

EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL
MEDIANTE LA EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS A PARTIR DEL LODO RESIDUAL DE LA
EMPRESA C.I. SIGRA S.A.

BRAYAN ESTEBAN RINCÓN CORREDOR
JESSICA NATALIA VARGAS GÓMEZ

Proyecto integral para optar el título de
INGENIERO QUIMICO

Director
Lina Maria Muñoz Montaña
Ingeniero Químico

Codirector
Duvian Alberto Vera Romero
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Presidente Jurado

Nombre
Jurado

Nombre
Jurado

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLES

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de la facultad

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de Programa de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos por su apoyo incondicional a: La Fundación Universidad de América y todos sus docentes por permitirnos formarnos como personas y sobre todo como profesionales íntegros a lo largo del desarrollo de nuestra carrera.

A C.I. SIGRA S.A por permitirnos desarrollar este proyecto en conjunto con el conocimiento de sus profesionales y por brindarnos su apoyo para realizar el proyecto en sus instalaciones.

A la ingeniera Lina María Muñoz por darnos la oportunidad de realizar este proyecto, por su tiempo, información y apoyo durante su ejecución.

Al ingeniero Duvian Alberto Vera por sus conocimientos prestados y por enseñarnos en su asignatura Oleo química todo lo necesario para tener las bases para la ejecución del proyecto.

Al ingeniero Edgar Fajardo Puerto por ser un apoyo incondicional en los laboratorios de la empresa y por estar pendiente de nuestro proyecto y nuestro desarrollo al ejecutarlo.

A Andrea Daza por ser un apoyo incondicional y ayudarnos a resolver inquietudes acerca de la temática del proyecto.

Y a todas aquellas personas que durante este camino estuvieron ahí para acompañarnos, sostenernos y darnos ánimo para culminar esta etapa de nuestro desarrollo profesional.

DEDICATORIA

Primero que todo, le doy gracias a Dios por permitirme culminar este proyecto y a su vez esta etapa de mi carrera. Le agradezco por darme la fuerza en los momentos difíciles y la sabiduría para terminar este proceso académico.

Este trabajo se lo dedico a mis padres Ricardo y María Antonia al igual que a mi hermano David, dándoles las gracias por su comprensión, su apoyo y su amor que me permito culminar este proyecto, por estar siempre que los necesite y por ser el soporte de mi vida. Por enseñarme que luchar vale la pena y que si se hacen las cosas con dedicación y empeño se pueden cumplir los sueños realidad.

A mi familia en general, a mis abuelitas por su amor, a mis tíos y tías por escucharme, a mis primos por sus consejos y por los momentos compartidos y a todos en general por enseñarme como ser una buena persona y excelente profesional.

A mi novia Carolina Andrade, que siempre estuvo para mí y quien me apoyo incondicionalmente con su amor, cariño y tiempo en todo momento de mi carrera. Por ser tan especial conmigo y por compartir mis triunfos y mis derrotas.

A mi gran amiga y compañera de tesis Natalia, quien siempre lucho conmigo durante las circunstancias de la pandemia y por su arduo trabajo, dedicación, empeño y amistad incondicional y valiosa desde que la conozco.

A mis amigos queridos Andrés Martínez, Jasay Calderón y Jessica Peña que a pesar de la distancia estuvieron para mí siempre que los necesite, por todo su cariño y su amistad. A mis nuevos amigos y colegas Diana Morena, Sandra Bustos, Nicol Rodríguez, Karent Urrego, Lorena Guerrero, Lizbeth Castro y Daniela Acosta por enseñarme que los verdaderos amigos si existen y por su tiempo y momentos compartidos durante nuestra carrera.

Brayan Esteban Rincón Corredor

DEDICATORIA

Le doy gracias a Dios por la culminación de esta etapa vivida y por todas las circunstancias aprendidas a lo largo de la carrera, permitiendo forjar a un ser humano con valores y ética para ser un buen profesional.

Este proyecto se lo dedico a mis padres Marizol Gómez y Carlos Julio Vargas que me apoyaron durante la carrera con sus sabios consejos para seguir adelante en el seguimiento de las metas y sueños, siendo un soporte incondicional. Así mismo, a mi abuela Clara Comba que siempre ha estado presente, a mis tías Cielo Gómez y Nubia Gómez, primos Raúl Hurtado y Marcela Hurtado porque siempre me están apoyando en cada decisión que tome.

A mi compañero Brayan por su dedicación y esmero que tuvo durante la tesis, por su paciencia frente a la situación de la pandemia, por sus consejos y sabias palabras en el momento correcto, más que un compañero es una gran amigo y colega.

Quiero agradecerle a mi novio Julián Eslava por su apoyo, sus consejos y por enseñarme que con paciencia y dedicación grandes cosas se consiguen. A mi mejor amigo Sergio Ramírez por su apoyo incondicional, por su amistad tan linda y por todos los momentos vividos durante esta etapa, con su tiempo y cariño tan peculiar.

A mis amigos y colegas Andrea Daza, Paola Gutiérrez, Santiago Giraldo que me apoyaron durante la carrera con su amistad, con sus consejos y sus alientos en la realización de este gran sueño. Al futuro colega Carlos Estrada, que me enseñó que, con perseverancia, siempre logras lo que te propones.

A todos muchas gracias por estar presentes y por siempre brindarme un apoyo incondicional.

Jessica Natalia Vargas Gómez

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	19
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES	23
1.1. Generalidades de la Empresa C.I SIGRA S.A.	23
1.2. Generalidades del Proceso Productivo	24
1.2.1. Recepción y almacenamiento de materia prima	25
1.2.2. Pretratamiento	26
1.2.3. Refinación	26
1.2.4. Hidrogenación	31
1.2.5. Fraccionamiento	32
1.2.6. Interesterificación	32
1.2.7. Preparación de mezclas grasas	33
1.2.8. Preparación de margarinas	33
1.2.9. Empaquetamiento de productos	34
1.2.10. Almacenamiento y distribución	34
2. DIAGNOSTICO DE LODOS RESIDUALES	35
2.1. Definición de lodos	35
2.2. Generación de los lodos residuales	35
2.3. Parámetros físico-químicos de los lodos residuales	35
2.3.1 Contenido de humedad	35
2.3.2 Contenido de cenizas	36
2.3.3 Índice de yodo	37
2.3.4 pH	37
2.4 Análisis de resultados de los parámetros físico químicos	37
2.4.1. Humedad	38
2.4.2. Contenido de cenizas	40
2.4.3. Índice de yodo	43
2.4.4. pH	46
3. ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES	50
3.1. Extracción de lípidos y ácidos grasos	50
3.1.1. Lípidos saponificables.	50
3.1.2. Lípidos insaponificables.	51
3.2. Selección del tipo de extracción	51

3.2.1. Tipos de extracción.	51
3.2.2. Matriz multicriterio	54
3.2.3. Método de extracción Soxhlet	64
3.3. Pruebas experimentales	67
3.3.1. Extracción de lípidos por el método Soxhlet a escala laboratorio	68
3.3.2. Caracterización de los lípidos recuperados	69
3.4. Análisis de resultados	69
3.4.1. Extracción de lípidos	69
3.4.2. Índice de acidez	72
4. BIOCOMBUSTIBLES	76
4.1. Biodiésel	76
4.1.1. Propiedades del Biodiésel	76
4.1.2. Obtención del biodiésel	78
4.1.3. Caracterización del biodiésel	82
4.1.4. Biodiésel en Colombia	86
4.1.5. Ventajas generales del biodiésel	88
4.1.6. Desventajas generales del biodiésel	89
4.1.7. Análisis de resultados	89
5. SIMULACIÓN DE LA PLANTA PILOTO	115
5.1. Modelamiento del proceso	115
5.1.1. Extracción de lípidos.	116
5.1.2. Esterificación.	116
5.1.3. Purificación de lípidos.	116
5.1.4. Transesterificación.	117
5.1.5. Purificación del biodiésel.	117
5.2. Desarrollo de la simulación	117
5.2.1. Recuperación de lípidos por extracción sólido-líquido	117
5.2.2. Simulación de la extracción sólido-líquido	123
5.2.3. Análisis de resultados de la simulación en Matlab	125
5.2.4. Producción del Biodiésel en Aspen Hysys	126
5.2.5. Simulación en Aspen Hysys	145
5.2.6. Resultados obtenidos en las simulaciones de Aspen Hysys	146
6. ANALISIS DE RENTABILIDAD	151
6.1. Inversiones	151
6.1.1. Inversiones fijas	151
6.1.2. Activos diferidos	152
6.2. Depreciaciones y amortizaciones	153
6.3. Costos de operación	153
6.3.1. Costos directos y gastos administrativos	153
6.4. Gastos varios	159
6.5. Capital de trabajo	159

6.6. Ingresos	160
6.7. Proyección de flujo de caja	160
6.8. Análisis de resultados	161
CONCLUSIONES	164
BIBLIOGRAFÍA	166

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Empresa C.I. SIGRA S.A	23
Figura 2. Diagrama de flujo de proceso de la empresa C.I SIGRA S.A.	24
Figura 3. Recepción de materia prima	25
Figura 4. Proporción de aceites empleados como materia prima	26
Figura 5. Reacción de la sal del fosfátido con el ácido(Ejemplo con el ácido fosfátido	27
Figura 6. Parámetros de confiabilidad del proceso de blanqueo	29
Figura 7. Reacción de saponificación en aceites vegetales	30
Figura 8. Reacción de hidrogenación en aceites vegetales	31
Figura 9. Reacción de interesterificación de triglicéridos	33
Figura 10. Determinación de humedad del lodo residual	38
Figura 11. Lodo residual peso húmedo	39
Figura 12. Determinación del contenido de cenizas	41
Figura 13. Cenizas del lodo residual	42
Figura 14. Determinación del índice de yodo	44
Figura 15. Procedimiento para la determinación del índice de yodo	45
Figura 16. Procedimiento para la medición del pH	47
Figura 17. Medición del pH para el lodo residual	48
Figura 18. Clasificación de los lípidos saponificables	50
Figura 19. Clasificación de los lípidos insaponificables	51
Figura 20. Procedimiento para la extracción de lípidos	70
Figura 21. Extracción de lípidos por el método de Soxhlet	71
Figura 22. Procedimiento para determinar el índice de acidez	73
Figura 23. Determinación del índice de acidez	74
Figura 24. Reacción de esterificación	78
Figura 25. Reacción de transesterificación	80
Figura 26. Proyección de la demanda de biodiésel en Colombia	86
Figura 27. Procedimiento para determinar la reacción de esterificación	90
Figura 28. Montaje de la reacción de esterificación	91

Figura 29. Resultados de la reacción de esterificación	92
Figura 30. Determinación del índice de acidez en la reacción de esterificación	93
Figura 31. Índice de acidez para la reacción de esterificación	94
Figura 32. Procedimiento para determinar la reacción de transesterificación	96
Figura 33. Montaje de la reacción de transesterificación	96
Figura 34. Resultados de la reacción de transesterificación	97
Figura 35. Resultados obtenidos de la operación de centrifugación	98
Figura 36. Determinación del índice de acidez en el biodiésel	99
Figura 37. Índice de acidez en el biodiésel	100
Figura 38. Procedimiento del contenido de cenizas en el biodiésel	102
Figura 39. Cenizas presentes en el biodiésel	103
Figura 40. Procedimiento para la densidad	105
Figura 41. Densidad en el biodiésel	106
Figura 42. Procedimiento para determinar el punto de inflamación	107
Figura 43. Punto de inflamación en el biodiésel	108
Figura 44. Procedimiento para determinar el índice de peróxidos	109
Figura 45. Índice de peróxidos en el biodiésel	110
Figura 46. Procedimiento del índice de yodo	112
Figura 47. Índice de yodo en el biodiésel	112
Figura 48. Esquema general del proceso para la producción de biodiésel	116
Figura 49. Balance de masa relacionado al tercer elemento	120
Figura 50. Balance de masa relacionado al cuarto elemento	121
Figura 51. Condiciones iniciales de frontera	122
Figura 52. Perfil de concentración de lípidos extraídos	125
Figura 53. Primer paso para la selección del método termodinámico	132
Figura 54. Continuación para compuestos polares no-electrolitos	133
Figura 55. Balance de masa de la extracción de lípidos con $P < 10$ bar	135
Figura 56. Balance de masa del mezclador 1 con $P < 10$ bar	135
Figura 57. Balance de masa del mezclador 2 con $P < 10$ bar	135
Figura 58. Balance de masa del reactor 1 reacción de esterificación con $P < 10$ bar	136
Figura 59. Balance de masa del destilador 1 con $P < 10$ bar	136

Figura 60. Balance de masa del mezclador 3 con $P < 10$ bar	136
Figura 61. Balance de masa del mezclador 4 con $P < 10$ bar	137
Figura 62. Balance de masa del reactor 2 reacción de transesterificación con $P < 10$ bar	137
Figura 63. Balance de masa del extractor con $P < 10$ bar	137
Figura 64. Balance de masa del destilador 2 con $P < 10$ bar	138
Figura 65. Balance de masa de la extracción de lípidos con $P > 10$ bar	140
Figura 66. Balance de masa del mezclador 1 con $P > 10$ bar	140
Figura 67. Balance de masa del mezclador 2 con $P > 10$ bar	141
Figura 68. Balance de masa del reactor1 reacción de esterificación a $P > 10$ bar	141
Figura 69. Balance de masa del extractor 1 con $P > 10$ bar	141
Figura 70. Balance de masa del destilador 1 con $P > 10$ bar	142
Figura 71. Balance de masa del mezclador 3 con $P > 10$ bar	142
Figura 72. Balance de masa del mezclador 4 con $P > 10$ bar	142
Figura 73. Balance de masa del reactor2 reacción de transesterificación con $P > 10$ bar	143
Figura 74. Balance de masa del extractor con $P > 10$ bar	143
Figura 75. Balance de masa del destilador 2 con $P > 10$ bar	143
Figura 76. Simulación en Aspen Hysys a condiciones $P < 10$ bar	145
Figura 77. Simulación en Aspen Hysys a condiciones < 10 bar	146
Figura 78. Producción de biodiésel vs la relación molar	148
Figura 79. Producción de biodiésel vs reflujo	149

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datos obtenidos para la determinación de la humedad	39
Tabla 2. Resultados porcentaje de humedad	40
Tabla 3. Datos obtenidos para la determinación de cenizas	42
Tabla 4. Resultados del contenido de cenizas	43
Tabla 5. Datos obtenidos para la determinación del índice de yodo	45
Tabla 6. Resultados del contenido de yodo	46
Tabla 7. Datos obtenidos para la medición del pH	48
Tabla 8. Métodos de extracción de lípidos	52
Tabla 9. Criterios evaluados de cada método de extracción	54
Tabla 10. Asignación numérica según relevancia para el análisis por criterio	55
Tabla 11. Asignación numérica por pares de criterios	55
Tabla 12. Evaluación del criterio de pretratamiento	56
Tabla 13. Matriz normalizada del criterio de pretratamiento	56
Tabla 14. Evaluación del criterio de tipo de solvente	56
Tabla 15. Matriz normalizada del criterio de tipo de solvente	57
Tabla 16. Evaluación del criterio de tipo de equilibrio de fases	57
Tabla 17. Matriz normalizada del criterio de equilibrio de fases	57
Tabla 18. Evaluación del criterio de relación lodo: solvente	58
Tabla 19. Matriz normalizada del criterio de relación lodo: solvente	58
Tabla 20. Evaluación del criterio de rendimiento	58
Tabla 21. Matriz normalizada del criterio de rendimiento	59
Tabla 22. Matriz de comparación por pares de criterios	59
Tabla 23. Matriz normalizada de la comparación por pares de criterios	60
Tabla 24. Matriz de ponderación final	60
Tabla 25. Fuentes documentales expresadas en la matriz multicriterio	61
Tabla 26. Parámetros analizados de los solventes en el método Soxhlet	65
Tabla 27. Tiempo de extracción según la relación solvente: lodo residual	67
Tabla 28. Datos obtenidos de la extracción de lípidos	71
Tabla 29. Resultados del contenido de lípidos	72

Tabla 30. Datos obtenidos para la medición del índice de acidez	74
Tabla 31. Resultados del índice de acidez de los lípidos	75
Tabla 32. Parámetros de biodiésel para uso en motores Diesel	77
Tabla 33. Parámetros de biodiésel para uso en motores Diesel	77
Tabla 34. Datos para la determinación de la reacción de esterificación	91
Tabla 35. Datos obtenidos del índice de acidez para la reacción de esterificación	94
Tabla 36. Resultados del índice de acidez de la reacción de esterificación	95
Tabla 37. Datos para determinar la reacción de transesterificación	97
Tabla 38. Datos obtenidos del índice de acidez del biodiésel	100
Tabla 39. Resultados del índice de acidez	101
Tabla 40. Datos para la determinación de cenizas en el biodiésel	103
Tabla 41. Resultados del contenido de cenizas en el biodiésel	104
Tabla 42. Datos para la determinación de la densidad en biodiésel	106
Tabla 43. Resultados de la densidad del biodiésel	107
Tabla 44. Datos obtenidos del punto de inflamación del biodiésel	108
Tabla 45. Datos para la determinación del índice de peróxidos en biodiésel	110
Tabla 46. Datos para la determinación del índice de peróxidos en biodiésel	111
Tabla 47. Datos para la determinación del índice de yodo en el biodiésel	113
Tabla 48. Resultados del índice de yodo en el biodiésel	113
Tabla 49. Parámetros de la ecuación diferencial	124
Tabla 50. Composición de triglicéridos utilizados en la simulación	127
Tabla 51. Componentes requeridos en la simulación	130
Tabla 52. Propiedades de los componentes que no se encuentran en Hysys	131
Tabla 53. Balance de energía de los intercambiadores de calor a $P < 10$ bar	138
Tabla 54. Balance de energía de las bombas a $P < 10$ bar	138
Tabla 55. Condiciones de operación de los equipos utilizados a $P < 10$ bar	139
Tabla 56. Balance de energía de los intercambiadores de calor a $P > 10$ bar	144
Tabla 57. Balance de energía de las bombas a $P > 10$ bar	144
Tabla 58. Descripción de los equipos utilizados a condiciones mayor a 10 bar	145
Tabla 59. Resultados de las simulaciones en Aspen Hysys	146
Tabla 60. Resultados de los componentes obtenidos en Aspen Hysys	147

Tabla 61. Costos de capital de los equipos utilizados	152
Tabla 62. Activos diferidos	152
Tabla 63. Depreciación y amortización	153
Tabla 64. Costos de materia prima	154
Tabla 65. Bibliografía de los costos de materia prima	154
Tabla 66. Costos de mano de obra directa y gastos administrativos mensual	156
Tabla 67. Costos de mano de obra directa y gastos administrativos anual	156
Tabla 68. Riesgo según el cargo	157
Tabla 69. Costos de seguridad social y parafiscales	157
Tabla 70. Prestaciones sociales	158
Tabla 71. Costos totales	158
Tabla 72. Costos de servicios del proceso	158
Tabla 73. Gastos varios	159
Tabla 74. Costos anuales de operación	159
Tabla 75. Proyección del flujo de caja para la producción de biodiésel	161
Tabla 76. Resultados del flujo de caja	161

LISTA DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
BAR	Bares
EQ	Equivalente gramo
GAL	Galones
G	Gramos
H	Horas
KG	Kilogramos
L	Litro
ML	Mililitros
MOL	Moles
TON	Toneladas

RESUMEN

Con el fin de estudiar la alternativa de utilidad de los residuos producidos en el proceso productivo de la elaboración de grasas y aceites vegetales de la empresa C.I. SIGRA S.A., el presente trabajo tiene como objetivo aprovechar los lípidos y ácidos grasos alojados en los lodos residuales de cada uno de los procesos de transformación de materia prima hacia el producto de interés, como fuente energética para la producción de biodiésel.

Por lo tanto, se realiza una caracterización fisicoquímica de los lodos, junto con la extracción de los compuestos energéticamente aprovechables empleándolos como insumo en la obtención de biodiésel a escala laboratorio.

De esta manera, la estimación de las condiciones de operación para producir biodiésel a nivel laboratorio y a partir de la recolección bibliográfica de modelos de simulación en el programa Aspen Hysys versión 9, licencia SLM_HYSYS_Process 2016 obtenida por medio del Departamento de Ingeniería Química de la Fundación Universidad América, se emplea dicha información para realizar el diseño de una planta piloto a partir de las condiciones de operación que se obtuvieron a nivel experimental, en la empresa C.I. SIGRA S.A.

Asimismo, se evalúan los costos asociados a la producción, estimando la factibilidad económica del proyecto, incluyendo parámetros que afecten el proceso, tales como equipos, instrumentación, métodos de extracción y valor comercial del biodiésel.

PALABRAS CLAVE: lodo residual, biodiésel, aceites vegetales, métodos de extracción, planta piloto.

GLOSARIO

Ácidos grasos: biomoléculas constituidas por lípidos que se forman a partir de una cadena de hidrógeno y carbono lineal.

Ácidos grasos libres: son aquellos ácidos grasos que no están unidos a una molécula de glicerol, por lo cual genera acidez en un aceite.

Biocombustible: son combustibles que se obtienen a partir de biomasa.

Biodiésel: es un biocombustible líquido generado a partir de aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol, la soja y la palma las materias primas más utilizadas.

Catalizador: sustancia que favorece o acelera una reacción química sin intervenir directamente en ella.

Estabilidad química: tendencia de un material para resistir el cambio o la composición debido a la reacción interna, o debido a la acción del aire, el calor, la luz, la presión, etc. Se refiere a la estabilidad termodinámica de un sistema químico.

Lípidos: los lípidos son un grupo heterogéneo de compuestos orgánicos definidos por su solubilidad en solventes no polares como éter y benceno, y por su poca solubilidad en agua.

Lodo: se definen como una mezcla que contiene una fase sólida suspendida en un medio líquido, dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento.

Residuos: son todos los desechos que se producen en la vida diaria.

Transesterificación: también denominado alcoholisis a partir de un aceite vegetal con un alcohol de cadena corta (metanol principalmente, aunque puede ser realizado también con etanol, propanol o butanol), mediante la presencia de un catalizador, sirve para la obtención de biodiésel y de glicerina, como producto secundario.

TRIGLICÉRIDOS: es la unión de tres ácidos grasos a una molécula de glicerol.

INTRODUCCIÓN

C.I. SIGRA S. A. es una empresa dedicada a la producción y comercialización de grasas y aceites vegetales libres de grasas trans para el sector y la industria de alimentos, a partir de aceite crudo de palma, palmiste, soya, canola y girasol.

Durante su proceso productivo, los aceites crudos son sometidos a tratamientos físicos y químicos con el fin de obtener diversos productos terminados destinados al consumo humano. Entre los residuos obtenidos de la remoción de impurezas durante este proceso, se albergan materias primas no aprovechadas correspondientes entre el 10 y 30% de los residuos del proceso, correspondientes a ácidos grasos y fosfolípidos de alto potencial energético.

Por lo tanto, en pro de la sostenibilidad ambiental C.I. SIGRA S.A. reconoce la necesidad de evaluar la posibilidad del aprovechamiento de los residuos como fuente principal para la producción de biodiésel, debido a las propiedades intrínsecas de los lípidos que favorecen su transformación a esteres metílicos de ácidos grasos, contribuyendo a la reducción de residuos por el uso de una energía renovable y por la incursión de un nuevo producto que genere mayores ganancias para la empresa.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar técnico financieramente la producción de biodiésel mediante la extracción de lípidos a partir del lodo residual de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Objetivos específicos

1. Determinar las propiedades físicas y químicas de los lodos residuales.
2. Extraer lípidos y ácidos grasos libres del lodo a través del desarrollo experimental.
3. Determinar las condiciones de operación para la producción de biodiésel a nivel laboratorio.
4. Desarrollar la simulación de una planta piloto para la obtención de biodiésel.
5. Establecer los costos para la producción de biodiésel a partir de lodos residuales de la empresa C.I. SIGRA S.A.

1. GENERALIDADES

1.1. Generalidades de la Empresa C.I SIGRA S.A.

C.I SIGRA S.A es una empresa colombiana con amplia cobertura nacional e internacional dedicada al desarrollo, producción y comercialización de aceites y grasas de origen vegetal para la industria panificadora y de alimentos [1] ubicada en la Cra 46 #13 – 95, Bogotá D.C en la zona industrial de la localidad de Puente Aranda [2] como se observa en la **figura 1** presentada a continuación.

Figura 1.

Empresa C.I. SIGRA S.A.



Nota. La figura representa la locación geográfica de la empresa C.I SIGRA S.A. Tomado de: Google. (s.f.). [Mapa de C.I SIGRA S.A, Colombia en Google maps]. Recuperado el 24 de agosto, 2020, de: <https://www.google.com.co/maps/place/Sigra/@4.6264584,-74.1053092,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3f995f9eb a8253:0x58d1adb251fbc527!8m2!3d4.6264531!4d-74.1031205?hl=en>

La empresa cuenta con una única planta de producción con procesos totalmente automatizados y altamente tecnificados y estandarizados para la elaboración de sus múltiples productos para el sector y la industria de alimentos [2].

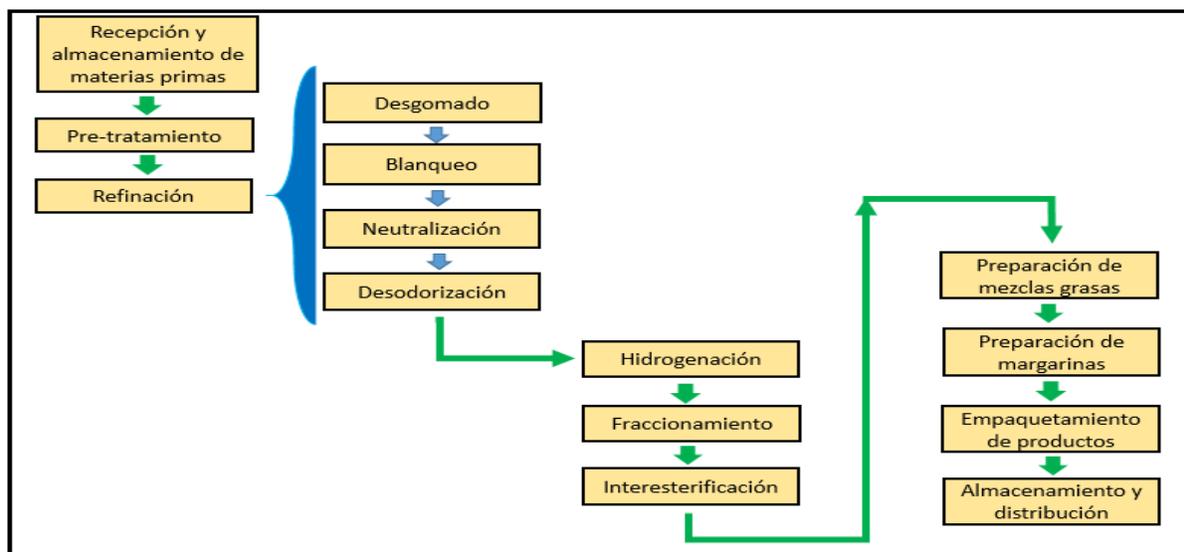
1.2. Generalidades del Proceso Productivo

El proceso de producción llevado a cabo en la empresa C.I. SIGRA S.A. cuenta con un conjunto de actividades orientadas a la transformación de aceites crudos para la elaboración de productos alimenticios de alta calidad [3], involucrando procesos tales como: Recepción y almacenamiento de materias primas, pretratamiento, desgomado, blanqueo, neutralización, desodorización, hidrogenación, fraccionamiento e interesterificación [1].

A continuación, la **figura 2**, ilustra el diagrama de flujo proceso de refinación del aceite crudo.

Figura 2.

Diagrama de flujo de proceso de la empresa C.I SIGRA S.A.



Nota. La figura representa el diagrama del proceso productivo de la empresa C.I. SIGRA S.A. Tomado de: L. C. Cortés G., S. L. Torres C., *Evaluación de alternativas para el aprovechamiento del residuo de la filtración de un aceite comestible.*, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2016. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1057&context=ing_ambient_al_sanitaria

1.2.1. *Recepción y almacenamiento de materia prima*

Las materias primas empleadas en la empresa C.I SIGRA S.A para la fabricación de productos alimenticios, contempla el uso de aceites crudos de palma, palmiste y soya, que ingresan a la planta a través del descargue de carrotanques, con disposición hacia los tanques de almacenamiento de color amarillo manteniendo los aceites crudos a una temperatura de 40°C, como se observa en la **figura 3**, con una proporción de aceite del 70% para la palma y 30% de los demás aceites mencionados [4], como se observa en la **figura 4**.

Figura 3.

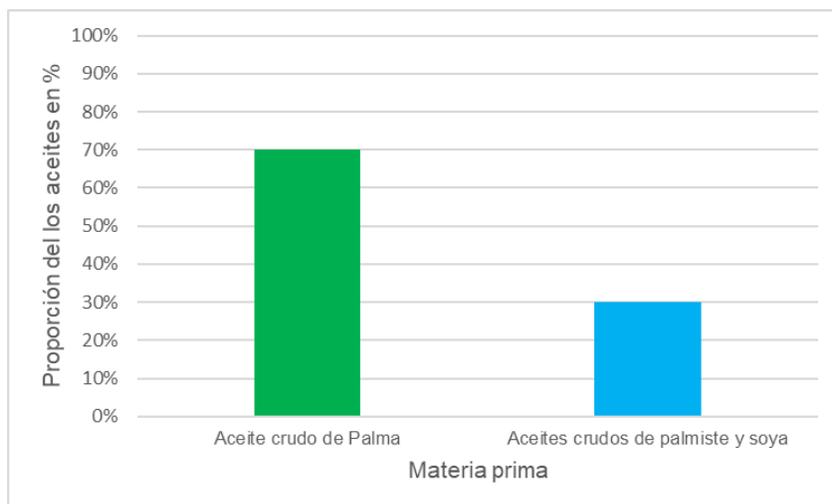
Recepción de materia prima



Nota. La figura representa la entrada y salida de carrotanques para la recepción de los aceites crudos. Tomado de: Google. (s.f.). [Entrada de materia prima C.I SIGRA S.A, Colombia en Google maps]. Recuperado el 24 de agosto, 2020, de: <https://www.google.com.co/maps/@4.6265533,74.1030731,3a,75y,113.86h,94.08t/data=!3m6!1e1!3m4!1sLSEtb5ofbdP5fx - p5TKbA!2e0!7i13312!8i6656?hl=en>

Figura 4.

Proporción de aceites empleados como materia prima



Nota. La figura representa la proporción de los aceites empleados como materia prima en la empresa C.I SIGRA S.A. Tomado de: L. C. Cortés G., S. L. Torres C., *Evaluación de alternativas para el aprovechamiento del residuo de la filtración de un aceite comestible.*, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2016. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1057&context=ing_ambiental_sanitaria

1.2.2. Pretratamiento

Etapa de acondicionamiento de los aceites crudos previa al proceso de refinación, empleando ácido cítrico al 20% para retirar los fosfátidos presentes y facilitar su eliminación en etapas subsiguientes [1].

1.2.3. Refinación

1.2.3.a. Desgomado. Es la etapa inicial de refinación física de los aceites crudos, que consiste en la eliminación de los fosfátidos hidratables y no hidratables junto con los mucilagos presentes en el aceite crudo [5].

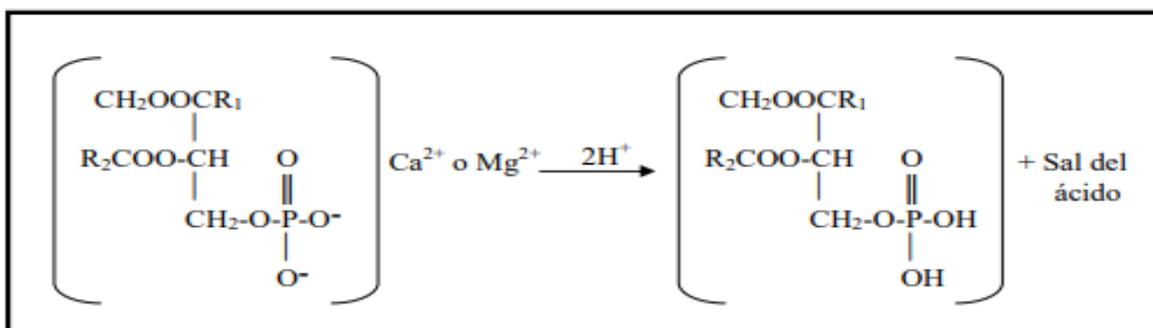
La eliminación de los fosfátidos resulta esencial en el proceso, dado que son compuestos altamente emulsionantes [6], así como su asociación a metales prooxidantes como el hierro (Fe) y el Cobre (Cu) que disminuyen la estabilidad y la calidad del producto, agregando turbidez al aceite por la aparición de precipitados [7].

En cuanto a los fosfátidos hidratables se hacen insolubles en el aceite, mediante el proceso de hidratación, en el cual dichos compuestos se hinchan formando geles, aglomerándose en forma de partículas floculadas logrando su eliminación por separación física [6].

Por otra parte, los fosfátidos no hidratables se encuentran presentes en forma de sales de calcio (Ca) y magnesio (Mg) y al no ser retirados por la acción del agua [6], se aplica el uso de ácido fosfórico y/o cítrico que convierten dichos compuestos en moléculas hidratables, facilitando su precipitación y separación en agua mediante la acción de centrifugado [8]. La reacción correspondiente a este proceso se visualiza en la **figura 5** presentada a continuación.

Figura 5.

Reacción de la sal del fosfátidos con el ácido (Ejemplo con el ácido fosfátidos)



Nota. La figura representa la reacción entre un ácido y fosfátido ocurrida en la etapa de desgomada. Tomado de: P. Blanco R., *DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE REFINACIÓN DE ACEITES VEGETALES.*, tesis pre. Ciencias, Universidad de Cádiz, Cádiz, España, 2007. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/disenio-de-una-planta-piloto-de-refinacion-de-aceites-vegetales>

1.2.3.b. Blanqueo. El objetivo de esta etapa consiste en la purificación del aceite crudo mediante la eliminación o reducción de los compuestos prooxidantes y compuestos de oxidación causantes de la rancidez, la pérdida del valor energético y la modificación de las características organolépticas de los productos terminados [9]. Este proceso consiste en el uso de tierras de blanqueo, cuya función es adsorber las partículas oxidativas dispersas en el aceite crudo [8] y lograr una alta calidad de los productos terminados maximizando su estabilidad oxidativa.

1.2.3.b.i. Compuestos oxidantes. En cuanto a los prooxidantes, se encuentran las clorofilas, las cuales actúan como agentes oxidativos en presencia de luz, los carotenos y xantofilas, encargados de la coloración rojiza y amarillenta de los aceites y trazas de partículas metálicas de cobre y hierro, que actúan como catalizadores para la formación y descomposición de hidroperóxidos en el aceite [9].

