

**DESARROLLO DEL DISEÑO DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN  
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA MICROALGA  
*Scenedesmus dimorphus* EMPLEANDO SOLVENTES VERDES**

**ELKIN ANDRES CIFUENTES VANEGAS**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2020**

**DESARROLLO DEL DISEÑO DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN  
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA MICROALGA  
*Scenedesmus dimorphus* EMPLEANDO SOLVENTES VERDES**

**ELKIN ANDRES CIFUENTES VANEGAS**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Orientador**

**HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA**

**Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C**

**2020**

Nota de aceptación (Subdirector Operativo de Investigaciones)

---

---

---

---

---

---

Firma Docente Investigador

---

Firma Docente Jurado 1

---

Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C., Noviembre 2020

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

*Presidente de la Universidad y Rector del Claustro*

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

*Consejero Institucional*

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

*Vicerrectora Académica y de Investigación*

**Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ**

*Vicerrector Administrativo y Financiero*

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

*Secretaría General*

**Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN**

*Decano Facultad de Ingenierías*

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

*Director Programa de Ingeniería Química*

**Ing. IVÁN RAMÍREZ MARÍN**

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.

## DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico especialmente a:

A Dios por darme la oportunidad de finalizar esta etapa tan importante en mi vida.

A mi madre Blanca Cecilia Vanegas, por su gran apoyo incondicional, por siempre demostrarme en actos de amor ser capaz en lo que me propongo. Y darme mayor fortaleza en momentos o circunstancias en que me sentía perdido o decaído. Ser un modelo a seguir para mi motivación en la vida.

A mi padre Jesús Andres Cifuentes, por demostrarme con la paciencia y el esfuerzo sale el fruto de los logros se alcanzan.

A mi hermana Maritza, siempre ha sido una compañera fiel en cada uno los logros importantes en mi vida. Además, fue un pilar en nunca desfallecer y continuar con todo lo que me proponga.

A mis demás familiares por su compañía en cada etapa de mi vida.

A mis amigos, compañeros, profesores y colegas por su tiempo invertido durante esta etapa importante de mi vida, de cada uno aprendí infinidad de cosas y me aportaron semillas a nivel integral.

A mi mascota y ángel Isis, no está presente fue amor puro, aliento y fuerza en el proceso de esta etapa de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa agradecimiento a:

Dios, por ser mi pilar y la sabiduría que me guía en cada uno de mis pasos, ser capaz de ser posible este logro.

A mi madre, por ser aquella que me ha dado una voz de aliento en mi formación profesional, y ser tenaz en todo momento.

A Katuska Echeverría, docente e Ingeniería Química de la Universidad Politécnica Territorial Andres Loy Blanco, por su aporte de conocimiento y resolver dudas que se presentaron en el proyecto.

A la Fundación Universidad de América, por contribuirme en mi formación profesional de Ingeniero Químico y dar los fundamentos en la ejecución de esta investigación.

A los docentes, compañeros y otras personas por su contribución en este proceso y dieron su grano de arena en el desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	19
1. MARCO TEORICO	19
1.1 MICROALGAS	19
1.1.1 <i>Scenedesmus</i>	20
1.1.1.1 <i>Scenedesmus dimorphus</i>	21
1.2 LIPIDOS	22
1.2.1 Acilgliceridos	25
1.2.1.1 Triacilglicerido	25
1.2.1.2 Monoacilglicerido	26
1.3 LIPIDOS PRESENTES EN MICROALGAS	27
1.4 CONDICIONES DE CULTIVO	29
1.4.1 pH	29
1.4.2 Luz	30
1.4.3 Agitación	30
1.4.4 Temperatura	31
1.4.5 Nutrición microalgal	31
1.5 CURVA DE CRECIMIENTO	31
1.6 SOLVENTES VERDES	34
1.7 PROCESO DE TRANSESTERIFICACION	39
2. METODOLOGIA PARAMETROS DE CULTIVO DE LA MICROALGA <i>Scenedesmus Dimorphus</i> Y SOLVENTES VERDES	44
2.1 PARAMETROS DE CULTIVO DE LA MICROALGA <i>Scenedesmus</i> <i>dimorphus</i>	44
2.1.1 Revisión bibliográfica de los parámetros de cultivo de la microalga <i>Scenedesmus dimorphus</i>	44
2.1.2 Diseño de la matriz de selección para el parámetro de cultivo de pH	47
2.2 SELECCIÓN DE LOS PARAMETROS DE CULTIVO DE LA MICROALGA <i>Scenedesmus dimorphus</i>	51
2.3 PARAMETROS DE SELECCIÓN DE LOS SOLVENTES VERDES	52
2.3.1 Revisión bibliográfica de los parámetros de selección de los solventes verdes para la extracción de lípidos	52
2.3.2 Compilación bibliográfica de los parámetros de selección de los solventes verdes	53
2.4 SELECCIÓN DEL SOLVENTE Y SUS PARÁMETOS PARA LA EXTRACCIÓN DE LIPIDOS	62



3. PARÁMETROS DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN	64
3.1 PARÁMETRO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS LÍPIDOS	64
3.1.1 Compilación bibliográfica de la caracterización de los lípidos	64
3.2 PARÁMETRO DE TIEMPO DE REACCIÓN	70
3.2.1 Compilación bibliográfica del tiempo de reacción	70
3.2.1.1 Análisis estadístico del parámetro de tiempo de reacción	72
3.3 PARÁMETRO DE CONTENIDO DE HUMEDAD	73
3.3.1 Compilación bibliográfica del parámetro de contenido de humedad	73
3.3.1.1 Análisis estadístico del parámetro de contenido de humedad	74
3.4 PARÁMETRO DE TEMPERATURA ÓPTIMA	75
3.4.1 Compilación bibliográfica del parámetro de temperatura óptima	75
3.4.1.1 Compilación bibliográfica del parámetro de temperatura óptima	77
3.5 PARAMETRO DE AGITACIÓN	78
3.5.1 Compilación bibliográfica del parámetro de agitación	78
3.5.1.1 Análisis estadístico del parámetro de agitación	79
3.6 SELECCIÓN DE LOS PARAMETROS DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN	82
4. DISEÑO DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN	83
4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO POR EQUIPO	84
4.1.1 Reactor	84
4.1.2 Decantador # 1	85
4.1.3 Secador # 1	86
4.1.4 Torre de destilación	87
4.1.5 Condensador	89
4.1.6 Lavado	89
4.1.7 Decantador # 2	90
4.1.8 Secador # 2	91
4.2 CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS A USAR PARA EL PROCESO	92
4.2.1 Reactor	92
4.2.2 Decantador	94
4.2.3 Secador	95
4.2.4 Torre de destilación	96
4.2.5 Condensador	96
5. CONCLUSIONES	98
6. RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFIA	100
ANEXOS	105

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Clasificación de ácidos grasos más comunes.	24
<b>Tabla 2.</b> Contenido de lípidos totales en la familia <i>Scenedesmus</i>	30
<b>Tabla 3.</b> Valores de matriz pH microalga <i>Scenedesmus dimorphus</i>	45
<b>Tabla 4.</b> Compilación bibliográfica de los parámetros de cultivo pH, luz y agitación de la microalga <i>Scenedesmus dimorphus</i>	46
<b>Tabla 5.</b> Compilación bibliográfica de los parámetros de cultivo temperatura y nutrición microalgal de la microalga <i>Scenedesmus dimorphus</i>	48
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de cultivo de pH, luz y agitación seleccionados de la especie microalgal	50
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de cultivo de temperatura y nutrición microalgal seleccionados de la especie microalgal	50
<b>Tabla 8.</b> Compilación bibliográfica de los parámetros de eficiencia y selectividad para la selección del solvente verde.	52
<b>Tabla 9.</b> Compilación bibliográfica de los parámetros de tiempo de extracción, costo y método de extracción para la selección del solvente verde	54
<b>Tabla 10.</b> Selección del solvente verde y sus parámetros de propiedades, eficiencia y selectividad para la extracción de lípidos	60
<b>Tabla 11.</b> Selección del solvente verde y sus parámetros de tiempo de extracción, costo y método de extracción para la extracción de lípidos	60
<b>Tabla 12.</b> Compilación bibliográfica de los perfiles de lípidos a partir de la microalga <i>Scenedesmus dimorphus</i>	63
<b>Tabla 13.</b> Compilación bibliográfica del tiempo de reacción en lípidos	69
<b>Tabla 14.</b> Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable de tiempo de reacción.	70
<b>Tabla 15.</b> Recopilación bibliográfica del contenido de humedad en lípidos	72
<b>Tabla 16.</b> Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable del contenido de humedad	73
<b>Tabla 17.</b> Recopilación bibliográfica de la temperatura óptima en el proceso de transesterificación.	75
<b>Tabla 18.</b> Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable de temperatura óptima.	77
<b>Tabla 19.</b> Recopilación bibliográfica de la agitación empleada en el proceso de transesterificación.	78
<b>Tabla 20.</b> Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable de la agitación.	81
<b>Tabla 21.</b> Parámetros del proceso de transesterificación	82

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Scenedesmus dimorphus</i> .	22
<b>Figura 2.</b> Formula general de ácido graso saturado y ácido graso insaturado.	25
<b>Figura 3.</b> Formula general de un triacilglicerido.	26
<b>Figura 4.</b> Formula general de un diacilglicérido.	27
<b>Figura 5.</b> Formula general de un monoacilglicérido.	28
<b>Figura 6.</b> Curvas de crecimiento para una población de microalgas.	34
<b>Figura 7.</b> Ecuación general del proceso de transesterificación.	41
<b>Figura 8.</b> Reacciones implicadas en el proceso de transesterificación.	42
<b>Figura 9.</b> Reacciones implicadas en el proceso de transesterificación: dos reacciones reversibles en la transformación de diglicérido a glicerina	42
<b>Figura 10.</b> Reacción de saponificación.	43
<b>Figura 11.</b> Diagrama conceptual del proceso de transesterificación in situ.	83
<b>Figura 12.</b> Corrientes decantador # 1	86
<b>Figura 13.</b> Corrientes secador # 1	87
<b>Figura 14.</b> Corrientes de la torre de destilación	88
<b>Figura 15.</b> Corrientes del condensador	89
<b>Figura 16.</b> Corrientes del lavado	90
<b>Figura 17.</b> Corrientes del decantador # 2	91
<b>Figura 18.</b> Corrientes del secador # 2	92
<b>Figura 19.</b> Reactor Batch	93
<b>Figura 20.</b> Decantador	94
<b>Figura 21.</b> Secador	95
<b>Figura 22.</b> Condensador	97

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>Anexo A. Delimitación</b>	<b>87</b>

## ABREVIATURAS

°C: Grados centígrados.

CO: Monóxido de carbono.

CO<sub>2</sub> Dióxido de carbono.

COP: Peso colombiano.

L: Litro.

mL: Mililitro

h: Hora.

min: Minutos.

SAFAS: Ácidos grasos saturados.

MUFAS: Ácidos grasos monoinsaturados.

PUFAS: Ácidos grasos poliinsaturados.

PUFAS: Ácidos grasos poliinsaturados

## GLOSARIO

**ÁCIDO GRASO:** nombre asignado a un grupo de moléculas que poseen un grupo carboxilo -COOH dependiendo del número de átomos de carbono

**BIODIESEL:** esteres de cadena larga formado por la transesterificación.

**BIOMASA:** material orgánico y biodegradable es originario de plantas, animales y/o microorganismos. Con el fin de obtener productos, subproductos, residuos se puede hacer una disposición final de agricultura, industrias forestales y afines.

**CULTIVO:** grupo de microorganismos que crecen en recipientes sin aireación con la ayuda de nutrientes, para la producción de biomasa y/o metabolito de interés.

**LÍPIDOS:** son compuestos orgánicos caracterizados por su solubilidad en solventes no polares y su baja solubilidad en agua. Agregando, son particularmente anfipáticos. Se dividen en ácidos grasos, colesterol, glicerofosfadicos y glucofosfolipidos.

**MICROALGA:** microorganismos fotosintéticos, capaces de transformar la energía solar o lumínica en biomasa y productos de interés.

**SOLVENTE VERDE:** sustancia ecológica útil como disolvente y en la extracción de lípidos en microalgas.

**TRANSESTERIFICACIÓN:** reacción entre un éster y un alcohol, presentando el intercambio de sus cadenas para la formación otro éster y otro alcohol

**TERPENOS:** compuesto orgánico isoprenoide, común a un grupo de hidrocarburos cíclicos, presentes en varios aceites esenciales de origen vegetal.

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación teórico se desarrolló el diseño del proceso de transesterificación a partir de recopilaciones bibliográficas de investigaciones realizadas con la microalga *Scenedesmus dimorphus* y los solventes verdes. Inicialmente, se establecieron los parámetros de cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus* con la presentación de los factores de pH, luz, agitación y nutrición microalgal. Cada uno de los parámetros de cultivo determinados es de vital importancia en los resultados de extracción de lípidos.

De igual manera, para los solventes verdes se realiza una recopilación bibliográfica con los parámetros que afectan el rendimiento y la extracción de lípidos. Los parámetros seleccionados que se registraron en la tabla 8 y 9 son las propiedades, eficiencia, tiempo de extracción, costo y método de extracción. A partir, del autor Jeevan y otros autores.

Luego se seleccionaron los parámetros del proceso de transesterificación. Con ello inicialmente se realizó una clasificación de los lípidos en MUFAS, PUFAS, SFAS asignándole factores, el factor de mayor valor es el adecuado para el proceso de transesterificación. Entonces, finalizada la clasificación del perfil lipídico se tomaron varios artículos relacionados con el proceso de transesterificación con el fin de selección de parámetros. Aquellos parámetros seleccionados son transesterificación contenido de humedad, tiempo de reacción, temperatura óptima y agitación.

Finalmente, con los parámetros del proceso de transesterificación seleccionados se diseñó el proceso tomando como fundamento un trabajo investigativo donde desarrollaron un proceso de transesterificación con microalgas. Por tanto, se presenta el diseño con una descripción de cada uno de las corrientes del proceso y los equipos seleccionados.

**Palabras clave:** Extracción lípidos, microalga, solvente verde, transesterificación

## INTRODUCCIÓN

Debido al actual precio del petróleo, los recursos limitados de combustibles fósiles, y las consecuencias y afectaciones ambientales que estos traen. Se ha generado un nuevo enfoque hacia la producción de biocombustibles empleando tecnologías verdes con el uso de microorganismos.

En Colombia la iniciativa de biocombustibles ya se vuelve una realidad con la Ley 693 de 2001 del etanol carburante y la Ley 939 de 2004 que se refiere a la ley de biodiesel.

Sin embargo, el biocombustible, en especial el biodiesel; es generado en Colombia mayoritariamente su materia prima es aceite de palma, indirectamente se puede tener una afectación tanto el incremento en los cultivos de aceite de palma apartando los cultivos naturales de cada región y simultáneamente sucede el incremento de los alimentos por el aumento de la población.

En la búsqueda de alternativas de fuentes de lípidos naturales surge el interés de emplear las microalgas y como siguiente proceso para la producción de biodiesel.

La selección de las microalgas como fuente de lípidos se sustenta en a su mayor eficiencia energética, mayor producción de biomasa y al rápido crecimiento del cultivo. Con ello, son capaces de producir y extraer lípidos a partir de varias investigaciones.

En estas investigaciones y trabajos de grados en su mayoría se han empleado específicamente dos familias *Chlorella* y *Scenedesmus* por su perfil lipídico facilitando a la extracción de lípidos.