Por otra parte, los hidroperóxidos son compuestos obtenidos a partir de la presencia de catalizadores oxidativos tales como la luz, oxígeno, calor, metales y clorofila, los cuales desencadenan la formación de productos secundarios de oxidación como las cetonas, aldehídos y ácidos orgánicos que provocan la reducción de la vida útil de los productos terminados.

1.2.3.b.ii. Tierras de blanqueo. Tierras minerales naturales o activas que interaccionan física y químicamente como adsorbente para mejorar la calidad del aceite, son empleadas a condiciones de vacío evitando la degradación del aceite por el incremento de temperatura durante este proceso [7].

En cuanto a la adsorción física de la tierra de blanqueo, contempla la atracción superficial que involucra las fuerzas intermoleculares y la adsorción química, relacionada a la interacción entre los enlaces iónicos de la tierra y los enlaces moleculares de las partículas promotoras de oxígeno.

1.2.3.b.iii. Mecanismos de blanqueo de las tierras. Los mecanismos involucrados en el blanqueo del aceite contemplan tres procesos que garantizan la obtención de un aceite blanqueado, los cuales involucran la absorción por el llenado de poros, la filtración por la remoción física de sólidos suspendidos y catálisis por la promoción de la destrucción de los peróxidos por la superficie ácida de la tierra [7].

A partir de estos mecanismos, se estiman parámetros que garanticen la confiabilidad del proceso, como se observa en la **figura 6** denotada a continuación:

Figura 6.

Parámetros de confiabilidad del proceso de blanqueo

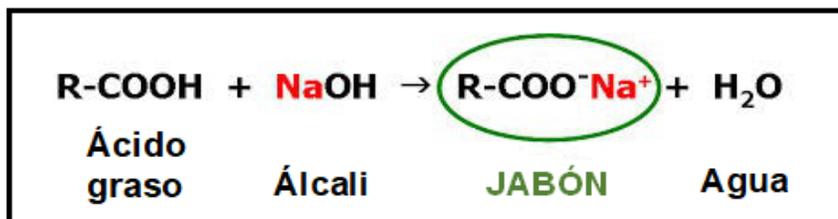
Fósforo (final) < 2 ppm
Valor de peróxidos = 0 meq / kg
Fe < 0,20 ppm
Cu < 0,05 ppm
Productos de oxidación = 0

Nota. La figura representa los parámetros de confiabilidad una vez realizada la etapa de blanqueo. Tomado de: E. R. Rodríguez Guoz., *ANÁLISIS Y REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE PRODUCCIÓN EN UNA INDUSTRIA DE ACEITE DE SOYA.*, tesis pre. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2007. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1811_IN.pdf

1.2.3.c. Neutralización. La neutralización del aceite es otra fase del proceso de refinación también conocido como desacidificación, que tiene como objetivo eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite crudo, mediante la reacción de saponificación [10], como se observa en la **figura 7**.

Figura 7.

Reacción de saponificación en aceites vegetales



Nota. La figura representa la reacción de saponificación en la etapa de neutralización. Tomado de: Jabones y detergentes. “Saponificación”. [En línea]. <http://biomodel.uah.es/model2/lip/jabondet.htm> [Acceso: agosto 5, 2020]

Esta reacción consiste en la interacción química entre los ácidos naturales presentes en el aceite, los ácidos adicionados durante la etapa de desgomado y el hidróxido de sodio (soda cáustica) empleado como agente alcalino a una concentración determinada según el grado de acidez del aceite [7].

Asimismo, el jabón producido durante esta etapa arrastra impurezas como proteínas, mucilagos, trazas de fosfátidos y partículas oxidativas que no fueron eliminados en etapas anteriores [6], para lo cual, se realiza un proceso por etapas de centrifugación, lavado y secado del aceite.

Por último, como resultando de la reacción química de este proceso se da la formación de un subproducto denominado soapstock, el cual es vendido como insumo para la industria de surfactantes [1].

1.2.3.d. Desodorización. Es la última etapa del proceso de refinación que consiste en la remoción de sustancias indeseadas que otorgan malos olores y sabores a los aceites, alterando la su calidad y estabilidad oxidativa. Entre ellas se encuentran los ácidos grasos libres, cetonas y aldehídos que no fueron eliminados en su totalidad en las etapas de blanqueo y neutralización, por lo cual, son retirados a través del proceso de destilación

por arrastre con vapor [9], a una temperatura de operación de 260 a 270°C.

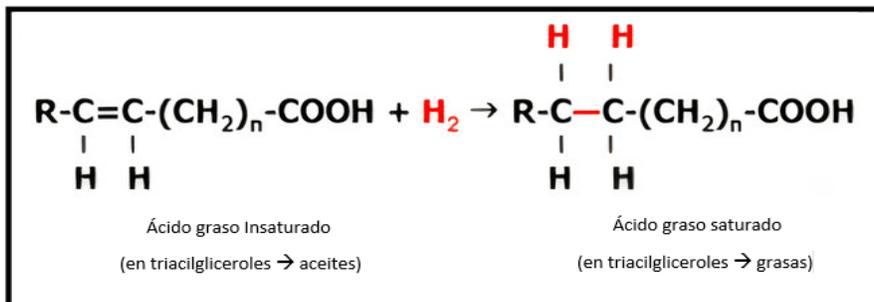
Este proceso lleva consigo el uso de vapor directo (Stripping) en contracorriente empleado como vehículo de arrastre de los diferentes compuestos volátiles indeseados, llevado a cabo una presión de vacío de 3 milibares y una temperatura de operación aproximada de 260°C [1].

1.2.4. Hidrogenación

Es el proceso químico que consiste en la reacción entre el hidrogeno y los ácidos grasos insaturados en presencia de un catalizador, con el fin de reducir las grasas trans presentes en el aceite, perjudiciales para la salud del ser humano, convirtiendo los ácidos grasos líquidos en grasas sólidas para la producción de margarinas, como se observa en la **figura 8** presentada a continuación.

Figura 8.

Reacción de hidrogenación en aceites vegetales



Nota. La figura representa la reacción de hidrogenación para la saturación de ácidos grasos. Tomado de: D. A. Pérez., *ESTUDIO DEL PROCESO DE HIDROGENACIÓN DE GRASAS.*, tesis pre. Facultad de Ingeniería. Universidad de Zaragoza, España, 2015. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/37127/files/TAZ-PFC-2015-402.pdf>

En cuanto a los parámetros requeridos para que el hidrogeno rompa el doble enlace de las cadenas de ácidos grasos, es necesario tener en cuenta dos criterios que garanticen el éxito de la reacción, los cuales son:

- Adición de un catalizador a base de níquel que favorezca la reducción de las barreras energéticas de la reacción para que ésta ocurra mucho más rápido.
- Garantizar el grado de transferencia de masa entre las fases involucradas en la reacción (la fase solida: el catalizador, la fase liquida: los ácidos grasos y la fase gaseosa: el hidrogeno) [12].

Por otra parte, algunos objetivos adicionales de este proceso incluyen [7]:

- Modificación de las propiedades físicas y químicas de las grasas y aceites.
- Producir grasas con propiedades determinadas que cumplan necesidades específicas.
- Mejoramiento en la resistencia oxidativa de los productos terminados.

1.2.5. Fraccionamiento

Consiste en el proceso de modificación termo mecánico de separación de triglicéridos en dos fases según sus especies moleculares [13], una fase solida (estearina) y una fase liquida (oleína) ocasionando cambios en la naturaleza química de los ácidos grasos aprovechando sus propiedades para la elaboración de diferentes productos alimenticios [14].

Por otra parte, el fraccionamiento se realiza en cristalizadores bajo enfriamiento térmico por la acción del amoniaco como fluido refrigerante [10], en los cuales, los ácidos grasos entrar en sobresaturación y empiezan a cristalizarse para luego ser separados a través del proceso de filtración, dejando pasar la fase liquida y reteniendo la fase sólida [15].

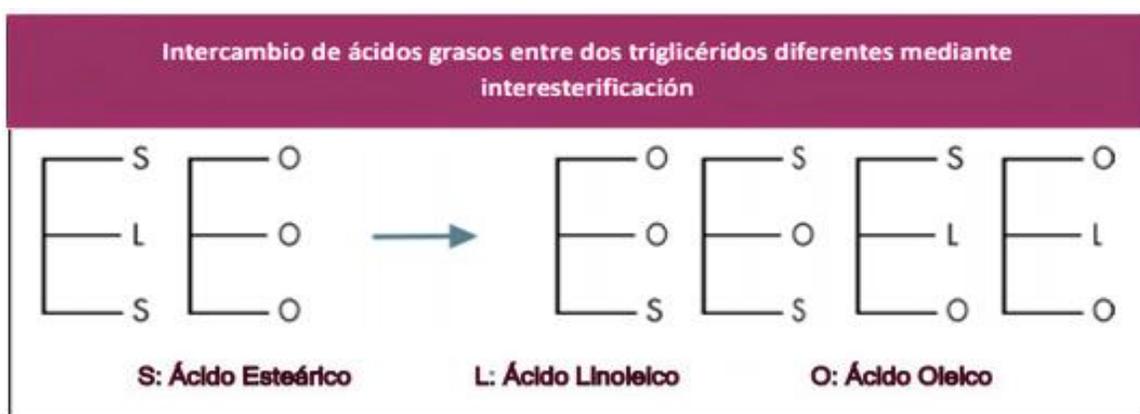
1.2.6. Interesterificación

Etapas que consisten en el reordenamiento de los grupos acilo entre un mismo o más triglicéridos a partir de reacciones catalíticas o enzimáticas con el fin de alterar químicamente su estructura y modificar funcionalmente sus propiedades en los aceites y grasas [14].

En cuanto a la interesterificación química, los catalizadores alcalinos ocasionan la redistribución de los ácidos grasos en forma aleatoria [16], mientras que la interesterificación enzimática emplea lipasas purificadas causando una distribución más definida, teniendo en cuenta que la acción química es de mayor aplicabilidad a nivel industrial como estrategia de transformación de aceites y grasas dirigidas a consumo masivo [17], como se observa en la **figura 9**.

Figura 9.

Reacción de interesterificación de triglicéridos



Nota. La figura representa la reacción de interesterificación de grasas y aceites. Tomado de: Tecnologías para la Industria Alimentaria. “Procesos alternativos para la reducción de Grasas Trans”. [En línea]. Disponible en: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_05_GTrans.pdf [Acceso: agosto 20, 2020]

1.2.7. Preparación de mezclas grasas

Es la primera etapa postratamiento cuya función es realizar la distribución de las mezclas a partir del producto que se desea elaborar.

1.2.8. Preparación de margarinas

Esta etapa consiste en la preparación de margarinas mediante los siguientes procesos: preparación de las fases acuosa y grasa, etapa de emulsionado, enfriamiento, cristalización y amasado, las cuales son elaboradas según las especificaciones técnicas

de cada producto que se desea obtener mediante las diferentes líneas de producción de la planta [19].

1.2.9. *Empaquetamiento de productos*

Acondicionamiento de los productos terminados con el fin de proteger sus características y la calidad de los mismos durante su almacenamiento, transporte y manipulación [4].

1.2.10. *Almacenamiento y distribución*

Es la última etapa del proceso productivo, en la cual se disponen los productos almacenados según la línea de producción, para luego ser transportados y distribuidos a nivel nacional e internacional.

2. DIAGNOSTICO DE LODOS RESIDUALES

2.1. Definición de lodos

Se define como el residuo sólido, semisólido o líquido, procedente del proceso productivo de grasas y aceites vegetales, cuyas características y composición dependen del tipo de operación y proceso que se realice.

2.2. Generación de los lodos residuales

Los aceites son sometidos a tratamientos físicos y químicos con el objetivo de remover impurezas y mejorar la calidad de los productos terminados. Por esta razón, durante el proceso de refinación de aceites y grasas se generan lodos residuales resultantes de cada uno de los procesos de transformación de la materia prima hacia el producto de interés.

En el proceso productivo de grasas y aceites vegetales de la empresa C.I. SIGRA S.A., la planta cuenta con una capacidad de 2000 Ton de aceite de palma, 600 Ton de palmiste y 600 Ton de soya [4], en la cual se producen 65 toneladas de lodo residual al mes proveniente de las diferentes etapas del proceso [4], con una contribución de más del 50% de la etapa de blanqueo, la cual, emplea tierras minerales naturales y/o activas que interaccionan física y químicamente como adsorbente para mejorar la calidad del aceite, provocando una alta generación de lodos durante esta etapa de refinación [4].

Estos lodos pasan por una planta de tratamiento, con el objetivo de ser acondicionados para ser empleados con fines agrícolas como compostaje, desaprovechando su potencial energético debido a que contienen entre el 10 y 30% de ácidos grasos y fosfolípidos [4].

2.3. Parámetros físico-químicos de los lodos residuales

Para determinar las características del lodo residual se realiza un análisis fisicoquímico a través del manejo de técnicas analíticas como contenido de humedad, índice de cenizas, índice de yodo y pH, con el fin de conocer las características intrínsecas de las muestras analizadas [20] y la presencia de lípidos y ácidos grasos no aprovechados.

2.3.1 *Contenido de humedad*

Determina el contenido de agua, a partir de la diferencia de pesos antes y después del secado de la muestra, durante un periodo de tiempo a una temperatura constante [21].

El contenido de humedad se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 1.

Ecuación para el porcentaje de humedad

$$\%H = \frac{W1 - W2}{W} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar humedad de la muestra de interés. Tomado de: Universidad tecnológica de Chile. “Química de alimentos - 510144”. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/24997715/Gu%C3%ADa_de_Humedad_y_Cenizas_1

Acceso: septiembre 15,2020]

Donde:

$\%H$ = Porcentaje de humedad

$W1$ = Peso del crisol más muestra húmeda (g)

$W2$ = Peso del crisol más muestra seca (g)

W = Peso de la muestra (g)

2.3.2 Contenido de cenizas

Método analítico que consiste en la determinación del equivalente al residuo sólido inorgánico resultado de la calcinación de la materia orgánica presente en la muestra [23].

El contenido de cenizas se puede determinar a partir de la siguiente ecuación

Ecuación 2.

Ecuación para el contenido de cenizas

$$\%C = \frac{P - p}{M} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar el porcentaje de cenizas de la muestra de interés. Tomado de: Universidad tecnológica de Chile. “Química de alimentos -510144”. [En línea]. Disponible en:

https://www.academia.edu/24997715/Gu%C3%ADa_de_Humedad_y_Cenizas_1

[Acceso: septiembre 15,2020]

Donde:

$\%C$ = Porcentaje de cenizas

P = Peso del crisol más cenizas (g)

p = Peso del crisol (g)

M = Peso de la muestra (g)

2.3.3 Índice de yodo

Método analítico que consiste en la determinación del grado de instauración de un compuesto orgánico, empleado como parámetro de calidad e identificación del tipo de muestra evaluada [24].

El índice de yodo se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 3.

Ecuación de índice de yodo

$$\text{Índice de Yodo} = \frac{((Y - X) * N * 0,127)}{m} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar el índice de yodo de la muestra de interés. Tomado de: Pruebas generales para lípidos. “Laboratorio de química experimental”. [En línea]. <http://quimicaexperimental9.blogspot.com/2013/04/instituto-tecnologico-de.html>

Donde:

X = Mililitros de tiosulfato gastados en la titulación de la muestra (mL)

Y = Mililitros de tiosulfato gastados en la titulación del blanco (mL)

N = Normalidad de la solución del tiosulfato de sodio (eq/L)

m = Peso de la muestra (g)

2.3.4 pH

Método potenciómetro que consiste en determinar la acidez relativa o basicidad de una solución acuosa a partir de la concentración de iones H^+ presentes en la muestra de interés [26].

2.4 Análisis de resultados de los parámetros físico químicos

El desarrollo de estas técnicas experimentales, se realizó a partir del muestreo de los lodos residuales tomados del tanque de flotación o lodos pre prensa de la planta de tratamiento. Adicionalmente, el muestreo para la caracterización fisicoquímica se efectuó

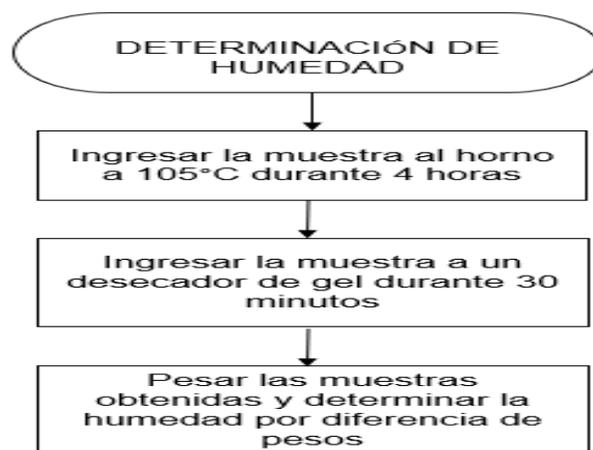
durante diferentes días de producción con el objetivo de estimar la presencia de ácidos grasos libres y lípidos presentes en el lodo residual, bajo los siguientes parámetros:

2.4.1. *Humedad*

Técnica experimental de caracterización fisicoquímica fundamentada en la norma ASTM E871 como se observa en la **figura 10**.

Figura 10.

Determinación de humedad del lodo



Nota. La figura representa la determinación de humedad del lodo. Tomado de: L. Daza. *Evaluación de síntesis de biodiésel mediante los residuos de Aguacate Hass empleando el método de transesterificación*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, 2020. Disponible

en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7772/1/6132149-2020-1-IQ.pdf>

Figura 11.

Lodo residual peso húmedo.



Nota. La figura representa el lodo residual en peso húmedo realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 1.

Datos obtenidos para la determinación de la humedad.

MEDICIÓN DE HUMEDAD	PESO DEL CRISOL SIN MUESTRA (g)	PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA (g)	PESO DEL CRISOL Y MUESTRA SECA (g)
MUESTRA 1	42,1243	5,2226	43,8344
MUESTRA 2	42,2690	5,0050	44,2764
MUESTRA 3	42,0172	5,2266	43,5588
MUESTRA 4	43,8720	5,1338	45,4130

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos mediante el uso de una balanza analítica en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación de humedad.

Calculo muestra 1:

$$\%H_1 = \frac{(42,1243g + 5,2226g) - (43,8344g)}{5,2226g} * 100 = 67,25\%$$

Tabla 2.

Resultados porcentaje de humedad.

MEDICIÓN DE HUMEDAD	% DE HUMEDAD
Muestra 1	67,26
Muestra 2	59,89
Muestra 3	70,50
Muestra 4	69,98

Nota. Esta tabla muestra los resultados de humedad de las muestras de lodo residual realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según los datos obtenidos, el contenido de agua en el lodo residual corresponde en promedio al 67% valor cercano a los parámetros estipulados en la literatura con un rango de humedad entre el 60% y el 70% [27], lo cual representa un parámetro significativo al momento de realizar la extracción de los lípidos, dado que para la obtención del biodiésel aumenta la viscosidad de este y dificulta el grado de separación de la glicerina durante la reacción de transesterificación [28].

2.4.2. Contenido de cenizas

Técnica experimental de caracterización fisicoquímica fundamentada en la norma NTC 4431 como se observa en la **figura 12**.

Figura 12.

Determinación del contenido de cenizas



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del contenido de cenizas para el lodo residual. Tomado de: Universidad tecnológica de Chile. “Química de alimentos -510144”. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/24997715/Gu%C3%ADa_de_Humedad_y_Cenizas_1 [Acceso: septiembre 15,2020]

Figura 13.

Cenizas del lodo residual



Nota. La figura representa las cenizas del lodo residual realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 3.

Datos obtenidos para la determinación de cenizas

MEDICIÓN DE CENIZAS	PESO DEL CRISOL SIN MUESTRA (g)	PESO DE LA MUESTRA (g)	PESO DEL CRISOL MÁS CENIZAS (g)
MUESTRA 1	49,8360	5,0490	52,9434
MUESTRA 2	49,3307	5,2956	52,8192

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos mediante el uso de una balanza analítica en el laboratorio de la empresa en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del contenido de cenizas.

Calculo muestra 1:

$$\%C_1 = \frac{52,9434g - 49,8360g}{5,0490g} * 100 = 61,54\%$$

Tabla 4.

Resultados del contenido de cenizas.

CONTENIDO DE CENIZAS	% DE CENIZAS
Muestra 1	61,54
Muestra 2	65,88

Nota. Esta tabla muestra los resultados del contenido de cenizas de las muestras de lodo residual realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según la literatura el porcentaje de cenizas determina la cantidad de materia orgánica calcinada mediante un tratamiento térmico a 501°C [29]; El cual, depende de todos aquellos compuestos que son empleados durante las diferentes etapas del proceso de refinación en la empresa C.I. SIGRA S.A como ácido cítrico, ácido fosfórico y soda caustica, así como sales minerales de magnesio y calcio intrínsecos en los aceites crudos [4].

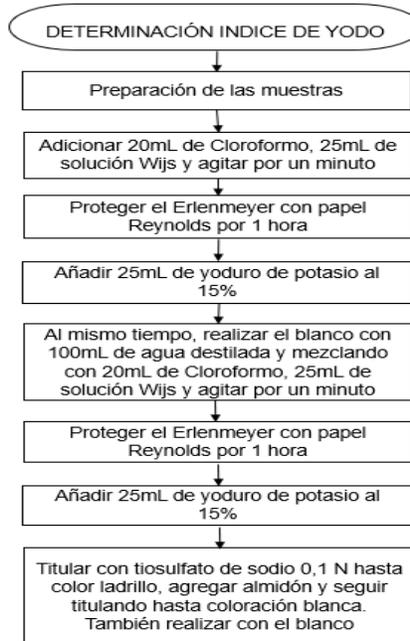
Según los datos obtenidos, el contenido de cenizas del lodo residual representa una proporción del 61,54 al 65,68% de los componentes inorgánicos presentes en la muestra, determinado con la finalidad de realizar una estimación del material orgánico extraíble (lípidos y ácidos grasos), es decir que, a mayor cantidad de cenizas, menor será el contenido de compuestos orgánicos extraíbles [30].

2.4.3. Índice de yodo

Técnica experimental de caracterización fisicoquímica fundamentada en la norma NTC 283 como se observa en la **figura 14**.

Figura 14.

Determinación del índice de yodo



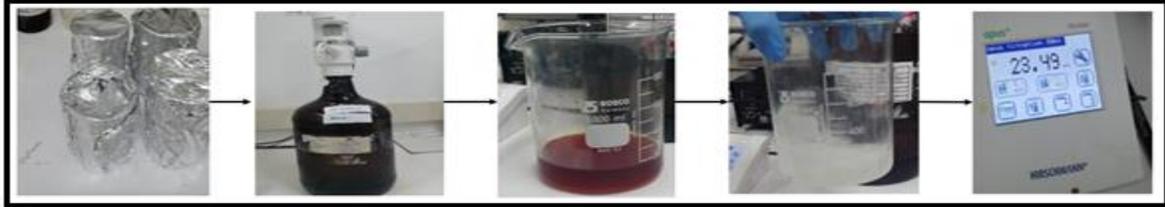
Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del índice de yodo para el lodo residual. Tomado de: Grasas y aceites “Índice de yodo”. [En línea].

Disponible en: <http://docencia.udea.edu.co/qf/grasas/yodo.html>

[Acceso: septiembre 15,2020]

Figura 15.

Procedimiento para la determinación del índice de yodo



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del índice de yodo, realizada en la empresa C.I. SIGRA S.A. para el análisis del lodo residual.

Tabla 5.

Datos obtenidos para la determinación del índice de yodo.

MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE YODO	PESO DE LA MUESTRA (g)	SOLUCIÓN DE YODURO DE POTASIO		TITULACIÓN	
		H ₂ O DESTILADA (mL)	KI (g)	TIOSULFATO DE SODIO Na ₂ S ₂ O ₃ (0,1131N) (mL)	ALMIDÓN (mL)
MUESTRA 1	0,5737	100	10,0416	26,20	2,5
MUESTRA 2	0,5766	100	10,1242	23,49	2,5
BLANCO	-	100	10,0281	31,06	2,5
MUESTRA 3	0,5915	100	10,0375	28,37	2
MUESTRA 4	0,4994	100	10,0243	29,88	2
BLANCO	-	100	10,0593	34,06	2

Nota. Esta tabla recopila los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del índice de yodo.

Calculo muestra 1:

$$\text{Índice de Yodo} = \frac{((31,06\text{mL} - 26,20\text{mL}) * 0,1131 \frac{eq}{l} * 0,127}{0,5737g} * 100 = 12,17$$

Tabla 6.

Resultados del contenido de yodo

MEDICIÓN DE ÍNDICE DE YODO	% DE YODO
MUESTRA 1	12,17
MUESTRA 2	18,86
MUESTRA 3	13,82
MUESTRA 4	12,02

Nota. Esta tabla muestra los resultados del contenido de cenizas de las muestras de lodo residual realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Por medio de estos resultados se puede determinar el grado de absorción de yodo por gramo de muestra, que incrementara por la cantidad de dobles enlaces. Cuando se encuentra saturado, se obtiene un índice de yodo igual a 0, quiere decir que a mayor insaturación menor es el punto de fusión en la muestra [32]

Según los datos obtenidos, el grado de insaturación tiene un valor promedio de 14,2175%, el cual es dependiente de la cantidad en peso de muestra utilizada. Este valor, es correspondiente al número de dobles enlaces presentes en las cadenas de ácidos grasos contenidos en la fase oleosa

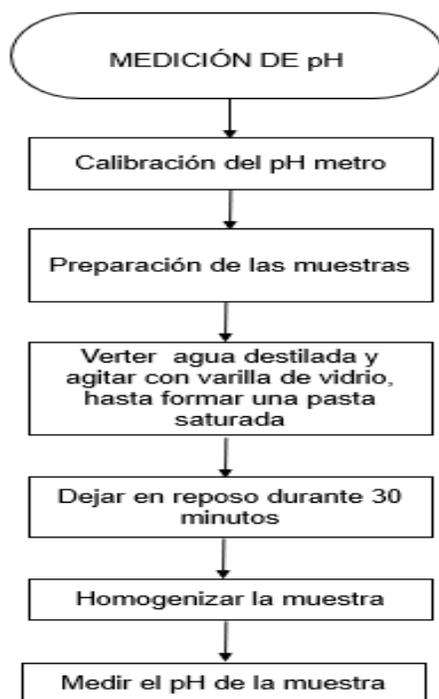
Por otra parte, este parámetro fisicoquímico permite evaluar el comportamiento del biodiésel durante la reacción de transesterificación, dado que a menor insaturación de los ácidos grasos el biodiésel adquirirá mayores niveles de estabilidad y número de cetanos [33].

2.4.4. pH

Técnica experimental de caracterización fisicoquímica fundamentada en la norma NTC 4592 como se observa en la figura 13.

Figura 16.

Procedimiento para la medición del pH



Nota. La figura representa el procedimiento para la medición del pH del lodo residual. [En línea]. Disponible en: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/medida.htm> [Acceso: septiembre 29,2020]

Figura 17.

Medición del pH para el lodo residual



Nota. La figura representa la determinación del pH para el lodo residual.

Tabla 7.

Datos obtenidos para la medición del pH

MEDICIÓN DE pH	PESO DE LA MUESTRA (g)	VOLUMEN DE H ₂ O DESTILADA (mL)	pH
MUESTRA 1	10,0900	25	5,37 a 23,30°C
MUESTRA 2	9,9960	20	5,52 a 23,30°C
MUESTRA 3	10,2089	20	5,43 a 23,30°C
MUESTRA 4	10,1384	20	5,48 a 23,30°C

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación de pH

Mediante la información obtenida en la literatura, el pH determina la alcalinidad o acidez de una sustancia a través del número de protones libres en la muestra [35]. Según los datos de pH, los valores oscilan entre 5,37 y 5,52, lo que representa la presencia de lípidos y ácidos grasos contenidos en la fase oleosa de las muestras, producto de los residuos grasos durante el proceso de refinación.

Asimismo, el valor de pH es ácido debido a la etapa de hidrogenación que contribuye al número de iones hidronio (H^+) en los aceites crudos, por la reacción de adición de hidrógeno en presencia de níquel como catalizador [4]. Por el contrario, si el valor de pH es básico o neutro, indica un bajo contenido de ácidos grasos presentes en el lodo residual.

3. ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES

A partir de la caracterización fisicoquímica de los residuos provenientes del proceso productivo, se realiza la extracción de lípidos y ácidos grasos libres, para utilizarlos como materia prima para la obtención de biodiesel.

3.1. Extracción de lípidos y ácidos grasos

Los lípidos son compuestos orgánicos compuestos por átomos de carbono, hidrogeno y oxígenos y son conocidos como aceites y grasas [36]. Son insolubles en compuestos polares como el agua y solubles en solventes orgánicos como cloroformo, éter, entre otros. Se encuentran alojados en los lodos residuales a lo largo del proceso de producción de grasas y aceites vegetales de la empresa C.I. SIGRA S.A.

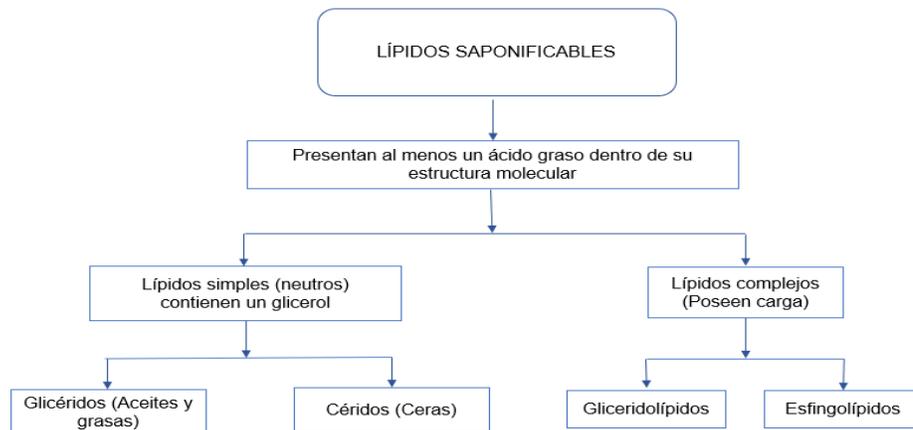
Por otro lado, entre su clasificación existen dos tipos de lípidos [37]:

3.1.1. *Lípidos saponificables.*

Son aquellos que poseen al menos un ácido graso dentro de su estructura molecular y que sirve para formar jabones.

Figura 18.

Clasificación de los lípidos saponificables



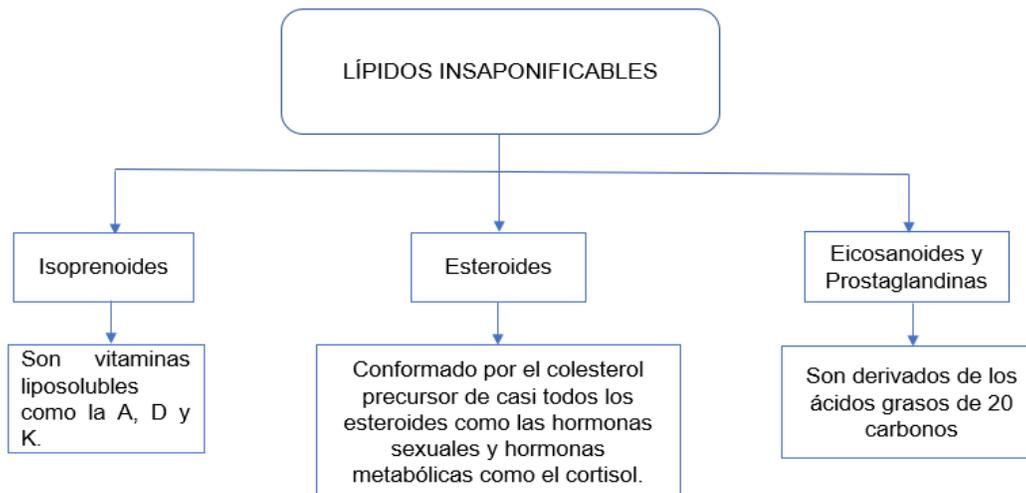
Nota. Esta figura representa la clasificación de lípidos saponificables. Tomado de: Lípidos y membranas.

3.1.2. Lípidos insaponificables.

Son aquellos lípidos que no poseen ácidos grasos dentro de su estructura.

Figura 19.

Clasificación de los lípidos insaponificables.



Nota. Esta figura representa la clasificación de los lípidos insaponificables.

Tomado de: Lípidos y membranas. [En línea]. Disponible en:

<http://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1960§ionid=148095989> [Acceso: septiembre 23,2020]

3.2. Selección del tipo de extracción

Con el propósito de seleccionar el método de extracción más adecuado se realiza un análisis multicriterio de los diferentes tipos de extracción empleados a nivel experimental para la extracción de lípidos, estimando el mejor método bajo criterios de ingeniería relacionado al pretratamiento, tipo de solvente, equilibrio de fases, relación lodo: solvente y rendimiento de cada uno de los métodos evaluados.

3.2.1. Tipos de extracción.

En cuanto a los métodos de extracción de lípidos en residuos, pueden emplearse diferentes técnicas tales como: Soxhlet, Folch, desdoblamiento y Bligh and Dyer, entre las más empleadas a nivel experimental, como se observa en la **tabla 8**.

Tabla 8.*Métodos de extracción de lípidos*

	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	BIBLIOGRAFÍA
SOXHLET	Técnica de separación sólido - líquido comúnmente empleada para la determinación del contenido graso y lipídico en muestras de diferente naturaleza. El método consiste en mantener un reflujo constante de solvente orgánico, calentado hasta ebullición y condensado a lo largo del equipo, a fin de entrar en contacto íntimo con la muestra y realizar la extracción del material de interés.	Técnicas avanzadas en química. "Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet". [En línea]. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf [Acceso: octubre 1,2020]
FOLCH	Método de extracción para determinación del perfil de ácidos grasos presentes en la muestra superiores al 2%, empleando la relación cloroformo y metanol como método de recuperación del material de interés.	M. Axelsson, F. Gentili, "A Single-Step Method for Rapid Extraction of Total Lipids from Green Microalgae", Rev. Investig., 2014. [En línea]. Disponible en: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0089643 [Acceso: octubre 1,2020]
DESDOBLAMIENTO	Método que consiste la separación de los ácidos grasos presentes en la muestra a partir una destilación de arrastre por vapor realizando una acidulación (reducción de pH < 1)	N. Y. Rojas., Recuperación de ácidos grasos de calidad comercial a partir de residuos de la refinación de aceites

Tabla 9. Continuación.

Métodos de extracción de lípidos

	<p>previa de la muestra. Este método de extracción permite la obtención de una fase orgánica rica en lípidos y una fase acuosa ácida que debe ser tratada para retirar el ácido empleado en la etapa de acidulación.</p>	<p>comestibles. tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2005. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22107/u260752.pdf?sequence=1 [Acceso: octubre 1,2020]</p>
<p>BLIGH AND DYER</p>	<p>Método de extracción y recuperación de lípidos basado en la extracción líquida en un sistema de dos fases, a través de la homogenización de la muestra con cloroformo, metanol y agua, cuya separación consta de una fase acuosa y no acuosa rica en el material lipídico extraído.</p>	<p>Determinación de la composición bioquímica de biomasa algal. “Determinación gravimétrica de lípidos totales (Bligh & Dyer)”. [En línea]. Disponible en: https://inbiotec-conicet.gob.ar/wp-content/uploads/2017/11/PR-OTOCOLO-E-lipidos.pdf [Acceso: octubre 1,2020]</p>

Nota. Esta tabla muestra la descripción de los métodos de extracción de lípidos empleados a nivel experimental.

Tabla 10.

Criterios evaluados de cada método de extracción

	PRE-TRATAMIENTO	TIPO DE SOLVENTE	EQUILIBRIO DE FASES	RELACIÓN LODO: SOLVENTE	RENDIMIENTO
SOXHLET	La muestra puede ser pre secada si contiene humedad mayor al 30%, de lo contrario no requiere calentamiento previo	Cloroformo:Metanol, n-hexano, éter de petróleo, acetato de etilo	Se favorece la extracción en equilibrio Sólido-Líquido	1:1 1:2 1:3 (La relación depende según disponibilidad de solvente)	20-60%
FOLCH	Debe conocerse el % de humedad, ajustar la humedad de la muestra al 80% para aumentar el rendimiento del método de extracción	Cloroformo, metanol	Se favorece la extracción en equilibrio Líquido-Líquido, aunque puede realizarse en equilibrio Sólido - Líquido -Líquido	1:2 (lodo:Mezcla solventes) 2:1 (Cloroformo:Metanol)	9- 24%
DESDOBLAMIENTO	La muestra puede ser pre secada si contiene humedad mayor al 30%, de lo contrario no requiere calentamiento previo	Vapor de agua, ácido clorhídrico	Se favorece la extracción en equilibrio Sólido-Líquido	1:3	10- 40%
BLIGH AND DYER	Debe conocerse el % de humedad, ajustar la humedad de la muestra al 80% para aumentar el rendimiento del método de extracción	Cloroformo, metanol, agua	Se favorece la extracción en equilibrio Líquido - Líquido, aunque puede realizarse en equilibrio Sólido - Líquido - Líquido	1:2 (lodo:Mezcla solventes) 8 : 3,2 : 1,6 (Cloroformo:Metanol:Agua)	20-30%

Nota. Esta tabla muestra los criterios a ser evaluados en la matriz multicriterio para cada método de extracción.

3.2.2. Matriz multicriterio

La matriz multicriterio o matriz de priorización, es una herramienta empleada con el fin de evaluar diferentes alternativas, la cual emplea criterios y evaluaciones cualitativas para seleccionar la opción más adecuada. Teniendo en cuenta, que cada valoración numérica es asignada según el soporte bibliográfico [51], y el valor porcentual es dado según el criterio ingenieril que se basa a partir de la información documental de los diferentes métodos.

3.2.2.a. Criterios de evaluación para la matriz multicriterio. Para el desarrollo de la matriz, cada parámetro será evaluado según una relevancia y asignación numérica, a partir de los criterios evaluados de cada método de extracción como: Pretratamiento, tipo de solvente, equilibrio de fases, relación lodo: solvente y rendimiento, a partir de fuentes bibliográficas, con el fin de estimar el método experimental que mejor se ajuste para la

extracción de los lípidos y ácidos grasos presentes en los lodos residuales, como se evidencia en la tabla 10 y 11.

Tabla 11.

Asignación numérica según relevancia para el análisis por criterio

COMPARACIÓN DEL MÉTODO CON RELACIÓN AL CRITERIO EVALUADO	VALOR NÚMÉRICO
80% mejor	5
50% mejor	4
30% mejor	3
10% mejor	2
Son iguales	1

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la relevancia de los criterios evaluados para cada tipo de extracción según el porcentaje de comparación entre cada método. Tomado de: A. Grajales Q., E. D. Serrano M., y C. M. Hahn V, “Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación”, Rev. Investig., 2013. [En línea]. Disponible en:

<http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a14.pdf>

Tabla 12.

Asignación numérica por pares de criterios

VALOR NÚMÉRICO	IMPORTANCIA DEL CRITERIO RESPECTO AL OTRO
5	Muy Alta
4	Alta
3	Media
2	Baja
1	Igual importancia

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la relevancia de los criterios evaluados para cada tipo de extracción según la relevancia de cada criterio respecto al otro. Tomado de: A. Grajales Q., E. D. Serrano M., y C. M. Hahn V, “Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación”, Rev. Investig., 2013. [En línea]. Disponible en:

<http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a14.pdf>

3.2.2.b. Matriz multicriterio. A continuación, se presenta el análisis criterio a criterio de cada uno de los tipos de extracción de lípidos. Lo resaltado en color gris hace referencia a la información encontrada en la bibliografía y la asignación numérica según relevancia para el análisis por criterio

Tabla 13.

Evaluación del criterio de pretratamiento

CRITERIO: PRE-TRATAMIENTO				
	SOXHLET	FOLCH	DESDOBLAMIENTO	BLIGH AND DYER
SOXHLET	1	5	1	5
FOLCH	0,2	1	0,2	0,33
DESDOBLAMIENTO	1	5	1	5
BLIGH AND DYER	0,2	3	0,2	1
SUMA	2,4	14	2,4	11,33

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la evaluación del criterio de pretratamiento para los métodos de extracción analizados.

Tabla 14.

Matriz normalizada del criterio de pretratamiento

CRITERIO PRETRATAMIENTO					
	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
SOXHLET	0,42	0,36	0,42	0,44	0,41
FOLCH	0,08	0,07	0,08	0,03	0,07
DESDOBLAMIENTO	0,42	0,36	0,42	0,44	0,41
BLIGH AND DYER	0,08	0,21	0,08	0,09	0,12

Nota. Esta tabla muestra la normalización de la matriz del criterio de pretratamiento junto con el vector promedio (promedio de la fila) de cada método de extracción.

Tabla 15.

Evaluación del criterio de tipo de solvente

CRITERIO: TIPO DE SOLVENTE				
	SOXHLET	FOLCH	DESDOBLAMIENTO	BLIGH AND DYER
SOXHLET	1	5	4	5
FOLCH	0,2	1	0,25	2
DESDOBLAMIENTO	0,25	4	1	4
BLIGH AND DYER	0,2	0,5	0,25	1
SUMA	1,65	10,5	5,5	12

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la evaluación del criterio de tipo de solvente para los métodos de extracción analizados.

Tabla 16.*Matriz normalizada del criterio de tipo de solvente*

CRITERIO: TIPO DE SOLVENTE					
	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
SOXHLET	0,61	0,48	0,73	0,42	0,56
FOLCH	0,12	0,10	0,05	0,17	0,11
DESDOBLAMIENTO	0,15	0,38	0,18	0,33	0,26
BLIGH AND DYER	0,12	0,05	0,05	0,08	0,07

Nota. Esta tabla muestra la normalización de la matriz del criterio de tipo de solvente junto con el vector promedio (promedio de la fila) de cada método de extracción.

Tabla 17.*Evaluación del criterio de tipo de equilibrio de fases*

CRITERIO: EQUILIBRIO DE FASES				
	SOXHLET	FOLCH	DESDOBLAMIENTO	BLIGH AND DYER
SOXHLET	1	5	1	5
FOLCH	0,2	1	0,2	3
DESDOBLAMIENTO	1	5	1	5
BLIGH AND DYER	0,2	0,33	0,2	1
SUMA	2,4	11,33	2,4	14

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la evaluación del criterio de equilibrio de fases para los métodos de extracción analizados.

Tabla 18.*Matriz normalizada del criterio de equilibrio de fases*

CRITERIO: EQUILIBRIO DE FASES					
	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
SOXHLET	0,42	0,44	0,42	0,36	0,41
FOLCH	0,08	0,09	0,08	0,21	0,12
DESDOBLAMIENTO	0,42	0,44	0,42	0,36	0,41
BLIGH AND DYER	0,08	0,03	0,08	0,07	0,07

Nota. Esta tabla muestra la normalización de la matriz del criterio de equilibrio de fases junto con el vector promedio (promedio de la fila) de cada método de extracción.

Tabla 19.*Evaluación del criterio de relación lodo: solvente*

CRITERIO: RELACIÓN LODO:SOLVENTE				
	SOXHLET	FOLCH	DESDOBLAMIENTO	BLIGH AND DYER
SOXHLET	1	5	4	5
FOLCH	0,2	1	0,25	3
DESDOBLAMIENTO	0,25	4	1	4
BLIGH AND DYER	0,2	0,33	0,25	1
SUMA	1,65	10,33	5,5	13

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la evaluación del criterio de relación lodo: solvente para los métodos de extracción analizados.

Tabla 20.*Matriz normalizada del criterio de relación lodo: solvente*

CRITERIO: RELACIÓN LODO:SOLVENTE					
	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
SOXHLET	0,61	0,48	0,73	0,38	0,55
FOLCH	0,12	0,10	0,05	0,23	0,12
DESDOBLAMIENTO	0,15	0,39	0,18	0,31	0,26
BLIGH AND DYER	0,12	0,03	0,05	0,08	0,07

Nota. Esta tabla muestra la normalización de la matriz del criterio de relación lodo: solvente junto con el vector promedio (promedio de la fila) de cada método de extracción.

Tabla 21.*Evaluación del criterio de rendimiento*

CRITERIO: RENDIMIENTO				
	SOXHLET	FOLCH	DESDOBLAMIENTO	BLIGH AND DYER
SOXHLET	1	3	2	3
FOLCH	0,33	1	0,5	2
DESDOBLAMIENTO	0,5	2	1	2
BLIGH AND DYER	0,33	0,5	0,5	1
SUMA	2,17	6,5	4	8

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la evaluación del criterio de rendimiento para los métodos de extracción analizados.

Tabla 22.*Matriz normalizada del criterio de rendimiento*

CRITERIO: RENDIMIENTO					
	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
SOXHLET	0,61	0,29	0,36	0,23	0,37
FOLCH	0,20	0,10	0,09	0,15	0,14
DESDOBLAMIENTO	0,30	0,19	0,18	0,15	0,21
BLIGH AND DYER	0,20	0,05	0,09	0,08	0,10

Nota. Esta tabla muestra la normalización de la matriz del criterio de rendimiento junto con el vector promedio (promedio de la fila) de cada método de extracción.

Una vez valorado cada criterio, se realiza la matriz de comparación por pares de criterios a fin de establecer que criterio representa mayor relevancia sobre el otro a la hora de seleccionar el método de extracción como se observa en la tabla 22.

Tabla 23.*Matriz de comparación por pares de criterios*

MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES - CRITERIOS					
	PRE-TRATAMIENTO	TIPO DE SOLVENTE	EQUILIBRIO DE FASES	RELACIÓN LODO: SOLVENTE	RENDIMIENTO
PRE-TRATAMIENTO	1	0,2	0,33	0,2	0,2
TIPO DE SOLVENTE	5	1	0,5	0,25	0,33
EQUILIBRIO DE FASES	3	2	1	0,33	0,25
RELACIÓN LODO: SOLVENTE	5	4	3	1	0,33
RENDIMIENTO	5	3	4	3	1
SUMA	19	10,2	8,83	4,78	2,12

Nota. Esta tabla muestra la asignación numérica de 1 a 5 de la importancia de cada criterio respecto al otro, para la selección del método más adecuado de extracción.

Tabla 24.

Matriz normalizada de la comparación por pares de criterios

MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES - CRITERIOS					
MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
0,05	0,02	0,04	0,04	0,09	0,05
0,26	0,10	0,06	0,05	0,16	0,13
0,16	0,20	0,11	0,07	0,12	0,13
0,26	0,39	0,34	0,21	0,16	0,27
0,26	0,29	0,45	0,63	0,47	0,42

Nota. Esta tabla muestra la normalización de comparación por pares de criterios junto con el vector promedio (promedio de la fila) de cada criterio.

Tabla 25.

Matriz de ponderación final

MÉTODO DE EXTRACCIÓN	PRE-TRATAMIENTO	TIPO DE SOLVENTE	EQUILIBRIO DE FASES
SOXHLET	0,41	0,56	0,41
FOLCH	0,07	0,11	0,12
DESDOBLAMIENTO	0,41	0,26	0,41
BLIGH AND DYER	0,12	0,07	0,07
PONDERACIÓN	0,05	0,13	0,13

RELACIÓN LODO: SOLVENTE	RENDIMIENTO	TOTAL
0,55	0,37	0,45
0,12	0,14	0,12
0,26	0,21	0,26
0,07	0,10	0,09
0,27	0,42	

Nota. Esta tabla muestra la ponderación final de la evaluación de cada criterio, estimando numéricamente el método más adecuado para la extracción de lípidos y ácidos grasos.

Tabla 26.

Fuentes documentales expresadas en la matriz multicriterio

	<p align="center">BIBLIOGRAFÍA DE LOS CRITERIOS POR MÉTODO DE EXTRACCIÓN</p>
<p align="center">SOXHLET</p>	<p>Pretratamiento y rendimiento: S. S. Rincón, J. A. Ramón V, J. R. Palacios G, “Análisis del rendimiento en la extracción de aceite de jatropha curcas I. Por los métodos de extracción química y ultrasonido”, Rev. Investig., pp. 171-179, 2018. [En línea]. Disponible en: https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/1394/4054 [Acceso: octubre 1,2020]</p> <p>Tipo de solvente: J. R. Bonilla M, J. L. Hoyos C, “Métodos de extracción, refinación y concentración de aceite de pescado como fuente de ácidos grasos omega-3”, Rev. Investig., pp. 623-626, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v19n3/es_0122-8706-ccta-19-03-645.pdf [Acceso: octubre 1,2020]</p> <p>Equilibrio de fases: Técnicas avanzadas en química. “Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet”. [En línea]. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf [Acceso: octubre 1,2020]</p> <p>Relación Lodo: Solvente: N. A. Hafizi M, W. Sing H, R. Abdul R, N. Ngadi, y I. Mahmood, “Optimization of Lipid Extraction from Primary Sludge by Soxhlet Extraction”, Rev. Investig, pp. 1-4, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.aidic.it/cet/17/56/221.pdf [Acceso: octubre 1,2020]</p>

Tabla 25. Continuación.

Fuentes documentales expresadas en la matriz multicriterio

<p>FOLCH</p>	<p>Pretratamiento: Calidad de métodos analíticos. “Métodos para determinar materia grasa total”. [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/ah833s/AH833S07.pdf [Acceso: septiembre 25,2020]</p> <p>Tipo de solvente y equilibrio de fases: M. Axelsson, F. Gentili, “A Single-Step Method for Rapid Extraction of Total Lipids from Green Microalgae”, Rev. Investig., 2014. [En línea]. Disponible en: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0089643 [Acceso: septiembre 25,2020]</p> <p>Relación Lodo: Solvente: Trabajo practico N°4. “Extracción y cuantificación de lípidos presentes en alimentos”. [En línea]. Disponible en: http://www.iib.unsam.edu.ar/archivos/docencia/licenciatura/biotecnologia/2017/QuimicaBiol/1494002365.pdf [Acceso: septiembre 25,2020]</p> <p>Rendimiento: L. E. Salazar P., Evaluación de métodos de extracción de aceite de microalgas para la producción de biodiesel. tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Perú, 2012. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1490/1/NG_508.pdf?sequence=1 [Acceso: septiembre 25,2020]</p>
<p>DESDOBLAMIENTO</p>	<p>Pretratamiento, tipo de solvente, equilibrio de fases, relación lodo: solvente y rendimiento: N. Y. Rojas., Recuperación de ácidos grasos de calidad comercial a partir de residuos de la refinación de aceites comestibles.</p>

Tabla 25. continuación.

Fuentes documentales expresadas en la matriz multicriterio

	<p>tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2005. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22107/u260752.pdf?sequence=1 [Acceso: septiembre 25,2020]</p>
<p>BLIGH AND DYER</p>	<p>Pretratamiento: Calidad de métodos analíticos. “Métodos para determinar materia grasa total”. [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/ah833s/AH833S07.pdf [Acceso: septiembre 25,2020]</p> <p>Tipo de solvente y equilibrio de fases: Determinación de la composición bioquímica de biomasa algal. “Determinación gravimétrica de lípidos totales (Bligh & Dyer)”. [En línea]. Disponible en: https://inbiotec-conicet.gob.ar/wp-content/uploads/2017/11/PROTOCOLO-E-lipidos.pdf [Acceso: septiembre 25,2020]</p> <p>Relación Lodo: Solvente: Técnicas de análisis de materias grasas. “Técnica Bligh y Dyer (1959)”. [En línea]. Disponible en: http://www.fagro.edu.uy/~nutrical/ensenanza/AVI%20WEB/cursoema/MGTecnicas.pdf [Acceso: septiembre 26,2020]</p> <p>Rendimiento:</p> <p>1) A. González D, L. Galindo, S. González, Y. Peralta R, V. Kafarov, “Adaptación del Método Bligh & Dyer a la</p>

Tabla 25. Continuación.

Fuentes documentales expresadas en la matriz multicriterio

	<p>Extracción de Lípidos de Microalgas colombianas para la Producción de Biodiesel de Tercera Generación”, Rev. Investig., pp. 26-34, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/317151458_A_daptacion_del_Metodo_Bligh_Dyer_a_la_Extraccion_de_Lipidos_de_Microalgas_Colombianas_para_la_Produccion_de_Biodiesel_de_Tercera_Generacion [Acceso: septiembre 25,2020]</p> <p>2) S. Soto L. et al, “Extracción de lípidos de tetraselmis suecica: proceso asistido por ultrasonido y solventes.” Rev. Investig., pp. 723-737, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n3/v13n3a7.pdf [Acceso: septiembre 25,2020]</p>
--	--

Nota. Esta tabla muestra las diferentes fuentes bibliográficas empleadas para el desarrollo de la matriz multicriterio.

3.2.2.c. Análisis del método seleccionado. De acuerdo con los resultados obtenidos de la matriz multicriterio, la alternativa más ajustada según los parámetros evaluados es la extracción por el método Soxhlet, dado que según los criterios de asignación numérica representa el mejor método de extracción por sus ventajas en términos de rendimientos [42] y número de solventes disponibles para la recuperación de lípidos y ácidos grasos presentes en los residuos de la empresa C.I. SIGRA S.A. [43].

3.2.3. Método de extracción Soxhlet

El método Soxhlet para la determinación de lípidos y grasas, se basa en el tipo de solvente y tiempo de extracción necesario para alcanzar un grado de separación lo suficientemente alto para solubilizar las grasas contenidas en los lodos residuales en el

disolvente no polar [52]. Por esta razón, se realiza la evaluación bibliográfica de dichos parámetros, para limitar la reducción del grado de separación.

3.2.3.a. Selección del solvente. Para seleccionar el tipo de solvente orgánico empleado en el método Soxhlet se realiza un análisis de los parámetros de punto de ebullición, índice de polaridad, rendimiento, riesgo a la salud y costos de los solventes más utilizados a nivel experimental para la extracción de lípidos y ácidos grasos [53].

Tabla 27.

Parámetros analizados de los solventes en el método Soxhlet

TIPO DE SOLVENTE	PUNTO DE EBULLICIÓN (°C)	ÍNDICE DE POLARIDAD
HEXANO	68,73	0,1
ÉTER DE PETRÓLEO	30-40	0,1
ACETATO DE ETILO	77,1	4,4
BIBLIOGRAFÍA DE CADA PARÁMETRO	Fabricante Multinacional Merck. “Productos químicos”. [En línea]. Disponible en: https://www.merckmillipore.com/CO/es [Acceso: septiembre 20,2020]	Analytical Techniques for Scientists. “Recent Advances in Sample Preparation for Pesticide Analysis”. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00101-0 [Acceso: septiembre 20,2020]

TIPO DE SOLVENTE	RENDIMIENTO (%)	GRADO DE RIESGO A LA SALUD (NFFPA)	COSTO (\$/1000 ML)
HEXANO	97,78+-1,32	1	\$ 495.286,10

Tabla 26. continuación.

Parámetros analizados de los solventes en el método Soxhlet

ÉTER DE PETRÓLEO	86,13+-1,12	1	\$ 214.006,94
ACETATO DE ETILO	55,73+-1,32	2	\$ 276.312,75
BIBLIOGRAFÍA DE CADA PARAMETRO	J. J. Lafont, M. S. Páez, y A. A. Portacio, “Extracción y Caracterización Físicoquímica del Aceite de la Semilla (Almendra) del Marañón (Anacardium occidentale L)”, Rev. Investig., pp. 53-55, 2011. [En línea]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/pdf/in_fotec/v22n1/art07.pdf [Acceso: septiembre 28, 2020]	Hoja de seguridad. “Productos químicos”. [En línea]. Disponible en: http://www.quimica.una.ac [Acceso: septiembre 28, 2020]	PanReac AppliChem. “Reactivos de laboratorio y productos químicos para uso industrial”. [En línea]. Disponible en: https://www.itwreagents.com/rest-of-world/es/home-rw [Acceso: septiembre 30,2020]

Nota. Estas tablas recopilan información de las características de los solventes orgánicos, con el fin de determinar el tipo de solvente a utilizar en el método de extracción.

A partir de los datos recopilados bibliográficamente, el éter de petróleo es el solvente más adecuado para la extracción de lípidos y ácidos grasos, dado que presenta un índice de polaridad de 0,1 indicando su alta afinidad química a la hora de arrastrar las partículas grasas contenidas en el lodo residual, mejorando el grado de extracción [59]. Asimismo, su bajo costo en comparación con los solventes analizados y su punto de ebullición

intermedio entre los diferentes solventes, lo hacen el mejor candidato para el método de extracción [60].

3.2.3.b. Tiempo de extracción. Para el tiempo de extracción, es necesario determinar la relación entre el éter de petróleo y la cantidad de lodo residual a utilizar en el equipo Soxhlet, dado que dicha relación determinara el tiempo en el cual el solvente inundara la muestra aumentando el grado de recuperación de lípidos gracias a la transferencia de masa entre el solvente y el lodo residual [61].

Tabla 28.

Tiempo de extracción según la relación solvente: lodo residual

TIEMPO DE EXTRACCIÓN (horas)	RELACIÓN LODO (g): SOLVENTE (mL)
3-4	1:2
4	1:3
6	2:1

Nota. Esta tabla recopila información de diferentes tiempos de extracción con base en la relación solvente: lodo residual. Tomado de: N. A. Hafizi M, W. Sing H, R. Abdul R, N. Ngadi, y I. Mahmood, "Optimization of Lipid Extraction from Primary Sludge by Soxhlet Extraction", Rev. Investig, pp. 1-4, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.aidic.it/cet/17/56/221.pdf>

A partir de la información recopilada, se empleará la relación 1:3 (lodo (g): solvente (mL)) dado que a mayor concentración de solvente se logra un mayor grado de extracción al existir mayor contacto entre las fases [62], teniendo en cuenta que para determinar dicha relación fue necesario conocer la disponibilidad del uso del solvente en el laboratorio de la empresa C.I SIGRA S.A.

3.3. Pruebas experimentales

Una vez determinado el método de extracción, el tipo de solvente y el tiempo de extracción, se realiza la técnica analítica por el método Soxhlet basado en el Standard Methods 5520E para la extracción de lípidos y ácido grasos, con el fin de estimar su cuantificación y naturaleza química, parámetros claves para la obtención del biodiésel [62].

El muestreo para la extracción de lípidos se realizó durante diferentes días de producción para estimar el comportamiento:

3.3.1. **Extracción de lípidos por el método Soxhlet a escala laboratorio**

El método Soxhlet consiste en el uso del extractor Soxhlet como equipo de extracción de analitos de interés (lípidos y ácidos grasos) de la muestra de lodo residual mediante el calentamiento del éter de petróleo como disolvente extractante [38], extrayendo los analitos solubles a reflujo constante durante un periodo de 4 horas. Asimismo, se realiza la separación solvente-lípidos en el mismo equipo de extracción para la cuantificación del porcentaje lipídico de la muestra.

El porcentaje de lípidos se determina a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 4.

Ecuación del porcentaje de lípidos

$$\% \text{ Lipidos} = \frac{m_2 - m_1}{M} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar el porcentaje de lípidos de la muestra de lodo residual. Tomado de: Técnicas avanzadas en química. “Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet”. [En línea]. Disponible en:

https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf

[Acceso: octubre 1,2020]

Donde:

m_1 = Peso del matraz sin muestra de lípidos (g)

m_2 = Peso del matraz con muestra de lípidos (g)

M = Peso de la muestra del lodo residual (g)

3.3.2. Caracterización de los lípidos recuperados

3.3.2.a. Índice de acidez. Es el porcentaje de ácidos grasos libres presentes en la muestra, relacionado al número de miligramos de hidróxido de sodio (NaOH) requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres no esterificados de un gramo de aceite [60]. Este índice se expresa en porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso predominante en la muestra analizada [60].

Ecuación 5.

Ecuación del porcentaje de AGL

$$\% \text{ A. G. L. como Oleico} = \frac{\text{ml NaOH} * PM_{ole} * N}{M} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar el porcentaje de ácidos grasos libres como oleico de la muestra de interés. Tomado de: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, *Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez*, Bogotá: ICONTEC.1999.

Donde:

ml NaOH = Mililitros de NaOH gastados para neutralizar los A.G.L. (mL)

PM_{ole} = Peso molecular del ácido oleico (g/mol)

N = Normalidad del NaOH (eq/L)

M = Peso de la muestra (g)

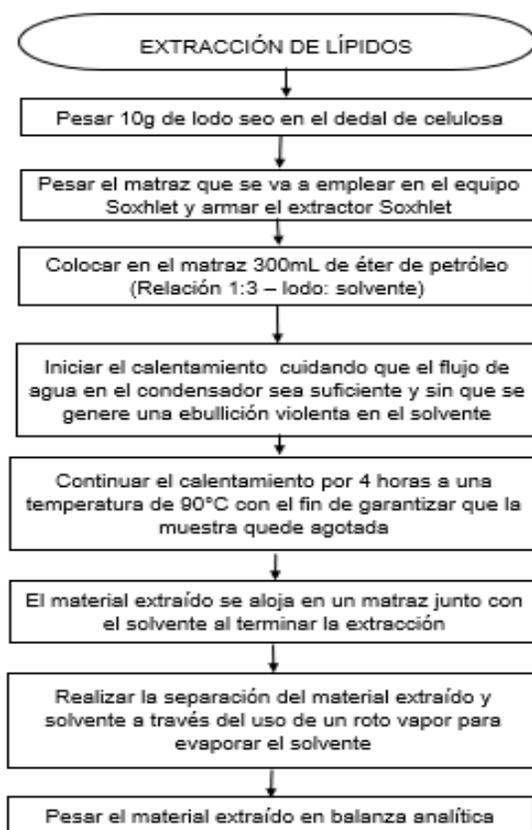
3.4. Análisis de resultados

3.4.1. Extracción de lípidos

Técnica experimental fundamentada en la norma NTC 6240 como se observa en la **figura 20**.

Figura 20.

Procedimiento para la extracción de lípidos.



Nota. La figura representa el procedimiento para la extracción de lípidos. Tomado de: Técnicas avanzadas en química. “Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet”. [En línea]. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quifis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf [Acceso: octubre 1,2020]

Figura 21.

Extracción de lípidos por el método de Soxhlet



Nota. La figura representa el método de Soxhlet - Standard Methods 5520E del lodo residual, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 29.

Datos obtenidos de la extracción de lípidos

EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS	PESO DE LA MUESTRA (g)	PESO DEL MATRAZ SIN MUESTRA (g)	PESO DEL MATRAZ CON MUESTRA (g)	ÉTER DE PETRÓLEO (mL)
MUESTRA 1	10,05	124,21	129,14	300
MUESTRA 2	10	125,8	128,57	300
MUESTRA 3	10,05	123,35	125,39	300

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A en la realización del método de Soxhlet - Standard Methods 5520E

Calculo muestra 1:

$$\% \text{ lípidos} = \frac{((129,14 \text{ g} - 124,21 \text{ g}))}{10,05 \text{ g}} * 100 = 49,05 \%$$

Tabla 30.

Resultados del contenido de lípidos.

EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS	CANTIDAD DE LÍPIDOS (%)
MUESTRA 1	49,05
MUESTRA 2	27,70
MUESTRA 3	25

Nota. Esta tabla muestra los resultados de la cantidad de lípidos presentes en las muestras de lodo residual realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según los datos obtenidos se denota un cambio en el porcentaje del contenido graso de los residuos entre un 25% a un 50%, parámetro que depende de los procesos que se realicen en la planta de C.I SIGRA. S.A para la obtención de sus productos terminados. Su composición predominante es de tripalmitina, triestearina, trioleína y trilinoleína, obtenidos de la extracción de lípidos realizada en el laboratorio.

El porcentaje lipídico es un parámetro crítico en la producción de biodiésel. De acuerdo con la literatura se encuentran en un rango del 20 al 30% en los lodos residuales de las industrias de alimentos [4].

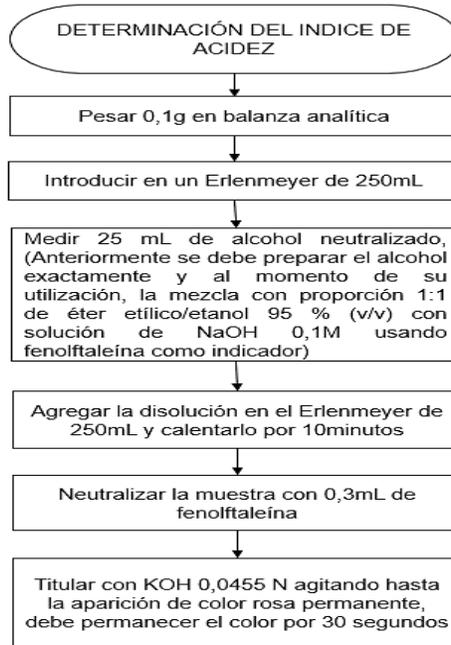
Con base a la información anterior, se establece el límite inferior del 20% para la simulación de la producción de biodiésel [62], representando la mínima extracción, en un día de producción, siendo este parámetro constante durante la simulación.

3.4.2. Índice de acidez

Técnica experimental de caracterización de lípidos fundamentada en la norma NTC 218 como se observa en la **figura 22**.

Figura 22.

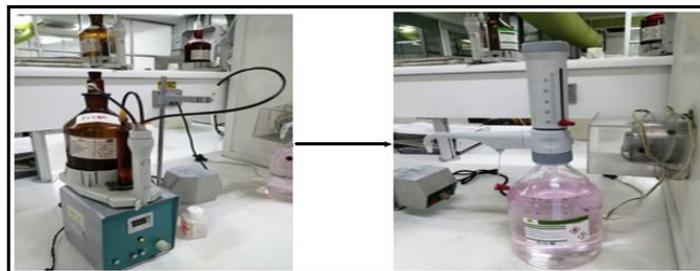
Procedimiento para determinar el índice de acidez



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del índice de acidez en los lípidos. Tomado de: J. A. Rodríguez A, L. Ruiz L, M. A. Santoyo S, y L. G. Miranda V, "Determinación del índice de acidez y acidez total de cinco mayonesas", Rev. Investig., pp. 843-849, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyT/A/files/volume1/2/10/146.pdf>.

Figura 23.

Determinación del índice de acidez



Nota. La figura representa la determinación del índice de acidez de los lípidos, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 31.

Datos obtenidos para la medición del índice de acidez

INDICE DE ACIDEZ	PESO DE LA MUESTRA (g)	ALCOHOL NEUTRALIZADO (mL)	SOSA CAUSTICA NAOH (mL)
MUESTRA 1	0,12	25	7,5
MUESTRA 2	0,11	25	5,7
MUESTRA 3	0,11	25	7,62

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del índice de acidez de los lípidos extraídos del lodo residual.

Calculo muestra 1:

$$\% \text{ A. G. L. como Oleico} = \frac{7,5 \text{ ml NaOH} * 282,47 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 0,0499 \frac{\text{eq}}{\text{l}} * \left(\frac{1\text{l}}{1000 \text{ ml}}\right)}{0,12 \text{ g}} * 100 = 87,94\%$$

Tabla 32.

Resultados del índice de acidez de los lípidos

MEDICIÓN DEL INDICE DE ACIDEZ	ÁCIDOS GRASOS LIBRES DE ÁCIDO OLEICO (%)
MUESTRA 1	87,94
MUESTRA 2	72,9
MUESTRA 3	97,5

Nota. Esta tabla muestra los resultados del índice de acidez de las muestras de los lípidos contenidos en el lodo residual realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según la literatura, se establece que el valor del índice de acidez debe ser menor al 3% para reducir la formación de jabones durante la reacción de transesterificación [28]. Sin embargo, un valor elevado de acidez implica una reacción de esterificación previa a la reacción de transesterificación, que consiste en la reducción de los ácidos grasos libres favoreciendo la producción de biodiésel [62].

A partir de los datos, se obtuvo un rango del 70 al 97% siendo un valor elevado del índice de acidez con un alto grado de hidrólisis [28]. Por esta razón, se emplea la reacción de esterificación para garantizar la obtención de biodiésel.

4. BIOCOMBUSTIBLES

Son combustibles que se pueden obtener a partir de biomasa derivada de residuos de tipo forestal, agrícola y doméstico, así como de fuentes industriales, los cuales son desarrollados a través de tratamientos físicos o químicos, considerados un tipo de energía renovable. Asimismo, presentan del 10% al 45% en peso de oxígeno, a diferencia de los combustibles de origen fósiles que no lo contienen [28].

Entre los biocombustibles, se puede incluir el bioetanol y biodiésel, entre los más desarrollados a nivel mundial, reemplazando la gasolina por bioetanol y el diésel y por el biodiésel, asociando su sustitución a reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero [28].

4.1. Biodiésel

Es un biocarburante que se describe según la ASTM (American Society for Testing and Materials) como un éster mono alquílico de ácidos grasos de cadena larga, derivado de lípidos como aceites vegetales y grasas animales [28]. Puede ser puro es decir B100 o mezclado con Diesel denominado BXX, donde XX representa el porcentaje de biodiésel en la mezcla. El B20 es el más utilizado, representa 80% Diesel y 20% biodiésel. Es una alternativa viable en comparación con los derivados del petróleo. Algunos estándares de biodiésel empleados son: ASTM D6751 (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, ASTM) usada específicamente para biocombustibles [66]. Se considera una alternativa viable por el uso de este tipo de residuos como materia prima siendo una alternativa de bajo costo.

4.1.1. *Propiedades del Biodiésel*

Para la determinación de estas propiedades se toman como referencia las normas NTC 5444 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). El cual menciona los parámetros permisibles del biodiésel para su uso en motores Diesel.