La presencia en el territorio colombiano de la familia de *Scenedesmus* es mayoritariamente en agua dulces. Se hallaron dos especies de microalga *Scenedesmus dimorphus* y *Scenedesmus sp* en varias muestras de agua del Caño de Aguas Claras en la ciudad de Villavicencio, Colombia

Se obtuvo un porcentaje de extracción de lípidos de 14% empleando no solventes orgánicos si no solventes verdes, en este caso, con el D-limoneno. Empleando la microalga *Chlorella Vulgaris*; una microalga con el similar perfil lípido de la *Scenedesmus Dimorphus*.

Actualmente, los solventes orgánicos para la extracción de lípidos poseen inconvenientes con el medio ambiente por su disposición final entre lo que se encuentra cloroformo y hexano. Por lo que ha surgido el interés de emplear solventes verdes para verificar si su porcentaje de extracción es similar al emplear un solvente orgánico.



## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar el diseño del proceso de transesterificación para la producción de biodiesel partiendo de la microalga *Scenedesmus dimorphus* usando solventes verdes.

### **OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Establecer los parámetros de cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus* y solventes verdes para la extracción de lípidos.
- Seleccionar los parámetros para el proceso de transesterificación
- Diseñar el proceso de transesterificación.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 MICROALGAS

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos con altas eficiencias pueden convertir su metabolismo en energía para su desarrollo celular. Aquellas poseen una gran fuente de biomoléculas (lípidos, proteínas, carbohidratos); el rendimiento de los productos de interés varía según el género de la microalga por sus distintos comportamientos. <sup>1</sup>También, pueden ser autótrofas, es decir, capaces de producir su propio alimento con el uso de compuestos inorgánicos como fuente de carbono. Para clasificarlas, primero, se encuentra las microalgas fotoautótrofas cuando usan la luz como fuente de energía y quimioautótrofas cuando oxidan compuestos inorgánicos para obtener la energía. <sup>2</sup>Por otra parte, están las heterótrofas usan compuestos orgánicos como fuente de carbono. Otra clasificación son auxótrofas requieren una pequeña presencia de un compuesto orgánico no especialmente para fuente de energía, si no lo requiere para multiplicar el crecimiento de cultivo y por ultimo las mixotróficas usan simultáneamente compuestos orgánicos y luz como fuente de energía. <sup>3</sup>

**1.1.1 *Scenedesmus*.** El subgénero *Scenedesmus* pertenece al género Chlorophyta o algas verdes; son abundantes en aguadulce, poseen clorofila a y b. Por otro lado, tiene almidon como producto de reserva, el cual se forma en el cloroplasto. <sup>4</sup>

Además, el subgénero *Scenedesmus* es capaz de producir varios tipos de biocombustibles entre el biodiesel y bioetanol, sin embargo, se desarrollado mayoritariamente en la producción de biodiesel. Se ha inclinado mayoritariamente en la producción de biodiesel por la alta productividad de biomasa. Si se efectúa una comparación entre la producción autótrófica y la producción heterótrófica, respectivamente, la última, tiene mayores condiciones de eficiencia por la optimización de biomasa y lípidos. <sup>5</sup> Con la optimización el rendimiento de lípidos ha

---

<sup>1</sup> CORZO, Ruth y MANRIQUE, Ingrid. Evaluación de carotenoides y lípidos en la microalga *Scenedesmus dimorphus* a escala laboratorio bajo condiciones de fotobiorreactor. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2019. p. 27.

<sup>2</sup> GÓMEZ, Liliana. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. Revista Cubana de Química [En línea]. Santiago de Cuba, Universidad de Oriente, 2007.vol 19, nro. 2. p. 3-20. [Citado en 19 de Febrero de 2020]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543707001.pdf>. ISSN: 0258-5995

<sup>3</sup> FERNANDEZ, José. Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas. En: UNIVERSIDAD DE ALMERIA. [Sitio web]. Sevilla. [ Citado en 22 de Febrero de 2020]. Disponible en: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1-microalgas.html>

<sup>4</sup> MERCADO, Estefanía. Cultivo de la microalga *Scenedesmus Obliquus* var. *Dimorphus* (TURPIN) para la obtención de biomasa y lípidos. Universidad Ricardo Palma. Escuela de Posgrado. Lima, Peru. 2016.p 37

<sup>5</sup> CASTILLO, Omar et al. Producción de biodiesel: avances y biotecnológicas. En: Hidrobiológica [En línea]. Celaya, México. Universidad de Guanajuato, mayo 2016-noviembre 2017. vol. 27, nro. 3. p. 337-352. [Citado en 2 marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v27n3/0188-8897-hbio-27-03-337.pdf>

alcanzado hasta 60% en biomasa seca, en comparación, con otros subgéneros de microalgas. Sin embargo, se requiere una condición de nitrato para incrementar la producción de lípidos.<sup>6</sup>

Para el mejoramiento de la producción de lípidos se produjo en los cultivos de la fase estacionaria se transfirió a medios deficientes de nitrato durante 7 días. No obstante, la extracción de lípidos con solventes como metanol o etanol es un reto por su menor extracción de lípidos al costo de producción.<sup>7</sup> En un estudio de la microalga se incrementó el contenido de biomasa y lípidos mediante una concentración de 0,32 g/L. Se descubrió con una transesterificación de dos pasos, es la más apropiada para la transesterificación, la extracción de Folch es la conveniente para la extracción de lípidos.<sup>8</sup>

**1.1.1.1 *Scenedesmus dimorphus*.** Es una microalga verde unicelular, en forma de ovalo puntiagudo con un tamaño de 10µm aproximadamente. Es caracterizada por ser un alga pesada, es decir, una microalga con una pared celular rígida, favoreciendo su sedimentación.<sup>9</sup>

Por otro lado, esta microalga tiene un contenido lípido de 31% aproximadamente, por lo cual es mayoritariamente utilizada en la obtención de lípidos, teniendo en cuenta se requiere una constante agitación ya que esta presenta la facilidad de formar sedimentos gruesos. La temperatura óptima para el crecimiento de la cepa se encuentra entre 30°C y 35°C.<sup>10</sup>

---

<sup>6</sup> TEJEDA, Lesly et al. Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. En: Revista Facultad de Ingeniería [En línea]. Cartagena. Universidad de Cartagena, mayo-agosto 2015. vol. 24 nro. 39 p. 43-54. [ Citado en 3 marzo de 2020]

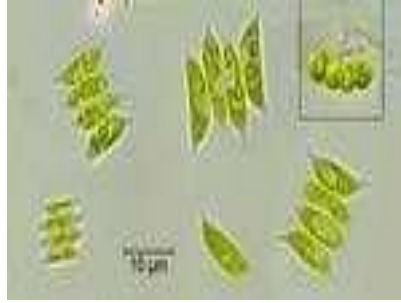
<sup>7</sup> MALDONADO, Carmen. Inducción lipídica por limitación en los nutrientes *Scenedesmus dimorphus* y *Chlorella sorokiniana*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C División de Estudios de Posgrado. Chihuahua, México.2011. p 37.

<sup>8</sup> XU, Xinmiao, et al. Cultivation of *Scenedesmus dimorphus* for C/N/P removal an lipid. Electronic Journal of Biotechnology. Fuzhou, China. Fuzhou University, august-december 2014. vol 18. P 46-50. [ Citado en 5 marzo de 2020 ]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.12.003>

<sup>9</sup> FONSECA, Laura y GUARÍN, María. Evaluación de la remoción de cromo con cultivos de microalgas en un fotobiorreactor de panel plano. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Bogotá. p 22.

<sup>10</sup> MERCADO, Estefania, op cit, p. 31.

**Figura 1.** Scenedesmus dimorphus.



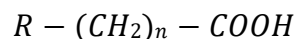
**Fuente:** ALGAEBASE.Scenedesmus dimorphus. [Enlínea] <[https://www.algaebase.org/search/species/detail/species\\_id=58629](https://www.algaebase.org/search/species/detail/species_id=58629)> [Citado en 19 de febrero de 2020]

## 1.2 LÍPIDOS

Son componentes biológicos en solventes no polares y una gran proporción insolubles en agua de manera su característica puede ser apolar o antipático.<sup>11</sup> Por lo tanto, estas moléculas poseen una gran variedad en su estructura y función biológica. Una de sus funciones biológicas es el carácter energético, estructural y funcional de biomembranas.<sup>12</sup>

Diferentes lípidos contienen en su estructura derivados de ácidos grasos. Estos se clasifican en dos grandes familias saturadas e insaturados, en un dado caso de contener o no dobles enlaces. La estructura general que describe los ácidos grasos saturados en la siguiente ecuación<sup>13</sup>:

**Ecuación 1.** Estructura general de los ácidos grasos saturados.



**Fuente.** Pardo, Luz Talleres de bioquímica. Universidad de América, 2016. p 21

Donde el grupo funcional es el carboxilo COOH.Los ácidos grasos, por general, implican cadenas hidrocarbonadas de entre 4 y 36 carbonos. No obstante, los más característicos son ácidos grasos de 16 y 18 carbonos.

---

<sup>11</sup> CHAPARRO, Gina. Evaluación del suero lácteo en la producción de biomasa y lípidos en la microalga Chlorella vulgaris a escala laboratorio. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2017. p 36.

<sup>12</sup> LIPIDOS Y MEMBRANAS. Capítulo 11. [Anónimo]. [En línea]. Disponible en: <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/Bioquimica/12-O.pdf>

<sup>13</sup> PARDO, Luz. Talleres de bioquímica. Universidad de América.2016. p 21.

**Tabla 1.** Clasificación de ácidos grasos más comunes.

Nombre	Átomos de carbono	Estructura
		Ácidos grasos saturados
Ácido láurico	12	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$
Mirístico	14	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
Palmítico	16	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
Estearico	18	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
Araquídico	20	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$
Lignocérico	24	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$
		Ácidos grasos insaturados
Palmitoleico	16	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Oleico	18	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linoleico	18	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linolénico	18	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

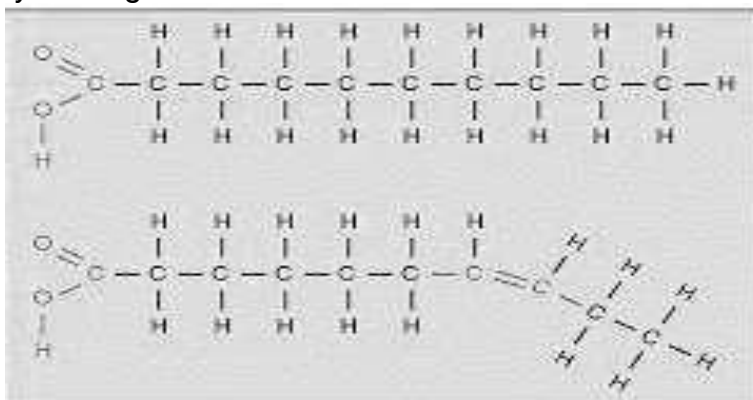
**Tabla 1. (Continuación)**

Nombre	Átomos de carbono	Estructura
Araquidónico	20	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{C}$ $\text{H}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$

**Fuente:** UNIVERSIDAD DE MURCIA. Ácidos grasos. [En línea]<<https://www.um.es/molecula/agra.htm>> [Citado en 2 Marzo de 2020]

Otra clasificación de los ácidos grasos son los insaturados, poseen uno o más dobles enlaces a lo largo de la cadena hidrocarbonada. Entre los más numerosos se encuentra los monoinsaturados (MUFAS), con un solo doble enlace en los carbonos 9 y 10. Mientras los poliinsaturados, generalmente, tiene el doble enlace de carbonos en el 9 y 10 además de dobles enlaces situados en el extremo metilo terminal de la cadena hidrocarbonada.<sup>14</sup>

**Figura 2.** Formula general de ácido graso saturado y ácido graso insaturado.



**Fuente:** Biología-geología. Ácidos grasos saturados e insaturados.[En línea]<[https://biologiageologia.com/biologia2/3211\\_acidos\\_grasos\\_saturados\\_e\\_insaturados.html](https://biologiageologia.com/biologia2/3211_acidos_grasos_saturados_e_insaturados.html)> [Citado en 27 de febrero de 2020]

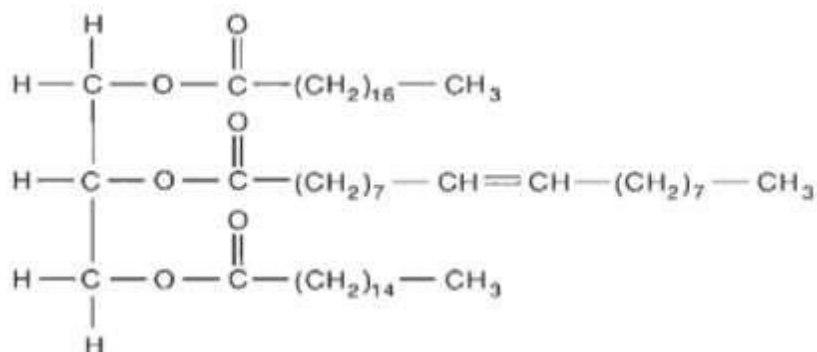
**1.2.1 Acilglicérido.** Los acilglicéridos son ésteres de la glicerina, al momento de reaccionar con uno, con dos o tres ácidos grasos da lugar a monoacilglicéridos, diacilglicéridos y triacilglicéridos.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> PARDO, Op. cit., p. 23.

<sup>15</sup> PORTO, Alejandro. TEMA 6: LIPIDOS. [En línea]. Disponible en: <https://www.bionova.org.es/biocast/tema06.htm>. [Citado en 1 marzo de 2020].

**1.2.1.1 Triacilglicéridos.** Son ésteres de glicerol de tres moléculas de ácidos grasos. Una de la característica importante es ser una grasa neutra, es decir, no tiene carga debido el grupo carboxilo de cada ácido graso está unido al glicerol mediante un enlace covalente. Tiene una aplicación en la industria oleoquímica como la de alimentos, biodiesel entre otros.<sup>16</sup>

**Figura 3.** Formula general de un triacilglicérido.



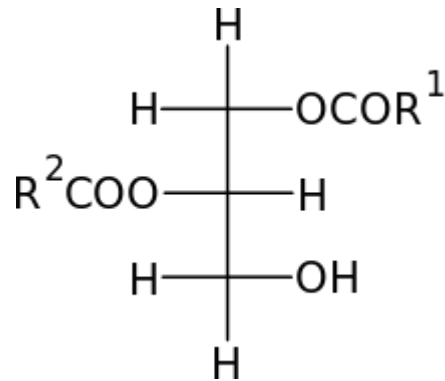
**Fuente:** UNIVERSIDAD RAFAEL LADINO. (2013) Lípidos y membranas [En línea]. <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/Bioquimica/12O.pdf>.> [Citado en 5 marzo de 2020].

**Diacilglicéridos.** Es una molécula lipídica simple, intermediaria en la síntesis de fosfolípidos pertenecientes a la familia de los fosfoglicéridos. Se conforma con una molécula de glicerol unida a dos ácidos grasos. Su uso industrial es en agentes emulsionantes y en la industria alimenticia de mascotas.<sup>17</sup>

<sup>16</sup>UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO. Acilgliceroles. [En línea]. Disponible en: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/lipidos/lipid33.htm#a>. [ Citado en 1 marzo de 2020]

<sup>17</sup> PORTO Op. Cit.

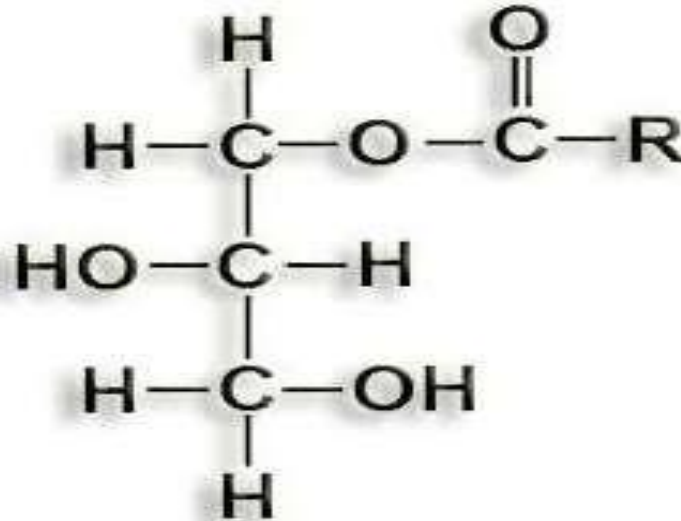
**Figura 4.** Formula general de un diacilglicérido.



**Fuente:** Lifeder. Diacilglicérido. [En línea]  
< <https://www.lifeder.com/diacilglicerol/>>  
[Citado en 28 de febrero de 2020]

**1.2.1.2 Monoacilglicéridos.** Son lípidos conformados por una molécula de glicerol unida a un ácido graso. Uso en la industria alimenticia como emulsionante

**Figura 5.** Formula general de un monoacilglicérido.



**Fuente:** Biologiasur. Lípidos y soluciones.[En línea]  
< <https://www.biologiasur.org/index.php/lipidos-2/90-lipidos/124-lipidos-2-soluciones>> [Citado en 2 marzo de 2020]



### 1.3 LÍPIDOS PRESENTES EN MICROALGAS

En las microalgas el contenido de lípidos varía dependiendo de la especie, en biomasa seca; entre el 5 y 77% en peso; debido al ciclo de vida, las condiciones de cultivo, temperatura, iluminación, fotoperiodo de luz y tasa de aireación. Las microalgas responden a la ausencia de nutrientes con la intensificación de la vía metabólica, sintetizando lípidos neutros. En algunos casos no aumenta la productividad de lípidos por unidad de masa, no aumenta la productividad de lípidos por unidad de masa. Pero, en algunas especies de microalgas presenten ausencia de oxígeno puede aumentar su contenido de lípidos entre un 10 al 20% en peso.<sup>18</sup>

El subgénero *Scenedesmus*, se ha reportado un perfil lipídico con cromatografía HPLC, en ácidos grasos presentes en la biomasa microalgal detallados en porcentaje de masa, donde se han encontrado ácido palmítico, oleico y linoleico importante en la industrial, uno de sus importantes usos es en la obtención de biodiesel.<sup>19</sup>

Otra aplicación de gran interés es la producción de ácidos grasos polinsaturados conocidos como PUFAS (Figura 2), los cuales estructuralmente cuentan con dobles enlaces; estos son no esenciales, por ende, el ser humano no los puede sintetizar por sí mismos y deben ser suplementados en la dieta; debido a que tienen funciones como construcción y el mantenimiento de las membranas celulares, la piel, las células nerviosas y la retina, entre otros beneficios para la salud. La carencia de PUFAS en el organismo, produce trastornos cardiovasculares y neurológicos, cutáneos, en la visión, y otras afectaciones.

---

<sup>18</sup> TEJEDA, Op. cit., p 45

<sup>19</sup> MAY, Elda. Cultivo de la microalga *Scenedesmus* sp. en un fotobiorreactor acoplado a un sistema de recuperación de biomasa. Centro de Investigación Científica Yucatán A.C. Posgrado en Ciencias en Energías Renovables. Merida, México. 2015. p 7.

**Tabla 2.** Contenido de lípidos totales en la familia Scenedesmus

MICROALGA	%LÍPIDO (peso seco)	REFERENCIA
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	31	Shen et al., 2009
<i>Scenedesmus incrassatulus</i>	8-12	Arias-Peñaranda et al., 2013
<i>Scenedesmus obliquus</i>	10-43	Ho et al., 2010
<i>Scenedesmus rubescens</i>	27-43	Lin y Lin, 2011; Tan y Lin 2011
<i>Scenedesmus sp.</i>	7-53	Xin et al., 2010

**Fuente:** GARCIA, Katherine y NOVOA, Jimmy W. (2019). Impacto en la producción de lípidos en la microalga *Scenedesmus dimorphus* en medio de cultivo BG-11 suplementado con vitamina B3 o vitamina B9. Universidad Francisco José de Caldas. Facultad de Ciencias y Educación. Bogotá. 2019. p 21.

#### 1.4 CONDICIONES DE CULTIVO

Para obtener un adecuado crecimiento de la biomasa microalgal, teniendo en cuenta las condiciones para mejorar la velocidad de crecimiento y la biomasa se genere. Las condiciones son las siguientes: el pH, la luz, la agitación, la temperatura, la nutrición de la microalga. Influyendo, la cantidad, intensidad o concentraciones dependiendo del género de la microalga a cultivar.

**1.4.1 pH.** El rango de pH para las condiciones de cultivo de la microalga está entre 7.0 y 9.9. Con el aporte de varias investigaciones un pH neutro es la condición más adecuada para el crecimiento microalgal. Con la aireación con un aire rico en CO<sub>2</sub> se logra acidificar el medio, haciendo el pH se incremente a medida la edad del cultivo avance ocasionando una acumulación de los minerales y nutrientes oxidados. Por ello, Benavente recomienda un pH inicial de 6.5 del medio de cultivo antes de la inoculación.<sup>20</sup> Este factor condiciona la solubilidad de los minerales y el CO<sub>2</sub> del cultivo.<sup>21</sup>

**1.4.2 Luz.** Es uno de los factores de vital importancia para el cultivo de microalgas sabiéndose son microorganismos fotosintéticos. Los periodos de exposición de la luz pueden ser continuo o discontinuo. Una exposición prolongada de luz, afecta

<sup>20</sup> BENAVENTE, J.R. Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Universidad Autónoma de Coahuila. Departamento de Investigación en Alimentos. Facultad de Ciencias Químicas. Coahuila, México. Ene-Jun 2012. Año 4, N°. 7. [En línea]. <<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>>. [Citado en 15 de Abril 2020].

<sup>21</sup> MARTÍNEZ, L. Eliminación de CO<sub>2</sub> con microalgas autóctonas. Y Park, J. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production.

negativamente al cultivo. Produciendo una disminución de la tasa fotosintética, dando cabida a la fotoinhibición.<sup>22</sup> Para contrarrestar la microalga, es necesario conservarla en un cultivo con una adecuada generación de biomasa, la mayoría de investigadores recomiendan una trayectoria de luz con una distancia transversal no mayor a 10 cm;<sup>23</sup> para cambiar la densidad celular del cultivo, si se presenta una distancia aun mayor afecta la intensidad y la homogeneidad de la luz irradiada.

Se sugiere un sistema de agitación con el acceso de luz a todas las células microalgares. El funcionamiento de la luz es necesario el uso de equipos de control para su posterior control de la intensidad de la luz.<sup>24</sup>

**1.4.3 Agitación.** El factor favorece la transferencia de masa de nutrientes en el cultivo, exposición continua a la luz y la estandarización del pH. Asimismo, es potenciador el intercambio de gases entre el aire y el cultivo. Impide la sedimentación y los gradientes de concentración a partir de las variables de temperatura, nutrientes y luz.<sup>25</sup> Si se emplea una agitación inadecuada reduce la productividad de la biomasa, causando la muerte de las células microalgares y la posterior fermentación del cultivo. Incluso se emplea con una aireación de CO<sub>2</sub>.<sup>26</sup>

**1.4.4 Temperatura.** La temperatura óptima varía entre 20°C y los 35°C, aunque existen microalgas con temperatura óptima hasta 35°C.<sup>27</sup> Este factor afecta la composición del medio de cultivo, la respiración celular, la fotosíntesis depende de las reacciones enzimáticas que influye en la composición lipídica de la microalga.

**1.4.5 Nutrición microalgal.** La concentración de los nutrientes en el cultivo es un factor importante, controla el crecimiento celular de las microalgas. Se clasifican en macro y micronutrientes.<sup>28</sup> Los macronutrientes presentes son el carbono que contribuye la producción de biomasa; también se incluye el nitrógeno, el fósforo, el hidrógeno, oxígeno, azufre, calcio, magnesio, potasio, sodio y cloro. En cambio, los micronutrientes son el hierro, boro, manganeso, cobre, vanadio, cobalto, níquel, silicio y selenio. Son fundamentales en las reacciones enzimáticas y biosíntesis de compuestos.<sup>29</sup>

---

<sup>22</sup> RICHMOND, A. Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology.

<sup>23</sup> ANDERSEN, R. Algal Culturing Techniques.

<sup>24</sup> FONSECA, op, cit, p. 22

<sup>25</sup> BENAVENTE, op.cit. N° 3.4.

<sup>26</sup> ARIAS, op.cit, p. 58.

<sup>27</sup> CERVANTES, op, cit, p. 22

<sup>28</sup> ABDEL-RAOUF, N et al. Microalgae and wastewater treatment. En: Saudi Journal of Biological Sciences. Beni-Suef, Egypt. King Saud University, mar-may 2012. vol 12, p 257-275. [Citado en 27 marzo de 2020]. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7498057/>

<sup>29</sup> GROBBELAAR, J. Algal nutrition: mineral nutrition. [En línea] 2004, p 97-115. [Citado en 28 marzo de 2020]. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470995280.ch6>

## 1.5 CURVA DE CRECIMIENTO

La curva de crecimiento permite resaltar e identificar las fases de crecimiento todo cultivo de microalga experimenta. Permite examinar de manera gráfica el cambio de concentración de la biomasa en base al tiempo. La gráfica concluyente depende de los factores de la concentración de biomasa en función del tiempo. También, la gráfica es dependiente de los factores de cultivo formulados a la microalga como los nutrientes del cultivo, la temperatura, su concentración de oxígeno, la agitación, su fuente de luz. Las variables de la gráfica son la velocidad específica de crecimiento o tasa de crecimiento ( $\mu$ ) y el tiempo de duplicación o generación. ( $t_g$ ).<sup>30</sup>

### Fases de crecimiento

- Fase de Adaptación: Es un periodo donde la microalga se acondiciona en el medio de cultivo. La etapa, depende de las condiciones son sometidas las células inoculadas, temperatura optima, luz y pH. Si estas condiciones no se formulan adecuadamente puede causar un retraso en el crecimiento inicial de la biomasa.<sup>31</sup>
- Fase de aceleramiento: En esta etapa, la microalga crece de manera significativa por el aumento de la actividad metabólica, comenzando desde el RNA. Cabe destacar el cultivo esta inoculado debe crecer y reproducirse.<sup>32</sup>
- Fase exponencial: La etapa sucede un aumento significativo de la concentración celular hasta alcanzar el valor máximo de crecimiento teniendo en cuenta no ocurra algún factor límite el crecimiento del cultivo. Y que haya un crecimiento constante.<sup>33</sup>
- Fase de desaceleración: En esta etapa sucede un agotamiento de los nutrientes de la microalga, con la acumulación de compuestos inhibidores del cultivo. Dando allí una detención del crecimiento y división celular.<sup>34</sup>
- Fase estacionaria: Aquí sucede una detención del crecimiento poblacional se iguala la generación de biomasa por condiciones limitantes del cultivo, disminución de la concentración de algún nutriente, pH no adecuado, alta

---

<sup>30</sup> RIVERON-RODRIGUEZ, Elier et al. Estación de trabajo para el estudio de la cinética de crecimiento de Escherichia coli mediante el método de turbidez. En: Revista CENIC Ciencias Biologicas [En línea]. Ciudad de La Habana, Cuba, mayo-agosto, 2012. vol 43, nro 2. p 1-5. [Citado en 30 marzo de 2020]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181223782002.pdf>. ISSN 0253-5688

<sup>31</sup> MALDONADO, Carmen. Op. cit., p. 23.

<sup>32</sup> *Ibíd.*, p. 23.

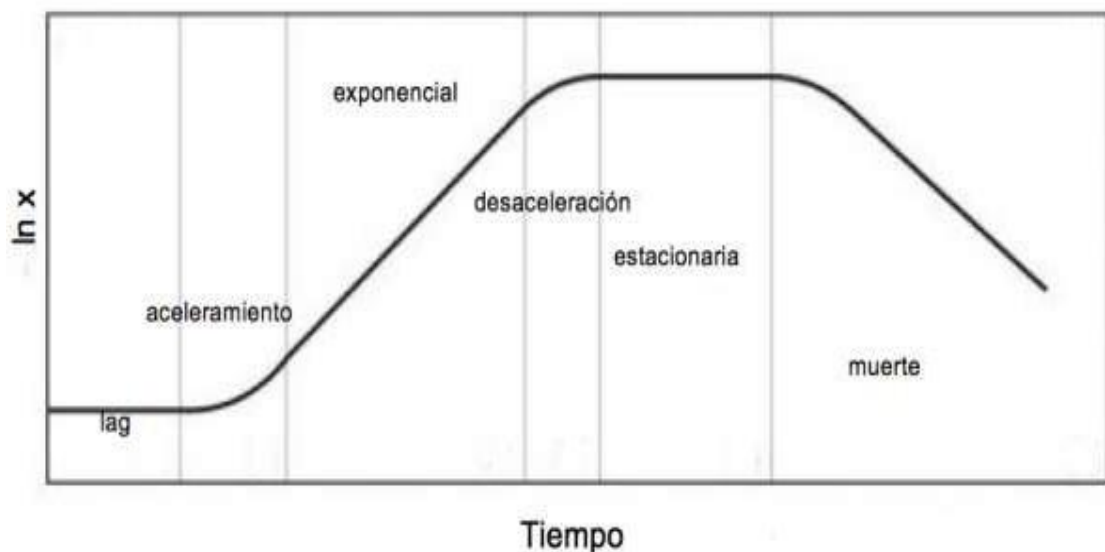
<sup>33</sup> *Ibíd.*, p. 24.

<sup>34</sup> *Ibíd.*, p. 24

concentración de oxígeno, falla en la exposición de luz y posible alta concentración de compuestos catalíticos presentes en el medio.<sup>35</sup>

- Fase de muerte: En esta etapa se presenta un incremento de la tasa de mortalidad dando lugar a la disminución de la concentración celular o biomasa, produciéndose por falta de nutrientes provocando la lisis celular.<sup>36</sup>

**Figura 6.** Curvas de crecimiento para una población de microalgas.



**Fuente:** MONTES, Omar. Efecto de la intensidad de la luz y de la tasa de inyección de aire en el crecimiento. y la productividad de la microalga *Nannochloropsis* sp., cultivada en un biorreactor plano. [En línea]. Ensenada, Mexico. 2014.p 17. [Citado en 1 Abril de 2020]. Disponible en:<<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/121/1/235111.pdf>>

## 1.6 SOLVENTES VERDES

Un solvente es un líquido se disuelve con el fin de extraer la sustancia de interés. Una de sus propiedades es remover el soluto, haciendo que aquel se disuelva correctamente teniendo en cuenta de ser inmisible o parcialmente inmisible con el fin de realizar la extracción. Se incluye el término verde con el uso de productos y métodos químicos para reducir o eliminar componentes peligrosos para el medio ambiente.<sup>37</sup> Por consiguiente, un solvente verde es un compuesto eco-amigable, no

<sup>35</sup> *Ibíd.*, p. 25

<sup>36</sup> *Ibíd.*, p. 25

<sup>37</sup> GONZALEZ BARRIOS, Iván. Biocatálisis en disolventes verdes: La mejor estrategia para la producción de fármacos en disolventes sostenibles. Complutense, España. Universidad de

perjudicial para el medio ambiente. Con la finalidad de disolver y extraer los lípidos de las microalgas.