Tabla 33.*Parámetros de biodiésel para uso en motores Diesel*

PROPIEDAD	UNIDADES	REQUISITO	MÉTODO DE ENSAYO
DENSIDAD 15°C	Kg/m ³	860 - 900	ASTM 04052 ISO 3675
NUMERO DE CETANO	Cetanos	47 mínimo	ASTM D613 ISO 5165
VISCOSIDAD (CINEMÁTICA 40°C)	mm/s	1,9 - 6,0	ASTM D445 ISO 3104
CONTAMINACIÓN TOTAL	mg/Kg	24 máximo	EN 12662
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	120 mínimo	ASTM D93 ISO 12937
CENIZAS SULFATADAS	% en masa	0,02 máximo	ASTM D874 ISO 3987
INDICE DE YODO	g yodo/100 g	120 máximo	EN 14111
PUNTO DE FLUIDEZ	°C	Reportar (1)	ASTM D97

Nota. La tabla representa los parámetros de biodiésel para uso en motores diésel. Tomado de: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. “biodiésel para uso en motores Diesel. Especificaciones NTC 5444”

Tabla 34.*Parámetros de biodiésel para uso en motores Diesel*

PROPIEDAD	UNIDADES	REQUISITO	MÉTODO DE ENSAYO
CARBÓN RESIDUAL	% en masa	0,3 máaximo	ASTM D4530 (2) ISO 10370
GLICERINA LIBRE	% en masa	0,02 máximo	ASTM D6584 EN 14105 / EN 14106
GLICERINA TOTAL	% en masa	0,25 máximo	ASTM D6584 ISO 14105
CONTENIDO DE ÉSTER	% en masa	96,5 mínimo	EN 14103
CONTENIDO DE MONOGLICERIDOS	% en masa	0,8 máaximo	ASTM D6584 ISO 14105
CONTENIDO DE DIGLICERIDOS	% en masa	0,2 máximo	ASTM D6584 ISO 14105
CONTENIDO DE TRIGLICERIDOS	% en masa	0,2 máximo	ASTM D6584 ISO 14105
DESTILACIÓN (PFE)	°C	360 máximo	ASTM D86 ISO 3405
NUMERO DE ÁCIDO	mg de KOH/g	0,5 máaximo	ASTM D664 EN 14104

Nota. La tabla representa los parámetros de biodiésel para uso en motores diésel. Tomado de: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. “Biodiésel para uso en motores Diesel. Especificaciones NTC 5444”

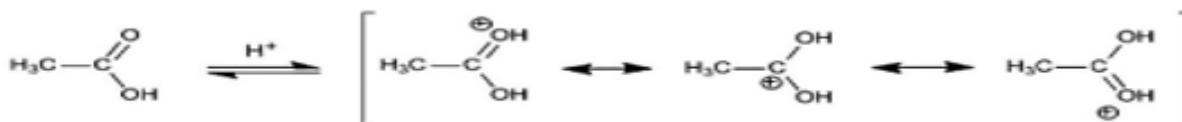
4.1.2. Obtención del biodiésel

Entre las materias primas para la producción del biodiésel se utilizan aceites vegetales, aceites usados de fritura o residuos derivados de procesos industriales que produzcan aceite [67], siendo las dos últimas las más económicas y viables en términos de reducción en la contaminación ambiental y el aprovechamiento de residuos. Del mismo modo, otras materias primas empleadas para la producción de biodiésel incluyen lípidos obtenidos a partir de procesos microbianos, algas, microalgas, entre otros. Teniendo en cuenta que los lípidos son factibles como materia prima para la producción de biodiésel, se determinó el índice de acidez en la recuperación de los mismos y se obtuvo un rango del 70 al 97% siendo un valor elevado. Por esta razón, se emplea una ruta química que consiste en la esterificación, la cual permite reducir el contenido de acidez debido a que debe ser menor al 3% y favorecer la reacción de transesterificación, descritas a continuación:

4.1.2.a. Esterificación. Por medio de este procedimiento se puede sintetizar un éster, que se produce por la interacción entre un ácido carboxílico y un alcohol en presencia de un catalizador, la cual emplea ácidos fuertes, con la finalidad de formar un éster a través de la eliminación de una molécula de agua puesto que se hidroliza [68].

Figura 24.

Reacción de esterificación



Nota. La figura representa la reacción esterificación para la obtención de biodiésel. Tomado de: L. Rivero, “Efecto de la temperatura y del tiempo de reacción sobre la esterificación de aceites comestibles usados”, Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias. Vol.4 No.13, 19-35, 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol4num13/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V4_N13_3.pdf

Parámetros que influyen en la reacción de esterificación:

Entre los parámetros se encuentran los siguientes [68], basados en la literatura.

4.1.2.a.i. Tipo de alcohol. Se emplean alcoholes primarios o secundarios como el metanol y etanol, debido a que alcoholes terciarios son susceptibles a la eliminación y los fenoles suelen ser muy poco reactivos. El más usado es el metanol debido a su bajo costo.

4.1.2.a.ii. Catalizador. Los generalmente usados son ácidos fuertes como el ácido sulfúrico, ácido sulfónico, ácido tósilico, entre otros. Los cuales no permiten generar reacciones secundarias. La concentración del catalizador no influye de manera significativa la eficiencia de esterificación. [69].

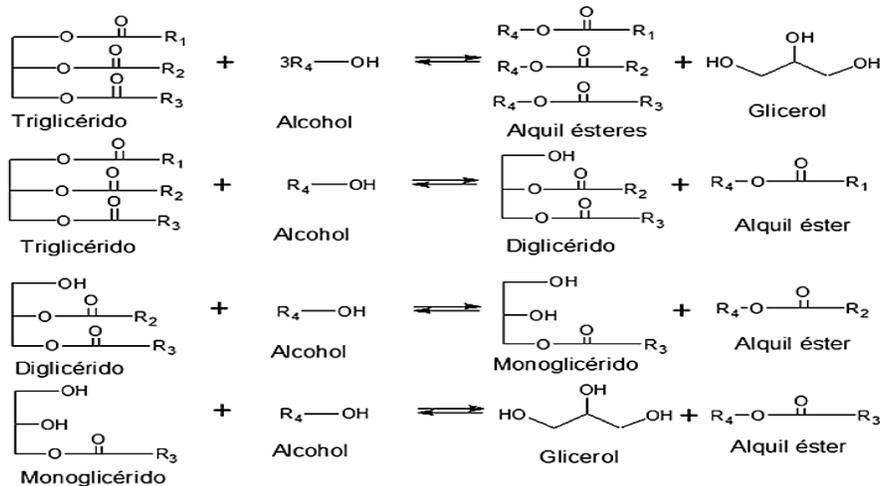
4.1.2.a.iii. Tiempo de reacción. Los tiempos de reacción varían de 1 a 10 horas a temperaturas de 60-110°C.

4.1.2.a.iv. Intensidad de agitación. Durante la agitación el valor estimado según lo reportado en la literatura varía de (120-600 rpm) tomando en cuenta un valor cercano al límite inferior de 200 rpm. Se debe mantener la intensidad de agitación entre los parámetros mencionados debido a que, si no se mantiene constante al añadir el catalizador, se forma un gel sólido y dificulta la obtención del biodiésel [68].

4.1.2.b. Transesterificación. El biodiésel se produce mediante de la reacción de transesterificación o alcoholisis, cuya reacción global genera tres reacciones consecutivas reversibles, en el cual, los triglicéridos (comúnmente compuestos entre 15 a 23 átomos de carbono, pero el más usual es de 18 átomos), se mezcla con un alcohol (etanol, butanol, hexanol, metanol), en donde forman esteres metílicos de ácidos grasos, en presencia de un catalizador (el más empleado es el hidróxido de sodio), convirtiendo el triglicérido en diglicérido, monoglicérido y glicerol como subproducto consecutivamente, liberando en cada reacción una mol de alquilester [70].

Figura 25.

Reacción de transesterificación



Nota. La figura representa la reacción transesterificación para la obtención de biodiésel. Tomado de: M. Montenegro, F. Vargas y C. Guerreo, “Producción y caracterización de biodiésel a partir de aceite de pollo” informador Técnico (Colombia), Edición 76, enero - diciembre 2012, p 62 – 71. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/264195284_Produccion_y_caracterizacion_de_Biodiesel_a_partir_de_aceite_de_pollo [Acceso: septiembre 8, 2020].

Parámetros que influyen en la transesterificación para la obtención de biodiésel:

Los parámetros que influyen en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiésel son los siguientes [28]. Incluye la temperatura, contenido de humedad, relación molar alcohol-lípidos, tiempo de reacción, tipo de alcohol, catalizador, intensidad de agitación.

4.1.2.b.i. Tiempo de reacción. Aproximadamente una hora y media según la literatura. Se deja que la mezcla repose durante 4 horas después de la reacción, manteniendo la

temperatura por encima de 50°C. De esta forma la glicerina se mantiene semilíquida debido a que se solidifica por debajo de 38° C [68].

4.1.2.b.ii. Tipo de alcohol. Se utilizan alcoholes de bajo peso molecular, entre menor sea el tamaño de la cadena, reacciona mejor. Entre más grande sea la cadena mayor temperatura requerirá, al igual que la concentración del catalizador.

Para la reacción de transesterificación solo se puede utilizar alcoholes como metanol, etanol, propanol o butanol, aunque el etanol se obtiene de fuentes renovables y no genera toxicidad como el metanol, siendo este el más comercial [28]. El etanol debe ser completamente anhidro debido a que, si contiene más del 2% de agua, revierte la reacción, llevándola al equilibrio deteniendo la ruptura de los triglicéridos.

4.1.2.b.iii. Catalizador. Se utilizan catalizadores ácidos como básicos. Entre los ácidos se utilizan el ácido sulfónico y el ácido sulfúrico [67].

Obteniendo altos rendimientos, aunque incurre en el aumento considerable de temperatura de aproximadamente 100°C y velocidades de reacción bajas de más de 3 horas, es por ello que se prefiere el uso de catalizadores básicos debido a que la velocidad de reacción es más rápida y son menos corrosivos, los más empleados son el hidróxido de potasio y la soda caustica, siendo más económicos y logrando un rendimiento mayor al 94%.

El uso de estos catalizadores básicos, no deben estar expuestos al aire porque absorben dióxido de carbono de la atmosfera y humedad [67], así como el aumento de la concentración del catalizador, no aumenta la conversión y por el contrario genera mayores costos debido a que hay que eliminarlo al final de la reacción [69]. Con una baja cantidad de catalizador (< 0,1% p/p) o una cantidad excesiva de este (> 50% p/p) no se obtienen buenos rendimientos [71].

4.1.2.b.iv. Intensidad de agitación. Durante la agitación el valor estimado según lo reportado en la literatura varía de (120-600 rpm) tomando en cuenta un valor cercano al límite inferior de 200 rpm. Se debe mantener la intensidad de agitación entre los

parámetros mencionados debido a que, si no se mantiene constante al añadir el catalizador, se forma un gel sólido y dificulta la obtención del biodiésel [68].

4.1.2.b.v. Presencia de ácidos grasos. Debe ser menor al 3% la presencia de ácidos grasos libres, si contiene mayor cantidad puede favorecer la producción de jabón, disminuyendo el rendimiento de biodiésel en la reacción de transesterificación.

4.1.2.b.vi. Temperatura. Afecta directamente la relación del catalizador con el alcohol, impidiendo una alta conversión y la calidad del producto final. Varía entre los 60°C a 70°C según la literatura usando etanol, si se usa metanol maneja un rango de 50 a 60°C. Estos valores son dependientes del punto de ebullición del alcohol, siendo menores para evitar su evaporación. Se debe mantener la temperatura entre los parámetros mencionados debido a que, si no se mantiene constante al añadir el catalizador, se forma un gel sólido y dificulta la obtención del biodiésel [68].

4.1.2.b.vii. Contenido de humedad. Debe contener <0.1% debido a que el catalizador se consume y favorece la generación de jabón o la reacción de saponificación, disminuyendo el rendimiento del producto deseado y la conversión del éster.

4.1.2.b.viii. Relación molar alcohol-lípidos. Según la literatura se maneja relaciones 6:1 pero también se ha visto relaciones más altas 12:1 esto se debe a los demás parámetros para que se logre la conversión para la producción de biodiésel [28].

4.1.3. Caracterización del biodiésel

Para la determinación de las características fisicoquímicas se debe realizar la extracción de lípidos y con ello se procede a evaluar algunos parámetros como la densidad, cenizas, índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxidos y punto de inflamación.

4.1.3.a. Índice de acidez. Por medio de este índice se determina la cantidad de ácidos grasos libres presentes en el biodiésel. El cual debe presentar un contenido menor al 3%, de lo contrario se debe realizar procesos adicionales para reducir esta cantidad [72].

Ecuación 6.

Ecuación del porcentaje de A.G.L en el biodiésel

$$\% A. G. L. como Oleico = \frac{ml NaOH * F}{M}$$

Nota. Ecuación para determinar el porcentaje de ácidos grasos libres como oleico de la muestra de interés. Tomado de: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, *Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez*, Bogotá: ICONTEC.1999.

Donde:

ml NaOH = Mililitros de NaOH gastados para neutralizar los A.G.L. (mL)

F = Factor del NaOH (1,74784)

M = Peso de la muestra (g)

4.1.3.b. Contenido de cenizas. Método analítico que consiste en la determinación del equivalente al residuo sólido inorgánico resultado de la calcinación de la materia orgánica presente en la muestra [73].

Ecuación 7.

Ecuación para el contenido de cenizas en el biodiésel

$$\%C = \frac{P - p}{M} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar el porcentaje de cenizas de la muestra de interés. Tomado de: Universidad tecnológica de Chile. “Química de alimentos -510144”. [En línea]. Disponible en:

https://www.academia.edu/24997715/Gu%C3%ADa_de_Humedad_y_Cenizas_1.

[Acceso: noviembre 1,2020]

Donde:

%C = Porcentaje de cenizas

P = Peso del crisol más cenizas (g)

p = Peso del crisol (g)

M = Peso de la muestra (g)

4.1.3.c. Densidad. Cantidad de materia por unidad de volumen a una determinada temperatura, coexiste con la densidad relativa que es la relación entre la densidad de una sustancia a una y la densidad del agua a la misma temperatura [72].

Ecuación 8.

Ecuación densidad

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \times \rho_2$$

Nota. Ecuación para determinar la densidad del biodiésel. Tomado de: R. Bernal. Elaboración y caracterización de biodiésel como energía alternativa a partir de aceite de pescado, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2019. Disponible en:

<https://repositorio.unibague.edu.co/bitstream/20.500.12313/1288/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>

Donde:

m_1 = Masa del biodiésel (g)

m_2 = Masa del beaker vacío del biodiésel (g)

m_3 = Masa del agua (g)

m_4 = Masa del beaker vacío del agua (g)

ρ_2 = Densidad del agua

4.1.3.d. Punto de inflamación. Es la temperatura a la cual el combustible iniciará a quemarse cuando se pone en contacto con fuego. El biodiésel tiene un punto de inflamación no menor que 120°C. Este es mayor que el del Diesel de petróleo el cual tiene un punto de inflamación de 71°C [74].

4.1.3.e. Índice de peróxidos. Determina la cuantificación de todas las sustancias que oxidan al yoduro de potasio y se expresa como miliequivalentes de peróxido por kg de muestra [75].

Ecuación 9.

Ecuación del índice de peróxidos del biodiésel

$$\text{Índice de peróxidos (I.P)} = \frac{(M - B) * N * 1000}{m}$$

Nota. Ecuación para determinar el índice de peróxidos del biodiésel. Tomado de: C. Velásquez. Estudio de estabilidad en almacén del biodiésel obtenido de aceite de soya (*Glycine max*), palma africana (*Elaeis guineensis*), maíz (*Zea mays*), higuera (*Ricinus communis*) y piñón (*Jatropha curcas*), tesis pre. Carrera de Agroindustria alimentaria, Universidad de Zamorano, Zamorano, Honduras, 2007. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1271/1/AGI-2007-T003.pdf>

Donde:

M = ml de tiosulfato de sodio utilizado para titular la muestra

B= ml de tiosulfato de sodio utilizado para titular el agua

N = Normalidad de la solución de tiosulfato usada (0,2027N)

m= Peso de la muestra

4.1.3.e. Índice de yodo. Consiste en la determinación del grado de instauración de un compuesto orgánico, empleado como parámetro de calidad e identificación del tipo de muestra evaluada [76].

Ecuación 10.

Ecuación de índice de yodo en el biodiésel

$$\text{Índice de Yodo} = \frac{((Y - X) * N * 0,127)}{m} * 100$$

Nota. Ecuación para determinar el índice de yodo de la muestra de interés. Tomado de: Pruebas generales para lípidos. “Laboratorio de química experimental”. [En línea]. <http://quimicaexperimental9.blogspot.com/2013/04/instituto-tecnologico-de.html>

Donde:

X = Mililitros de tiosulfato gastados en la titulación de la muestra (mL)

Y = Mililitros de tiosulfato gastados en la titulación del blanco (mL)

N = Normalidad de la solución del tiosulfato de sodio (eq/L)

m = Peso de la muestra (g)

4.1.4. Biodiésel en Colombia

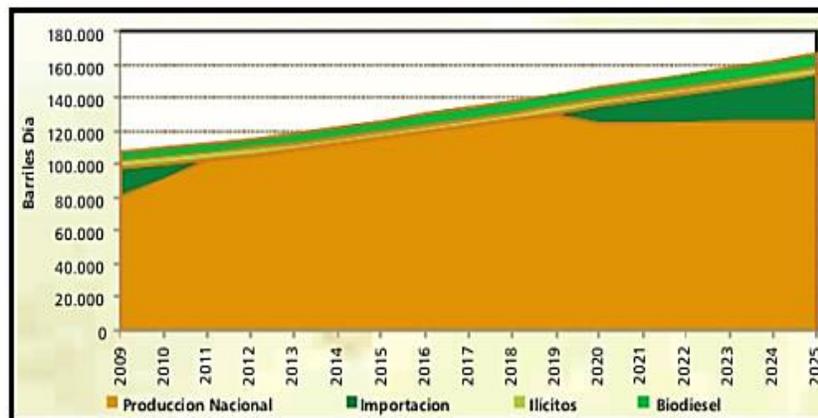
En Colombia el uso de los combustibles para el sector de transporte en las últimas décadas ha ido migrando hacia la incursión de la diversificación de la canasta energética a partir del uso de combustibles de origen vegetal y animal que favorezcan el desarrollo sostenible en el entorno social, económico y ambiental [77]. Por esta razón, la aprobación de la ley 939 del 2004 marcó la entrada a los biocombustibles estableciendo un marco legal y normativo flexible provocando un estímulo en su producción, comercialización y consumo [78].

Actualmente, Colombia destina alrededor de 2,5 millones de toneladas de aceite para generar biodiésel [79], cuyo volumen de mezcla en los combustibles fósiles está sujeto a las normas establecidas en la legislación colombiana, la cual es establecida según la oferta y la demanda de este biocombustible.

4.1.4.a. Demanda de biodiésel. Según las estadísticas de la Unidad de planeación Minero-Energética (UPME), la proyección de la demanda de biodiésel en Colombia es establecida según supuestos basados en el consumo vehicular que poseen motores diésel que incluye aspectos como: precio del gas natural vehicular, precio de combustible ACPM y crecimiento de la demanda del 4% [80]. Dando lugar, al comportamiento presentado a continuación en la **Figura 26**:

Figura 26.

Proyección de la demanda de biodiésel en Colombia



Nota. La figura representa la demanda del biodiésel en Colombia en un periodo de evolución del 2009 al 2025. Tomado de: J. A. Ramírez C., S. C. Rodríguez P., *Conveniencia de la Producción de Biodiésel en Colombia desde la perspectiva del Desarrollo Sostenible.*, tesis pre. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2019. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23602/1/Conveniencia%20de%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biodiesel%20en%20Colombia%20desde%20la%20perspectiva%20del%20desarrollo%20sostenible.pdf>

4.1.4.b. Aspecto Socioeconómico. La producción de biodiésel en Colombia genera cambios en el entorno social y económico del país, desde el momento de la extracción de la materia prima, hasta el paso por su cadena productiva para su transformación en biocombustible, dado que el incremento de su consumo fomenta el desarrollo y el crecimiento de los tres eslabones de la cadena productiva de biodiésel: los proveedores de materia prima, productores de biodiésel y distribuidores del biodiésel [81].

4.1.4.c. Biorrefinerías. Actualmente, la participación de Colombia en la contribución de los biocombustibles está distribuida en la producción de 10000 barriles diarios de biodiésel provenientes de 6 refinerías, tres ubicadas en la costa Caribe, una en Barrancabermeja, una en Cundinamarca y una en el departamento del Meta. Las empresas que participan en el suministro energético de fuentes renovables son [79]:

- Oleoflores
- Biocombustibles Sostenibles del Caribe
- Odin Energy
- Ecodiesel de Colombia
- BioD
- Aceites Manuelita
- Biocastilla

Los cuales suman una capacidad total de 571000 toneladas año, representando una contribución en el sector económico, sociales, ambiental e independencia energética.

4.1.5. Ventajas generales del biodiésel

4.1.5.a. Medio Ambientales.

- El ciclo de vida del biodiésel a partir de aceites vegetales, genera mayor impacto ambiental en la extracción del aceite de palma. Sin embargo, en la producción de este biocombustible se ve favorecido el medio ambiente por la recirculación del metanol y la producción de glicerina como subproducto que es utilizado en la industria farmacéutica
- Mejora la calidad de vida de los seres humanos por la baja concentración de CO₂ y SO₂.
- No necesita un almacenamiento especial.
- Se degrada biológicamente por cadenas hidrocarbonadas que forman ésteres con átomos de oxígeno, lo que lo hace biológicamente activo, en comparación al Diesel que está constituido por mezcla de alcanos, cicloalcanos e hidrocarburos aromáticos, siendo difíciles de degradar [67] siendo viable por su baja inflamabilidad y toxicidad
- Se le considera un combustible limpio debido a que no contiene azufre ni compuestos aromáticos. Evita las emisiones de SO_x evitando la generación de lluvia ácida o efecto invernadero).
- Mejora la combustión, reduciendo emisiones de hollín hasta un 55% desapareciendo el humo negro y malos olores [82]
- Permite reducir la dependencia del petróleo, incrementando la seguridad y diversidad en el medio ambiente.

4.1.4.b. Técnicos.

- A condiciones normales no genera reacción espontánea dado a su alto punto de inflamación (Temperatura superior a 130°C).
- Se degrada hasta 4 veces más rápido que el diésel convencional y es menos tóxico que el diésel

4.1.4.c. Energéticos.

- Aumenta la vida de los motores debido a que posee un mayor poder lubricante,

reduciendo el ruido en los mismos esto se debe a su poder detergente, que mantiene limpios los sistemas de conducción e inyección del circuito de combustible de los motores [82].

- Aunque el biodiésel contiene aproximadamente 8% menos energía por galón que el diésel de petróleo, no se ha reportado una diferencia significativa en el desempeño o ahorro de combustible
- Obtenido a partir biomasa, es decir materia prima renovable
- Reduce el uso de combustibles fósiles.
- Reduce los costos en las estaciones depuradoras de aguas residuales.

4.1.6. Desventajas generales del biodiésel

- Al ser un biocombustible de primera generación, utiliza suelo agrario que genera competencia por la tierra y el agua, produciendo deforestación por el tipo de materia prima
- Genera un efecto de competencia entre la producción de comida y la de biocombustibles
- Libera glicerina que es tóxica y contaminante.
- Genera un 10% de óxidos nitrosos a la atmósfera con respecto a los combustibles fósiles.
- A temperaturas por debajo de 14°C (punto de nube) se puede solidificar y formar grumos o geles, que pueden obstruir los conductos del combustible [82].
- Puede degradar ciertos materiales, tales como el caucho natural, es por esta razón que se debe cambiar algunas mangueras del motor antes de usar biodiésel, especialmente con vehículos antiguos.

4.1.7. Análisis de resultados

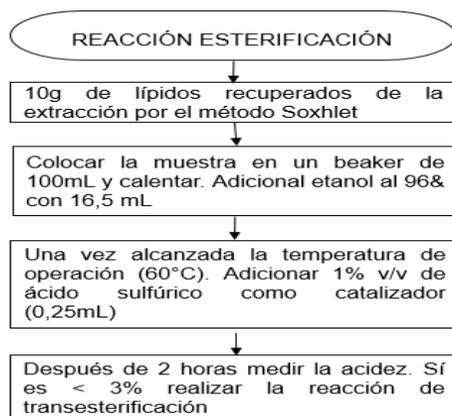
Según los datos obtenidos en el laboratorio, la cantidad de gramos obtenidos en la recuperación de los lípidos por el método de Soxhlet fue de 56 g cuyo porcentaje de acidez fue en promedio de 86,11% de las muestras analizadas, por esta razón se debe realizar una ruta química previa a la reacción de transesterificación con el fin de reducir el contenido de ácidos grasos libres presentes en los lípidos a reaccionar.

4.1.7.a. Esterificación. En la reacción se utilizaron los siguientes parámetros:

- Lípidos usados: 31 g obtenido de la extracción de lípidos realizada en el laboratorio. Su composición predominante es de tripalmitina, triestearina, trioleína y trilinoleína.
- Tipo de alcohol: Etanol 96%
- Catalizador: Ácido sulfúrico 0,2N
- Tiempo de reacción: 2 horas
- Temperatura: 60 - 70°C
- Relación molar lípidos: alcohol: 1:8

Figura 27.

Procedimiento para determinar la reacción de esterificación



Nota. La figura representa el procedimiento para determinar la reacción de esterificación. Tomado de: J. A. Rodríguez A, "Determinación del índice de acidez y acidez total de cinco mayonesas", Rev. Investig., pp. 843-849, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.fcb.unl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/10/146.pdf>.

Figura 28.

Montaje de la reacción de esterificación



Nota. La figura representa el montaje de la reacción de esterificación para la obtención del biodiésel, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 35.

Datos para la determinación de la reacción de esterificación.

REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN	PESO DE LÍPIDOS (g)	ETANOL (mL)	ÁCIDO SULFÚRICO (mL)
MUESTRA 1	9,75	16	0,27
MUESTRA 2	20,8	33,07	0,56

Nota. Esta tabla muestra los datos para la determinación de la reacción de esterificación para la obtención del biodiésel en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A

Cálculos muestra 1:

Relación 1:8

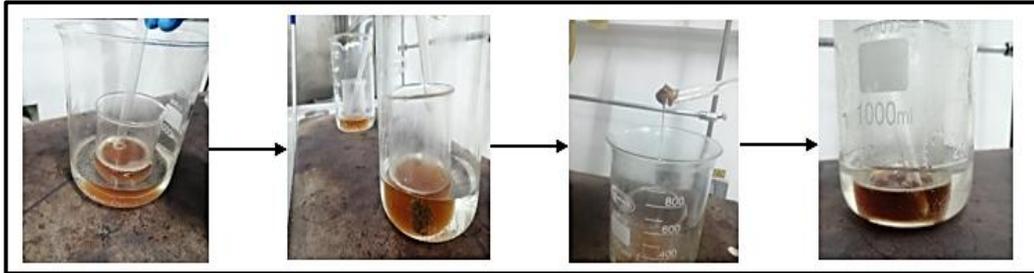
$$(9,75 \text{ g lípidos}) \times \left(\frac{1 \text{ mol lípidos}}{282,47 \text{ g lípidos}}\right) \times \left(\frac{8 \text{ mol etanol}}{1 \text{ mol lípidos}}\right) \times \left(\frac{46,07 \text{ g etanol}}{1 \text{ mol etanol}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mL etanol}}{0,789 \text{ g etanol}}\right) = 16 \text{ mL etanol}$$

$$V \text{ lípidos (mL)} = \frac{m}{\rho \text{ lípidos}} = \frac{9,75 \text{ g}}{0,895 \text{ g/mL}} = 10,894 \text{ mL}$$

$$V \text{ Ác. Sulfurico (mL)} = \frac{V \text{ lípidos} + V \text{ etanol}}{100} = \frac{10,894 \text{ mL} + 16,12 \text{ mL}}{100} = 0,270 \text{ mL}$$

Figura 29.

Resultados de la reacción de esterificación



Nota. Esta figura muestra los resultados de la reacción de esterificación para la obtención del biodiésel realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Para el montaje se empleó un baño María con un rango de temperatura de calentamiento de 60 a 70°C monitoreados a través de un termómetro para mantener las condiciones óptimas para que ocurra la reacción.

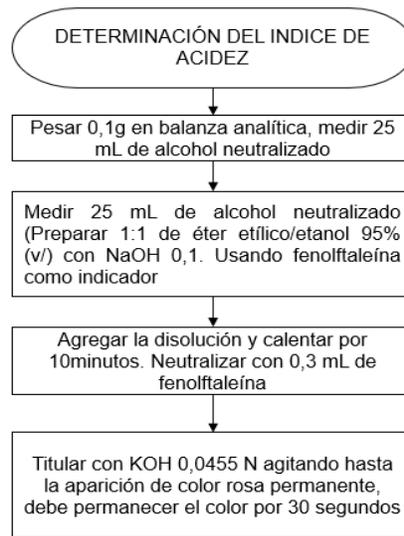
Al iniciar el procedimiento con la adición de la mezcla alcohol-catalizador se denota el cambio de coloración debido a la interacción molecular con los lípidos y la formación de esteres reduciendo la concentración de ácidos grasos libres presentes en la muestra el cual es dependiente de la tonalidad de la materia prima. Adicionalmente, se observó coágulos o aglutinaciones relacionados a cambios de temperatura y agitación fuera de los rangos de la reacción, humedad del ambiente por corrientes de aire presentes en el laboratorio debido a que el beaker se encontraba a la intemperie y por exceso de concentración de catalizador empleado.

Debido a la alta presencia de ácidos grasos libres, es necesario determinar el índice de acidez y una vez realizada la esterificación, se realizará la réplica de esta reacción hasta obtener un valor menor al 3% con el fin de proceder a la reacción de transesterificación.

a. Índice de acidez. Técnica experimental fundamentada en la norma NTC 218

Figura 30.

Determinación del índice de acidez en la reacción de esterificación



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del índice de acidez en la reacción de esterificación. Tomado de: J. A. Rodríguez A, “Determinación del índice de acidez y acidez total de cinco mayonesas”, Rev. Investig., pp. 843-849, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/ID/CyTA/files/volume1/2/10/146.pdf>.

Figura 31.

Índice de acidez para la reacción de esterificación



Nota. La figura representa la determinación del índice de acidez en la reacción de esterificación para la obtención de biodiésel, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 36.

Datos obtenidos del índice de acidez para la reacción de esterificación

INDICE DE ACIDEZ REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN	MUESTRA 1	MUESTRA 2
REPLICA 1		
PESO (G)	0,18	0,15
SOSA CAUSTICA NAOH (ML)	4	4,4
REPLICA 2		
PESO (G)	0,18	0,15
SOSA CAUSTICA NAOH (ML)	1,2	1,5
REPLICA 3		
PESO (G)	0,18	0,15
SOSA CAUSTICA NAOH (ML)	0,22	0,25

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos del índice de acidez para la reacción de esterificación.

Calculo muestra 1, replica 1:

$$\% A. G. L. como Oleico = \frac{4 \text{ ml NaOH} * 1,74784}{0,18 \text{ g}} = 38,84\%$$

Tabla 37.

Resultados del índice de acidez de la reacción de esterificación

MEDICIÓN DEL INDICE DE ACIDEZ REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN	ÁCIDOS GRASOS LIBRES DE ÁCIDO OLEICO (%) REPLICA 1	ÁCIDOS GRASOS LIBRES DE ÁCIDO OLEICO (%) REPLICA 2	ÁCIDOS GRASOS LIBRES DE ÁCIDO OLEICO (%) REPLICA 3
MUESTRA 1	38,84	11,65	2,13
MUESTRA 2	51,27	17,48	2,91

Nota. Esta tabla muestra los resultados del índice de acidez presentes en el biodiésel, realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

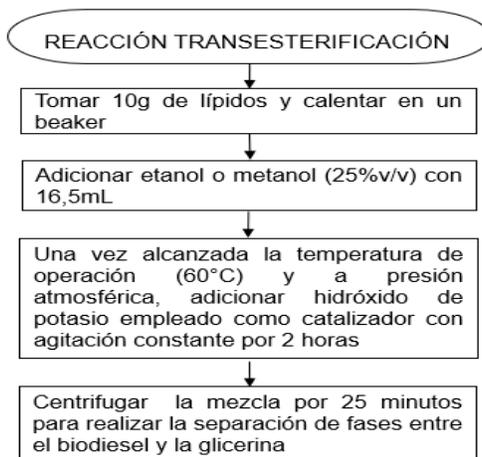
Según la literatura, las materias primas con porcentajes de acidez mayores al 20% requieren de dos a tres esterificaciones para reducir su porcentaje de ácidos grasos libres y obtener una acidez por debajo del 3% [62], parámetro deseado para realizar la reacción de transesterificación. De acuerdo a los resultados obtenidos, fue necesario realizar tres esterificaciones para reducir el contenido de acidez obteniendo un rango entre el 2,13 y 2,91%, favoreciendo la reacción de transesterificación y reduciendo la formación de jabón.

4.1.7.b. Transesterificación. En la reacción se utilizaron los siguientes parámetros:

- Tipo de alcohol: Etanol 96%
- Catalizador: Hidróxido de sodio 0,062N
- Tiempo de reacción: 2 horas
- Temperatura: 60°C - 70°C
- Relación molar lípidos: alcohol: 1:8

Figura 32.

Procedimiento para determinar la reacción de transesterificación



Nota. La figura representa el procedimiento para determinar la reacción de esterificación para la obtención del biodiésel.

Figura 33.

Montaje de la reacción de transesterificación



Nota. La figura representa el montaje de la reacción de transesterificación para la obtención del biodiésel.

Tabla 38.

Datos para determinar la reacción de transesterificación

REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN	PESO DE LIPIDOS (g)	ETANOL (mL)	HIDROXIDO DE SODIO (mL)
MUESTRA 1	9,75	16	0,2
MUESTRA 2	20,8	33,07	0,5

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación de la reacción de transesterificación para la obtención del biodiésel.

Cálculos muestra 1:

Relación 1:8

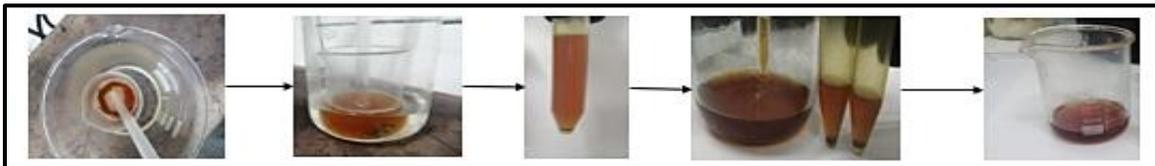
$$(9,75 \text{ g lípidos}) \times \left(\frac{1 \text{ mol lípidos}}{282,47 \text{ g lípidos}} \right) \times \left(\frac{8 \text{ mol etanol}}{1 \text{ mol lípidos}} \right) \times \left(\frac{46,07 \text{ g etanol}}{1 \text{ mol etanol}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ mL etanol}}{0,789 \text{ g etanol}} \right) = 16 \text{ mL etanol}$$

$$m \text{ etanol (g)} = V_{\text{etanol}} * \rho_{\text{etanol}} = 16,12 * 0,789 \text{ g/mL} = 12,71 \text{ g}$$

$$m \text{ NaOH (g)} = \frac{m_{\text{lípidos}} + m_{\text{etanol}}}{100} = \frac{9,75 \text{ g} + 12,71 \text{ g}}{100} = 0,2 \text{ g}$$

Figura 34.