Para poder realizar la extracción de lípidos se han propuesto solventes y técnicas de extracción alternativas con los protocolos de Bligh & Dyer y Folch.<sup>38</sup> Según las alternativas más importantes de solventes verdes, el artículo “Sustainable Green solvents and techniques for lipid extraction from microalgae: A review” de Jeevan y otros autores, realizan una clasificación de los solventes con sus respectivas.

- Solventes bio-derivados: En esta clasificación se encuentran los terpenos con un origen vegetal y lactato de etilo. Son disolventes con constitución biológica son eficientes, ecológicos y rentables económicamente. Los terpenos son compuestos orgánicos se produce a partir de plantas y especies cítricas como el D-limoneno, p-cimeno. Con el uso del D-limoneno y con el empleo de otra microalga, *Chlorella vulgaris*, se ejecutó la extracción de lípidos, con resultados de rendimientos similares al hexano por medio de la extracción Soxhlet con una recuperación del solvente a partir de una destilación Celvenger. El D-limoneno se caracteriza por un solvente con buenas propiedades químicas y un producto económico. En esta clasificación se han desarrollado, nuevos solventes con materias primas agrícolas y biológicas como son el lactato de etilo, metil soyato. Resaltando son biodegradables, renovables y con una pequeña toxicidad.<sup>39</sup>
- Tecnología de fluidos supercríticos (SCF): Es una técnica favorable aplicada en la industria farmacéutica y alimentaria. Posee una alta selectividad, menor tiempo de extracción y no presenta toxicidad comparándola con los disolventes orgánicos. Cabe destacar que esta técnica no requiere una etapa de separación, los fluidos están en fase gaseosa a presión ambiente facilitando la recuperación y la reutilización evitando el efecto invernadero. La eficiencia de la extracción es dependiente de las variables de temperatura, presión, caracterización de la muestra, la interacción de los compuestos y los fluidos supercríticos<sup>40</sup>. Se enfatiza es la técnica adecuada para la extracción de lípidos. Su inconveniente es su alto costo de equipos.
- Líquidos iónicos: Son soluciones salinas no acuosas, con una formación de solución orgánica de cationes y aniones. Su constitución es ecológica, no inflamable y permanece en estado líquido en un rango amplio de temperatura. Asimismo, las características fisicoquímicas permiten un conveniente diseño del solvente por la hidrofobicidad, polaridad y solubilidad por el soluto de interés.

---

Complutense. Facultad de Farmacia. p 11 [Citado en 10 Abril de 2020]. Disponible en <<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/IVAN%20GONZALEZ%20BARRIOS.pdf>>

<sup>38</sup> KUMAR, Jeevan, et al. Sustainable green solvents and techniques for lipid extraction from microalgae: A review. *Algal Research*, No 21. 2017. p. 139-141.

<sup>39</sup> *Ibid.*, p. 139

<sup>40</sup> *Ibid.*, p. 140

Los estudios hechos por este tipo de solventes son pocos, se resalta el uso del 1-butil-3-metilimidazolio, este solvente rompe la pared celular haciendo que se formen dos fases, una hidrófoba y la otra hidrófila. Ahora, todavía no se tiene suficiente conocimiento de las propiedades de las sales iónicas que dificultan su viabilidad, siendo muy potenciales para optimizar la eficiencia en la extracción de lípidos.<sup>41</sup>

- Solventes intercambiables (SHS): Son solventes constituidos por amidina y aminas secundarias. Posee la propiedad de cambiar su polaridad y su miscibilidad baja a alta. Por su facilidad de disposición final son apropiados para la extracción de lípidos de microalgas para la producción de biodiesel. Aquellos requieren una eliminación total del solvente para la etapa de transesterificación. Por otra parte, con el uso del componente N, N-dimetilciclohexilamina emplea la microalga *Botryococcus braunii* con una buena eficiencia en la extracción de lípidos en comparación con los solventes orgánicos convencionales. Estos poseen una alta selectividad permitiendo reducir el tiempo de extracción y su posible uso en biorefinerías.<sup>42</sup>
- Polímeros líquidos: En esta clasificación están los polímeros de bajo peso molecular como etilenglicoles (PEGs) y propilenglicoles (PPGs) se destacan por no ser volátiles. Los PEG son económicos y estables, capaces de formar macromoléculas propicias a decantar. En el futuro tendrán importantes avances científicos para la extracción de lípidos de las microalgas.<sup>43</sup>
- Solventes eutécticos profundos (DES): Son fluidos sus componentes son dos o más solventes eutécticos naturales, la mezcla de sal de amonio cuaternario + cloruro de metal + hidrato de cloruro de metal. Son seguros, económicos y destacado en solventes renovables en comparación a los solventes orgánicos. Se pueden emplear con temperatura ambiente, biodegradable, bajo en toxicidad, baja volatilidad, lo más significativo es su capacidad de solubilizar compuestos de un amplio rango de polaridad.<sup>44</sup>
- Solventes eutécticos profundos naturales (NADES): Son componentes metabolitos primarios de origen natural como son aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares, urea, derivados de colina; cuya función es la solubilización de compuestos polares y no polares. Tienen mayores ventajas con respecto DES por su toxicidad, biodegradabilidad, estabilización de solutos, sostenibilidad y el costo en su proceso. Se han desarrollado trabajos con NADES para la

---

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p. 141

<sup>42</sup> *Ibíd.*, p. 141

<sup>43</sup> *Ibíd.*, p. 144

<sup>44</sup> *Ibíd.*, p. 145

extracción de fenoles y flavonoides, favoreciendo la alta eficiencia si su constitución es de origen biológico, natural y renovable.<sup>45</sup>

- Solventes fluorescentes (FS): Son solventes compuestos de un sistema bifásico en fases acuosas y no acuosas entre ellos el perfluorociclohexano. Las variables del sistema son la caracterización de los solventes y la temperatura. Poseen la capacidad de transferir componentes. Todavía la aplicabilidad no ha sido desarrollada en la extracción de lípidos de microalgas. Empleados en el fraccionamiento de aceites esenciales, extracción de trazas de metales en mezclas orgánicas, extracción de residuos sólidos, líquidos fotodegradados de bifenilos policlorados contaminados.<sup>46</sup>
- Solventes supramoleculares (SUPRAS): Son fluidos nanoestructurados con características derivadas de los anfífilos, se producen mediante procesos de autoensamblaje a escala molecular y nanoescala. La polaridad de aquellos solventes donde se cambia el grupo hidrófilo en el compuesto anfífilo, produciendo excelentes solventes para la extracción de compuestos polares y no polares. Se han empleado en química analítica para procesos de extracción de tensoactivos catiónicos y compuestos orgánicos. Además se resalta por baja volatilidad y no inflamabilidad.<sup>47</sup>

Algunos de los solventes nombrados anteriormente no optan por la etapa de disrupción celular. Por lo cual, se planea intensificar el proceso de extracción de lípidos. Por ello, se han proyectado técnicas expuestas en el artículo 'Sustainable green solvents and techniques for lipid extraction from microalgae: A review' de Jeevan<sup>48</sup> y otros autores:

- Extracción asistida por microondas (MAE): Es un método donde se obtiene mejores rendimientos y calidad reduciendo el tiempo de extracción. Donde hay presencia de gran cantidad energía como consecuencia, de materiales que genera calor favoreciendo la formación de vapor de agua, a causa de la disrupción en la membrana celular. Resultando ser eficiente en la extracción de metabolitos intracelulares entre los que están presentes los lípidos. En temperaturas de 120°C, se han descubierto incrementos en la eficiencia de extracción hasta un nivel de 115.5% de aceite comparándolo con la extracción Soxhlet.<sup>49</sup>
- Extracción asistida por ultrasonido (UAE): Es una técnica sencilla, económica y ecológica. Favorece la pureza en el producto final. Demanda menor uso de

---

<sup>45</sup> *Ibíd.*, p. 145

<sup>46</sup> *Ibíd.*, p. 145

<sup>47</sup> *Ibíd.*, p. 145

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 142-144

<sup>49</sup> *Ibíd.*, p. 142



solvente y la extracción se realiza en cortos minutos. Induce la disrupción celular en medio de fenómenos de cavitación.<sup>50</sup>

- Extracción asistida por enzimas (EAE): Es una estrategia innovadora para la disrupción de la membrana celular y liberar compuestos intracelulares. La técnica se ejecuta sobre la acción selectiva de las enzimas. Es un método suave, característico y amigable con el medio ambiente.<sup>51</sup>
- Extracción asistida por tensoactivos (SAE): Baja en toxicidad, emplea productos químicos biodegradables teniendo un gran potencial para la extracción de lípidos sin la necesidad del uso de equipos. Se caracteriza por su composición antipática.<sup>52</sup>
- Extracción lipídica de biomasa microalgal húmeda: La biomasa constituye un porcentaje alto de agua, que impide en la penetración de productos químicos y disolventes. Un inconveniente, es el secado haciendo que la extracción sea más costosa. En cambio, se pueden desarrollar técnicas combinatorias entre la disrupción celular y solventes verdes.<sup>53</sup>

## 1.7 PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

La transesterificación es una técnica empleada para la obtención de biodiesel. Inicia, con una reacción de lípidos específicamente, de triglicéridos con la característica de alcoholes de bajo peso molecular como son metanol, etanol, propanol o butanol. Para la producción de ésteres y glicerina. Generalmente, se trabaja a presión atmosférica con una temperatura de 65°C, constante agitación y tiempo de doce horas.<sup>54</sup>

---

<sup>50</sup> *Ibíd.*, p. 142

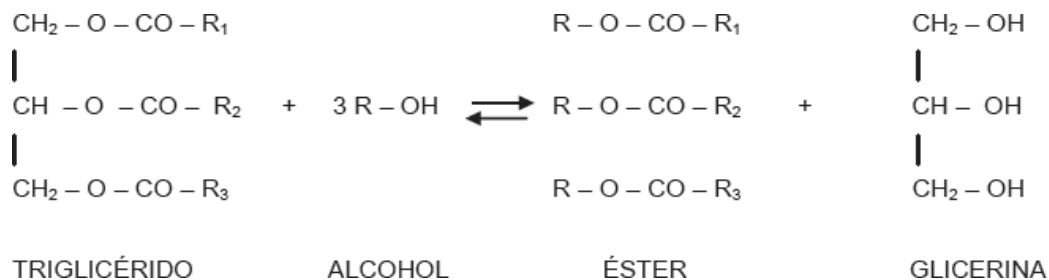
<sup>51</sup> *Ibíd.*, p. 143

<sup>52</sup> *Ibíd.*, p. 143

<sup>53</sup> *Ibíd.*, p. 143

<sup>54</sup> PEREZ RIAL, Leticia; SALGUIERO FERNANDEZ, José y MACEIRA CASTRO, Rocío. Producción de biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. Meubook. 2014. p 58. [En línea]. Disponible en: <<https://www.researchgate.publication.305108885>>. [Citado en 8 junio de 2020].

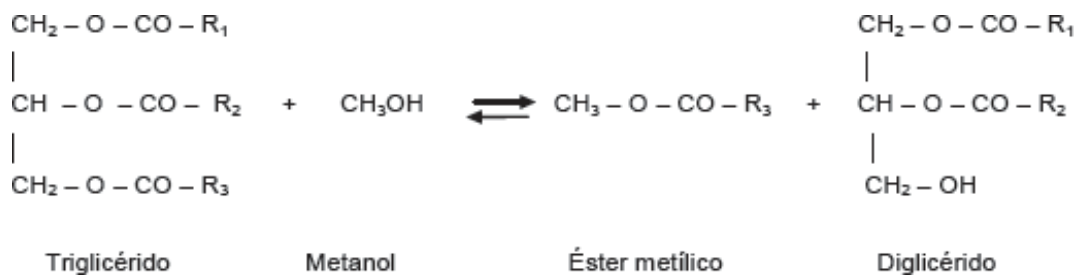
**Figura 7.** Ecuación general del proceso de transesterificación.



**Fuente:** PEREZ RIAL, Leticia; SALGUIERO FERNANDEZ, José y MACEIRA CASTRO, Rocío. Producción de biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. Meubook. 2014. p 58. [En línea]. <<https://www.researchgate.publication.305108885>>. [Citado en 8 junio de 2020].

El proceso se desarrolla en una proporción molar de 3:1, alcohol a triglicérido. Asimismo, del producto de glicerina, inmisible con esteres metílicos, fundamentales en el desplazamiento de la reacción a la derecha, obteniendo conversiones próximas al 100%.<sup>55</sup>

**Figura 8.** Reacciones implicadas en el proceso de transesterificación.



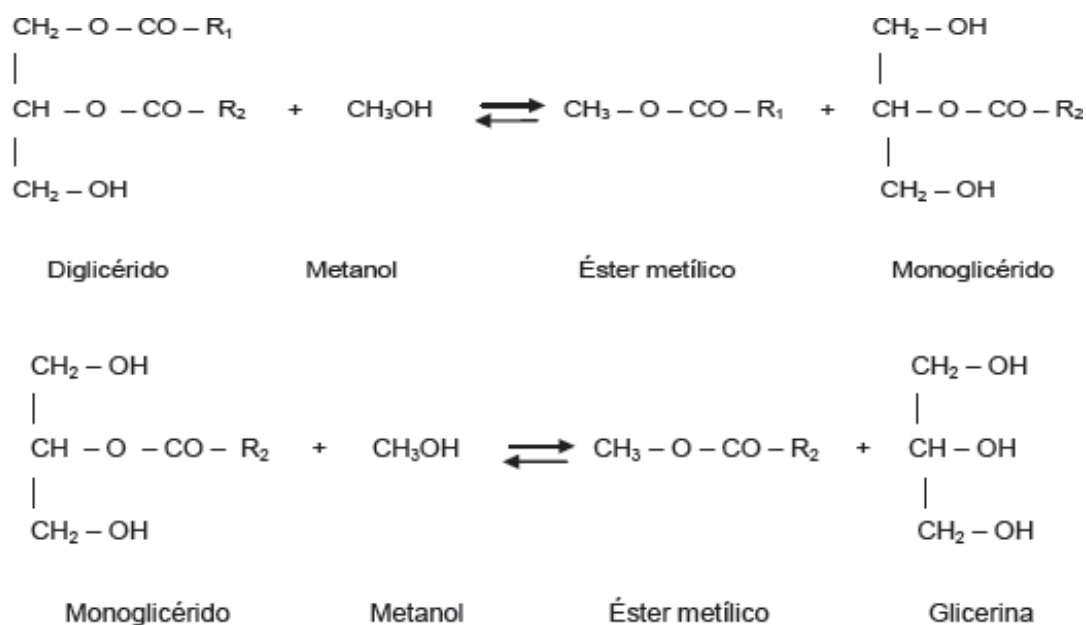
**Fuente:** PEREZ RIAL, Leticia; SALGUIERO FERNANDEZ, José y MACEIRAS CASTRO, Rocío. Producción de biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. Meubook. 2014. p 58. [En línea]. <<https://www.researchgate.publication.305108885>>. [Citado en 8 junio de 2020].

Las reacciones se caracterizan por tres reversibles, donde el triglicérido se transforma en diglicérido, monoglicérido y glicerina.<sup>56</sup>

<sup>55</sup> *Ibíd.*, p. 58

<sup>56</sup> *Ibíd.*, p. 58

**Figura 9.** Reacciones implicadas en el proceso de transesterificación, dos reacciones reversibles implicadas en la transformación de diglicérido a glicerina



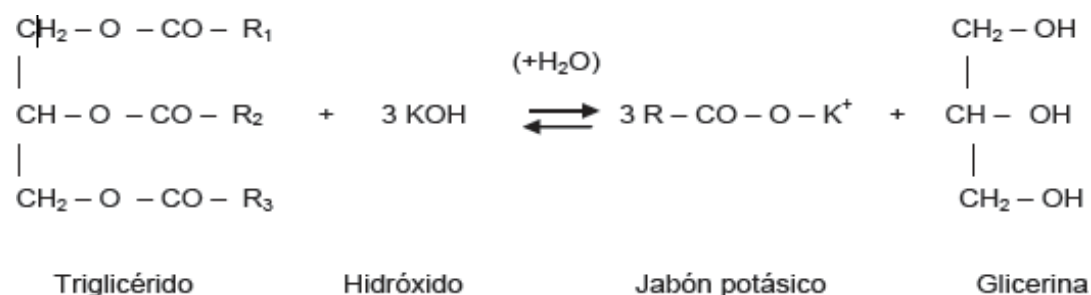
**Fuente:** PEREZ RIAL, Leticia; SALGUIERO FERNANDEZ, José y MACEIRA CASTRO, Rocío. Producción de biodiesel mediante transesterificación in situ partir de algas marinas. Meubook. 2014. p 59. [En línea]. <<https://www.researchgate.publication.305108885>>. [Citado en 8 junio de 2020].

La reacción de transesterificación favorece la formación de reacciones secundarias<sup>57</sup> como son:

- Reacción de saponificación.
- Reacción de neutralización de ácidos grasos libres.

<sup>57</sup> *Ibíd.*, p. 59

**Figura 10.** Reacción de saponificación.



**Fuente:** PEREZ RIAL, Leticia; SALGUIERO FERNÁNDEZ, José; MACEIRAS CASTRO, Rocío. Producción de biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. Meubook. 2014. p 60. [En línea]. <<https://www.researchgate.net/publication/305108885>>. [Citado en 9 junio de 2020].

En la reacción de transesterificación se aplican catalizadores para aumentar la velocidad de reacción y rendimiento final.<sup>58</sup> Los catalizadores empleados son:

- Catalizadores ácidos homogéneos: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, R-SO<sub>3</sub>.
- Catalizadores ácidos heterogéneos: Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO<sub>4</sub>/ ZrO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>/ ZrO<sub>2</sub>.
- Catalizadores básicos heterogéneos: MgO, CaO, Na/ NaOH/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Catalizadores básicos homogéneos: KOH, NaOH.
- Catalizadores enzimáticos: Lipasas, *Candida Penicillium*, *Pseudomon*

---

<sup>58</sup> *Ibíd.*, p. 60

## **2. PARAMETROS DE CULTIVO DE LA MICROALGA *Scenedesmus Dimorphus* Y SOLVENTES VERDES**

### **2.1 PARAMETROS DE CULTIVO DE LA MICROALGA *Scenedesmus dimorphus***

Se establecieron los parámetros de cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus* a partir de una revisión bibliográfica de artículos y/o tesis realizadas en los últimos 10 años. La información recopilada se consigna en la Tabla 4 de los parámetros de cultivo de esta especie microalgal.

En el caso del parámetro de pH, se desarrolló una escala de valoración con el fin de la selección del pH más óptimo que registra mayor productividad de lípidos.

Finalizada la escala de valoración, se elaboró una tabla de compilación bibliográfica de los parámetros de cultivo tomando en cuenta en los diferentes trabajos investigativos realizados con esta especie microalgal.

Presentada la tabla de compilación bibliográfica se selecciona los parámetros de cultivo con sus respectivas unidades.

#### **2.1.1 Revisión bibliográfica de los parámetros de cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus*.**

Para la revisión bibliográfica de trabajos investigativos de los últimos 10 años se seleccionaron los siguientes parámetros con la razón por la cual influyen en la extracción y rendimiento de los lípidos. A continuación, se presenta los parámetros seleccionados:

- pH: El factor que influye la productividad del cultivo, respiración celular. Según anteriores revisiones el pH se establece entre 7 a 9. Sin embargo, se decide tener una prevalencia en pH de 8,2 a 8,7 tendrán mayores valoraciones, mientras los rangos entre 7 a 7,5; y el rango entre 8,7 a 9,0. Se les asigna una valoración baja.
- Luz: Este factor influye la actividad metabólica de la microalga. De anteriores trabajos de grado, se establece el criterio de un fotoperíodo entre 12h de luz y 12h de oscuridad. Permitiendo que la microalga no entrar en una etapa de fotoinhibición
- Agitación: Favorece la transferencia de masa de nutrientes del cultivo microalgal, exposición adecuada a la luz, homogenización del pH. En la matriz se asigna, las diferentes agitaciones empleadas.
- Temperatura: Las variaciones grandes de temperatura, afectan la composición y la respiración de la microalga. A partir, de anteriores trabajos investigativos trabajaron el rango de temperatura entre 20°C y 35°C. Aquí si se tomó en cuenta

el margen de error de investigaciones anteriores, sabiendo que pequeñas perturbaciones en la media afecta el cultivo de la microalga.

- Nutrición microalgal: Puesto que este factor constituye el crecimiento celular de la microalga. Los componentes fundamentales son nitrógeno, fósforo, oxígeno, azufre, entre otros; son los macronutrientes. Mientras en pequeñas proporciones están hierro, boro, manganeso, cobre; entre otros.

De anteriores trabajos investigativos, han seleccionado como nutriente microalgal el fertilizante Foliagro por excelente fuente de nitrógeno, aporta fósforo al cultivo. También incluye otros componentes entre los que presenta calcio, potasio, magnesio, azufre. Y en pequeñas proporciones se compone de boro, cobre, manganeso, molibdeno y zinc.

**2.1.2 Diseño de matriz de selección para el parámetro de pH.** Para facilitar la selección del parámetro de pH se elabora una matriz que presenta los valores del factor correspondiente a un valor de pH. El factor de mayor cuantía en la tabla 3 es el pH óptimo y eficaz en la extracción y productividad de lípidos.

En la tabla 3 se presentan diferentes valoraciones respectivo a los valores de pH. Se destaca, la mayoría del cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus* están presentes entre 7 y 9. Benavente cita el pH más óptimo es el rango de 8,2 a 8,7 por lo que se asigna un valor de 5. Aunque, con la revisión bibliográfica Martin y otros autores del artículo de Benavente sugiere un pH óptimo neutro de 7,5. Sin embargo, en la revisión bibliográfica se realizó con la especie microalgal *Scenedesmus dimorphus* registraron pocos datos de pH. Se debe considerar el pH se incrementa conforme a la edad del cultivo, también, por la acumulación de nutrientes y oxidación de estos.

A continuación, se resume el parámetro de pH:

**Tabla 3.** Valores de matriz pH microalga *Scenedesmus dimorphus*

Valor/Factor	pH	Fuente
0	<7,0 >9,0	(BENAVENTE. et al, 2012) pH optimo
1	7,0-7,2	
2	7,3-7,5	
3	7,6-7,8	
4	7,9-8,1 8,8-9,0	
5	8,2-8,7	

**Fuente:** elaboración propia

**2.1.3 Compilación bibliográfica de los parámetros de cultivo.** Se presenta el consolidado de los trabajos investigativos revisados con su descripción de los parámetros que desarrollaron en cada uno de las investigaciones a partir de la microalga *Scenedesmus dimorphus*

De acuerdo con la compilación bibliográfica, en el factor de cultivo del pH, se encontró en una investigación como título de “*Microalgas como fuente de biomasa para la producción de biogás*” de Candía, 2019, empleo un pH 8,5 siendo el óptimo según la clasificación del factor del pH mencionada en la Tabla 3. Además, trabajaron con luz solar y columna de burbujeo.

En la Tabla 4, se evidencia en varias investigaciones con la microalga *Scenedesmus dimorphus*, experimentaron con alternancias de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad con agitación continua siendo posible el crecimiento y producción de biomasa.

En la variable de temperatura se obtuvo un rango de trabajo entre 18°C a 27°C. Sin embargo, en el trabajo de Candía, 2019 trabajaron con una microalga diferente, obteniendo un rango más amplio de temperatura.

Es propicio señalar en el factor de nutrición microalgal, se han empleado una variedad para el cultivo y crecimiento de la microalga. Entre los que se mencionan BG-11, Bayfolan, Guillard y Foliagro.

A continuación, se presentan las tablas 4 y 5.

**Tabla 4.** Compilación bibliográfica de los parámetros de cultivo pH, luz y agitación de la microalga *Scenedesmus dimorphus*.

<b>Especie de microalga</b>	<b>pH</b>	<b>Factor de pH</b>	<b>Luz</b>	<b>Agitación</b>	<b>Fuente</b>
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	N.E	N.E	-Luz roja y luz verde.  -12 horas luz y 12 horas de oscuridad.	Bombas de acuario con caudal de aire de 4L/min Con fotobiorreactor adaptado con agitación manual	(MANRIQUE, et al. 2019)
<i>Scenedesmus obliquus var.</i>	N.E	N.E	-Espectro luminoso azul o rojo  -Ciclo luz/oscuridad (14:10)	Suministro de aire Agitación continua	(MERCADO. 2016)

**Tabla 4.** (Continuación)

<b>Especie de microalga</b>	<b>pH</b>	<b>Factor de pH</b>	<b>Luz</b>	<b>Agitación</b>	<b>Fuente</b>
<b><i>Scenedesmus dimorphus</i></b>	N.E	N.E	Fotoperiodo de 18 horas de luz y 6 horas de oscuridad	Suministro de aire	(GARCIA, et al. 2019)
<b><i>Scenedesmus dimorphus</i></b>	8,0	4	Fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas de oscuridad	10000 rpm por 5 minutos	(RAMÍREZ. 2015)
<b><i>Scenedesmus sp.</i></b>	7,0	1	Fotoperiodo de 24 horas de luz	N.E	(ARROYO. 2018)
<b><i>Scenedesmus obtusiusculus</i></b>	8,5	5	Luz solar	Columna de burbujeo	(CANDÍA. 2018)
<b><i>Scenedesmus dimorphus</i></b>	7,2	1	Iluminación continua 4 lámparas de luz blanca (75W)	3000 rpm por 15 minutos	(MALDONADO . 2011)
<b><i>Scenedesmus dimorphus</i></b>	N.E	N.E	Periodos de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad	Agitación continua	(BAHAREH. 2013)
<b><i>Scenedesmus dimorphus</i></b>	N.E	N.E	Periodos de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad	2000 rpm Agitación continua	(RIBITA. 2011)
<b><i>Scenedesmus dimorphus</i></b>	7,5± 0,08	2	Fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas de oscuridad	Agitación continua	(KUDAHETTI GE, et al. 2018)

**Fuente:** elaboración propia



**Tabla 5.** Compilación bibliográfica de los parámetros de cultivo temperatura y nutrición microalgal de la microalga *Scenedesmus dimorphus*.

<b>Especie de microalga</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Nutrición microalgal</b>	<b>Fuente</b>
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	18°C	Foliagro con agua destilada	(MANRIQUE, et al. 2019)
<i>Scenedesmus obliquus var.</i>	22°C	Guillard Bayfolan	BG-11 (MERCADO. 2016)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	22± 3 °C	Medio modificado	BG-11 (MALDONADO. 2011)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	30±1°C	Medio Bold-Basal	(BAHAREH. 2013)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	30 °C	Medio Bold-Basal modificado con vitaminas	(RIBITA. 2011)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	18°C a 27°C	Medio BG-11 Ácido fólico Vitamina B9 Acido nicotínico Vitamina B3	(GARCIA, et al. 2019)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	23 °C	Medio modificado	BG-11 (RAMÍREZ. 2015)
<i>Scenedesmus sp.</i>	18°C	Medio Biofloc con vitaminas Guillard f/2 enriquecido	(ARROYO. 2018)
<i>Scenedesmus obtusiusculus</i>	10 a 32 °C	EDTA	(CANDÍA. 2018)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	22 ± 2 °C	Fotobiorreactor en agua residual tratar	en sin al. (KUDAHETTIGE, et al. 2018)

**Fuente:** elaboración propia

## 2.2 SELECCIÓN DE LOS PARAMETROS DE CULTIVO DE LA MICROALGA *Scenedesmus dimorphus*

En esta sección se presenta los parámetros de cultivo de la especie microalgal con su respectivo factor.

Como se registra en la tabla 6 y 7 se seleccionaron los parámetros de cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus*. Se destaca la selección de un pH de 8,5 basado en la tabla 3 y tabla 4. Para el parámetro de luz se eligió un fotoperiodo de 12h de luz y 12h de oscuridad. También, para el parámetro de agitación se seleccionó una agitación continua en base a las diferentes fuentes bibliográficas revisadas

En la Tabla 6 y 7 se establece cada uno de los parámetros de cultivo de la microalga *Scenedesmus dimorphus* con presentada a continuación:

**Tabla 6.** Parámetros de cultivo de pH, luz y agitación seleccionados de la especie microalgal

<b>Especie de microalga</b>	<b>pH</b>	<b>Factor de pH</b>	<b>Luz</b>	<b>Agitación</b>
<b>Scenedesmus dimorphus</b>	8,5	5	Fotoperiodo de 12h luz y 12h de oscuridad	Suministro de aire con agitación continua

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 7.** Parámetros de cultivo de temperatura y nutrición microalgal seleccionados de la especie microalgal

<b>Especie de microalga</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Nutrición microalgal</b>
<b>Scenedesmus dimorphus</b>	22°C	Foliagro con agua destilada

**Fuente:** elaboración propia.

## 2.3 PARAMETROS DE SELECCIÓN DE LOS SOLVENTES VERDES

**2.3.1 Revisión bibliográfica de los parámetros de selección de los solventes verdes para la extracción de lípidos.** Basado en el artículo de Jeevan Green Solvents, que se desarrolló en el trabajo investigativo se realiza una tabla de compilación bibliográfica de los solventes para posteriormente establecer el solvente más óptimo para la extracción y rendimiento en los lípidos. Los parámetros de las solventes verdes mencionadas en este artículo son los siguientes:

- **Propiedades:** Es un factor crucial para la extracción de lípidos, allí se caracteriza el solvente adicionando la disrupción celular característico de la cepa microalgal *Scenedesmus dimorphus*. Además, ser no tóxico, no seguros y no inflamables.
- **Eficiencia:** Es un factor fundamental en la extracción del solvente permitiendo seleccionar el solvente adecuado entre la relación de biomasa vs lípidos. Una variable para agregar en el factor de eficiencia es la productividad alcanzada de biomasa microalgal.
- **Selectividad:** Es una variable que relaciona el producto deseado son los lípidos con el solvente verde vs el producto no deseado es la saponificación de ácidos grasos y residuos de la biomasa microalgal.
- **Tiempo de extracción:** El factor está relacionado con el método de extracción del lípido a partir del empleo del solvente verde. Según el método de extracción seleccionado varia el tiempo, este puede oscilar entre 30 minutos a 8 horas. El investigador decide el tiempo de reacción
- **Costo:** Es un componente primordial en la selección del solvente verde define su valor en el mercado y otorga si la extracción del solvente es costosa o de un precio adecuado para su posterior experimentación
- **Método de extracción:** Es un factor soportado por el articulo Sustainable green solvents and techniques for lipid extraction from microalgae: A review del autor Jeevan y otros colaboradores. Allí se planteó la hipótesis de que unos de los posibles métodos de extracción son: extracción por microondas, extracción asistida por ultrasonido, extracción asistida por enzimas, extracción asistida por tensoactivos y extracción lipídica de biomasa húmeda.