Resultados de la reacción de transesterificación



Nota. Esta figura muestra los resultados de la reacción de transesterificación para la obtención del biodiésel realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Este procedimiento ocurre posteriormente a la reacción de esterificación bajo las mismas condiciones de calentamiento, agitación y tiempo de reacción.

Al iniciar el procedimiento con la adición de la mezcla alcohol-catalizador se denota el cambio de coloración debido a la interacción molecular con los esteres y la formación de glicerol y metil éster (biodiésel). Adicionalmente, se observó coágulos o aglutinaciones al igual que en la esterificación relacionados a cambios de temperatura y agitación fuera de los rangos de la reacción, humedad del ambiente por corrientes de aire presentes en el laboratorio debido a que el beaker se encontraba a la intemperie y por exceso de concentración de catalizador empleado.

Posteriormente, una vez terminada la reacción con un tiempo de 2 horas se realizó la separación de las fases formadas por medio de la operación de centrifugación como se observó en la siguiente figura.

Figura 35.

Resultados obtenidos de la operación de centrifugación



Nota. Esta figura muestra los resultados de la centrifugación

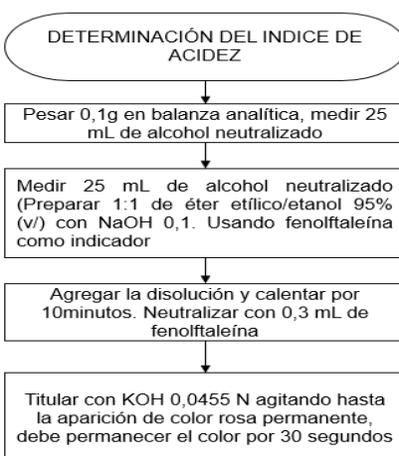
Durante el proceso de centrifuga se presencié la separación de fases del metil éster (biodiésel) y glicerol a partir de la diferencia de densidades y la tonalidad que cada uno presentaba, teniendo en cuenta que el biodiésel debe tener una densidad menor a 1,2613 g/mL valor correspondiente a la densidad de la glicerina a 20°C según la bibliografía. Al finalizar la separación, se realizó un lavado con agua destilada utilizando 5,6 mL correspondiente a la tercera parte del biodiésel obtenido que fue de 19,91 g obteniendo como resultado final 17 g de biodiésel y 0,87 g de glicerina contribuyendo a un rendimiento del 95% del metil éster.

4.1.7.c. Caracterización del biodiésel. Una vez realizado la reacción de transesterificación se realiza la caracterización del biodiésel a partir de:

4.1.7.c.i. Índice de acidez. Técnica experimental basada en la norma ASTM D664

Figura 36.

Determinación del índice de acidez en el biodiésel



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del índice de acidez. Tomado de: J. A. Rodríguez A, “Determinación del índice de acidez y acidez total de cinco mayonesas”, Rev. Investig., pp. 843-849, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/ID/CyTA/files/volume1/2/10/146.pdf>.

Figura 37.

Índice de acidez en el biodiésel



Nota. La figura representa la determinación del índice de acidez del biodiésel, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 39.

Datos obtenidos del índice de acidez del biodiésel

INDICE DE ACIDEZ	PESO DE LA MUESTRA (g)	ALCOHOL NEUTRALIZADO (mL)	SOSA CAUSTICA NAOH (mL)
MUESTRA 1	0,17	25	0,18
MUESTRA 2	0,12	25	0,2

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A en la realización del índice de acidez del biodiésel que incluye el alcohol neutralizado, la soda caustica y el peso de la muestra.

Calculo muestra 1:

$$\% \text{ A. G. L. como Oleico} = \frac{0,18 \text{ ml NaOH} * 1,74784}{0,17 \text{ g}} = 1,85\%$$

Tabla 40.

Resultados del índice de acidez

MEDICIÓN DEL INDICE DE ACIDEZ DEL BIODIESEL	ÁCIDOS GRASOS LIBRES DE ÁCIDO OLEICO (%)	ASTM D664
MUESTRA 1	1,85	<3%
MUESTRA 2	2,91	<3%

Nota. Esta tabla muestra los resultados del índice de acidez presente en el biodiésel, realizados en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

El índice de acidez fue evaluado según la ASTM D664 con el fin de determinar la cantidad de ácidos grasos libres en el biodiésel, el cual debe ser menor al 3%.

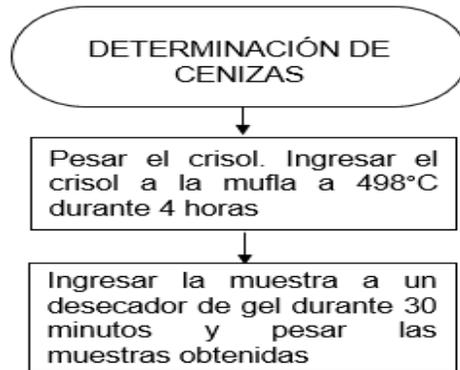
De acuerdo a los parámetros obtenidos se encuentran por debajo de ese umbral, lo que significa que las reacciones de esterificación ácida y transesterificación alcalina convirtieron los ácidos grasos libres en metil ésteres [72].

Asimismo, la presencia de una elevada acidez ocasiona corrosión del motor y degradación del biodiésel [28].

4.1.7.c.ii. Contenido de cenizas. Técnica experimental fundamentada en la norma ASTM D874. A continuación, se especifica el procedimiento para la ejecución de este parámetro:

Figura 38.

Procedimiento del contenido de cenizas en el biodiésel



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del contenido de cenizas para el lodo residual. Tomado de: Universidad tecnológica de Chile. "Química de alimentos -510144". [En línea]. Disponible en:

https://www.academia.edu/24997715/Gu%C3%ADa_de_Humedad_y_Cenizas_1.

[Acceso: noviembre 1, 2020]

Figura 39.

Cenizas presentes en el biodiésel



Nota. La figura representa las cenizas en el biodiésel, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 41.

Datos para la determinación de cenizas en el biodiésel

MEDICIÓN DE CENIZAS EN EL BIODIESEL	PESO DEL CRISOL SIN MUESTRA (g)	PESO DE LA MUESTRA (g)	PESO DEL CRISOL MÁS CENIZAS (g)
MUESTRA 1	22,3135	0,85	22,3136
MUESTRA 2	23,9340	0,98	23,9342

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del contenido de cenizas en el biodiésel.

Calculo muestra 1:

$$\%C_1 = \frac{22,3136g - 22,3135g}{0,85g} * 100 = 0,012\%$$

Tabla 42.

Resultados del contenido de cenizas en el biodiésel

MEDICIÓN DE CENIZAS EN EL BIODIESEL	PORCENTAJE DE CENIZAS (%)	ASTM D874
MUESTRA 1	0,012	<0,02
MUESTRA 2	0,020	<0,02

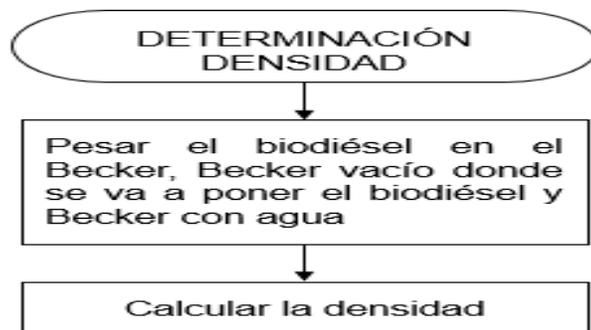
Nota. Esta tabla muestra los resultados del contenido de cenizas en el biodiésel realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según la ASTM D874 el contenido de cenizas presentes en el biodiésel debe ser inferior a 0,02%. De acuerdo con los parámetros obtenidos se encuentran entre 0,012 y 0,020%, de no ser así el biodiésel obtenido genera desgastes en el inyector e incrustaciones en el motor. Esto ocurre por la presencia de sólidos abrasivos y catalizadores no eliminados durante la purificación del biodiésel [73].

4.1.7.c.iii. Densidad.Técnica experimental fundamentada en la norma NTC 5444.

Figura 40.

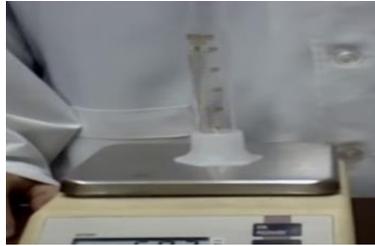
Procedimiento para la densidad



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación de la densidad Tomado de: R. Bernal. Elaboración y caracterización de biodiésel como energía alternativa a partir de aceite de pescado, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2019. Disponible en: <https://repositorio.unibague.edu.co/bitstream/20.500.12313/1288/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>

Figura 41.

Densidad en el biodiésel



Nota. La figura representa la determinación de la densidad en el biodiésel, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 43.

Datos para la determinación de la densidad en biodiésel

MEDICIÓN DE LA DENSIDAD	MASA DEL BODIESEL (g)	MASA DEL BECKER VACÍO DE BODIESEL (g)	MASA DEL AGUA (g)	MASA DEL BECKER VACÍO DEL AGUA (g)	DENSIDAD DEL AGUA (g/mL)
MUESTRA 1	50,5	33	54,14	34,66	1
MUESTRA 2	50,21	33,05	55,15	35,25	1

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación de la densidad del biodiésel.

Calculo muestra 1:

$$\rho = \left(\frac{50,5g - 33g}{54,14g - 34,66} \right) * (1g/mL) = 0,898g/mL$$

Tabla 44.

Resultados de la densidad del biodiésel

MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL BIODIESEL	DENSIDAD (g/mL)	DENSIDAD (Kg/m ³)	ASTM D4052
MUESTRA 1	0,898	898	860-900
MUESTRA 2	0,862	862	860-900

Nota. Esta tabla muestra los resultados de la densidad del biodiésel realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según la ASTM D4052 la densidad del biodiésel debe encontrarse en un rango de 860 a 900 kg/m³. De acuerdo a los datos obtenidos la densidad del biodiésel fue de 862 y 898 kg/m³ de las muestras analizadas, este parámetro determina la eficiencia de la atomización del combustible durante su combustión [72]. Asimismo, una densidad fuera de los rangos estipulados en la regulación para su comercialización afectará el poder calorífico del biocombustible, así como su consumo en el motor, dado que los inyectores trabajan con un volumen determinado de combustible [72].

4.1.7.c.iv. Punto de inflamación. Técnica experimental basada en la norma NTC 5444.

Figura 42.

Procedimiento para determinar el punto de inflamación



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del punto de inflamación en el biodiésel.

Figura 43.

Punto de inflamación en el biodiésel



Nota. La figura representa la determinación del punto de inflamación en el biodiésel.

Tabla 45.

Datos obtenidos del punto de inflamación del biodiésel

MEDICIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN	PESO DE LA MUESTRA (g)	TEMPERATURA (°C)	ASTM D93
MUESTRA 1	0,96	122	>120
MUESTRA 2	1,02	125	>120

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del punto de inflamación del biodiésel.

El punto de inflamación es la temperatura mínima a la cual los vapores del combustible se hacen inflamables el cual debe ser superior a 120°C según la ASTM D93.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos, el biodiésel cumple con los requisitos normativos, lo que implica su facilidad en su manipulación, transporte y almacenamiento, indispensable para la seguridad industrial. Por otra parte, bajos puntos de inflamación

indicarían la presencia de alcohol residual en el biodiésel obtenido [74] lo cual lo hace peligroso por su fácil inflamación ante una fuente de ignición.

4.1.7.c.v. Índice de peróxidos. Técnica experimental fundamentada en la norma NTC 5444.

Figura 44.

Procedimiento para determinar el índice de peróxidos



Nota. La figura representa el procedimiento del índice de peróxidos. Tomado de: C. Velásquez. Estudio de estabilidad en almacén del biodiésel obtenido de aceite de soya, palma africana, maíz, higuera y piñón, tesis pre. Carrera de Agroindustria alimentaria, Universidad de Zamorano, Zamorano, Honduras, 2007. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1271/1/AGI-2007-T003.pdf>

Figura 45.

Índice de peróxidos en el biodiésel



Nota. La figura representa la determinación del índice de peróxidos en el biodiésel, realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Tabla 46.

Datos para la determinación del índice de peróxidos en biodiésel

MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE PERÓXIDOS	PESO DE LA MUESTRA (g)	SOLUCIÓN DE YODURO DE POTASIO		TITULACIÓN	
		H ₂ O DESTILADA (mL)	KI (mL)	TIOSULFATO DE SODIO NA ₂ S ₂ O ₃ (0,1131N) (mL)	ALMIDÓN (mL)
MUESTRA 1	2	130	0,5	0,61	1
MUESTRA 2	2	130	0,5	0,63	1
BLANCO	-	130	0,5	0,51	1

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del índice de peróxidos en el biodiésel.

Calculo muestra 1:

$$\text{Indice de peróxidos (I.P)} = \frac{(0,61 - 0,51\text{mL}) * 0,2027\text{N} * 1000}{2\text{g}} = 4,175$$

Tabla 47.

Resultados del índice de peróxidos en el biodiésel

MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE PERÓXIDOS	ÍNDICE DE PERÓXIDOS
Muestra 1	4,175
Muestra 2	5,125

Nota. Esta tabla muestra los resultados del índice de peróxidos del biodiésel realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según la literatura el índice de peróxidos determina el contenido de peróxidos presentes en la muestra analizada que ocasionan la oxidación del yoduro de potasio, expresados en mili-equivalentes de oxígeno activo por kg de muestra [62].

En cuanto a los valores obtenidos, se presentaron valores en un rango de 4,175 a 5,125 lo cual representa que el biodiésel tendrá una combustión más completa [69], reduciendo el riesgo de provocar un enranciamiento oxidativo del biocombustible [62]

Por otra parte, la alta presencia de peróxidos puede incidir en la formación de aldehídos y ácidos que reacciones con los esteres metílicos provocar inestabilidad oxidativa y una reducción en el rendimiento del biodiésel [84].

4.1.7.c.vi. Índice de yodo. Técnica experimental fundamentada en la norma EN 14111.

Figura 46.

Procedimiento del índice de yodo



Nota. La figura representa el procedimiento para la determinación del índice de yodo. Tomado de: Grasas “Índice de yodo”. Disponible en: <http://docencia.udea.edu.co/qf/grasas/yodo.html>. [Acceso: noviembre 1,2020]

Figura 47.

Índice de yodo en el biodiésel



Nota. La figura representa la determinación del índice de yodo en el biodiésel.

Tabla 48.

Datos para la determinación del índice de yodo en el biodiésel

MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE YODO	PESO DE LA MUESTRA (g)	SOLUCIÓN DE YODURO DE POTASIO		TITULACIÓN	
		H ₂ O DESTILADA (mL)	KI (mL)	TIOSULFATO DE SODIO Na ₂ S ₂ O ₃ (0,1131N) (mL)	ALMIDÓN (mL)
MUESTRA 1	0,49	100	25	16,69	1
MUESTRA 2	0,5	100	25	17	1
BLANCO	-	100	25	20,5	1

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A para la determinación del índice de yodo en el biodiésel.

Calculo muestra 1:

$$\text{Índice de Yodo} = \frac{((20,5\text{mL} - 16,69\text{mL}) * 0,1131 \frac{\text{eq}}{\text{l}} * 0,127}{0,49\text{g}}) * 100 = 11,16 \text{ I}_2 / \text{g}$$

Tabla 49.

Resultados del índice de yodo en el biodiésel

MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE YODO	ÍNDICE DE YODO	EN 14111
Muestra 1	11,16	<120
Muestra 2	10,26	<120

Nota. Esta tabla muestra los resultados del índice de yodo en el biodiésel realizado en el laboratorio de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Según la EN 14111 el índice de yodo debe ser menor a 120 g I₂ / g de muestra.

Teniendo en cuenta los parámetros obtenidos, el biodiésel cumple con la normativa con un valor entre 10,26 y 11,16 siendo un valor bajo comparado con el umbral, lo cual se debe al origen de la materia prima, implicando un rendimiento óptimo del biocombustible [85].

De igual modo, un valor elevado en el índice de yodo implicaría una baja estabilidad y reducción en su número de cetanos, generando deterioro en el combustible [33], debido a que se favorecen procesos de oxidación, polimerización e hidrólisis [85].

5. SIMULACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

5.1. Modelamiento del proceso

En el siguiente capítulo se realiza el escalamiento de nivel laboratorio a planta piloto mediante los programas de Matlab y Aspen Hysys, con base a la información obtenida a nivel experimental y bibliográficamente. Partiendo de una generación de 65 ton/mes de lodos residuales de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Matlab se utilizó con el fin de determinar el comportamiento de la extracción que corresponde al 20% de los lípidos presentes en el lodo residual, en 1 hora de operación, la cual es tipo sólido- líquido en el que interactúa el solvente y el lodo residual de la empresa C.I. SIGRA S.A.

Evaluando el comportamiento que tiene la molécula de la trioleína en el sistema de extracción, a partir de una ecuación diferencial que permite conocer el comportamiento de algunos parámetros [86] como:

- Cambio del perfil de concentración de los lípidos en el solvente con respecto al tiempo de extracción en una hora de operación
- Velocidad de flujo del solvente.

Una vez obtenidos el flujo de lípidos extraídos se utilizó el software Aspen Hysys para la obtención de biodiésel, teniendo en cuenta parámetros [87] como:

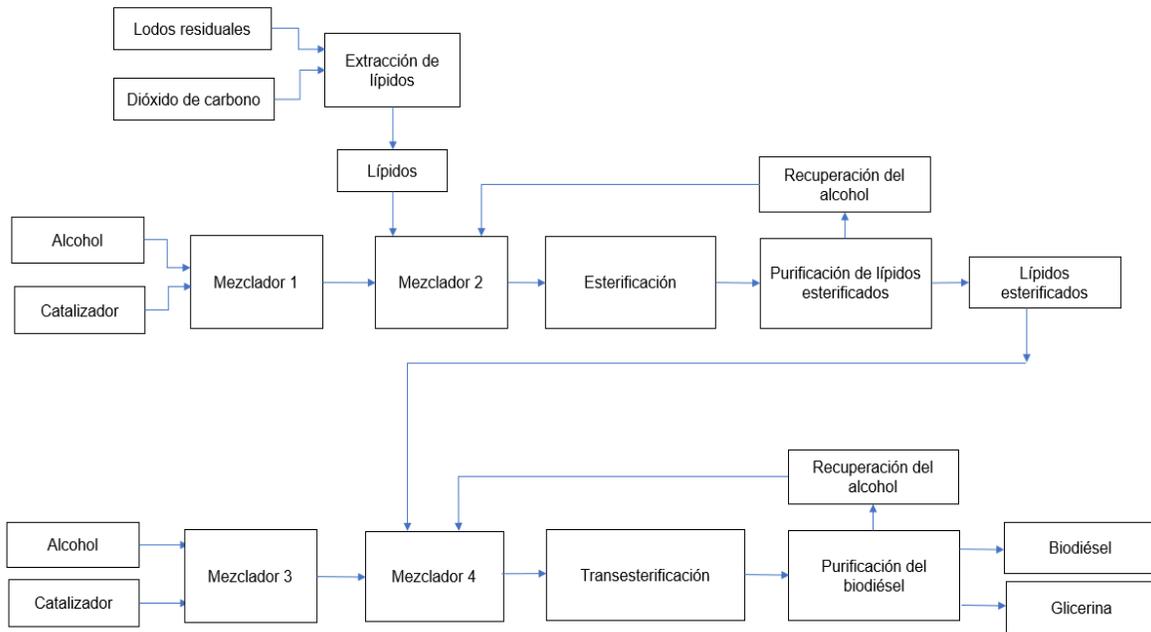
- Temperatura
- Concentración de catalizador
- Relación Molar alcohol: lípidos

En la determinación de los equipos se tuvo en cuenta la información de fuentes bibliográficas que realizan el escalamiento de plantas piloto para la producción de biodiésel a partir del programa Aspen Hysys versión 9 [87].

En el siguiente diagrama de etapas del proceso, se representa el esquema general para la producción de biodiésel, donde la sección enmarcada en rojo corresponde a la extracción de lípidos realizada en Matlab, mientras que las demás etapas se ejecutaron en Aspen Hysys.

Figura 48.

Esquema general del proceso para la producción de biodiésel



Nota. Este diagrama representa el proceso de producción de biodiésel a partir de los lodos residuales de la empresa C.I. SIGRA S.A.

La descripción de cada etapa se especifica a continuación:

5.1.1. Extracción de lípidos.

La extracción sólido-líquido o lixiviación es una operación de transferencia de masa que consiste en la remoción de un componente soluble (soluto) inmerso en un sólido mediante el uso de un solvente [88].

5.1.2. Esterificación.

Una vez obtenidos los lípidos, se utiliza el simulador Aspen Hysys, en el cual se realiza el proceso de esterificación.

Esta etapa se llevó a cabo con el fin de reducir los ácidos grasos libres presentes en los lípidos, reduciéndose al 1% [89], permitiendo favorecer la producción de biodiésel.

5.1.3. Purificación de lípidos.

Cuando los lípidos son esterificados son sometidos a la etapa de purificación en el cual se realiza la separación del metanol que no reaccionó para recircular, con un alto contenido de pureza del orden del 80% al 95% [87], con el fin de ser aprovechado y reducir costos asociados al uso de reactivos, agua y catalizador empleado en los lípidos esterificados, que serán llevados posteriormente a la etapa de transesterificación.

5.1.4. *Transesterificación.*

Con los lípidos esterificados, se realiza la transesterificación. Se estipula una relación molar alcohol - aceite 7:1 en presencia de hidróxido de sodio como catalizador, con 1% en peso respecto a la masa de los lípidos esterificados [90], con el objeto de tener un grado de conversión superior al 90%.

5.1.5. *Purificación del biodiésel.*

En esta última etapa, se separa el metanol para recircular del 80% al 95% [94], biodiésel para su comercialización y glicerina como subproducto que se forma durante la reacción de transesterificación [87].

5.2. Desarrollo de la simulación

5.2.1. *Recuperación de lípidos por extracción sólido-líquido*

La extracción de lípidos en los lodos residuales de la empresa C.I. SIGRA S.A. Se plantea realizar una recuperación del material aprovechable a partir de esta técnica de extracción, basándose en la información recopilada por diferentes fuentes documentales que soportan este método de recuperación de triglicéridos [90].

A nivel experimental la extracción de lípidos es realizada a través del extractor Soxhlet empleando hexano, éter de petróleo u otros solventes no polares, mientras que a escala industrial se emplean solventes de menor costo para la rentabilidad de los procesos, como es el caso de la extracción supercrítica con dióxido de carbono.

5.2.1.a. Extracción Supercrítica con dióxido de carbono. Este tipo de extracción consiste en presurizar el dióxido de carbono a presiones y temperaturas superiores a sus

condiciones críticas con el fin de otorgarle propiedades de un fluido de baja viscosidad, con la capacidad de mejorar el contacto íntimo con el soluto (materia prima) [86]. Cuando se despresuriza, retoma a su estado inicial con fase gaseosa, perdiendo sus características como solvente.

Las condiciones a las que puede operar el solvente son:

- Presiones mayores a 827 bar
- Temperaturas mayores a 80°C

Este método de extracción se seleccionó teniendo en cuenta las bases bibliográficas de esta operación unitaria a nivel industrial [86] bajo las condiciones de 820 bar y 80°C a velocidad de flujo de CO₂ de 3,33 lb/min [86] para garantizar una mayor extracción de lípidos.

5.2.1.b. Comportamiento del sistema de extracción. Teniendo en cuenta los parámetros antes mencionados y con base a fuentes bibliográficas se plantea un modelo basado en el planteamiento de una ecuación diferencial parcial en función de los efectos convectivos, conductivos, parámetros relacionados al tamaño de la partícula y condiciones de frontera [90].

5.2.1.c. Comportamiento del Solvente. Para estimar el comportamiento del dióxido de carbono en la etapa de extracción es necesario comprender dos parámetros con relación a la interacción entre los compuestos químicos y el solvente, los cuales son [91]:

- Contacto íntimo entre el lodo tratado y el dióxido de carbono para disolver el compuesto soluble.
- Separación del solvente y el soluto recuperado

5.2.1.d. Descripción del modelo. Para la compresión del modelo diferencial descrito por varios autores [90], la ecuación cuenta con cuatro elementos [86], de los cuales, el primero corresponde al cambio de la concentración de los lípidos en el solvente con

respecto al tiempo cuando ocurre la extracción, el segundo elemento contempla el cambio de la concentración en función de la longitud del extractor y la velocidad de flujo del solvente, el tercero, relaciona la concentración de los lípidos atrapados en el lodo en función del tiempo y de la densidad de este, y finalmente, el último elemento describe el comportamiento de los lípidos libres en la superficie del sólido no soluble [90] .

5.2.1.d.i. Hipótesis del modelo. Para el desarrollo del modelo se realizan las siguientes hipótesis [86]:

1. Distribución uniforme de la velocidad de flujo del dióxido de carbono (u) en todas las secciones del extractor.
2. Durante la extracción, la fracción volumétrica de los lípidos (ε) no es afectada por la reducción de la masa del lodo residual.
3. Los lípidos se encuentran distribuidos en dos fases en equilibrio dentro del lodo [90]:
 - Fase de soluto atrapado en las partículas: Ocupa una fracción (ϕ_t) del volumen de las partículas y se considera constante, definiendo la concentración promedio de lípidos atrapados como (P)
 - Fase del soluto libre en la superficie de las partículas: La concentración de esta fase es la misma en cada partícula y es igual a la densidad del soluto puro (ρ_o).
4. La fracción volumétrica del lodo lleno de lípidos antes de la extracción se define como:
$$\phi_f = 1 - \phi_t$$
5. La fracción del lodo ocupado por los lípidos libres durante la extracción se define como: $\psi\phi_f$ con $\psi \geq 1$, teniendo en cuenta que (ψ_o) es la fracción volumétrica de lípidos libres al inicio de la extracción (diferente de 1)

Una vez iniciado el proceso de extracción, la fase lipídica se desplaza del lodo hacia el solvente y mediante las hipótesis planteadas a través del desarrollo experimental de diferentes autores, se presenta la ecuación diferencial parcial de primer orden [86] como se observa a continuación:

Ecuación 11.

Ecuación diferencial parcial del comportamiento de la extracción

$$\varepsilon * \rho_f * \frac{\partial C}{\partial t} + u * \rho_f * \frac{\partial C}{\partial z} + (1 - \varepsilon) * \phi_t * \rho_s * \frac{\partial P}{\partial t} + (1 - \varepsilon) * \phi_f * \rho_o * \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0$$

ε : Fracción volumétrica de los lípidos.

ρ_f : Densidad del solvente (g/cm^3)

C : Concentración de lípidos en el solvente en términos de masa del soluto por unidad de masa del solvente (g/g)

t : Tiempo de extracción (min)

u : Velocidad de flujo del dióxido de carbono (cm/min)

z : Coordenada axial en el extractor (longitud) (cm)

ϕ_t : Fracción de lípidos atrapados

ρ_s : Densidad del lodo no soluble (g/cm^3)

P : Concentración promedio de lípidos atrapados en el sólido (g/g).

ϕ_f : Fracción volumétrica del lodo lleno de lípidos libres antes de la extracción

ρ_o : Densidad de lípidos puros (g/cm^3)

ψ_o : Fracción volumétrica de lípidos libre en el inicio de la extracción

Nota. Esta figura muestra la ecuación diferencial parcial empleada para entender el comportamiento de las variables de proceso en la extracción de lípidos. Tomado de: E. Reverchon y C. Marrone. *Modeling and Simulation of the Supercritical CO₂ Extraction of Vegetable Oils*, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oil

5.2.1.d.ii. Parámetros adicionales del modelo. En cuanto al tercer y cuarto elemento se plantean dos balances de masa relacionados a las fases en equilibrio de los lípidos [91], donde la fase de lípidos libres está definida como:

Figura 49

Balance de masa relacionado al tercer elemento

$$\rho_o * \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{K_f * a * (\rho_o - K_\psi * C)}{(1 - \varepsilon) * \phi_f}$$

Nota. Esta figura muestra un balance de masa relacionado a la fase en equilibrio de los lípidos empleados para entender el comportamiento de las variables de proceso en la extracción de lípidos. Tomado de: E. Reverchon y C. Marrone. *Modeling and Simulation of the Supercritical CO2 Extraction of Vegetable Oils*, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oils

Y la fase de los lípidos atrapados en el lodo como:

Figura 50.

Balance de masa relacionado al cuarto elemento

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{K_i * a * (P - K_p * C)}{(1 - \varepsilon) * \phi_t}$$

Nota. Esta figura muestra un balance de masa relacionado a la fase en equilibrio de los lípidos empleados para entender el comportamiento de las variables de proceso en la extracción de lípidos. Tomado de: E. Reverchon y C. Marrone. *Modeling and Simulation of the Supercritical CO2 Extraction of Vegetable Oils*, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oils

5.2.1.d.iii. Condiciones iniciales y de frontera. Para la simulación de la ecuación diferencial, las fuentes documentales sugieren especificar condiciones iniciales respecto a la concentración de lípidos, concentración promedio de lípidos atrapados en lodo y concentración de lípidos libres en la superficie del sólido [86], como se observa a continuación:

Figura 51.

Condiciones iniciales de frontera

Condiciones adicionales:

En el tiempo $t = 0$: $C = C_0$; $P = P_0$; $\psi = \psi_0$

Condiciones de Frontera:

En la longitud $z = 0$: $C = 0$

Nota. Esta figura muestra las condiciones iniciales empleadas para entender el comportamiento de las variables de proceso en la extracción de lípidos. Tomado de: E. Reverchon y C. Marrone. Modeling and Simulation of the Supercritical CO₂ Extraction of Vegetable Oils, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oils

Para la concentración inicial de lípidos presentes en los lodos residuales de la empresa C.I. SIGRA S. A. Se determinó una concentración mínima del 20% de triglicéridos a partir de los datos obtenidos experimentalmente.

Respecto a la concentración promedio de lípidos atrapados en el lodo (P_0), antes de iniciar la extracción, una parte de los lípidos en el lodo es saturada por el dióxido de carbono implicando que la fase de lípidos atrapada y el solvente se encuentren en equilibrio, por lo tanto, según las hipótesis planteadas por diferentes fuentes bibliográficas la concentración es determinada de la siguiente manera [90]:

Ecuación 12.

Ecuación de la concentración de los lípidos atrapados en el lodo

$$P_o = K_p * C$$

Nota. Esta figura muestra la concentración de los lípidos atrapados en el lodo para entender el comportamiento de las variables de proceso en la extracción de lípidos. Tomado de: E. Reverchon y C. Marrone. *Modeling and Simulation of the Supercritical CO₂ Extraction of Vegetable Oils*, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oils

Por otro lado, la fracción volumétrica de lípidos libre en el inicio de la extracción es de 0.8 y el tiempo inicial es de 0 min [90], datos determinados a lo largo del desarrollo experimental de diferentes procesos de extracción de lípidos en tierras de blanqueo utilizados como referencia para evaluar el comportamiento de la extracción en la empresa C.I. SIGRA S.A.

5.2.2. Simulación de la extracción sólido-líquido

Una vez específico las condiciones de frontera y las condiciones iniciales del proceso, se precisan los parámetros de la ecuación diferencial para una extracción de 18,05 kg/h de lípidos correspondiente al 20% de la alimentación [88], de los lodos residuales de la empresa SIGRA S.A en los cuales se generan 65 ton/mes.

Ecuación 13.

Flujo de lípidos extraídos

$$\text{Lípidos extraídos: } 65 \frac{\text{ton}}{\text{mes}} \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ Ton}} = 90,27 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 20\% = 18,05 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Nota. Esta figura muestra el flujo de lípidos extraídos

Estos parámetros fueron tomados de la literatura de procesos de recuperación de grasas en tierras de blanqueo a nivel experimental y a escala piloto como guía base del comportamiento de la transferencia de masa entre el solvente y los lípidos a extraer, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 50.

Parámetros de la ecuación diferencial

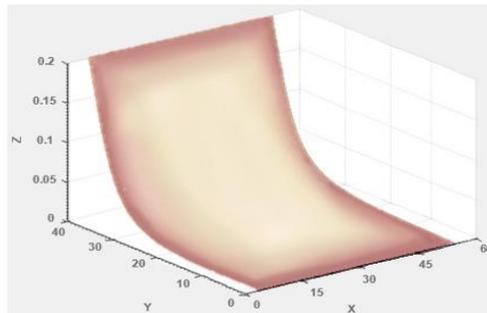
PARÁMETRO	VARIABLE	VALOR NUMÉRICO
FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL FLUIDO	ε	0.40
DENSIDAD DEL DIOXIDO DE CARBONO [g/cm ³]	ρ_f	0.87
FRACCIÓN DE LÍPIDOS ATRAPADOS EN EL LODO RESIDUAL	ϕ_t	0.20
DENSIDAD DEL LODO [g/cm ³]	ρ_s	1.98
RESISTENCIA A LA TRANSFERENCIA DE MASA INTERNA (m/s)	K_i	3×10^{-7}
ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS DE LA TIERRA (1/cm)	α	300
CONSTANTE DE EQUILIBRIO ENTRE EL SOLVENTE Y LA FASE DE SOLUTO LIBRE [g/cm ³]	K_ψ	112,5
CONSTANTE DE EQUILIBRIO ENTRE LA FASE ATRAPADA Y EL SOLVENTE (g/g)	K_p	42,2
RESISTENCIA A LA TRANSFERENCIA EXTERNA DE MASA (m/s)	K_f	$1,64 \times 10^{-7}$
FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL LODO LLENO DE LÍPIDOS LIBRES ANTES DE LA EXTRACCIÓN	ϕ_f	0.80
DENSIDAD DE LÍPIDOS [g/cm ³]	ρ_o	0.85

Nota. Esta tabla muestra parámetros de la ecuación diferencial. Tomado de: E. Reverchon y C. Marrone. *Modeling and Simulation of the Supercritical CO2 Extraction of Vegetable Oils*, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oils

5.2.3. Análisis de resultados de la simulación en Matlab

Figura 52.

Perfil de concentración de lípidos extraídos



Nota. Esta figura representa el perfil de concentración de lípidos extraídos.