**2.3.2 Compilación bibliográfica de los parámetros de selección de los solventes verdes.** En esta sección se presenta la compilación bibliográfica de los parámetros de los solventes verdes presentada en la Tabla 8 y 9. Se consigna datos experimentales de investigaciones que emplean solventes verdes para la extracción y obtención de excelentes rendimientos de lípidos.

Acorde a la compilación bibliográfica de la Tabla 8 y 9 de los parámetros de selección del solvente verde. Se revisó que la investigación desarrollada por TANZI,

et al. 2012 los solventes metil terbutil éter, 2-Metiltetrahidrofurano no registraron reporte de eficiencia y selectividad. En cambio, consignaron un rendimiento para la extracción de lípidos en promedio de un 37%. Empleo un tiempo de extracción de 8 horas con un método de extracción húmeda y requirió un mayor volumen de solvente. Después, realizó una liofilización de la biomasa con una extracción Soxhlet y finalizó con la extracción de lípidos

Por otra parte, con los solventes dimetil éter licuado, N-etil butilamina y ciclopentil metil éter, registraron eficiencias bajas para los dos primeros solventes de 16% y 22%. Con el ciclopentil metil éter obtuvo un resultado de eficiencia media de 55%. Si no, los tiempos de extracción son prácticamente cortos entre un rango de entre 20 a 45 minutos. Los métodos de extracción por cada solvente cambian, por consiguiente, el dimetil éter licuado requiere una aireación de nitrógeno con extracción de columna diferente a los solventes consignados en la Tabla 10. Con el N-etilbutilamina su extracción inicia con contenido de agua, para luego realizar una liofilización para que finalmente, se desarrolle la extracción de lípidos por el método convencional Bligh-Dyer.

Con el ciclopentil metil éter se evidencia una extracción húmeda para la extracción de lípidos de la biomasa microalgal trabajando altas presiones entre 150 MPa y 250 MPa.

El D-limoneno, de la Tabla 8 nos registra altas eficiencias de entre 76% y 129%. Se resalta es uno de los solventes económicos y es fácil su disponibilidad en el mercado para su experimentación. Para el método de extracción se consolidaron dos investigaciones. La investigación de ANGLES, et al. 2017 consideró la disrupción celular de la microalga empleando un método de extracción con un manejo de altas presiones; a la vez su tiempo de extracción es muy corto de 20 minutos. En la investigación de TANZI, et al 2012 se trabajó con un método de extracción convencional, es decir, Soxhlet con liofilización y destilación Clevenger. El tiempo de extracción es de 8 horas, se refleja en su eficiencia alrededor del 129%.

Para la  $\alpha$ -pineno también se encontraron una alta eficiencia del 90% con una extracción convencional de Soxhlet y 8 horas en la duración de la extracción. Por otro lado, es más costoso en el mercado respecto al solvente D-limoneno y la necesidad de un envío desde EEUU.

A continuación, se muestra la tabla 8

**Tabla 8.** Compilación bibliográfica de los parámetros de eficiencia y selectividad para la selección del solvente verde.

<b>Solvente</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Selectividad</b>	<b>Fuente</b>
<b>Dimetil eter licuado (DME)</b>	No toxico No requiere secado Disrupción celular de la microalga sin calentamiento del solvente	22%	0,15	(KANANDA, et al. 2012)
<b>N-etil butilamina (EBA)</b>	Alta eficiencia de extracción lipídica y energética Extracción húmeda sin disrupción celular	16%	0,05	(BOELO, et al. 2016)
<b>D-limoneno</b>	Solvente verde No toxico	76%	0,11	(ANGLES, et al. 2017)
<b>Metil terbutil eter (MTBE)</b>	Solvente alternativo de química verde Pertenece al grupo terpeno Seguros No inflamables No peligrosos	N.E	N.E	(TANZI, et al. 2012)
<b>Ciclopentil metil eter (CPME)</b>	Solvente alternativo de la química verde Bajo punto de ebullición	55%	0,32	(ANGLES, et al. 2017)

**Tabla 8.** (Continuación).

<b>Solvente</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Selectividad</b>	<b>Fuente</b>
<b>2-Metiltetrahidrofurano (MeTHF)</b>	Solvente alternativo de química verde Pertenece al grupo terpeno Seguros No inflamables No peligrosos	N.E	N.E	(TANZI, et al. 2012)
<b>d-limoneno</b>	Solvente alternativo de química verde Pertenece al grupo terpeno Seguros No inflamables No peligrosos	129%	N.E	(TANZI, et al. 2012)
<b>α-Pineno</b>	Solvente alternativo de química verde Pertenece al grupo terpeno Seguros No inflamables No peligrosos	90%	N.E	(TANZI, et al. 2012)

**Fuente:** elaboración propia en base de MOTTA, Ángela. (2019). Evaluación de un solvente verde para la extracción de lípidos a partir de microalgas a escala laboratorio. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2019. p 61-63

**Tabla 9.** Compilación bibliográfica de los parámetros de tiempo de extracción, costo y método de extracción para la selección del solvente verde.

<b>Solvente</b>	<b>Tiempo de extracción</b>	<b>Costo</b>	<b>Método de extracción</b>	<b>Fuente</b>
<b>Dimetil eter licuado (DME)</b>	N.E	\$1.368 COP por mL	Compresión con gas de nitrógeno, con extracción en una columna Temperatura 20°C Volumen del solvente 100cm <sup>3</sup> Para su análisis es necesario el método Bligh-Dyer	(KANDA, et al. 2012)
<b>N-etil butilamina (EBA)</b>	45 min	N.E	La biomasa de la microalga se mezcla con agua y se liofiliza. Para la extracción realizo el método de Bligh-Dyer	(BOELO, et al. 2016)
<b>D-limoneno</b>	20 min	\$82.000 COP	Disrupcion celular con alta presión ( 150 y 250 Mpa) Extracción húmeda 10 ± 0,2mL de cultivos a 1,34 g/L de biomasa con un solvente de 5 ± 0,2 mL	(ANGLES, et al. 2017)

**Tabla 9.** (Continuación).

<b>Solvente</b>	<b>Tiempo de extracción</b>	<b>Costo</b>	<b>Método de extracción</b>	<b>Fuente</b>
<b>Ciclopentil metil eter (CPME)</b>	20 min	N.E	Disrupción celular con alta presión ( 150 y 250 MPa) Extracción húmeda 10 ± 0,2mLde cultivos a 1,34 g/L de biomasa con un solvente de 5 ± 0,2 mL	(ANGLES, et al. 2017)
<b>d-limoneno</b>	8 horas	\$82.000 COP cada 100mL	Volumen de disolvente y una fase acuosa 0,5. Extracción en 10± 0,02 min con una agitación de 2500 rpm en vortex con una temperatura 20±0,4°C. Se centrifuga 10± 0,02 min con una fuerza de 3600g Se separa la fase orgánica y la acuosa. Se centrifuga nuevamente, con la biomasa de microalga a una temperatura -80 °C y liofilización. El método de extracción por Soxhlet con 300 mL solvente verde 10g de microalga seca. Se destila por Clevenger con la separación del solvente y los lípidos.	



**Tabla 9.** (Continuación).

<b>Solvente</b>	<b>Tiempo de extracción</b>	<b>Costo</b>	<b>Método de extracción</b>	<b>Fuente</b>
<b>2-Metiltetrahidrofuran (MeTHF)</b>	8 horas	\$152.700 COP	Volumen de disolvente y una fase acuosa 0,5. Extracción en 10± 0,02 min con una agitación de 2500 rpm en vortex con una temperatura 20±0,4°C. Se centrifuga 10± 0,02 min con una fuerza de 3600g Se separa la fase orgánica y la acuosa. Se centrifuga nuevamente, con la biomasa de microalga a una temperatura -80 °C y liofilización. El método de extracción por Soxhlet con 300 mL solvente verde 10g de microalga seca. Se destila por Clevenger con la separación del solvente y los lípidos.	(TANZI, et al. 2012)

**Tabla 9.** (Continuación).

<b>Solvente</b>	<b>Tiempo de extracción</b>	<b>Costo</b>	<b>Método de extracción</b>	<b>Fuente</b>
<b><math>\alpha</math>- Pino</b>	8 horas	\$118.900 COP	Volumen de disolvente y una fase acuosa 0,5. Extracción en $10 \pm 0,02$ min con una agitación de 2500 rpm en vortex con una temperatura $20 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ . Se centrifuga $10 \pm 0,02$ min con una fuerza de 3600g Se separa la fase orgánica y la acuosa. Se centrifuga nuevamente, con la biomasa de microalga a una temperatura $-80^{\circ}\text{C}$ y liofilización. El método de extracción por Soxhlet con 300 mL solvente verde 10g de microalga seca. Se destila por Clevenger con la separación del solvente y los lípidos.	(TANZI, et al. 2012)

**Fuente:** elaboración propia en base de MOTTA, Ángela. (2019). Evaluación de un solvente verde para la extracción de lípidos a partir de microalgas a escala laboratorio. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2019. p 61-63

## **2.4 SELECCIÓN DEL SOLVENTE VERDE Y SUS PARAMETROS PARA LA EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS**

En esta sección luego de realizar la descripción de los parámetros de selección del solvente verde. Se muestra en la tabla 10 el solvente seleccionado con sus parámetros y la fuente bibliográfica que se tomó los datos experimentales.

Como se puede apreciar en la tabla 10 y 11 se seleccionó el D-limoneno como solvente verde para la extracción de lípidos con los parámetros característicos de resultados experimentales de sus propiedades, eficiencia, selectividad, tiempo de extracción, costo y método de extracción que sustentan la selección de este solvente verde. Además, de un previo Trabajo de Grado de “Evaluación de un solvente verde para la extracción de lípidos a partir de biomasa de microalgas a escala laboratorio” Motta evalúa con la especie *Chlorella Vulgaris* y el solvente verde D-limoneno la extracción de lípidos. A partir, de este Trabajo de Grado se toma base los datos experimentales del D-limoneno y la extracción de lípidos en la microalga

*Scenedesmus dimorphus*, solo tomando los datos de perfiles de lípidos de extracciones realizadas con esta especie microalgal.

A continuación, se presenta la Tabla 10:

**Tabla 10.** Selección del solvente verde y sus parámetros de propiedades, eficiencia y selectividad para la extracción de lípidos.

Solvente	Propiedades	Eficiencia	Selectividad	Fuente
D-limoneno	Solvente verde No toxico	76%	0,11	(ANGLES, et al. 2017)

**Fuente:** elaboración propia en base de MOTTA, Ángela. (2019). Evaluación de un solvente verde para la extracción de lípidos a partir de microalgas a escala laboratorio. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2019. p 61-63

A continuación, se presenta la tabla 11:

**Tabla 11.** Selección del solvente verde y sus parámetros de tiempo de extracción, costo y método de extracción para la extracción de lípidos.

Solvente	Tiempo de extracción	Costo	Método de extracción	Fuente
D-limoneno	20 min	\$82,000 COP	Disrupción celular con alta presión (150 y 250 MPa) Extracción húmeda 10 ± 0,2mL de cultivos a 1.34 g/L de biomasa con un solvente de 5 ± 0,2 mL	(ANGLES, et al. 2017)

**Fuente:** elaboración propia en base de MOTTA, Ángela. (2019). Evaluación de un solvente verde para la extracción de lípidos a partir de microalgas a escala laboratorio. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2019. p 61-63

### 3. PARÁMETROS DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

En el siguiente capítulo se resume los parámetros del proceso de transesterificación seleccionados a partir de revisiones bibliográficas inicialmente, de los perfiles lípidos de las extracciones de lípidos con la microalga *Scenedesmus dimorphus*. Después, se revisa en varias fuentes bibliográficas los parámetros que inciden en el proceso de transesterificación adjuntándose en varias tablas según el parámetro seleccionado con sus respectivos datos experimentales que respalda la selección del parámetro. Finalmente, en la Tabla 21 se muestra los parámetros seleccionados del proceso. También, con un breve análisis de diseño de experimentos con los datos experimentales recopilados de la compilación bibliográfica, se verifica si el parámetro seleccionado afecta y genera un cambio significativo en el proceso de transesterificación

#### 3.1 PARÁMETRO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS LÍPIDOS

**3.1.1 Compilación bibliográfica de la caracterización de los lípidos.** En esta sección se presenta la compilación bibliográfica de los perfiles de lípidos que usaron la microalga *Scenedesmus dimorphus* en su experimentación. Luego de ser seleccionadas, las fuentes bibliográficas de los perfiles a partir del artículo de Arias Peñaranda mencionan, los mejores lípidos para el proceso de transesterificación son los ácidos grasos de cadena larga con un bajo grado de saturación entre aquellos ácidos presentes los ácidos palmitoleico 16:1, oleico 18:1 y mirística 14:0. Por ello, de los trabajos investigativos seleccionados en la Tabla 12 según los perfiles lipídicos encontrados se le asignan diferentes valoraciones a los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAS), ácidos grasos monoinsaturados (MUFAS) y los ácidos grasos saturados (SFAS). Donde la valoración de mayor numeración son los lípidos convenientes para el proceso de transesterificación

De acuerdo con la revisión bibliográfica en la Tabla 12 acerca de la caracterización de los lípidos en la extracción de microalgas preferiblemente de la especie *Scenedesmus dimorphus*. Se realizó una clasificación con el fin de resaltar la presencia de MUFAS y PUFAS. La presencia de SFAS influye en la reacción de saponificación sin que suceda el proceso. En Arias-Peñaranda <sup>59</sup> menciona en el proceso de transesterificación se requiere un catalizador para esta investigación la variable del catalizador no se tomará en cuenta.

La compilación bibliográfica de los perfiles de lípidos de la microalga *Scenedesmus dimorphus* con sus valoraciones se presenta a continuación:

---

<sup>59</sup> Arias-Peñaranda et al., 2013

**Tabla 12** Compilación bibliográfica de los perfiles de lípidos a partir de la microalga *Scenedesmus dimorphus*

<b>Valor/Factor</b>	<b>Ácido graso</b>	<b>Derivado</b>	<b>Fuente</b>
2	Ácido mirístico	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
1	Ácido miristoleato	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
1	Ácido pentadecanoato	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
1	Ácido pentadecenoato	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
5	Ácido palmítico	PUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
3	Ácido palmitoleico	MUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
2	Ácido margarico	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
3	Ácido heptadecenoico	MUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
3	Ácido esteárico	MUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
	Ácido elaidico	MUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
3	Ácido oleico	MUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
1	Acido vis-vaccenico	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
5	Ácido linoleico	PUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
1	Acido gamma linoleica	SFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
4	Ácido linolenico	PUFAS	(MANRIQUE, et al. 2019)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)
2	Ácido pentadecanoico	SFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)
3	Ácido palmitoleico	MUFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)
3	Ácido esteárico	MUFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)
3	Ácido oleico	MUFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)

**Tabla 12.** (Continuación).

<b>Valor/Factor</b>	<b>Ácido graso</b>	<b>Derivado</b>	<b>Fuente</b>
4	Ácido linoleico	PUFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)
4	Acido alfa linolenico	PUFAS	(KUDAHETTIGE, et al. 2018)
4	Ácido oleico	MUFAS	(GOUR, et al. 2016)
4	Ácido linolenico	PUFAS	(GOUR, et al. 2016)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(GOUR, et al. 2016)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(GOUR, et al. 2016)
4	Ácido linoleico	PUFAS	(GOUR, et al. 2016)
2	2-metil-tetracosano	SFAS	(GOUR, et al. 2016)
1	Hexadecano	SFAS	(GOUR, et al. 2016)
1	Ácido eicosenoico	SFAS	(GOUR, et al. 2016)
2	Ácido heptadecanoico	SFAS	(GOUR, et al. 2016)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(AXELSSON, et al. 2014)
3	Acido esteárico	MUFAS	(AXELSSON, et al. 2014)
3	Ácido oleico	MUFAS	(AXELSSON, et al. 2014)
4	Ácido linoleico conjugado	PUFAS	(AXELSSON, et al. 2014)
4	Ácido linolenico	PUFAS	(AXELSSON, et al. 2014)
1	Ácido lignocericico	SFAS	(AXELSSON, et al. 2014)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(YIN DU, et al. 2017)
4	Ácido linoleico	PUFAS	(YIN DU, et al. 2017)
1	Ácido cis-vaccenico	SFAS	(YIN DU, et al. 2017)

**Tabla 12.** (Continuación).

<b>Valor/Factor</b>	<b>Ácido graso</b>	<b>Derivado</b>	<b>Fuente</b>
2	Ácido gamma linolenico	SFAS	(YIN DU, et al. 2017)
3	Ácido oleico	MUFAS	(YIN DU, et al. 2017)
3	Ácido oleico	MUFAS	(YIN DU, et al. 2017)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
3	Ácido palmitoleico	MUFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
3	Ácido esteárico	MUFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
4	Ácido linolenico	PUFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
4	Acido alfa linolenico	PUFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
1	Acido gamma linolenico	SFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
1	Ácido araquidico	SFAS	(MEILIN HE, et al. 2017)
2	Ácido caprico	SFAS	(MOTTA. 2019)
2	Ácido mirístico	SFAS	(MOTTA. 2019)
4	Ácido palmítico	PUFAS	(MOTTA. 2019)
1	Ácido behenico	SFAS	(MOTTA. 2019)
3	Ácido palmitoleico	MUFAS	(MOTTA. 2019)
1	Ácido lignocérico	SFAS	(MOTTA. 2019)
1	Ácido undecenoico	SFAS	(MOTTA. 2019)
3	Ácido oleico	MUFAS	(MOTTA. 2019)
3	Ácido palmitoleico	MUFAS	(MOTTA. 2019)

**Fuente:** elaboración propia

## 3.2 PARÁMETRO DE TIEMPO DE REACCIÓN

**3.2.1 Compilación bibliográfica del tiempo de reacción.** En esta sección se presenta la compilación bibliográfica del tiempo de reacción para el proceso de transesterificación a partir de la revisión de diferentes artículos entre los que se destacan el artículo de “Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión catálisis química” de Andres Felipe Rojas y otros autores. Igualmente, los datos del Trabajo de Grado” Obtención de biodiesel mediante transesterificación de aceite de ricino y grasas animales. Aprovechamiento energético de la glicerina como subproducto del proceso” de Nuria Sánchez. Con ello se realizó una revisión de este parámetro donde se adjunta los datos hallados en diferentes trabajos investigativos en la Tabla 13.

Con la compilación bibliográfica se registró tiempo de reacción es amplio a diferentes mediciones en base a diferentes fuentes. Por lo cual se decide realizar un diseño factorial con los datos experimentales del artículo con el fin de verificar si el parámetro de tiempo de reacción influye en el proceso. En algunos autores, el tiempo de reacción en el proceso de transesterificación es muy repetitivo.

A continuación, se presenta la tabla 13 donde se resume la compilación bibliográfica del parámetro de tiempo de reacción en lípidos y en el proceso de transesterificación:



**Tabla 13.** Compilación bibliográfica del tiempo de reacción en lípidos

Medida	Tiempo de reacción # 1 (h)	Tiempo de reacción # 2 (h)	Tiempo de reacción # 3 (h)	Fuente
1	90			(ROJAS, Et al. 2009)
2	90			
3	90			
4	72			
5	5			
6	18			
7	7			
8	24	5	24	
9	8	10		
10	1	1,5	5	
11	24	12		
12	3			
13	6			
14	6	24	24	
15	24			
16	24			
17	60			
18	1,5	1	0,7	(LAY, 2007)
19	0,5	0,5	1	(DELGADO, 2013)
20	1	1	1	
21	0,5	0,5	1	
22	1	1	0,5	
23	0,5	0,5	0,5	
24	1	0,5	0,5	
25	0,5	1	1	
26	2	2	2	(SANCHEZ, 2015)
27	2	2	2	
28	2	2	2	
29	2	2	2	
30	2	2	1	
31	3	6	3	
32	10	20	30	
33	40	48	40	
34	1	1	1	(ALFONSO, 2013)

**Fuente:** elaboración propia

**3.2.1.1 Análisis estadístico del parámetro tiempo de reacción** Con el fin de verificar si el parámetro de tiempo de reacción influye directamente en el proceso de transesterificación se decidió realizar el siguiente diseño factorial analizando estadísticamente con ANOVA un análisis de varianza de un factor. La variable de respuesta el tiempo de reacción a partir de los múltiples datos experimentales de diferentes trabajos investigativos. Con ello se plantearon las siguientes hipótesis:

H0: El tiempo de reacción del proceso no genera un cambio significativo en la conversión de los ácidos grasos.

H1: El tiempo de reacción del proceso genera un cambio significativo en la conversión de los ácidos grasos

En la tabla 14, se muestra el resultado obtenido

**Tabla 14.** Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable de tiempo de reacción.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2491,30	2	1245,65	2,87	0,06	3,12
Dentro de los grupos	31646,44	73	433,51			
Total	34137,75	75				

**Fuente:** elaboración propia.

Para un nivel de significancia de 0,05; el valor de F es menor que el valor crítico para F, por lo tanto, es aceptada la hipótesis nula y se determina no hay diferencias significativas en el tiempo de reacción y la conversión de los ácidos grasos. El resultado obtenido es con un nivel de confianza de 95%, por lo que a nivel estadístico es alto, para la muestra de datos de tres repeticiones teniendo en cuenta hay valores vacíos. Es suficiente con los datos recopilados no cambia significativamente la relación de conversión de ácidos grasos en el proceso de transesterificación mencionado en la revisión bibliográfica de este proceso.

### 3.3 PARÁMETRO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

**3.3.1 Compilación bibliográfica del parámetro de contenido de humedad** Se presenta a continuación la compilación bibliográfica del parámetro de contenido de humedad con diferentes artículos y trabajos de grado que registraron contenido de humedad en el proceso de transesterificación. El contenido de humedad en el inicio del proceso depende de la enzima lipasa. También, con los contenidos de humedad de 0,5% a 10% alcanzan excelentes rendimientos en el proceso de transesterificación, pero se debe considerar el límite. Sin embargo, si se supera el

10% de contenido de humedad favorece a la formación de ésteres y no acontezcan en el proceso. De manera que, se realizó la siguiente compilación bibliográfica con este parámetro en la tabla 15.

Con la compilación bibliográfica se registró contenido humedad en amplios rangos superando el límite de 10% en donde comienza la formación de esteres y no favorece en el proceso de transesterificación en diferentes trabajos investigativo de revisados y presentados en la Tabla 15. Por el amplio rango de la compilación bibliográfica se decidió verificar los datos experimentales del trabajo investigativo a partir de un diseño factorial si el parámetro de contenido de humedad influye en el proceso.

A continuación, se presenta la tabla 15 donde se resume la compilación bibliográfica del parámetro de contenido de humedad en lípidos y en el proceso de transesterificación:

**Tabla 15.** Recopilación bibliográfica del contenido de humedad en lípidos

Medida	%w #1	%w #2	%w #3	Fuente	
1	12	30		(ROJAS, et al 2009)	
2	6	12	30		
3	6	12	30		
4	3	15			
5	0,4				
6	1				
7	5	3	5		
8	0	5	10		
9	1,2				
10	6				
11	0	5	10	(SANCHEZ, 2015)	
12	0,32	0,26	0,26		
13	0,25	0,31	0,28		
14	0,29	0,29	0,24		
15	0,25	0,28	0,29		
16	0,25	0,26	0,29		
17	0,3	0,81	0,3		
18	0,4	0,5	0,3		(PISARELLO, 2010)
19	0,2	0,2	0,2		

**Fuente:** elaboración propia.

**3.3.1.1 Análisis estadístico del parámetro de contenido de humedad.** Con el fin de comprobar si el parámetro de contenido de humedad influye directamente en el proceso de transesterificación puesto que según el artículo referenciado el contenido de humedad supero el límite de 10% favorece la formación de esteres con datos de 12%, 15% y 30%. Por consiguiente, se decidió realizar el siguiente diseño factorial analizado estadísticamente con ANOVA de análisis de varianza de un factor. La variable de respuesta es el contenido humedad con diferentes datos experimentales de la compilación bibliográfica. Por lo tanto, se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: El porcentaje del contenido de humedad no genera un cambio significativo en el rendimiento de la reacción del proceso de transesterificación.

H1: El porcentaje del contenido de humedad genera un cambio significativo en el rendimiento de la reacción del proceso de transesterificación.

En la tabla 16, se muestra el resultado obtenido.

**Tabla 16.** Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable del contenido de humedad.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad para F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	178,83	2	89,42	1,50	0,23	3,21
Dentro de los grupos	2626,49	44	59,69			
Total	2805,33	46				

**Fuente:** elaboración propia.

Para un nivel de significancia de 0,05; el valor de F es mayor que el valor crítico para F, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula. Además, no existe un cambio significativo en el rendimiento de la reacción y a la vez en el proceso de transesterificación. A nivel estadístico, el resultado obtenido se explica por un nivel de significancia de 95% con varias muestras de datos con tres repeticiones por cada nivel.

### 3.4 PARAMETRO DE TEMPERATURA ÓPTIMA

**3.4.1 Compilación bibliográfica del parámetro de temperatura óptima.** En esta sección se presenta la compilación bibliográfica del parámetro de temperatura, en base a diferentes trabajos investigativos donde registraron la temperatura en el proceso de transesterificación. Rojas, mencionó el parámetro de temperatura está relacionado con la materia prima, es este caso, con la biomasa microalgal. Asimismo, de considerar las variables de rendimiento del proceso de transesterificación y el punto de ebullición del alcohol en este proceso.

Con la compilación bibliográfica de la tabla 17 se consignan varias temperaturas se encuentran en el rango en base al trabajo investigativo de Rojas y otros autores. Aunque, se evidenció temperaturas elevadas del rango entre ellas una temperatura de 60°C reportada en la tabla 17. Sin embargo, se decide verificar si los datos experimentales del trabajo investigativo influyen en el proceso de transesterificación.

En la tabla 17 se resume la compilación bibliográfica de temperatura óptima

**Tabla 17.** Recopilación bibliográfica de la temperatura óptima en el proceso de transesterificación.

Medida	Temperatura # 1 (°C)	Temperatura # 2 (°C)	Temperatura # 3 (°C)	Fuente
1	35			(ROJAS, et al 2009)
2	35			
3	35			
4	35			
5	50			
6	50			
7	40	30	60	
8	35	40	35	
9	40	58		
10	40			
11	35			
12	40			
13	40			
14	40			
15	30			
16	60	65	60	(LAY, 2007)
17	60	50	45	(DELGADO, 2013)
18	40	35	40	
19	31	31	31	
20	38	31	37	
21	31	29	30	
22	38	38	40	
23	41	39	41	
24	31	39	29	
25	39	30	39	
26	65	65	65	
27	65	65	65	
28	65	65	65	
29	65	65	65	
30	65	65	55	
31	45	35	45	(ALFONSO, 2013)
32	30	40	50	
33	60	60	60	

Fuente: elaboración propia.

**3.4.1.1 Análisis estadístico del parámetro de temperatura óptima.** Con el fin de comprobar si el parámetro de temperatura óptima influye en el proceso de transesterificación. Puede que estén consignadas temperaturas que superen el punto de ebullición del alcohol. Por esta razón se decidió realizar el siguiente diseño factorial analizado estadísticamente con un factor. La variable de respuesta es la temperatura óptima con los diferentes datos experimentales consignados en la tabla 17. Por consiguiente, se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: La temperatura óptima no genera un cambio significativo en el rendimiento del proceso de transesterificación.

H1: La temperatura óptima genera un cambio significativo en el rendimiento del proceso de transesterificación.

En la tabla 18, se muestra el resultado obtenido.

**Tabla 18.** Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable de temperatura óptima

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	209,43	2	104,72	0,62	0,54	3,13
Dentro de los grupos	12074,42	71	170,06			
Total	12283,85	73				

**Fuente:** elaboración propia.

## 3.5 PARAMETRO DE AGITACIÓN

**3.5.1 Compilación bibliográfica del parámetro de agitación** En esta sección se presenta la compilación bibliográfica del parámetro de agitación en base a diferentes trabajos investigativos. Entre los trabajos investigativos seleccionados de la compilación bibliográfica se destaca el artículo “Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión catálisis química” de Andres Felipe Rojas y otros autores. Asimismo, el trabajo de grado “Optimización del proceso de transesterificación metílica de aceite de palma en una planta experimental con lotes en RECOPE” de Adrián Delgado Quesada. El parámetro crucial al inicio del proceso para que ocurra un mejor contacto de la biomasa microalgal

Con la compilación bibliográfica de la tabla 19 se registra varias agitaciones que son repetitivas en el trabajo investigativo de Rojas y otros autores. Aunque solo de los datos registrados se evidencia uno se sale de los rangos es una agitación de 1417 rpm. Se considera los datos de la tabla 19 no se menciona la fuente lipídica donde se obtuvieron los respectivos datos. Pero para verificar si los datos experimentales de la tabla se estipulo realizar un análisis estadístico en si influye en el proceso de transesterificación. También, otros autores como (Lay, 2007; Delgado, 2013; Alfonso, 2013) registraron agitaciones entre 300 rpm a 600 rpm aproximadamente.

A partir, de diferentes datos experimentales se elaboró la tabla 19.



**Tabla 19.** Recopilación bibliográfica de la agitación empleada en el proceso de transesterificación.

<b>Medida</b>	<b>Agitación # 1 (rpm)</b>	<b>Agitación # 2 (rpm)</b>	<b>Fuente</b>
1	330	500	(ROJAS, et al. 2009)
2	600	500	
3	600	130	
4	130	1417	
5	130	500	
6	600	600	
7	600	600	(LAY, 2007)
8	300	300	(DELGADO, 2013)
9	605,3	609	
10	304,6	602,5	
11	305,2	602,7	
12	309	305	
13	616,2	608,5	
14	602	300	
15	300	307	
16	601,2	603,1	
17	620,2	305,4	
18	309,2	302,3	
19	309	309	
20	600	600	(ALFONSO, 2013)

**Fuente:** elaboración propia.

**3.5.1.1 Análisis estadístico del parámetro de agitación.** Con la finalidad de comprobar si el parámetro de agitación influye en el proceso de transesterificación puesto que en el artículo y en la tabla 19 se registra un dato de agitación que supera y pueden afectar el proceso de transesterificación. De tal forma que se decidió realizar el siguiente diseño factorial analizada estadísticamente con un factor. La variable de respuesta es la agitación a partir de los diferentes datos investigativos

de la compilación bibliográfica. Por consiguiente, se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: La agitación no genera un cambio significativo en el rendimiento del proceso de transesterificación.