Según el comportamiento de la gráfica, se puede observar el perfil de concentración de los lípidos arrastrados por el dióxido de carbono (z) en función del tiempo (x) y la longitud del extractor (y).

Según la bibliografía la variable de proceso más importante en la ecuación diferencial es la velocidad de flujo del dióxido de carbono, debido a que una variación considerable de este parámetro permite aumentar la extracción de lípidos, en un menor tiempo de operación [92].

Según la gráfica, se puede observar que la operación realiza una extracción con un comportamiento progresivo en un tiempo de operación de una hora, con una velocidad de flujo del solvente de 0,029 Kg/s valor proporcional a 90,27 Kg/h. A partir de una relación 1:1 respecto al peso del lodo residual y peso del solvente, debido a su alta eficiencia del (85%) a condiciones supercríticas [90]. El cual fue determinado mediante los parámetros iniciales de concentración y la interacción entre el dióxido de carbono y

el lodo residual [86]. La capacidad del extractor según la bibliografía se encuentra en un rango de 0,6L a 13L [91]

5.2.4. Producción del Biodiésel en Aspen Hysys

Una vez obtenido los lípidos, se procede al siguiente software, el cual permite hacer la simulación para la transformación a biodiésel, en la cual se realizan dos simulaciones, con el fin de comparar el nivel de producción de biodiesel, los cuales se pueden desarrollar a partir de los lípidos obtenidos. Una vez obtenido los datos, se elige la simulación más adecuada y se le realiza un análisis de sensibilidad para determinar si los parámetros como reflujo en la columna de destilación y relación molar tienen mayor influencia para la producción de biodiesel.

A continuación, se especifican los flujos de alimentación para ambos procesos:

Ecuación 14.

Flujo volumétrico de metanol en la alimentación

$$\text{Metanol} = 18,05 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{ lípidos} * \left(\frac{1 \text{Kmol lípidos}}{885,432 \text{ Kg lípidos}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mol lípidos}}{1 \text{Kmol lípidos}} \right) * \left(\frac{7 \text{ mol metanol}}{1 \text{ mol lípidos}} \right) * \left(\frac{32,04 \text{ g metanol}}{1 \text{ mol metanol}} \right) * \left(\frac{1 \text{Kg metanol}}{1000 \text{g metanol}} \right) = \frac{4,57 \text{Kg}}{\text{h}}$$

Nota. Esta figura muestra el flujo volumétrico de metanol en la alimentación.

Donde:

Masa molar lípidos= 885,432 Kg/Kmol; Relación metanol: lípidos= 7:1; Masa molar del metanol= 32,04 g/mol

Ecuación 15.

Flujo másico del hidróxido de sodio en la alimentación

$$\text{NaOH} = 18,05 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 1\% = 0,18 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Nota. Esta figura muestra el flujo másico del hidróxido de sodio en la alimentación.

Ecuación 16.

Flujo másico de ácido sulfúrico en la alimentación

$$H_2SO_4 = 18,05 \frac{Kg}{h} * 5\% = 0,90 \frac{Kg}{h}$$

Nota. Esta figura muestra el flujo másico de ácido sulfúrico en la alimentación.

Las condiciones en las que opera cada simulación son [90]:

- Condiciones normales con 60°C y 4,6 bar
- Condiciones supercríticas con 60°C y 250 bar

5.2.4.a. Requerimientos de la simulación. Con el fin de realizar el diseño de la planta piloto, se deben tener en cuenta algunos parámetros como la temperatura, reactivos, productos, subproductos, paquetes termodinámicos empleados, entre otros.

5.2.4.a.i. Composición de los triglicéridos. Se especifica la composición de los triglicéridos según las fuentes documentales que manejan aceites de palma, palmiste y soya relacionando la composición de cada aceite, con los triglicéridos utilizados en el proceso [90]. Los cuales se representan a continuación.

Tabla 51.

Composición de triglicéridos utilizados en la simulación

ÁCIDO GRASO	NÚMERO LIPÍDICO	COMPOSICIÓN MÁSCICA (%) DE LOS ÁCIDOS GRASOS		
		ACEITE DE PALMA	ACEITE DE PALMISTE	ACEITE DE SOYA
Láurico	C12:0	<0,5	48,7	-
Mirístico	C14:0	0,5-2,0	15,6	< 0,3
Palmítico	C16:0	39,3-47,5	7,5	2,0 - 11,0

Tabla 50. Continuación.

Composición de triglicéridos utilizados en la simulación

Palmitoleico	C16:1	< 0,6	-	< 0,4
Esteárico	C18:0	3,5-6,0	1,8	2,0 - 6,0
Oleico	C18:1	36,0 - 44,0	14,8	17,0 - 57,0
Linoleico	C18:2	9,0-12,0	2,6	28,0 - 57,0
Linolénico	C18:3	< 0,5	0,1	2,0 - 10,0
Alquídicico	C20:0	< 1,0	0,1	-
FUENTE BIBLIOGRÁFICA		<p>M. A. AMADO D., Seguimiento a las pérdidas de fitonutrientes durante el proceso de refinación del aceite de palma. tesis pre., Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 2010. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/11056335.pdf [Acceso: noviembre 28, 2020]</p>	<p>Propiedades y usos del aceite de palmiste. “Composición de ácidos grasos de los aceites de palmiste media”. [En línea]. Disponible en: https://publicacion.es.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/925 [Acceso: noviembre 28, 2020]</p>	<p>La soya. “Composición de ácidos grasos del aceite de soya”. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4697/1/T196.pdf [Acceso: noviembre 28, 2020]</p>

Tabla 50. Continuación.

Composición de triglicéridos utilizados en la simulación

		COMPOSICIÓN MÁSCICA (%) PARA LA SIMULACIÓN
TRIGLICERIDOS	TRIPALMITINA	44,7
	TRISTEARINA	4,6
	TRIOLEINA	38,6
	TRILINOLEINA	12,1
BIBLIOGRAFÍA	M. Franco. Simulación del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales en condiciones súper - críticas, tesis pos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2013. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/41810657.pdf [Acceso: noviembre 28, 2020]	

Nota. Esta tabla muestra la composición de los triglicéridos empleados en la simulación en el software Aspen Hysys.

5.2.4.a.ii. Componentes. Los componentes requeridos para la simulación se muestran en la siguiente tabla, entre los cuales se incluye reactivos, triglicéridos, metil-esteres junto con su disponibilidad en el software Aspen Hysys para el proceso de producción de biodiésel a escala industrial. Es necesario revisar si el programa tiene los componentes que se requieren en la simulación como se describen a continuación

Tabla 52.*Componentes requeridos en la simulación*

	COMPUESTOS REQUERIDOS EN LA SIMULACIÓN	BASE DATOS DE ASPEN HYSYS
REACTIVOS	Metanol	Si se encuentra
	Ácido Sulfurico	Si se encuentra
	Hidróxido de Sodio	Si se encuentra
TRIGLICERIDOS	Trioleina	Si se encuentra
	Tripalmitina	No se encuentra
	Trilinoleina	No se encuentra
	Triestearina	No se encuentra
MÉTIL ESTERES	Metil Oleato	Si se encuentra
	Metil Linoleato	Si se encuentra
	Palmitato de Metilo	No se encuentra
	Estereato de Metilo	No se encuentra
SUBPRODUCTOS	Agua	Si se encuentra
	Glicerol	Si se encuentra

Nota. Esta tabla muestra los componentes requeridos en el proceso y si se encuentran o no en la base de datos del software de simulación.

Dado que la base de datos de Aspen Hysys no cuenta con la información de todas las moléculas requeridas, fue necesario emplear la herramienta HYPO MANAGER para la construcción de algunas moléculas, haciendo una recolección bibliográfica de sus propiedades, incluyendo temperatura de ebullición, temperatura crítica, presión crítica, volumen crítico, peso molecular, densidad y factor acéntrico [90], como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 53.

Propiedades de los componentes que no se encuentran en Hysys

COMPUESTO	TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (K)	PESO MOLECULAR (g/mol)	DENSIDAD (kg/m ³)	T _c (K)	P _c (bar)	V _c (cm ³ /gmol)	W FACTOR ACÉNTRICO
TRILINOLEINA	687,1	879,38	930	757,54	4,33	3292,7	1,7593
TRIPALMITINA	722,717	807,34	920	801,044	4,585	3082,1	1,7068
TRISTEARINA	727,27	891,48	910	800,149	4,168	3412,7	1,7567
PALMITATO DE METILO	686,596	270,46	880,4	861,837	12,5	1056,7	0,8811
ESTEREATO DE METILO	686,596	298,5	1007	850,305	11,46	1166,9	0,9509

Nota. Esta tabla muestra las propiedades de los componentes que no se encuentran en la base de datos de Aspen Hysys. Tomado de: M. Franco. *Simulación del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales en condiciones súper - críticas*, tesis pos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2013. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41810657.pdf>

5.2.4.a.iii. Descripción de los reactivos del proceso.

- Tipo de Alcohol: Para la selección del alcohol se tuvo en cuenta los rendimientos y la facilidad de separación que cada reactivo presenta.

Como se mencionó anteriormente, el reactivo utilizado a nivel laboratorio fue etanol, pero a escala industrial este alcohol logra un rendimiento del 70% al 80% mucho menor que la del metanol [98]. Así mismo, presenta dificultades en el proceso de separación debido a que genera azeótropos con el agua [98], lo que permite un incremento en el costo energético del proceso.

Por esta razón, se seleccionó el metanol para los sistemas reactivos de esterificación y transesterificación debido a que proporciona un alto grado de reactividad con rendimientos del 95 al 98% [97].

- Tipos de Catalizadores: Los tipos de catalizadores empleados en las reacciones del proceso se determinaron a partir de los datos obtenidos a escala experimental,

corroborando su uso industrial en procesos de producción de biodiésel mediante fuentes bibliográficas.

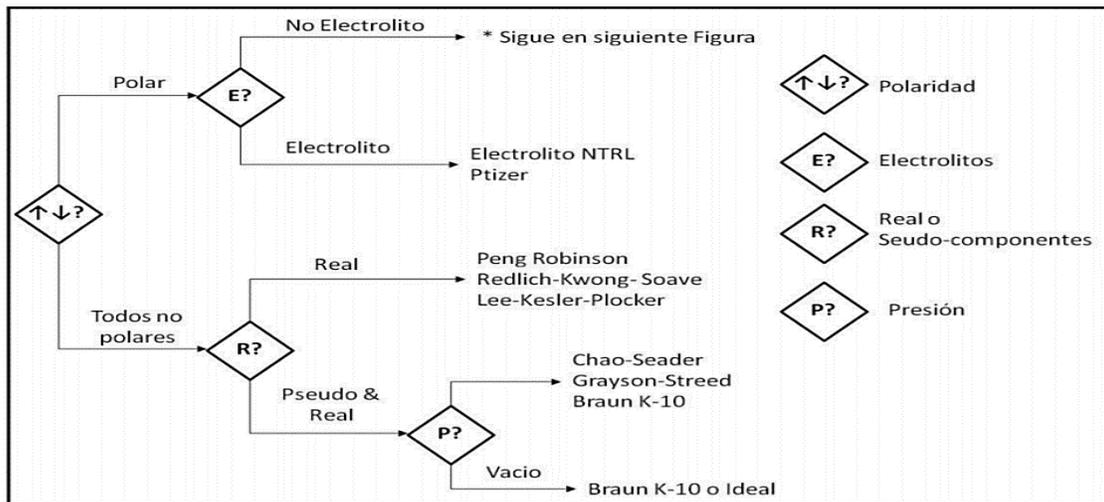
En la reacción de esterificación se empleó un catalizador de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una concentración del 5% en peso de los lípidos alimentados al proceso [97], el cual permite recudir la mayor cantidad de ácidos grasos libres, con un menor tiempo de reacción [89].

Así mismo, en la reacción de transesterificación se utilizó un catalizador básico de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración del 1% en peso de los lípidos esterificados [99].

5.2.4.a.iv. Modelo termodinámico. Se utilizaron los árboles de decisión sugeridos por Carlson para facilitar la selección de los modelos termodinámicos [90].

Figura 53.

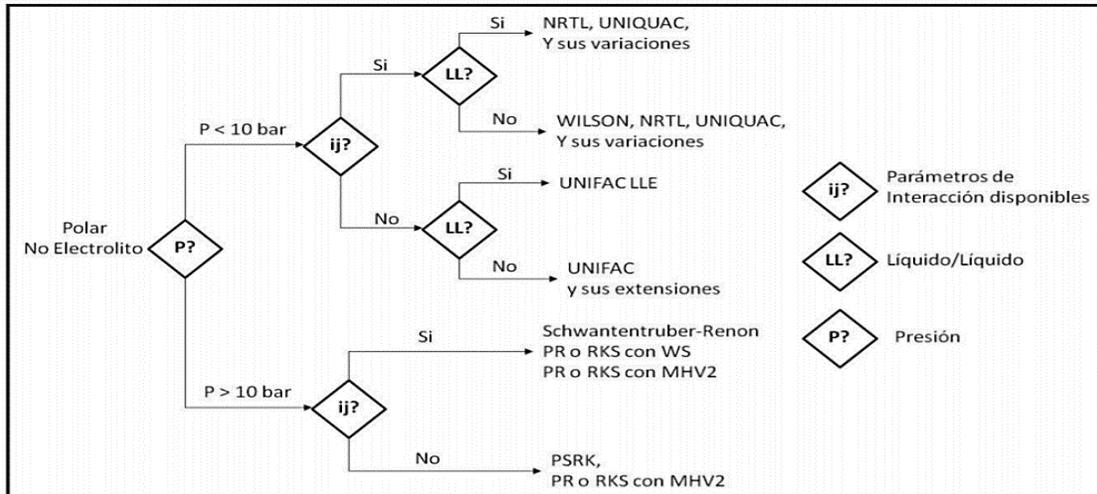
Primer paso para la selección del método termodinámico



Nota. Esta figura muestra el primer paso para la selección del método termodinámico. Tomado de: M. Franco. *Simulación del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales en condiciones súper - críticas*, tesis pos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2013. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41810657.pdf>

Figura 54.

Continuación para compuestos polares no-electrolitos



Nota. Esta figura muestra la continuación para compuestos polares no-electrolitos. Tomado de: M. Franco. *Simulación del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales en condiciones súper - críticas*, tesis pos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2013. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41810657.pdf>

De acuerdo con las características de los reactivos altamente polares como el metanol y la glicerina, el modelo escogido es NRTL, para condiciones de presión menores a 10 bar [89]. Este método tiene la característica de no cumplirse en fase vapor, por lo que se empleó otra ecuación de estado, la cual es PR Twu [99], que representa de forma adecuada el comportamiento de las fases liviana y pesada en la separación, esto con el objetivo de tener una aproximación de cómo es el comportamiento de la simulación. Sin embargo, según la bibliografía también se pueden emplear otros modelos como UNIQUAC y UNIFAC por las diferentes mezclas variables de ácidos grasos presentes en este tipo de procesos [91].

Adicionalmente, a condiciones super críticas se eligió Redlich Kwong, el cual ha demostrado predecir bien el equilibrio vapor-líquido a altas presiones, así como también la transición de fases de la metanolisis de los triglicéridos. Según lo reportado en la

literatura arroja buenos resultados y permite comparar los datos obtenidos en ambos métodos [90].

5.2.4.a.vi. Parámetros de operación. Con el fin de conocer el proceso más adecuado, se realiza una descripción de dos simulaciones a condiciones de presión menores a 10 bar y mayores a 10 bar.

- Condiciones de operación < 10 bar. En la siguiente tabla se describen los equipos utilizados y sus condiciones de operación de presión, temperatura y flujo másico. Los equipos que se utilizaron en la simulación son dos reactores, dos torres de destilación, una columna de extracción líquido-líquido, entre otros.

Las condiciones principales son de 60°C, 4,6 bar y el modelo termodinámico que se empleó NRTL y PR-Twu para la fase de vapor, el reactor utilizado es de conversión con relación 7:1 para esterificación y 7:1 para transesterificación cuyos parámetros se obtuvieron en la experimentación realizada en la empresa C.I. SIGRA S.A.

Adicionalmente, no se realizó el escalado con un reactor PFR o CSTR porque se desconocen algunos requerimientos de diseño, como los parámetros cinéticos relacionados con la velocidad de reacción, el factor de frecuencia, entre otros, a las condiciones de operación empleadas en este proceso.

A continuación, los balances de masa y energía para este proceso y sus condiciones iniciales enlistadas:

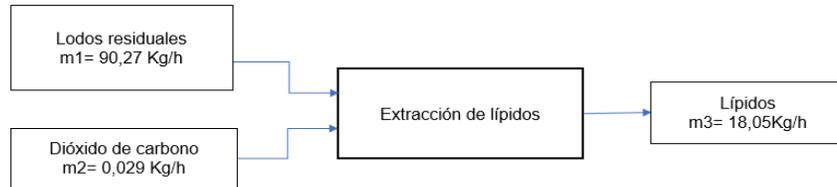
- Metanol = 4,57Kg/h
- Ácido Sulfúrico = 0,90 Kg/h
- Lípidos = 18,05 Kg/h
- Hidróxido de sodio = 0,18
- P = 4,6 bar
- T= 60°C
- Relación lípidos: lodos residuales= 1:1

A continuación, se realizaron los balances de masa:

- Extracción de lípidos

Figura 55.

Balance de masa de la extracción de lípidos con $P < 10$ bar

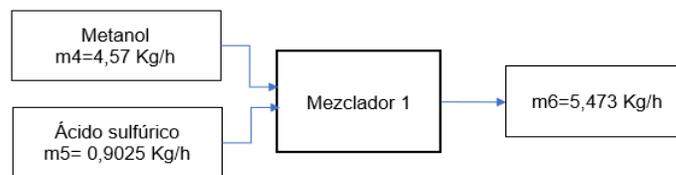


Nota. Esta figura muestra el balance de masa de la extracción de lípidos para la simulación a $P < 10$ bar.

- Mezclador 1

Figura 56.

Balance de masa del mezclador 1 con $P < 10$ bar

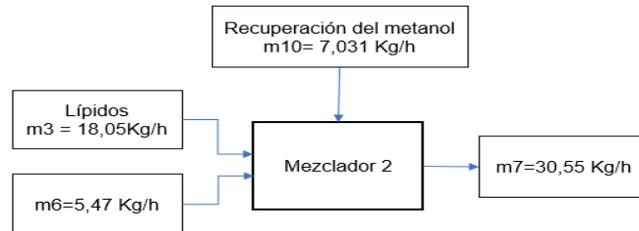


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 1 para la simulación a $P < 10$ bar.

- Mezclador 2

Figura 57.

Balance de masa del mezclador 2 con $P < 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 2 para la simulación a $P < 10$ bar.

- Reactor 1 reacción de esterificación

Figura 58.

Balance de masa del reactor 1 reacción de esterificación con $P < 10$ bar

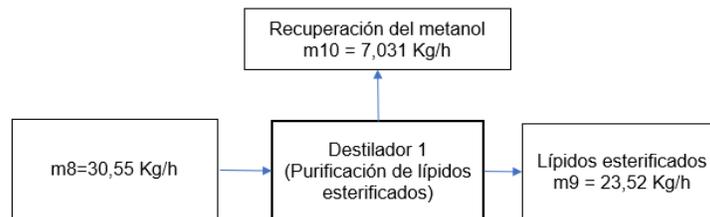


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del reactor 1 donde ocurre la reacción de esterificación para la simulación a condiciones de $P < 10$ bar.

- Destilador 1

Figura 59.

Balance de masa del destilador 1 con $P < 10$ bar

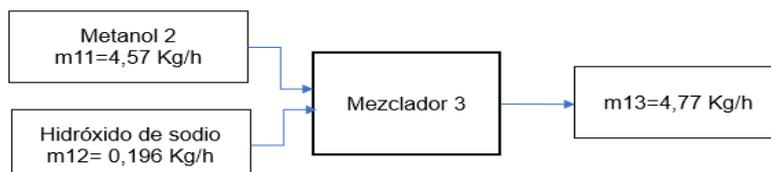


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del reactor 1 donde ocurre la purificación de lípidos esterificados para la simulación a $P < 10$ bar.

- Mezclador 3

Figura 60.

Balance de masa del mezclador 3 con $P < 10$ bar

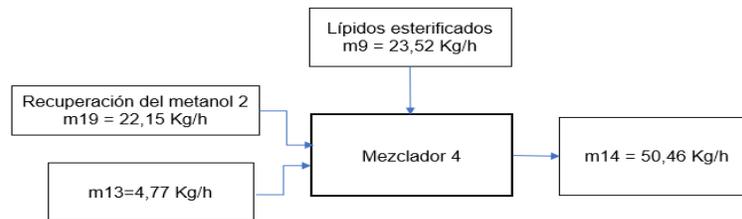


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 3 para la simulación a $P < 10$ bar.

- Mezclador 4

Figura 61.

Balace de masa del mezclador 4 con $P < 10$ bar

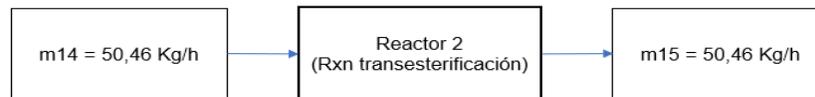


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 4 para la simulación a $P < 10$ bar.

- Reactor 2 reacción de transesterificación

Figura 62.

Balace de masa del reactor 2 reacción de transesterificación con $P < 10$ bar

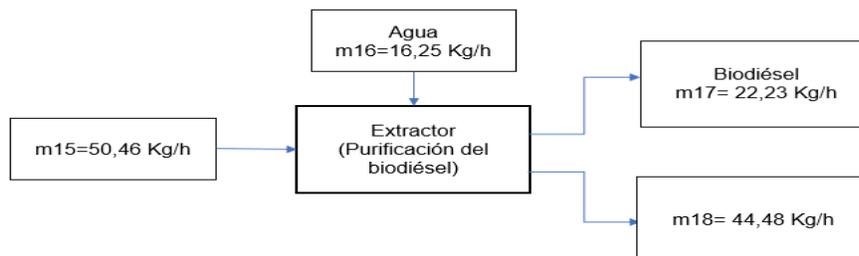


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del reactor 2 reacción de transesterificación para la simulación a condiciones de $P < 10$ bar

- Extractor

Figura 63.

Balace de masa del extractor con $P < 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa del extractor de la purificación del biodiésel para la simulación a $P < 10$ bar

- Destilador 2

Figura 64.

Balance de masa del destilador 2 con $P < 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa del destilador 2 de la purificación del biodiésel, para la simulación a condiciones de $P < 10$ bar

Tabla 54.

Balance de energía de los intercambiadores de calor a $P < 10$ bar

INTERCAMBIADOR DE CALOR	T IN (°C)	T OUT (°C)	FLUJO CORRIENTE (Kg/h)	PRESIÓN (bar)	HEAT FLOW (KJ/h)
E-100	20,15	60	31,56	4,6	3252
E-101	64,72	20	7,03	4,6	1153
E-102	98,68	60	24,53	1	2058
E-103	33,47	60	52,46	4,6	4064
E-104	60,87	30	52,46	4,6	4512
E-105	25,5	20	22,23	1	227,9
E-106	64,85	20	22,18	1	3653

Nota. Esta figura muestra el balance de masa de energía de los intercambiadores de calor, utilizados en la simulación a $P < 10$ bar

Tabla 55.

Balance de energía de las bombas a $P < 10$ bar

BOMBAS	P IN (bar)	T IN (°C)	P OUT (bar)	T OUT (°C)	FLUJO CORRIENTE (Kg/h)	HEAT FLOW (KJ/h)
P-100	1	20	4,6	20,17	6,47	3,69
P-101	1	20	4,6	20,24	18,05	7,98
P-102	1	64,55	4,6	64,72	7,03	4,65
P-103	1	20	4,6	20,17	5,76	3,56
P-104	1	60	4,6	60,27	24,53	13,89
P-105	1	25	1,2	25	16,25	0,4
P-106	1	20	4,6	20,17	22,17	13,73

Nota. Esta figura muestra el balance de masa de energía de las bombas utilizadas en la simulación a condiciones de $P < 10$ bar

Tabla 56.

Condiciones de operación de los equipos utilizados a $P < 10$ bar

EQUIPO	P (bar)	T (°C)	FLUJO MÁSICO (Kg/h)
MIX-100	1	20	5,47
P-100	4,6	20,17	5,47
P-101	4,6	20,24	18,05
MIX-101	4,6	20,15	30,55
E-100	4,6	60	30,55
CRV-100	4,6	60	30,55
T-100	Cond: 1 Rehe: 1	Cond: 64,56 Rehe: 147,8	Cond: 7,03 Rehe: 23,52
P-102	4,6	64,74	7,03
E-101	4,6	20	7,03
R-CY-1	4,6	20	7,03
E-102	1	60	23,52
P-104	4,6	60,29	23,52
MIX-102	1	20	4,76
P-103	4,6	20,17	4,76

EQUIPO	P (bar)	T (°C)	FLUJO MÁSICO (Kg/h)
MIX-103	4,6	33,12	50,45
E-103	4,6	60	50,45
CRV-101	4,6	60,93	50,45
CUT-100	4,6	60,45	50,45
E-104	4,6	30	50,45
VLV-100	1,2	30,15	50,45
P-105	1,2	25	16,25
T-101	Cim: 1 Fon: 1	Cim: 25,51 Fon: 50,34	Cim: 22,23 Fon: 44,47
E-105	1	20	22,23
T-102	Cim: 1 Fon: 1	Cim: 64,86 Fon: 85,75	Cim: 22,17 Fon: 22,31
E-106	1	20	22,17
R-CY2	1	20	22,16
P-106	4,6	20,17	22,16

*Cond: Condensador, Rehe: Rehervidor, Cim: Cimas, Fon: Fondos

Nota. Esta figura muestra los principales equipos utilizados en la simulación a condiciones <10 bar y sus condiciones de operación.

A continuación, se presenta el diagrama de bloques con los parámetros másicos descritos anteriormente

- Condiciones de operación > 10 bar (super críticas). A continuación, se realizó una descripción de los equipos utilizados a presión menores a 10 bar con sus condiciones de operación, con los flujos anteriormente mencionados:

En la siguiente tabla se describen los equipos utilizados y sus condiciones de operación de presión, temperatura y flujo másico. Los equipos que se utilizaron en la simulación son dos reactores, dos torres de destilación, una columna de extracción líquido-líquido, entre otros. Las condiciones principales son de 60°C, 250 bar y el modelo termodinámico que se empleó fue SRK y el reactor utilizado es de conversión con relación 7:1 para esterificación y 7:1 para transesterificación cuyos parámetros se obtuvieron en la experimentación realizada en la empresa C.I. SIGRA S.A.

Adicionalmente, no se realizó el escalado con un reactor PFR o CSTR porque se desconocen algunos requerimientos de diseño, como los parámetros cinéticos relacionados con la velocidad de reacción, el factor de frecuencia, entre otros, a las condiciones de operación empleadas en este proceso. Los balances de masa y energía para este proceso y sus condiciones iniciales enlistadas:

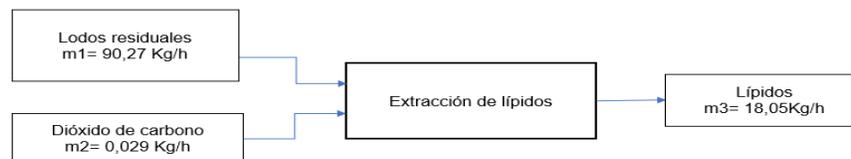
- Metanol = 4,57Kg/h
- Ácido Sulfúrico = 0,90 Kg/h
- Lípidos = 18,05 Kg/h
- Hidróxido de sodio = 0,18
- P = 250 bar
- T= 60°C

A continuación, se realizaron los balances de masa:

- Extracción de lípidos

Figura 65.

Balance de masa de la extracción de lípidos con $P > 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa de la extracción de lípidos para la simulación a condiciones de $P > 10$ bar

- Mezclador 1

Figura 66.

Balance de masa del mezclador 1 con $P > 10$ bar

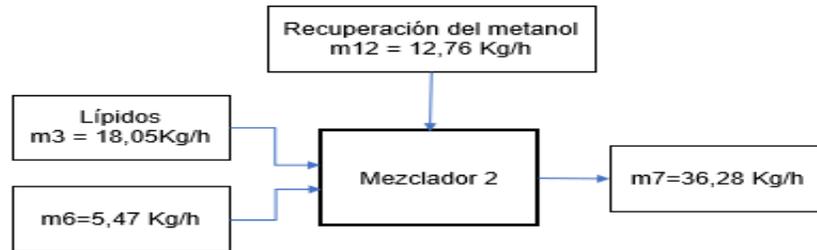


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 1 para la simulación a $P > 10$ bar.

- Mezclador 2

Figura 67.

Balance de masa del mezclador 2 con $P > 10$ bar

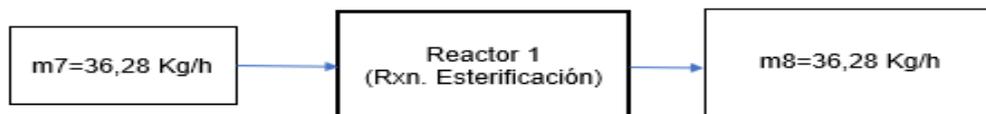


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 2 para la simulación a $P > 10$ bar.

- Reactor 1 reacción de esterificación

Figura 68.

Balance de masa del reactor 1 reacción de esterificación a $P > 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa del reactor 1 donde ocurre la reacción de esterificación para la simulación a $P > 10$ bar.

- Extractor 1

Figura 69.

Balance de masa del extractor 1 con $P > 10$ bar

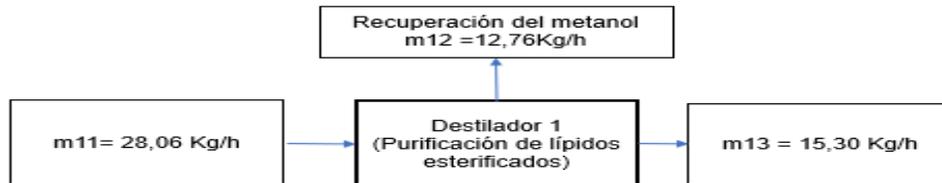


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del extractor 1 donde ocurre la purificación de los lípidos esterificados para la simulación a condiciones de $P > 10$ bar.

- Destilador 1

Figura 70.

Balance de masa del destilador 1 con $P > 10$ bar

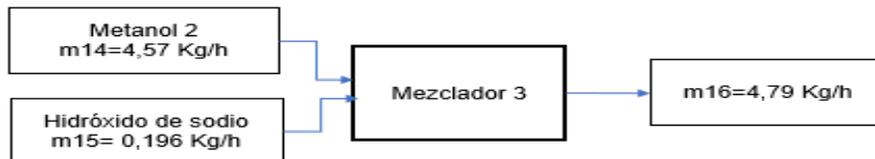


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del destilador 1 donde ocurre la purificación de lípidos esterificados para la simulación a condiciones de $P > 10$ bar.

- Mezclador 3

Figura 71.

Balance de masa del mezclador 3 con $P > 10$ bar

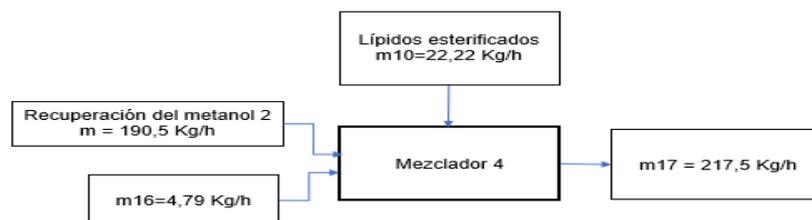


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 3 para la simulación a condiciones de $P > 10$ bar.

- Mezclador 4

Figura 72.

Balance de masa del mezclador 4 con $P > 10$ bar

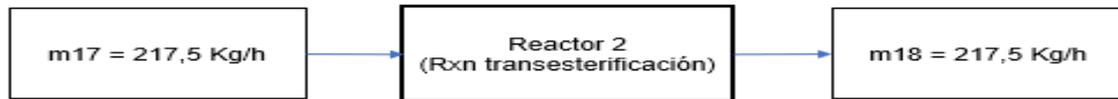


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del mezclador 4 para la simulación a $P > 10$ bar.

- Reactor 2 reacción de transesterificación

Figura 73.

Balance de masa del reactor 2 reacción de transesterificación con $P > 10$ bar

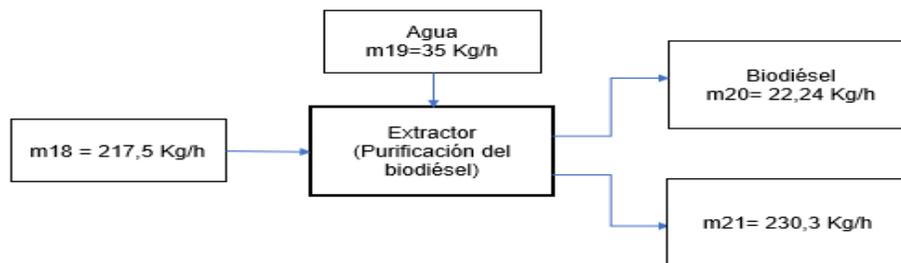


Nota. Esta figura muestra el balance de masa del reactor 2 reacción de transesterificación para la simulación a condiciones de $P > 10$ bar

- Extractor

Figura 74.

Balance de masa del extractor con $P > 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa del extractor de la purificación del biodiésel para la simulación a $P > 10$ bar

- Destilador 2

Figura 75.

Balance de masa del destilador 2 con $P > 10$ bar



Nota. Esta figura muestra el balance de masa del destilador 2 de la purificación del biodiésel, para la simulación a $P > 10$ bar

Tabla 57.

*Balance de energía de los intercambiadores de calor a
P > 10 bar*

INTERCAMBIADOR DE CALOR	T IN (°C)	T OUT (°C)	FLUJO CORRIENTE (Kg/h)	PRESIÓN (bar)	HEAT FLOW (KJ/h)
E-100	16,48	60	36,28	250	4525
E-101	69,06	20	36,28	1	5302
E-102	66,96	20	12,76	1	22,82
E-103	99,82	20	15,3	1	5382
E-104	10,81	60	217,5	250	44850
E-105	60	30	217,5	250	27710
E-106	75,76	20	190,5	1	48360
E-107	100,3	20	40,76	1	17900

Nota. Esta figura muestra el balance de masa de energía de los intercambiadores de calor, utilizados en la simulación a P > 10 bar

Tabla 58.

Balance de energía de las bombas a P > 10 bar

BOMBAS	P IN (bar)	T IN (°C)	P OUT (bar)	T OUT (°C)	FLUJO CORRIENTE (Kg/h)	HEAT FLOW (KJ/h)
P-100	1	19,89	250	21,88	5,47	207,9
P-101	1	20	250	13,14	18,05	539,5
P-102	1	20	1,2	20	36,28	1,03
P-103	1	20	1,2	20	14	0,34
P-104	1	20	250	22,77	12,76	531,1
P-105	1	18,41	250	17,6	4,79	197,9
P-106	1,2	20,28	250	19,95	22,22	829,5
P-107	1	20	1,2	20	35	0,86
P-108	1	44,03	1,2	44,03	230,3	6,6
P-109	1	20	250	20,21	190,5	7242

Nota. Esta figura muestra el balance de masa de energía de las bombas utilizadas en la simulación a condiciones de P > 10 bar

Tabla 59.

Descripción de los equipos utilizados a condiciones mayor a 10 bar

EQUIPO	P (bar)	T (°C)	Flujo másico (Kg/h)
MIX-100	1	19,89	5,47
P-100	250	21,88	5,47
P-101	250	13,14	18,05
MIX-101	250	16,48	36,28
E-100	250	60	36,28
CRV-100	250	60	36,28
VLV-100	1	69,06	36,28
E-101	1	20	36,28
P-102	1,2	20	36,28
P-103	1,2	20	14
T-100	Cim: 1,2 Fon: 1	Cim: 20,28 Fon: 1	Cim: 22,22 Fon: 1
T-101	Cond: 1 Rehe: 1	Cond: 66,96 Rehe: 99,82	Cond: 12,76 Rehe: 15,30
E-103	1	20	15,3
E-102	1	20	12,76
R-CY-1	1	20	12,76
P-104	250	22,77	12,76

EQUIPO	P (bar)	T (°C)	Flujo másico (Kg/h)
MIX-102	1	18,41	4,79
P-105	250	17,59	4,79
P-106	250	19,95	22,22
MIX-103	250	10,81	217,5
E-104	250	60	217,5
CRV-101	250	60	217,5
E-105	250	30	217,5
P-107	1,2	20	35
VLV-101	1,2	45,21	217,5
T-102	Cim: 1 Fon: 1	Cim: 20,5 Fon: 44,03	Cim: 22,24 Fon: 230,3
P-108	1,2	44,03	230,3
T-103	Cim: 1 Fon: 1	Cim: 75,76 Fon: 100,3	Cim: 190,5 Fon: 40,76
E-107	1	20	40,76
E-106	1	20	190,5
R-CY-2	1	20	190,5
P-109	250	20,21	190,5

*Cond: Condensador, Rehe: Rehervidor, Cim: Cimas, Fon: Fondos

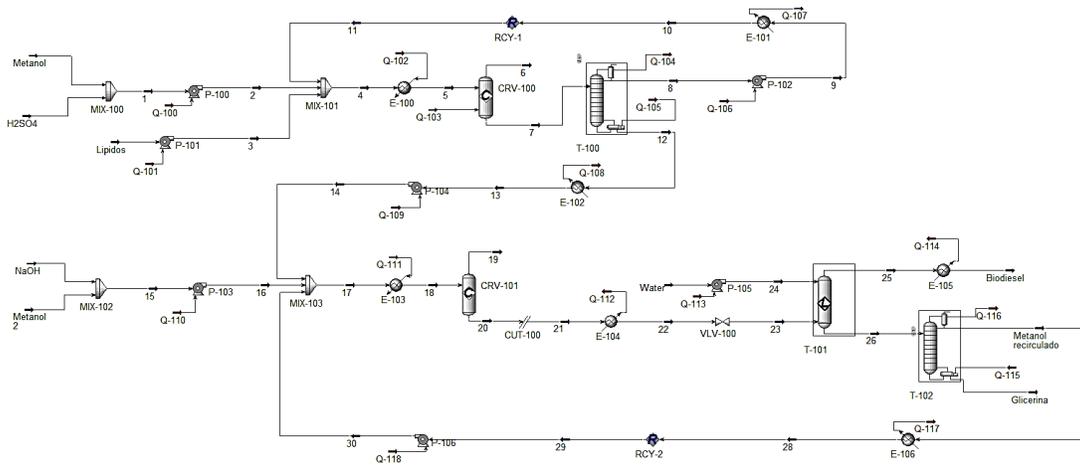
Nota. Esta tabla muestra los principales equipos utilizados en la simulación a condiciones <10 bar

5.2.5. Simulación en Aspen Hysys

5.2.5.a. Condiciones <10 bar.

Figura 76.

Simulación en Aspen Hysys a condiciones P < 10 bar

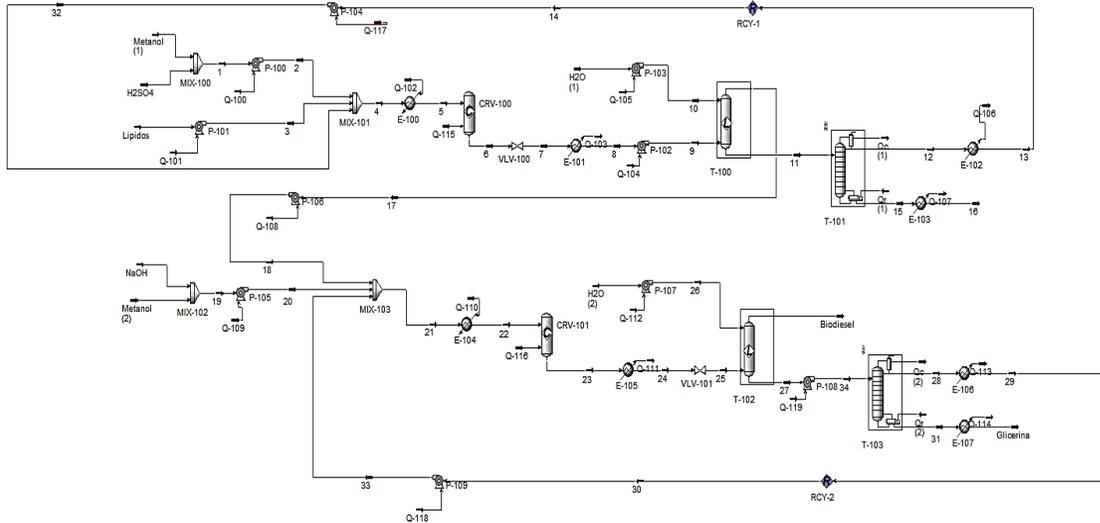


Nota. Esta figura muestra la simulación en el software Aspen Hysys

5.2.5.b. Condiciones >10 bar

Figura 77.

Simulación en Aspen Hysys a condiciones <10 bar



Nota. Esta figura muestra la simulación en Aspen Hysys

5.2.6. Resultados obtenidos en las simulaciones de Aspen Hysys

Tabla 60.

Resultados de las simulaciones en Aspen Hysys

BIODIÉSEL	SIMULACIÓN 1 (P < 10 bar)	SIMULACIÓN 2 SUPERCRÍTICAS. (P > 10 bar)
FLUJO MÁSSICO (Kg/h)	22,23	22,24
FLUJO MOLAR (Kmol/h)	0,0784	0,07869
COMPOSICIÓN EN FRACCIÓN MÁSSICA		
METANOL	0,0000	0,0000

Tabla 59. Continuación*Resultados de las simulaciones en Aspen Hysys*

H₂SO₄	0,0000	0,0000
NaOH	0,0000	0,0006
TRIOLEINA	0,0003	0,0003
TRILINOLEINA	0,0001	0,0001
TRIPALMITINA	0,0004	0,0004
TRISTEARINA	0,0000	0,0000
OLEATO DE METILO	0,3826	0,3823
LINOLEATO DE METILO	0,1201	0,1200
PALMITATO DE METILO	0,4508	0,4506
ESTEREATO DE METILO	0,0455	0,0455
GLICERINA	0,0000	0,0000
H₂O	0,0001	0,0002

Nota. Esta tabla muestra los resultados de las simulaciones en Aspen Hysys

Tabla 61.*Resultados de los componentes obtenidos en Aspen Hysys*

COMPONENTES OBTENIDOS	SIMULACIÓN 1 (P < 10 bar)	SIMULACIÓN 2 SUPERCRÍTICAS (P > 10 bar)
% METANOL RECUPERADO ETAPA DE ESTERIFICACIÓN	90%	93%

Tabla 60. Continuación.

Resultados de los componentes obtenidos en Aspen Hysys

% DE METANOL RECUPERADO ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN	80%	95%
CONSUMO DE AGUA DEL PROCESO (Kg/h)	16,25	49
GLICERINA OBTENIDA (Kg/h)	0,0960	0,0960

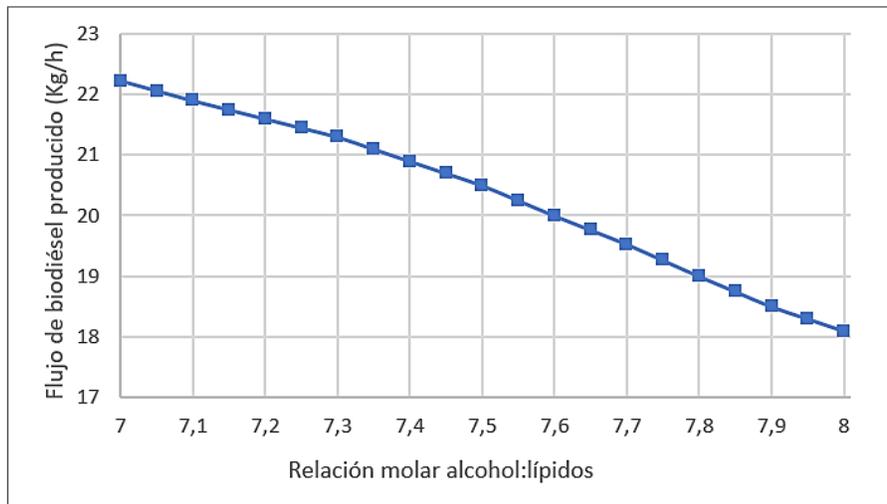
Nota. Esta tabla muestra resultados de los componentes obtenidos en Aspen Hysys

Al no denotar una diferencia considerable respecto a la producción de biodiesel, pero si respecto al uso del agua, se seleccionó la simulación a P < 10 bar a la que se le efectuó un análisis de sensibilidad para estimar el comportamiento de algunos parámetros como reflujo en la columna de destilación 2 y relación molar en la producción de biodiesel.

5.2.6.a. Análisis de sensibilidad.

Figura 78.

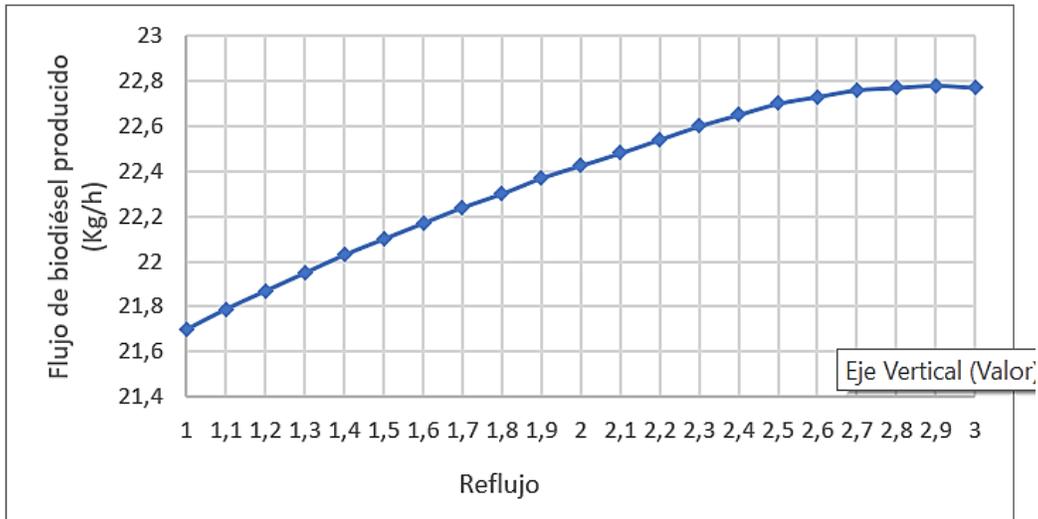
Producción de biodiésel vs la relación molar



Nota. Esta gráfica representa el comportamiento de la producción de biodiésel vs la relación molar alcohol: lípidos

Figura 79.

Producción de biodiésel vs reflujo



Nota. Esta gráfica representa el comportamiento de la producción de biodiésel vs el reflujo del destilador 2

De acuerdo con el análisis de sensibilidad se pudo determinar que a mayor relación molar (alcohol: lípidos) menor será la producción de biodiésel porque aumenta la conversión, pero la separación no es total, aumentando el gasto energético para la recuperación del metanol [28]. Adicionalmente, se pudo determinar que la pureza del producto de interés está fuertemente relacionada con el reflujo molar de la columna de destilación.

5.2.7. Análisis de resultados

Durante la simulación, se denoto que es necesario el paquete termodinámico PR-Twu a condiciones normales para realizar una mejor separación de la fase liviana y pesada al facilitar el comportamiento predictivo de la presión de vapor de cada componente.[100]

Según los datos y parámetros operativos obtenidos a nivel laboratorio en la empresa C.I. SIGRA S.A. Se logró conocer la secuencia en la que ocurre la obtención de biodiésel y la selección de los equipos empleados en la simulación que son recopilados de fuentes bibliográficas de plantas piloto, adaptados a este proceso [89].

En cuanto al biodiésel, los datos obtenidos no se ven afectados por las condiciones super críticas en términos de flujo masico de biocombustible, debido al bajo suministro de materia prima, con un valor de 22,23 Kg/h para $P < 10$ bar y 22,24Kg/h para $P > 10$ bar (Condiciones supercríticas).

Adicionalmente, la cantidad de glicerina obtenida en el proceso en ambas simulaciones es muy baja por el flujo de alimentación, por esta razón no se realiza un tratamiento adicional de separación y limpieza para posterior venta [87].

Asimismo, la cantidad de agua que se suministra a condiciones de $P < 10$ bar es equivalente a 16 Kg/h, sin embargo, a condiciones super criticas es de 49 Kg/h el cual requiere mayores costos de suministro de agua, desfavoreciendo el proceso.

Según los datos obtenidos en la simulación, se denotó que, a condiciones estándar, el proceso muestra una mejor viabilidad en términos de la cantidad de equipos y requerimientos energéticos, por esta razón se realizará el análisis financiero de la simulación que opera a una presión menor a 10 bar.

6. ANALISIS DE RENTABILIDAD

En este capítulo se realizó el análisis financiero, que atribuye si el proyecto es económicamente rentable, por medio de un flujo de caja que permite calcular los indicadores económicos del proceso, donde los costos se basan en una producción para el primer año de 190 ton proporcional a 22,23 Kg/h de biodiésel obtenido en la simulación a P<10 bar que se seleccionó anteriormente.

Los parámetros iniciales que se deben tener en cuenta son:

- Tasa de impuesto en Colombia para el 2020 [117]: 30%
- Inflación asociada a costos de producción [118]: 3%
- Incremento de la demanda de Biodiésel [119]: 4%
- Incremento en gastos administrativos [67]: 4%
- Valor de salvamiento esperado del proyecto [67]: 40%

6.1. Inversiones

Están constituidas por los gastos que se deben adquirir para los bienes y servicios necesarios para realizar el proyecto. Están constituidos por:

6.1.1. *Inversiones fijas*

Están incluidos los equipos, terrenos, obras físicas, muebles y enseres.

6.1.1.a. Equipos. En la siguiente tabla, se muestran los costos de capital de los equipos utilizados para la producción de biodiésel, junto con su mantenimiento del 7%. Esta información fue consultada a partir de proveedores nacionales como PSE (Process Solutions and Equipment) cuyas ventas están dedicadas al comercio electrónico por internet.

Tabla 62.*Costos de capital de los equipos utilizados*

EQUIPOS							
EQUIPO	CANTIDAD	CAPACIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO EQUIPOS (\$)	FACTOR DE INSTALACIÓN	COSTO DEL EQUIPO INSTALADO	COSTO DEL MANTENIMIENTO (7%) (COP)
MEZCLADOR	4	70 Kg/h	\$ 2.750.000	\$ 11.000.000	1,3	\$ 14.300.000	\$ 1.001.000
REACTOR CSTR	2	15L/h	\$ 2.550.000	\$ 5.100.000	3,0	\$ 15.300.000	\$ 1.071.000
COLUMNA DE DESTILACIÓN	2	300 L/h	\$ 35.744.585	\$ 71.489.170	4,0	\$ 285.956.680	\$ 20.016.968
TORRE DE EXTRACCIÓN	1	100 L/h	\$ 35.357.100	\$ 35.357.100	4,0	\$ 141.428.400	\$ 9.899.988
BOMBAS	7	400m3/h	\$ 1.307.368	\$ 9.151.576	4,0	\$ 36.606.304	\$ 2.562.441
INTERCAMBIADOR DE CALOR	7	316L	\$ 1.767.855	\$ 12.374.985	3,5	\$ 43.312.448	\$ 3.031.871
EXTRACTOR DE DIÓXIDO DE CARBONO	1	300 L/h	\$ 70.475.744	\$ 70.475.744	4,0	\$ 281.902.976	\$ 19.733.208
COSTO TOTAL DE EQUIPOS DE LA PLANTA						\$ 818.806.808	-
COSTO TOTAL DE MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE LA PLANTA						-	\$ 57.316.477
COSTO TOTAL DE EQUIPOS DE LA PLANTA INSTALADOS						\$	876.123.284

Nota. Esta tabla muestra los costos de capital de los equipos para la producción de biodiésel.

6.1.1.b. Muebles y enseres. Incluye (teléfonos, escritorios, computadores, impresoras y otros muebles de oficina) serán de \$10'000.000 [67].

6.1.2. Activos diferidos

Incluye los gastos preoperativos es decir el estudio de la factibilidad del proyecto. Adicionalmente, la puesta en marcha como la capacitación de personal, estudio legal, Software a emplear, entre otros. Son gastos que se recuperan a largo plazo, son relevantes porque mejoran el desempeño en la empresa

Tabla 63.*Activos diferidos*

ACTIVOS DIFERIDOS	
INVERSIONES DIFERIDAS	VALOR
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROYECTO	\$ 8.000.000
CAPACITACIÓN DEL PERSONAL	\$ 5.000.000
SOFTWARE	\$ 12.000.000
COSTO TOTAL (COP)	\$ 25.000.000

Nota. Esta tabla muestra los activos diferidas.

6.2. Depreciaciones y amortizaciones

Se realiza con base a las inversiones iniciales, teniendo en cuenta que la maquinaria y los equipos se deprecian a 10 años, obras civiles a 20 años y los muebles y enseres a 5 años.

Tabla 64.

Depreciación y amortización

DEPRECIACIÓN ACTIVOS FIJOS	EQUIPOS DEPRECIACIÓN (15 AÑOS)	\$ 21.289.378
	MUEBLES DEPRECIACIÓN (5 AÑOS)	\$ 2.000.000
	TOTAL	\$ 23.289.378

AMORTIZACIÓN ACTIVOS DIFERIDOS	ACTIVOS DIFERIDOS (5 AÑOS)	\$ 5.000.000
-----------------------------------	-------------------------------	--------------

TABLA DE AMORTIZACIÓN				
n	SALDO	INTERÉS	CUOTA	AMORTIZACIÓN
0	\$ 25.000.000			
1	\$ 23.937.134	\$ 4.500.000	\$ 5.562.866	\$ 1.062.866
2	\$ 22.682.952	\$ 4.308.684	\$ 5.562.866	\$ 1.254.182
3	\$ 21.203.017	\$ 4.082.931	\$ 5.562.866	\$ 1.479.935
4	\$ 19.456.694	\$ 3.816.543	\$ 5.562.866	\$ 1.746.323
5	\$ 17.396.033	\$ 3.502.205	\$ 5.562.866	\$ 2.060.661

Nota. Esta tabla muestra la depreciación y amortización

6.3. Costos de operación

Los costos de producción corresponden al primer año de producción de la planta.

6.3.1. Costos directos y gastos administrativos

Incluye costos de materia prima, mano de obra directa y gastos administrativos, entre otros.

6.3.1.a. Materia prima. Se incluye los costos de materia prima anual que corresponde a las cantidades para un año de producción, el costo de metanol, ácido sulfúrico, entre otros.

Tabla 65.

Costos de materia prima

COSTO DE MATERIAS PRIMAS			
PRECIOS DEL MERCADO		REQUERIMIENTOS DE LA PLANTA	
COMPUESTO	PRECIO (COP/ton)	CANTIDAD REQUERIDA (ton/mes)	COSTO TOTAL ANUAL (COP)
DIOXIDO DE CARBONO (CO2)	\$ 100.518	55,97	\$ 67.510.845
COMPUESTO	PRECIO (COP/m ³)	CANTIDAD REQUERIDA (ton/mes)	COSTO TOTAL ANUAL (COP)
AGUA (H2O)	\$ 3.601	10,14	\$ 438.170
COMPUESTO	PRECIO (COP/ton)	CANTIDAD REQUERIDA (ton/mes)	COSTO TOTAL ANUAL (COP)
METANOL (CH3OH)	\$ 2.106.023	3,48	\$ 87.838.336
COMPUESTO	PRECIO (COP/ton)	CANTIDAD REQUERIDA (ton/mes)	COSTO TOTAL ANUAL (COP)
ÁCIDO SULFURICOácido (H2SO4)	\$ 687.120	0,56	\$ 4.643.502
COMPUESTO	PRECIO (COP/ton)	CANTIDAD REQUERIDA (ton/mes)	COSTO TOTAL ANUAL (COP)
HIDROXIDO DE SAODIO (NaOH)	\$ 2.061.360	0,11	\$ 2.786.101
COSTO TOTAL (COP)			\$ 163.216.954

Nota. Esta tabla muestra los costos de materia prima para la producción de biodiésel.

Tabla 66.

Bibliografía de los costos de materia prima

BIBLIOGRAFÍA	
DIÓXIDO DE CARBONO	SendeCO2. "Precios CO2. [En línea]. Disponible en: https://www.sendeco2.com/es/precios-co2 . [Acceso: diciembre 13, 2020]
AGUA	Acueducto "Tarifa de agua". [En línea]. Disponible en: https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas_2020!/ut/p/z1/nZFN4NAEIZ_Sw8e64yTrS_y9rZJqG4jZFImdS9BgN4Jxg7GV_vtKCqUWSUPnNsPzzsc7wJABN_I7ZfKusk1eD_kL-9uF9CmOJC0ILQRqT83jYK4oiQk2Z8DXIXoSaYmCQtTPq2Cd

Tabla 65. Continuación.

Bibliografía de los costos de materia prima

	pKG38gTwNXochcJgTcEMMUroP_qfna7TXwD4cvsN8Bn5diDyHxC1jhRKMw7n4DExZND78NcWT8CmtsXXw1RTzKQBbsvXsi1b960dyvuuO57uHXSw73vXWGvq0t3Zg4NTkr09dZCNSTge0jTNsHq85eKjVzefYZwUaw!!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/ [Acceso: diciembre 13, 2020]
METANOL	Servicios MinMinas. "Precio Metanol". [En línea]. Disponible en: http://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivos/SoporteRevistas/7766.pdf . [Acceso: diciembre 13, 2020]
ÁCIDO SULFÚRICO	Minería Chilena. "Mercado del ácido sulfúrico". [En línea]. Disponible en: https://www.mch.cl/reportajes/mercado-del-acido-sulfurico-precio-bajaria-hacia-octubre-por-mayor-oferta/# . [Acceso: diciembre 13, 2020]
HIDRÓXIDO DE SODIO	Química. "Precios de NaOH". [En línea]. Disponible en: https://www.quiminet.com/productos/naoh-1885819/precios.html . [Acceso: diciembre 13,2020]

Nota. Estas tablas muestran la bibliografía de los costos de materia prima para la producción de biodiésel.

6.3.1.b. Mano de obra directa y gastos administrativos. Con el fin de determinar el costo de mano de obra directa y los gastos de administración y ventas, se tiene en cuenta para la mano de obra 3 operarios y 1 ingeniero químico, que manejarán la planta automatizada en la supervisión de materia prima, extracción de lípidos y producción de biodiésel.

Gastos administrativos que incluye un gerente de administración y seguridad industrial que se encargue de la contabilidad y ventas y un jefe de producción que supervise los operarios y el manejo de la planta siendo un apoyo para el ingeniero químico.

Se estimó costo de seguridad social relacionando salud (8,5%), pensión (12%) y Arl para el ingeniero químico, operario y jefe de producción (1,04%) y gerente administración

(0,52%). Además, costos parafiscales que incluyen SENA (2%), ICBF (3%), CCF (4%) y prestaciones sociales como cesantías, intereses de cesantías, primas y vacaciones. Con un contrato a término fijo.

Tabla 67.

Costos de mano de obra directa y gastos administrativos mensual

SALARIOS BASICOS POR MES					
AÑO	OPERARIO	AUXILIO DE TRANSPORTE OPERARIOS	INGENIERO QUÍMICO	GERENTE DE ADMINISTRACIÓN Y SEGURIDAD	JEFE DE PRODUCCIÓN
1	\$ 908.526	\$ 106.454	\$ 5.000.000	\$ 4.000.000	\$ 3.500.000
2	\$ 943.050	\$ 110.499	\$ 5.190.000	\$ 4.152.000	\$ 3.633.000
3	\$ 978.886	\$ 114.698	\$ 5.387.220	\$ 4.309.776	\$ 3.771.054
4	\$ 1.016.084	\$ 119.057	\$ 5.591.934	\$ 4.473.547	\$ 3.914.354
5	\$ 1.054.695	\$ 123.581	\$ 5.804.428	\$ 4.643.542	\$ 4.063.100

Nota. Esta tabla muestra los costos de mano de obra directa y gastos administrativos mensual por 5 años

Tabla 68.

Costos de mano de obra directa y gastos administrativos anual

SALARIOS BASICOS POR AÑO			
AÑO	OPERARIO(3)	INGENIERO QUÍMICO	GERENTE DE ADMINISTRACIÓN Y SEGURIDAD INDUSTRIAL
1	\$ 32.706.936	\$ 60.000.000	\$ 48.000.000
2	\$ 33.949.800	\$ 62.280.000	\$ 49.824.000
3	\$ 35.239.892	\$ 64.646.640	\$ 51.717.312
4	\$ 36.579.008	\$ 67.103.212	\$ 53.682.570
5	\$ 37.969.010	\$ 69.653.134	\$ 55.722.508

SALARIOS BASICOS POR AÑO			
JEFE DE PRODUCCIÓN	TOTAL SALARIOS BASICOS	AUX TRANSPORTE OPERARIOS	TOTAL SALARIOS BASICOS + AUX TRANSPORTE
\$ 42.000.000	\$ 182.706.936	\$ 1.277.448	\$ 183.984.384
\$ 43.596.000	\$ 189.649.800	\$ 1.325.991	\$ 190.975.791
\$ 45.252.648	\$ 196.856.492	\$ 1.376.379	\$ 198.232.871
\$ 46.972.249	\$ 204.337.039	\$ 1.428.681	\$ 205.765.720
\$ 48.757.194	\$ 212.101.846	\$ 1.482.971	\$ 213.584.817

Nota. Esta tabla muestra los costos de mano de obra directa y gastos administrativos

Tabla 69.*Riesgo según el cargo*

CARGO	RIESGO	PORCENTAJE
OPERARIO	2	1,04%
INGENIERO QUÍMICO	2	1,04%
JEFE DE PRODUCCIÓN	2	1,04%
GERENTE DE ADMINISTRACIÓN Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	1	0,52%

Nota. Esta tabla muestra el riesgo según el cargo**Tabla 70.***Costos de seguridad social y parafiscales*

AÑO	COSTOS SEGURIDAD SOCIAL		
	SALUD	PENSIÓN	ARL
1	\$ 15.530.090	\$ 21.924.832	\$ 1.654.260
2	\$ 16.120.233	\$ 22.757.976	\$ 1.717.122
3	\$ 16.732.802	\$ 23.622.779	\$ 1.782.373
4	\$ 17.368.648	\$ 24.520.445	\$ 1.850.103
5	\$ 18.028.657	\$ 25.452.222	\$ 1.920.407

COSTOS PARAFISCALES		
SENA (2%)	ICBF (3%)	CCF (4%)
\$ 3.654.139	\$ 5.481.208	\$ 7.308.277
\$ 3.792.996	\$ 5.689.494	\$ 7.585.992
\$ 3.937.130	\$ 5.905.695	\$ 7.874.260
\$ 4.086.741	\$ 6.130.111	\$ 8.173.482
\$ 4.242.037	\$ 6.363.055	\$ 8.484.074

Nota. Esta tabla muestra el costo de seguridad social que incluye salud, pensión, ARL y costos de parafiscales como SENA, ICBF y CCF por 5 años

Tabla 71.*Prestaciones sociales*

AÑO	PRESTACIONES SOCIALES			
	CESANTIAS	INTERESES CESANTIAS	PRIMA (JUNIO Y DICIEMBRE)	VACACIONES
1	\$ 13.408.526	\$ 1.609.023	\$ 26.817.052	\$ 6.704.263
2	\$ 14.028.549	\$ 1.683.426	\$ 28.057.098	\$ 7.014.275
3	\$ 14.561.634	\$ 1.747.396	\$ 29.123.268	\$ 7.280.817
4	\$ 15.114.976	\$ 1.813.797	\$ 30.229.952	\$ 7.557.488
5	\$ 15.689.345	\$ 1.882.721	\$ 31.378.691	\$ 7.844.673

Nota. Esta tabla muestra las prestaciones sociales como cesantías, intereses de cesantías, prima y vacaciones por 5 años

Tabla 72.*Costos totales*

AÑO	COSTOS TOTALES				
	SALARIO TOTAL + AUX DE TRANSPORTE	SEGURIDAD SOCIAL	PARAFISCALES	PRESTACIONES SOCIALES	TOTAL COSTOS
1	\$ 183.984.384	\$ 39.109.182	\$ 16.443.624	\$ 48.538.864	\$ 288.076.055
2	\$ 190.975.791	\$ 40.595.331	\$ 17.068.482	\$ 50.783.348	\$ 299.422.952
3	\$ 198.232.871	\$ 42.137.954	\$ 17.717.084	\$ 52.713.115	\$ 310.801.024
4	\$ 205.765.720	\$ 43.739.196	\$ 18.390.333	\$ 54.716.214	\$ 322.611.463
5	\$ 213.584.817	\$ 45.401.285	\$ 19.089.166	\$ 56.795.430	\$ 334.870.699

Nota. Esta tabla muestra el costo total por 5 años

Tabla 73.*Costos de servicios del proceso*

FLUIDOS DE SERVICIO		
TIPO DE SERVICIO	PRECIO (COP)	COSTO TOTAL (COP/ANUAL)
AGUA	3601 COP/m ³	\$ 3.287.564
ENERGÍA	\$120/KWh	\$ 49.980.000
COSTO TOTAL (COP)		\$ 53.267.564

Nota. Esta tabla muestra los costos de servicios del proceso

6.4. Gastos varios

Incluye los gastos como transporte, limpieza, seguridad y vigilancia.

Tabla 74.

Gastos varios

GASTOS VARIOS	\$/MES
TRANSPORTE	\$ 1.300.000
LIMPIEZA	\$ 1.000.000
SEGURIDAD Y VIGILANCIA	\$ 1.000.000
GASTOS VARIOS TOTALES POR MES	\$ 3.300.000
TOTAL GASTOS VARIOS POR AÑO	\$ 39.600.000

Nota. Esta tabla muestra los gastos varios

6.5. Capital de trabajo

Se determina con el método del periodo de desfase, teniendo como recuperación de cartera 30 días (N_d) y teniendo en cuenta que se trabajan 312 días y el costo anual de operación.

Tabla 75.

Costos anuales de operación

COSTOS	TOTAL
COSTO MATERIA PRIMA	\$ 163.216.954
COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA	68221608,65
COSTO TOTAL SERVICIOS	\$ 53.267.564
COSTO ANUAL DE OPERACIÓN	\$ 284.706.127

Nota. Esta tabla muestra los costos anuales de operación

Ecuación 17.

Ecuación para determinar el capital de trabajo

$$C_T = \left(\frac{C_a}{312} \right) * N_d$$

Nota. Esta figura representa el capital de trabajo

Donde:

C_a = Costo anual de operación

C_T = Capital de trabajo

N_d = Número de días de desface (26 días)

$$C_T = \left(\frac{284.706.127}{312} \right) * 26 = 23.725.518$$

El costo de capital invertido es de: \$23.725.518

6.6. Ingresos

Para determinar los ingresos se debe determinar el flujo de ingreso anual de biodiésel producido en la planta de la empresa C.I. SIGRA S.A. y su precio en el mercado nacional.

Las ventas estimadas para el 2021 se realizaron con base a la demanda de los últimos 2 años, con un valor promedio de \$12.000/galón [101], por lo que las ventas del primer año equivalen a 190 ton/año que es proporcional a 161,34 gal/día [102]

$$190 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * 308.7 = 58083 \frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

$$58083 \frac{\text{gal}}{\text{año}} * \frac{\$12000}{\text{gal}} = 724.875.840 \text{ (COP)}$$

6.7. Proyección de flujo de caja

Se representa la proyección del flujo de caja para un periodo de 5 años y una tasa de oportunidad del 10%.

Esta proyección se realizó con el fin de determinar la viabilidad del proyecto, teniendo en cuenta las inversiones, los costos, gastos, capital de trabajo, valor de liquidez, entre otros.

Tabla 76.

Proyección del flujo de caja para la producción de biodiésel

Concepto	0	1	2	3	4	5
Ingresos (Incremento 4%)	\$	724.875.840	\$ 753.870.874	\$ 784.025.709	\$ 815.386.737	\$ 848.002.206
Costo de Producción Directos (Incremento 3%)	\$	297.417.690	\$ 306.340.221	\$ 315.530.428	\$ 324.996.340	\$ 334.746.231
Costo de Producción Indirectos (Incremento 3%)	\$	54.865.591	\$ 56.511.559	\$ 58.206.905	\$ 59.953.113	\$ 61.751.706
Gastos Administrativos (Incremento 4%)	\$	189.512.960	\$ 197.093.478	\$ 204.977.218	\$ 213.176.306	\$ 221.703.358
Gastos varios (Incremento 4%)	\$	41.184.000	\$ 42.831.360	\$ 44.544.614	\$ 46.326.399	\$ 48.179.455
Gastos Financieros	\$	4.500.000	\$ 4.308.684	\$ 4.082.931	\$ 3.816.543	\$ 3.502.205
Depreciación Activos Fijos	\$	60.408.219	\$ 60.408.219	\$ 60.408.219	\$ 60.408.219	\$ 60.408.219
Amortización a Diferidos	\$	5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Utilidad Antes de Impuesto	\$	71.987.380	\$ 81.377.352	\$ 91.275.393	\$ 101.709.817	\$ 112.711.032
Impuestos (i=30%)	\$	21.596.214	\$ 24.413.206	\$ 27.382.618	\$ 30.512.945	\$ 33.813.310
Utilidad Despues de Impuesto	\$	50.391.166	\$ 56.964.147	\$ 63.892.775	\$ 71.196.872	\$ 78.897.723
Depreciación Activos Fijos	\$	60.408.219	\$ 60.408.219	\$ 60.408.219	\$ 60.408.219	\$ 60.408.219
Amortización Activos Diferidos	\$	5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Amortización Crédito	\$	1.062.866	\$ 1.254.182	\$ 1.479.935	\$ 1.746.323	\$ 2.060.661
Inversiones						
Activo Fijo	\$	886.123.284				
Activos Diferidos	\$	-				
Capital Trabajo	\$	-				
Valor de salvamento						\$ 354.449.314
Recuperación de Capital de Trabajo						\$ 23.725.518
Valor liquidez						\$ 584.082.189
Flujo Neto	-\$ 909.848.802	\$ 114.736.519	\$ 121.118.184	\$ 127.821.060	\$ 134.858.768	\$ 1.104.502.301

Nota. Esta tabla muestra el flujo de caja para la producción de biodiésel.

Tabla 77.

Resultados del flujo de caja

INDICADORES FINANCIEROS			
TIO	10%	SE APRUEBA	El proyecto es viable, los ingreso son mayores que los egresos.
VPN	\$ 168.508.034		
TIR	15%	SE APRUEBA	El proyecto es vable, ya que a tasa interna de retorno es mayor a la tasa de oportunidad
VPN	\$ -		

Nota. Esta tabla muestra los resultados del flujo de caja.

6.8. Análisis de resultados

Según los datos obtenidos en las simulaciones, la materia prima de la planta pilo al ser un lodo residual generado en la empresa C.I SIGRA S.A reduce los costos de operación, contribuyendo a la viabilidad del proyecto.

El proceso industrial demostró una alta efectividad debido a las condiciones de operación utilizadas porque reduce gastos energéticos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la automatización de la planta aumenta estos costos por el control de los equipos

utilizados. Adicionalmente, el uso del extractor de dióxido de carbono supercrítico al ser un proceso rápido y eficiente, genera un aumento de costos significativo.

El análisis financiero realizado no contempló el uso de la unidad de re-esterificación el cual consiste en emplear el glicerol y volverlo a restituir en aceite, para introducirlo nuevamente en el proceso y generar ahorros energéticos, con el fin de que no se genere un producto con un valor agregado más bajo.

Para reducir los costos energéticos relacionados con la generación de la glicerina, es necesario emplear trenes de separación, con el fin de obtener biodiésel de mejor calidad y más competitivo a nivel industrial.

Dentro del análisis de rentabilidad se consideró nuevos operarios y personal administrativos e ingeniero. Sin embargo, se puede realizar una redistribución de cargos, capacitando el personal para esta línea de producción lo que permite ahorrar costos en personal directo y administrativo.

El diésel tiene un costo de \$9734 lo cual representa un valor menor al biodiésel de \$12000 obtenido en este proyecto, dado que tiene unas características fisicoquímicas que favorecen el producto terminado como el punto de inflamación (122°C - 125°C), índice de yodo (12% - 18%) y densidad (862Kg/m^3 - 898Kg/m^3), entre otros. El cual, permite una adecuada combustión con menor relación de aire/combustible, porque contiene mayor cantidad de oxígeno, reduciendo el peligro de incendios durante su manejo y almacenamiento con una mejor estabilidad de la molécula y mayor número de cetanos. Sin embargo, tiende a generar cristales por su punto de nube (14°C), que se forman en el seno del líquido, cuando la muestra de combustible se enfría gradualmente, este parámetro se puede controlar en presencia de aditivos como SFPP que son mezcla de copolímeros de etileno, los cuales retrasan la formación de sus cristales, controlando su tamaño, cinética de crecimiento y forma, permitiendo que el combustible continúe fluyendo evitando bloqueos de filtros y líneas contribuyendo a su normal funcionamiento a bajas temperaturas [120].

Según los datos obtenidos del flujo de caja, los indicadores financieros determinan que el proyecto es viable, al estimar un rendimiento mayor al mínimo requerido, representando una inversión rentable. Esto se debe a que el estudio realizado arrojó una tasa interna de retorno (15%) mayor a la tasa interna de oportunidad (10%).

Adicionalmente, el VPN es mayor a cero con un valor del \$168.508.034, lo que indica que la inversión inicial si alcanza a ser recuperada en un periodo de 5 años. Hay que tener en cuenta que el precio del biodiesel está sujeto a cambios dependiendo la demanda nacional, el tipo de biodiésel obtenido relacionado a su punto de nube de 18°C y el porcentaje de mezcla con el diésel.

7. CONCLUSIONES

El análisis físico químico de los lodos residuales determinó la presencia de lípidos y ácidos grasos libres por medio de la evaluación de parámetros de humedad (67%), cenizas (64%), índice de yodo (39,2%) y pH (5,45) en promedio de las muestras analizadas.

La extracción Soxhlet se seleccionó a partir de la comparación de diferentes métodos de extracción por medio de una matriz multicriterio, la cual definió las variables más relevantes como tipo de solvente (Éter de petróleo), relación molar (1:3 - lodo: solvente) y tiempo de extracción (3h).

La extracción realizada permitió identificar el contenido lipídico presente en el lodo residual con un rango de 25 a 50%, y con un contenido de acidez libre del 72 al 96% verificando su comportamiento como triglicérido.

El análisis experimental de la producción de biodiésel estimó la ruta química más adecuada la cual corresponde a dos esterificaciones y una transesterificación a condiciones de 67°C y 1 atm teniendo en cuenta la temperatura de ebullición del solvente, el tipo de catalizador y las propiedades de los lípidos.

El biodiésel obtenido en el laboratorio cumple con los parámetros estipulados para su comercialización a partir de la caracterización fisicoquímica que incluye densidad (880 kg/m³), acidez libre (2,38%), contenido de cenizas (0,015%), y punto de inflamación (123°C).

La extracción de lípidos realizada en Matlab permitió determinar que, al cabo de una hora sí es posible extraer 18,05 Kg/h de lípidos. Adicionalmente, las simulaciones realizadas en Aspen Hysys, determinaron que el flujo de ingreso de los lípidos (18,05 kg/h) produjo a condiciones super críticas 22,24 kg/h y a condiciones estándar 22,23 kg/h de biodiésel, los cuales no representan una diferencia significativa en el rendimiento de biodiesel dado a que el flujo de ingreso es bajo.

La evaluación técnico-financiera para la producción de biodiésel estableció que el proyecto es viable para su ejecución, a partir de la tasa interna de retorno (15%) mayor a la tasa interna de oportunidad (10%) y un VPN de \$168.508.034 mayor a cero, lo que indica lo que indica que la inversión inicial si alcanza a ser recuperada en un periodo de 5 años.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.G. Alzate G., J. E. Sotaquirá U., *Propuesta para el aprovechamiento del agua residual generada en la planta de tratamiento de C.I SIGRA S.A.*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7201>
- [2] C.I. SIGRA. S.A. “Margarinas Pendería y Pastelería”. [En línea]. Disponible en: <https://sigra.com/>. [Acceso: agosto 1, 2020]
- [3] Organización de la producción. “Proceso productivo”. [En línea]. Disponible en: http://www.prothius.com/docencia/L_CN-LC-13-2010-web.pdf. [Acceso: agosto 3, 2020]
- [4] L. C. Cortés G., S. L. Torres C., *Evaluación de alternativas para el aprovechamiento del residuo de la filtración de un aceite comestible.*, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2016. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1057&context=ing_ambient_al_sanitaria
- [5] C. Hernández., A. Mieres., Z. Niño., S. Pérez. “Efecto de la Refinación Física Sobre el Aceite de la Almendra del Corozo (*Acrocomia aculeata*)”, SciELO, vol. 18, no.5, pp 61, 2007, [En línea]. Disponible: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:9lBeAm1lWygJ:https://scielo.conicyt.cl/scielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS0718-07642007000500008+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co [Acceso: agosto 12, 2020].
- [6] P. Blanco R., *Diseño de una planta piloto de refinación de aceites vegetales.*, tesis pre. Ciencias, Universidad de Cádiz, Cádiz, España, 2007. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/disen-de-una-planta-piloto-de-refinacion-de-aceites-vegetales>
- [7] E. R. Rodríguez Guoz., *Análisis y reducción de pérdidas de producción en una industria de aceite de soya.*, tesis pre. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2007. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1811_IN.pdf

- [8] FAO. “Elaboración y refinado de aceites comestibles”. [En línea]. <http://www.fao.org/3/v4700s/v4700s09.html>. [Acceso: agosto 8, 2020].
- [9] J. Mara Block y D. Barrera-Arellano. (2009). Temas selectos en Aceites y Grasas. [En línea]. Volumen (1). Disponible en: https://issuu.com/editorablucher/docs/issuu_temas_selectos_isbn9788521204893
- [10] J. L. Arroyo R., *Planta de refino de aceites vegetales.*, tesis pre. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla, España, 2018. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3841/fichero/1.+Proyecto.+Memoria,Planos,+Pliego+y+Presupuesto%252FProyecto.+Memoria,+Pliego+y+Presupuesto.pdf>
- [11] D. A. Pérez., *Estudio del proceso de hidrogenación de grasas.*, tesis pre. Facultad de Ingeniería. Universidad de Zaragoza, España, 2015. Disponible en: <https://zagan.unizar.es/record/37127/files/TAZ-PFC-2015-402.pdf>
- [12] J. F. Sánchez M., *Estudio de la utilización de catalizadores y reactores estructurados en la hidrogenación de aceites.*, tesis doc. Universidad Nacional del Sur, Argentina, 2011. Disponible en: <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/2210/1/Sanchez-John-Tesis.pdf>
- [13] D. García S. *et al*, “Fraccionamiento e interesterificación del aceite de palma (*Elaeis guineensis*) cultivado en la amazonia peruana”, Rev. Investig., pp. 104-109, jun. 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/26524149_Fraccionamiento_e_interesterificacion_del_aceite_de_palma_Elaeis_guineensis_cultivado_en_la_amazonia_peruana
- [14] J. A. Salcedo C., *Diseño de una manteca vegetal para uso industrial a partir de grasa interesterificada enzimáticamente.*, tesis pre. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2014. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/89591/D-79967.pdf>

- [15] M. E. Méndez G., *Cuantificación y caracterización del contenido de sólidos y estabilidad térmica de diferentes tipos de oleínas de palma africana (Elaeisguineensis) y mezclas con aceite de soya (Glycinemax).*, tesis pre. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2014. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1465_Q.pdf
- [16] C. Palla, y M. Elena C, “0% Trans: Interesterificación y fraccionamiento como estrategias tecnológicas”, Rev. Investig., pp. 24-25, 2014. [En línea]. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/13510/CONICET_Digital_Nro.16727.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] I. A. Riquelme C., *Interesterificación química de grasa animal y aceite de nuez.*, Anteproyecto pre. Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas. Universidad de Chile, Chile, 2006. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2006/riquelme_i/sources/riquelme_i.pdf
- [18] Tecnologías para la Industria Alimentaria. “Procesos alternativos para la reducción de Grasas Trans”. [En línea]. Disponible en: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_05_G_Trans.pdf. [Acceso: agosto 20, 2020]
- [19] Proceso de refinación de aceites. “Margarinas”. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5170/03_Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=4&isAllowed=y. [Acceso: agosto 15, 2020]
- [20] HANNA instruments “Determinación del índice de peróxidos”. [En línea]. <https://www.hannainst.es/blog/116/determinacion-del-indice-de-peroxidos#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20per%C3%B3xidos%20mide,activo%20por%20kilo%20de%20grasa>. [Acceso: septiembre 9, 2020]
- [21] Mettler Toledo. “Determinación del contenido de humedad”. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Laboratory_weighing/moisture-contentdetermination.html#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20del%20horno%20de

[%20secado%20es%20un%20m%C3%A9todo%20termogravim%C3%A9trico,seca do%20y%20determinando%20la%20diferencia.](#) [Acceso: septiembre 5, 2020]

- [22] Universidad tecnológica de Chile. "Química de alimentos -510144". [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/24997715/Gu%C3%ADa_de_Humedad_y_Cenizas_1. [Acceso: septiembre 15,2020]
- [23] B. M. Márquez S., Refrigeración y congelación de alimentos: terminología, definiciones y explicaciones. tesis pre. Facultad de ingeniería de procesos, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú, 2014. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4188/IAmasibm024.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Las%20cenizas%20son%20el%20primer,%2C%20pectinas%2C%20almidones%20y%20gelatina.>
- [24] M. J. Ayala R., *Evaluación de la calidad del aceite de mezclas vegetales utilizado en doce frituras sucesivas empleado para freír plátano hartón verde.*, tesis pre. Facultad de ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2011. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8796/tesis740.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [25] Pruebas generales para lípidos. "Laboratorio de química experimental". [En línea]. <http://quimicaexperimental9.blogspot.com/2013/04/instituto-tecnologico-de.html>
- [26] L. L. Gomez M., A. M. Merchan B., Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas., tesis pre. Facultad de ingeniería y arquitectura, Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia, 2016. Disponible en: <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1305/Laura%20Lizeth%20Gomez%20Molina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [27] L. J. Cano., Cuantificación del porcentaje de humedad y cenizas contenidos en los residuos sólidos urbanos de la parroquia de limoncocha., tesis pre. Facultad De Ciencias Naturales Y Ambientales, Quito, Colombia, 2016. Disponible en:<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2499/1/Cano%20Leslie%20Tesis%20UISEK.pdf>
- [28] K. Castellanos y L. Daza. *Evaluación de la síntesis de biodiésel mediante el uso de residuos de Aguacate Hass (semilla) empleando el método de transesterificación*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7772/1/6132149-2020-1-IQ.pdf>
- [29] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. “Análisis Humedad y Cenizas”. [En línea]. Disponible en: <https://inta.gob.ar/servicios/analisis-humedad-y-cenizas#:~:text=Instituto%20Nacional%20de%20Tecnolog%C3%ADa%20Agropecuaria.Acerca%20De&text=El%20valor%20de%20ceniza%20se,%2F100%20g%20de%20muestra>. [Acceso: septiembre 29, 2020]
- [30] B. Márquez., *Refrigeración y congelación de alimentos: terminología, definiciones y explicaciones.*, tesis pre. Facultad de ingeniería de procesos, Arequipa, Perú, 2014. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4188/IAmasibm024.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [31] Grasas y aceites “Índice de yodo”. [En línea]. Disponible en: <http://docencia.udea.edu.co/qf/grasas/yodo.html>. [Acceso: septiembre 15,2020]
- [32] T. Ramírez. *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de aceites y grasas residuales potenciales para la producción de biocombustibles*, tesis pos. centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, S.C. México, 2018. Disponible en: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/369/1/Evaluaci%C3%B3n%20de%20las%20propiedades%20fisicoqu%C3%ADmicas%20de%20aceit>

[es%20y%20grasas%20residuales%20potenciales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biocombustibles_rees.pdf](#)

- [33] J. Lombana C., J. Vega J., E. Britton A. y S. Herrera V. *Análisis del sector biodiésel en Colombia y su cadena de suministro*. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/download/libro/579409.pdf>
- [34] Medida del pH. [En línea]. Disponible en: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/medida.htm>. [Acceso: septiembre 29,2020]
- [35] Escuela venezolana para la enseñanza de la química. “Acidez y pH”. [En línea]. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16739/acidez_ph.pdf;jsessionid=18E22D8565483977664412B93E1808A2?sequence=1. [Acceso: septiembre 29,2020]
- [36] TECNAL. “La determinación de lípidos presentes en alimentos auxilia en la elaboración de dietas balanceadas”. [En línea]. Disponible en: <https://tecnal.com.br/es/blog/82-la-determinacion-de-lipidos-presentes-en-alimentos-auxilia-en-la-elaboracion-de-dietas-balanceadas>. [Acceso: septiembre 20,2020]
- [37] Lípidos y membranas. [En línea]. Disponible en: <http://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1960§ionid=148095989>. [Acceso: septiembre 23,2020]
- [38] Técnicas avanzadas en química. “Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet”. [En línea]. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_04_05.pdf [Acceso: septiembre 23,2020]
- [39] M. Axelsson, F. Gentili, “A Single-Step Method for Rapid Extraction of Total Lipids from Green Microalgae”, *Rev. Investig.*, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0089643>
- [40] N. Y. Rojas., *Recuperación de ácidos grasos de calidad comercial a partir de residuos de la refinación de aceites comestibles*. tesis pre. Facultad de Ingeniería,

- Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2005. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22107/u260752.pdf?sequence=1>
- [41] Determinación de la composición bioquímica de biomasa algal. “Determinación gravimétrica de lípidos totales (Bligh & Dyer)”. [En línea]. Disponible en: <https://inbiotec-conicet.gob.ar/wp-content/uploads/2017/11/PROTOCOLO-E-lipidos.pdf>
- [42] S. S. Rincon, J. A. Ramón V, J. R. Palacios G, “Análisis del rendimiento en la extracción de aceite de jatropha curcas I. Por los métodos de extracción química y ultrasonido”, Rev. Investig., pp. 171-179, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/1394/4054>
- [43] J. R. Bonilla M, J. L. Hoyos C, “Métodos de extracción, refinación y concentración de aceite de pescado como fuente de ácidos grasos omega-3”, Rev. Investig., pp. 623-626, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v19n3/es_0122-8706-ccta-19-03-645.pdf
- [44] N. A. Hafizi M, W. Sing H, R. Abdul R, N. Ngadi, y I. Mahmood, “Optimisation of Lipid Extraction from Primary Sludge by Soxhlet Extraction”, Rev. Investig, pp. 1-4, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.aidic.it/cet/17/56/221.pdf>.
- [45] Calidad de métodos analíticos. “Métodos para determinar materia grasa total”. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/ah833s/AH833S07.pdf>. [Acceso: septiembre 25,2020]
- [46] Trabajo practico N°4. “Extracción y cuantificación de lípidos presentes en alimentos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.iib.unsam.edu.ar/archivos/docencia/licenciatura/biotecnologia/2017/QuimicaBiol/1494002365.pdf> [Acceso: septiembre 25,2020]
- [47] L. E. Salazar P., *Evaluación de métodos de extracción de aceite de microalgas para la producción de biodiesel*. tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Perú, 2012. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1490/ING_508.pdf?sequence=1

- [48] Técnicas de análisis de materias grasas. “Técnica Bligh y Dyer (1959)”. [En línea]. Disponible en: <http://www.fagro.edu.uy/~nutrical/ensenanza/AVI%20WEB/cursoema/MGTecnicas.pdf>. [Acceso: septiembre 26,2020]
- [49] A. González D, L. Galindo, S. González, Y. Peralta R, V. Kafarov, “Adaptación del Método Bligh & Dyer a la Extracción de Lípidos de Microalgas colombianas para la Producción de Biodiesel de Tercera Generación”, Rev. Investig., pp. 26-34, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/317151458_Adaptacion_del_Metodo_Bligh_Dyer_a_la_Extraccion_de_Lipidos_de_Microalgas_Colombianas_para_la_Produccion_de_Biodiesel_de_Tercera_Generacion
- [50] S. Soto L. *et al*, “Extracción de lípidos de *tetraselmis suecica*: proceso asistido por ultrasonido y solventes.” Rev. Investig., pp. 723-737, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n3/v13n3a7.pdf>
- [51] A. Grajales Q., E. D. Serrano M., y C. M. Hahn V, “Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación”, Rev. Investig., 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a14.pdf>
- [52] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. “Determinación de grasas y aceites en aguas por el Método Soxhlet”. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Grasas+y+Aceites+en+agua+por+m%C3%A9todo+Soxhlet..pdf/15096580-8833-415f-80dd-ceaa7888123d#:~:text=Adicione%20el%20solvente%20al%20vaso,de%20calentamiento%20del%20equipo%20extractor.&text=Realice%20la%20extracci%C3%B3n%20durante%204.sif%C3%B3n%20que%20realice%20el%20equipo>. [Acceso: septiembre 27, 2020]
- [53] Extracción. “Extracciones con equipo soxhlet”. [En línea]. Disponible en: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/39-extraccinconequiposoxhlet.pdf>. [Acceso: septiembre 30, 2020]
- [54] Fabricante Multinacional Merck. “Productos químicos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.merckmillipore.com/CO/es>. [Acceso: septiembre 20,2020]

- [55] Analytical Techniques for Scientists. “Recent Advances in Sample Preparation for Pesticide Analysis”. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00101-0>. [Acceso: septiembre 20,2020]
- [56] J. J. Lafont, M. S. Páez, y A. A. Portacio, “Extracción y Caracterización Físicoquímica del Aceite de la Semilla (Almendra) del Marañón (*Anacardium occidentale L*)”, Rev. Investig., pp. 53-55, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v22n1/art07.pdf>
- [57] Hoja de seguridad. “Productos químicos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.quimica.una.ac>. [Acceso: septiembre 28, 2020]
- [58] PanReac AppliChem. “Reactivos de laboratorio y productos químicos para uso industrial”. [En línea]. Disponible en: <https://www.itwreagents.com/rest-of-world/es/home-rw>. [Acceso: septiembre 30,2020]
- [59] Determinación de grasa cruda. “Método soxhlet”. [En línea]. Disponible en: http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/cbs/lyanez/analisis/material_adicional/notasgrasas.ppt. [Acceso: octubre 1, 2020]
- [60] D. T. García., Y. Díaz D., M. Rondón M., E. Fernández S., y R. Piloto R. *Extracción de aceites de origen vegetal monografía*, monografía, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba, 2017. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/317007345 Extraccion de aceites de o rigen vegetal](https://www.researchgate.net/publication/317007345_Extraccion_de_aceites_de_origen_vegetal)
- [61] N. A. Hafizi M, W. Sing H, R. Abdul R, N. Ngadi, y I. Mahmood, “Optimisation of Lipid Extraction from Primary Sludge by Soxhlet Extraction”, Rev. Investig, pp. 1-4, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.aidic.it/cet/17/56/221.pdf>.
- [62] M. L. Pisarello., *Producción de biodiesel: equilibrio físicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes*. Tesis doc. Facultad de ingeniería química, Universidad Nacional del Litoral, Argentina, 2019. Disponible en: <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [63] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, *Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez*, Bogotá: ICONTEC.1999.
- [64] Caracterización de grasas y aceites. “Índice de saponificación o Koettsdorfer” [En línea]. Disponible en: https://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/gmanrique/images/Grasas_y_Aceites.pdf. [Acceso: octubre 1,2020]
- [65] J. A. Rodríguez A, L. Ruiz L, M. A. Santoyo S, y L. G. Miranda V, “Determinación del índice de acidez y acidez total de cinco mayonesas”, Rev. Investig., pp. 843-849, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/10/146.pdf>.
- [66] H. Salcedo. *CONVERSIÓN DE LOS ACEITES RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS EN BIODIESEL*, tesis doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2018. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1pNW_j95KLfL1hYYGtoASAkARx7DaDk2/view
- [67] A. Arbeláez y M. Rivera. *Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos*, tesis pre. departamento de ingeniería de procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2007. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1jChQRtJXunu7gPzno0FjbgwavNuCPW2g/view>
- [68] L. Rivero, C. Youseff, B. Alcocer, D. De la Rosa, “Efecto de la temperatura y del tiempo de reacción sobre la esterificación y la transesterificación de aceites comestibles usados”, Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias. Vol.4 No.13, 19-35, 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol4num13/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V4_N13_3.pdf
- [69] M. Medina, Y. Ospina, L. Tejeda, “Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel”, Revista.luna.azúl. No. 40, 25-34, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n40/n40a03.pdf>

- [70] M. Montenegro, F. Vargas y C. Guerreo, “Producción y caracterización de biodiesel a partir de aceite de pollo” informador Técnico (Colombia), Edición 76, enero - diciembre 2012, p 62 – 71. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/264195284_Produccion_y_caracterizacion_de_Biodiesel_a_partir_de_aceite_de_pollo [Acceso: septiembre 8, 2020].
- [71] “Variables de operación en el proceso de transesterificación de grasas animales”. [En línea]. <file:///C:/Users/Cielo/Downloads/1143-Article%20Text-4201-2-10-20201017.pdf> [Acceso: octubre 25, 2020]
- [72] R. Bernal. Elaboración y caracterización de biodiesel como energía alternativa a partir de aceite de pescado, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2019. Disponible en: <https://repositorio.unibague.edu.co/bitstream/20.500.12313/1288/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>
- [73] B. Ordóñez, L. Chaves, W. Rodríguez, M. Murcia, E. Alvarado, “Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina”, Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. XV n.º 1, pp. 61- 70, jul. 2013. [Online]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v15n1/v15n1a7.pdf>
- [74] A. Muentes, F. Pérez, B. Labrada, M. Velásquez, A. Sánchez, “Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador”, Rev. Cuba Quim vol. 30 n.º 1, ene. – abril. 2018. [Online]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000100012#:~:text=Seg%C3%BAn%20las%20normas%20ASTMD6751%20y,inflamaci%C3%B3n%20de%2071%20oC
- [75] C. Velásquez. Estudio de estabilidad en almacén del biodiesel obtenido de aceite de soya (*Glycine max*), palma africana (*Elaeis guineensis*), maíz (*Zea mays*), higuera (*Ricinus communis*) y piñón (*Jatropha curcas*), tesis pre. Carrera de Agroindustria alimentaria, Universidad de Zamorano, Zamorano, Honduras, 2007. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1271/1/AGI-2007-T003.pdf>

- [76] A. Calderón, M. Santamaría, R. Tapia, E. Chávez, O. Villegas, V. Téllez, “Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite crudo de la palma africana *Elaeis guineensis*”, Rev. Acad Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, vol. 17, n.º 2, pp. 103-109, mayo-agosto. 2013. [Online]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46730913002.pdf>
- [77] Biocombustibles en Colombia. “Marco normativo”. [En línea]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles_colombia.pdf. [Acceso: noviembre 1, 2020]
- [78] Ley 939 de 2004. Por medio de la cual se subsanan los vicios de procedimiento en que incurrió en el trámite de la Ley 818 de 2003 y se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en Motores diesel y se dictan otras disposiciones. 31 de diciembre de 2004. D.O. No. 45778
- [79] Fedebiocombustibles. “El aceite de palma lidera la producción mundial de biodiésel”. [En línea]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-1833.htm#:~:text=Como%20se%20avanza%20al%20principio,para%20generar%20electricidad%20y%20calor>. [Acceso: noviembre 2, 2020]
- [80] J. A. Ramírez C., S. C. Rodríguez P., *Conveniencia de la Producción de Biodiesel en Colombia desde la perspectiva del Desarrollo Sostenible.*, tesis pre. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2019. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23602/1/Conveniencia%20de%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biodiesel%20en%20Colombia%20desde%20la%20perspectiva%20del%20desarrollo%20sostenible.pdf>
- [81] Análisis del sector biodiésel en Colombia y su cadena de suministro. “Estructura del sector biodiésel en Colombia”. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/579409.pdf> [Acceso: noviembre 2, 2020]
- [82] Plantas de biomasa “Biodiesel”. [En línea]. Disponible en: <http://www.plantasdebiomasa.net/biodies.html#:~:text=El%20Biodiesel%20por%20>

[ser%20su,abaratando%20los%20costes%20de%20mantenimiento.&text=Es%20el%20%C3%BAnico%20combustible%20no,los%20motores%20de%20gas%C3%B3leo%20convencional.](#) [Acceso: octubre 25,2020]

- [83] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (noviembre 11, 2008) “Biodiesel para uso en motores Diesel. Especificaciones”
- [84] Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. “La estabilidad oxidativa”. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5038487>. [Acceso: noviembre 6, 2020]
- [85] W. L. Jiménez., S. E. Valero E., *Estudio de la estabilidad, bajo condiciones de almacenamiento, del biodiésel obtenido a partir de aceite reciclado de cocina*. tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, 2015. Disponible en:<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7947/Documento%20William-%20Esmeralda.pdf?sequence=1>
- [86] E. Reverchon y C. Marrone. *Modeling and Simulation of the Supercritical CO2 Extraction of Vegetable Oils*, tesis pre. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222980359_Modeling_and_simulation_of_the_supercritical_CO2_extraction_of_vegetable_oils
- [87] C. D. Zapata, I. D. Martínez, E. A. Castiblanco, C. A. Henao U, “Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: Diseño y simulación de dos procesos continuos”, Rev. Investig., 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n151/a08v74n151.pdf>
- [88] Lixiviación. “Extracción sólido líquido” [En línea]. Disponible en: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mlci/lixiv_introd.pdf [Acceso: diciembre 10,2020]
- [89] L. R. Rosa R, E. Henríquez M, E. Sánchez T, K. A. Ojeda D, “Diseño y simulación de una planta para la producción de biodiésel a partir de *Jatropha curcas* L. en el

- departamento de Bolívar”, Rev. Investig., 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342039270008.pdf>
- [90] M. Franco. *Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales en condiciones súper - críticas*, tesis pos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2013. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41810657.pdf>
- [91] A. Diaz, S. Useche, *Simulación de una planta piloto para la obtención de biodiesel en condiciones supercríticas a partir de tierras de blanqueo agotadas*, tesis pre. Departamento de ingeniería Química, Universidad los Andes, Bogotá, Colombia, 2013. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/25055/u627280.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [92] j. Welty, C. Wicks, R. Wilson, *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*. México D.F. Limusa: Universidad Estatal de Oregon, 1991.
- [93] VWR International. “Productos químicos”. [En línea]. Disponible en: <https://es.vwr.com/store/>. [Acceso: noviembre 27, 2020]
- [94] M. A. AMADO D., *Seguimiento a las pérdidas de fitonutrientes durante el proceso de refinación del aceite de palma*. tesis pre. Facultad de ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 2010. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11056335.pdf>
- [95] Propiedades y usos del aceite de palmiste. “Composición de ácidos grasos de los aceites de palmiste media”. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/925>. [Acceso: noviembre 28, 2020]
- [96] La soya. “Composición de ácidos grasos del aceite de soya”. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4697/1/T196.pdf> [Acceso: noviembre 28, 2020]

- [97] A. M. Arbeláez M., M. P. Rivera Q., *Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiésel a partir de algunos aceites vegetales colombianos*. tesis pre. Departamento de ingeniería de procesos, Universidad de Eafit, Medellín, Colombia, 2007. Disponible en: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/365/AngelaMaria_ArbelaezMarin_2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [98] M. A. Acero L., L. A. Manrique P., *Optimización operativa y económica de una planta de biodiésel colombiana con base en modelo numérico*. tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2009. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/24253/u364982.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [99] S. A. García M, A. E. Sánchez C, B. Labrada V, F. Lafargue P, M. Díaz V, “Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador”, *Rev. Investig.*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n2/rtq07218.pdf>
- [100] Paquetes termodinámicos. [En línea]. Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/p3nak770/In-General-it-is-better-to-use-the-PR-property-package-as-a-starting-point-4315/>. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [101] Club de Biotanqueo. “Normatividad de la agroindustria de los biocombustibles”. [En línea]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/main-pagina-id-2-titulo-normatividad.htm>. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [102] Experiencia del gremio palmero colombiano en el desarrollo del biodiésel de palma. “Innovación productiva en circuitos comerciales orientados a la producción y comercialización de biocombustibles”. [En línea]. Disponible en: https://web.fedepalma.org/media/Presentacion_JMD_Costa%20Rica_Biodiesel_opt2.pdf. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [103] SendeCO₂. “Precios CO₂”. [En línea]. Disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>. [Acceso: diciembre 13, 2020]

- [104] Acueducto. “Tarifa de agua”. [En línea]. Disponible en: https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas_2020!/ut/p/z0/04_Sj9CPykyssy0xPLMnMz0vMAfljo8zivS3MjDzcLYz8Lly8TQwCDR1dPZxcHY38PYz0C7ldFQFf4IKj/. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [105] Servicios MinMinas. “Precio Metanol”. [En línea]. Disponible en: <http://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/7766.pdf>. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [106] Minería Chilena. “Mercado del ácido sulfúrico”. [En línea]. Disponible en: <https://www.mch.cl/reportajes/mercado-del-acido-sulfurico-precio-bajaria-hacia-octubre-por-mayor-oferta/#>. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [107] Química. “Precios de NaOH”. [En línea]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/productos/naoh-1885819/precios.htm>. Acceso: diciembre 13, 2020]
- [108] Silverson. “Mezcladores”. [En línea]. Disponible en: <https://www.silverson.es/es/productos/mezcladores-en-linea/>. Acceso: diciembre 13, 2020]
- [109] Alibaba. “Bombas”. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/g/centrifugal-pumps-price.html>. Acceso: diciembre 13, 2020]
- [110] Alibaba. “Bombas”. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/g/centrifugal-pumps-price.html>. Acceso: diciembre 13, 2020]
- [111] Silverson. “Mezcladores”. [En línea]. Disponible en: <https://www.silverson.es/es/productos/mezcladores-en-linea/>. Acceso: diciembre 13, 2020]

- [112] C. D. Zapata, I. D. Martínez, E. A. Castiblanco, C. A. Henao U, “Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: Diseño y simulación de dos procesos continuos”, Rev. Investig., 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n151/a08v74n151.pdf>
- [113] Albiz. “Reactor de laboratorio con camisa y aislamiento”. [En línea]. Disponible en: <https://tm.all.biz/en/laboratory-reactor-with-a-jacket-and-insulation-v-g1733803KZ>
Acceso: diciembre 13, 2020]
- [114] BibDigital. “Torre de destilación”. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7342?mode=full/>. Acceso: diciembre 13, 2020]
- [115] Poypro, tecnología de servicio. “Válvula reductora de presión”. [En línea]. Disponible en: <https://www.polypro.com.co/productos?producto=754>. Acceso: diciembre 13, 2020]
- [116] E. May, J. Rocha, “Análisis de exergía de unas columnas de destilación” Ciencia Ed. (IMIQ) vol. 24 núm. 2, 2009. Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ) 24(2): 117-126, 2009. [Online]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/482/48213841004.pdf>
- [117] La economía. “Tasa impositiva del mercado”. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/asi-quedaron-los-impuestos-en-2020-con-la-reforma-tributaria-2946739#:~:text=En%20la%20Ley%20de%20Crecimiento,2021%20y%2030%25%20para%202022>. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [118] Dinero. “La inflación anual”. [En línea]. Disponible en: <https://www.dinero.com/economia/articulo/inflacion-de-colombia-en-octubre-de-2020/305847#:~:text=El%20indicador%20anual%20es%20inferior,indicador%20se%20acerque%20al%203%25>. [Acceso: diciembre 13, 2020]
- [119] Ministerio de minas y energía. “Mina de datos de la reactivación sostenible de Colombia”. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24211636/2020.10.09+Informe+>

[semanal+sector+minero+energetico_Medios+%281%29.pdf](#). [Acceso: diciembre 13, 2020]

[120] Total Colombia. “Aditivos de flujos en frío”. [En línea]. Disponible en: <https://www.total.co/aditivos-y-combustibles/aditivos-de-refinamiento/aditivos-de-flujo-en-frio>. [Acceso: febrero 4, 2021]