H1: La agitación genera un cambio significativo en el rendimiento del proceso de transesterificación.

En la tabla 20, se muestra el resultado obtenido

**Tabla 20.** Diseño experimental factorial analizado con ANOVA para la variable de la agitación.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	37797,90	1	37797,90	0,74	0,39	4,10
Dentro de los grupos	1934302,1	1	50902,69			
	1972100,0					
Total	1	39				

**Fuente:** elaboración propia.

Para un nivel de significancia de 0,05; el valor de F es menor que el valor crítico para F, por lo que se acepta la hipótesis nula y se determina que no hay un cambio significativo en el rendimiento del proceso de transesterificación. El resultado es obtenido a partir de un nivel de confianza de 95%, siendo alto, con datos de la muestra de dos repeticiones sin celdas vacías siendo suficiente para considerar como parámetro en el proceso de transesterificación.

### 3.6 SELECCIÓN DE LOS PARAMETROS DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

En esta sección luego haber realizado la compilación bibliográfica de cada uno de los parámetros del proceso de transesterificación. En la tabla 21 se presentan los parámetros seleccionados más convenientes para el proceso con su respectiva fuente bibliográfica.

Para el contenido de humedad en el proceso se seleccionó de 10% por la cita del artículo de Rojas y otros autores a partir de este contenido de humedad el proceso tiene rendimientos altos. Para el tiempo de reacción se seleccionó 60h según el artículo que se elaboró la compilación bibliográfica, sin embargo, la fuente de lípidos de este parámetro no se consideró. Por último, se seleccionó una temperatura de 35°C.

Para el parámetro de agitación se un valor de 600rpm.En base al Trabajo de Grado de (Delgado, 2013) donde este valor fue el más repetitivo en los datos experimentales.

A continuación, se presenta la tabla 21:

**Tabla 21.** Parámetros del proceso de transesterificación.

<b>Parámetro/ Ácidos grasos</b>	<b>Contenido de humedad</b>	<b>Tiempo de reacción</b>	<b>Temperatura optima</b>	<b>Agitación</b>	<b>Fuente</b>
Ácido linoleico	10% w	60 (h)	35°C	600 rpm	(MOTTA. 2019)
Ácido palmítico					(MEILIN HE, et al. 2017)
Ácido linolenico					(YIN DU, et al. 2017)
Acido alfa linolenico					(AXELSS ON, et al. 2014)
Ácido oleico					(KUDAHE TTIGE, et al. 2018)
Ácido linoleico conjugado					(ROJAS, et al 2009)

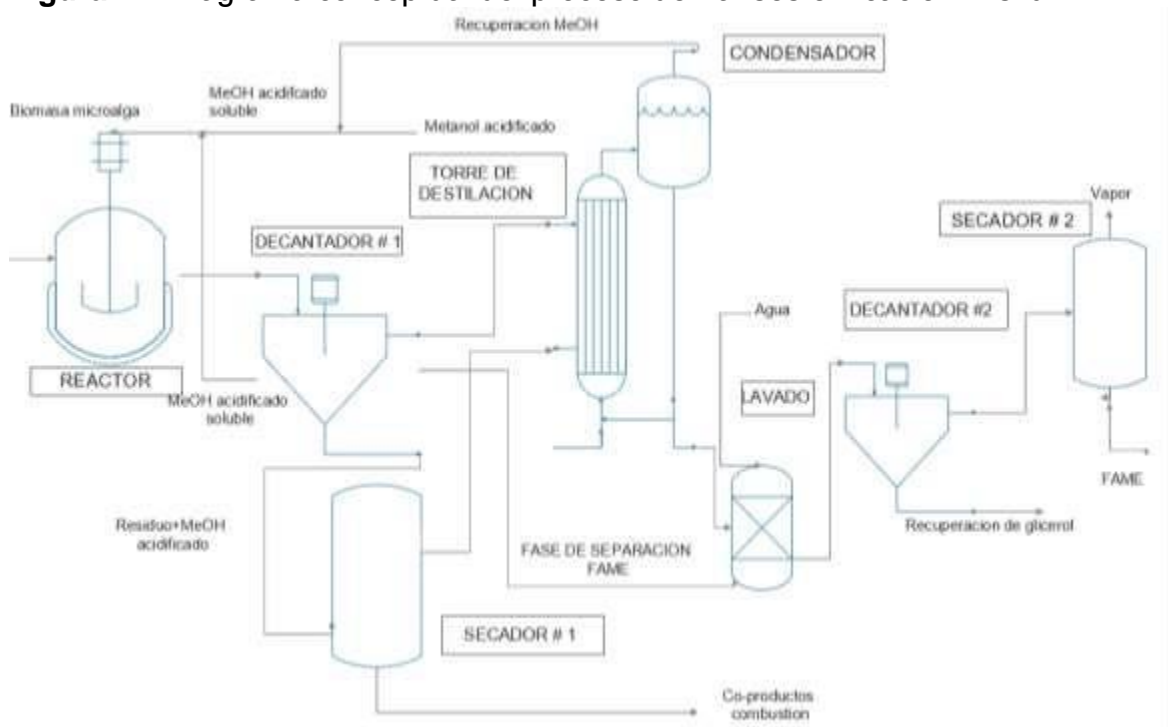
**Fuente:** elaboración propia

#### 4. DISEÑO DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

Con base en el artículo “One-pot and recovery of fatty acid methyl esters (FAMES) from microalgae biomass” de los autores Daniel Nelson y Sridhar Viamajala diseñaron conceptualmente el proceso. Con las variables del proceso seleccionadas en la segunda etapa se decide tomar del artículo el diseño conceptual y rediseñar el proceso con los equipos que son utilizados en el proceso; las salidas y entradas de cada equipo y operación unitaria. Sin embargo, no se consideró las especificaciones técnicas del proceso.

En la figura 11 se representa el diagrama conceptual del proceso de transesterificación in situ

**Figura 11.** Diagrama conceptual del proceso de transesterificación in situ.



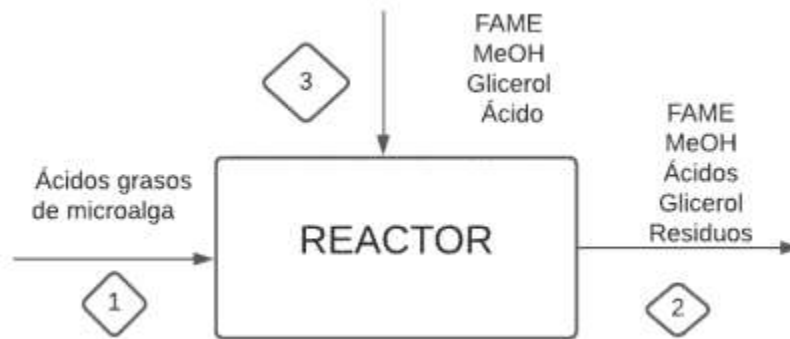
**Fuente:** elaboración propia en base de NELSON, Daniel R. y VIAMAJALA Sridhar. One-pot synthesis and recovery of fatty acid methyls esters (FAMES) from microalgae biomass. En: Catalysis Today. Vol 269. 2016. p 29-39. [En línea]. Disponible en Elsevier: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586116300141>>

En la figura 11 se representa el diseño del proceso de transesterificación con cada uno de los equipos y composición de las corrientes del proceso.

## 4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES POR EQUIPO

**4.1.1 Reactor** En el equipo son mezclados los lipidos de la microalga y el metanol, con ayuda de la agitación para promover la reacción de transesterificación. Para la reacción debe establecer una temperatura y presión.

**Figura 12.** Corrientes reactor



Fuente: elaboración propia

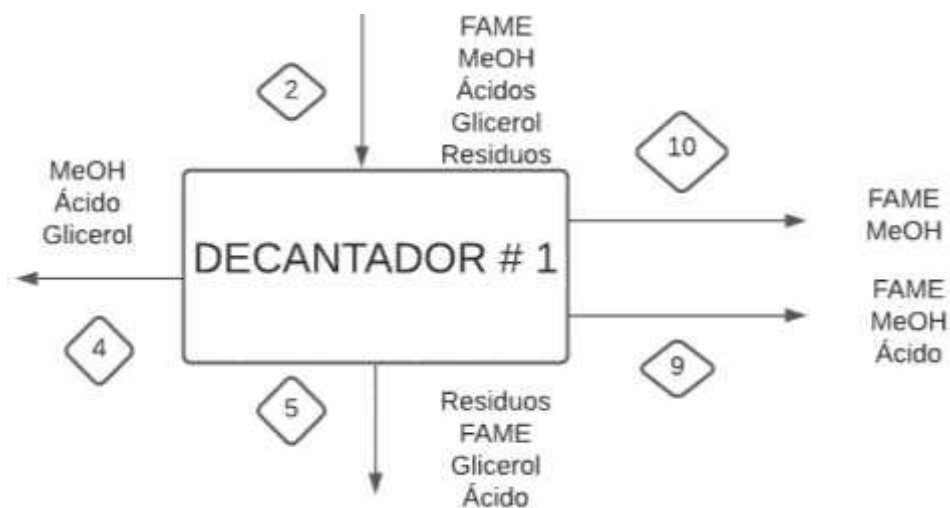
Parámetros de entrada del reactor: Fueron previamente seleccionados en la revisión bibliográfica.

- Temperatura óptima: 35<sup>0</sup> C
- Agitación: 600 rpm
- Perfil lipídico: Acido linolenico, acido palmitico, acido linoleico, acido alfa linolenico, acido oleico, acilo linolenico conjugado.
- Tiempo de reaccion: 60 h.

La corriente de entrada del reactor # 1, ingresa lipidos previamente extraidos de la microalga *Scenedesmus dimorphus*. En la otra corriente de entrada # 3, entra metanol. Con el parámetro de agitación reaccionen los reactivos en el reactor para favorecer su contacto entre los mismos. En la corriente de salida # 2, sale producto (FAME) con metanol y glicerol. Para posteriormente, ser enviada la corriente # 2 al decantador.

**4.1.2 Decantador # 1.** El equipo se basa en separar por medio de la densidad líquidos y sólidos. La separación se fundamenta en dos fases. La primera fase se compone de metanol, residuos de la biomasa y agua. La segunda se compone de una pequeña proporción de ácidos grasos. FAME y glicerol.

**Figura 13.** Corrientes decantador # 1



**Fuente:** Elaboración propia

Parámetros de entrada del decantador:

- Agitación: 600 rpm
- Contenido de humedad: 10% w.

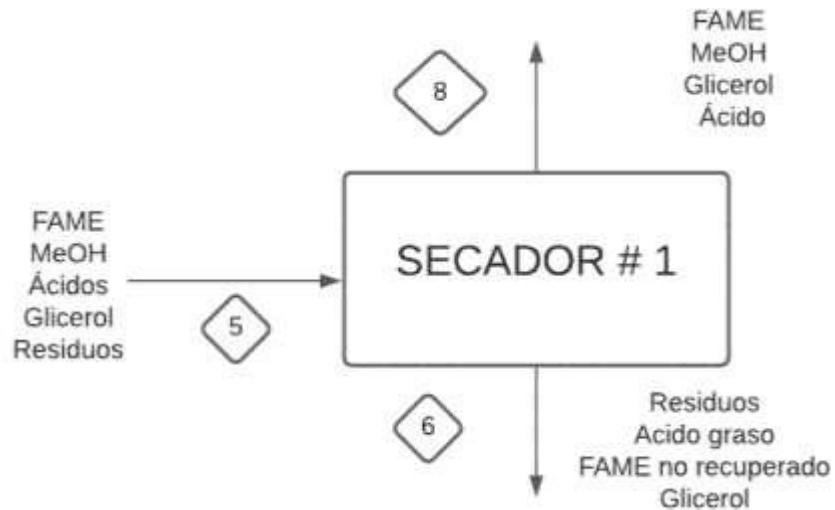
La corriente entrada del decantador, la # 2, ingresa con una composición de FAME, MeOH, ácidos grasos, glicerol y residuos de biomasa. A partir, de la separación por densidades se separan dos fases; la primera fase es separado por la corriente # 5 con una composición de residuos de biomasa, FAME, glicerol y ácidos grasos. La segunda fase es acuosa; en el equipo es la corriente # 9 su composición es FAME, metanol y ácidos grasos es enviada a la torre de destilación.

La corriente # 10 su composición es una gran proporción de FAME y pequeñas trazas de metanol, se envía al decantador # 2 para realizar nuevamente, una separación.

La corriente # 4, se realiza una recirculación para la corriente # 3, posteriormente, es enviada al reactor. Su composición, en la gran mayoría es metanol con pequeñas trazas de ácidos grasos, FAME y glicerol.

**4.1.3 Secador # 1.** En la operación unitaria se separan líquidos por su punto de ebullición. La corriente de entrada en su composición presenta residuos de biomasa se lleva a su punto de ebullición. Para las corrientes de salida, en la parte inferior separa el residuo con remanentes de ácido graso, FAME no recuperado y glicerol. Y la corriente de salida de la parte superior presenta FAME, mezclado con metanol, glicerol y ácido graso es enviado a la torre de destilación.

**Figura 13.** Corrientes secador # 1



**Fuente:** Elaboración propia

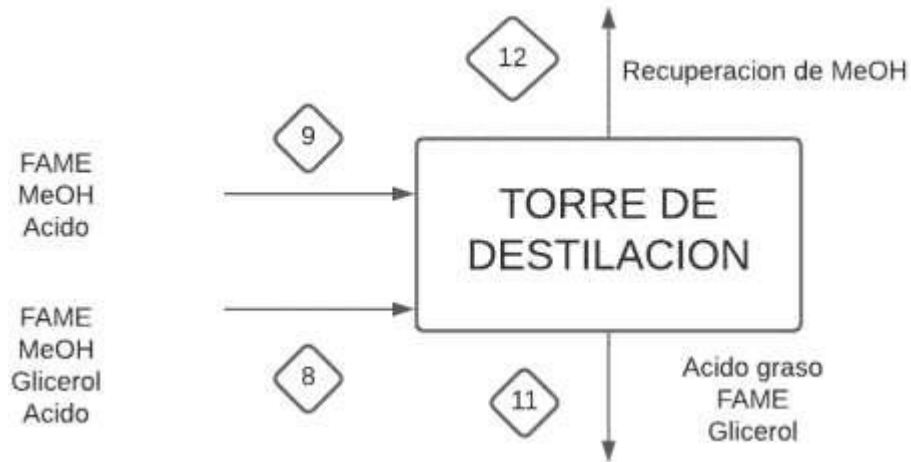
Parámetro de entrada del secador:

- Contenido de humedad: 10 % w.

La entrada del secador es la corriente # 5, presenta una composición de FAME, metanol, ácido graso, glicerol y residuos. Se realizó el proceso de secado para generar la combustión de los residuos incluyendo los remantes de la mezcla. En la corriente # 6, sale los residuos no se usarán en el proceso. En la corriente # 8, en fase líquida es enviada a la torre de destilación para separar el metanol del ácido graso, FAME y glicerol.

**4.1.4 Torre de destilación.** En el equipo se realizó la fase separación con un líquido volátil y no volátil. En el proceso se buscó separar el metanol del glicerol, FAME y ácido graso. La corriente de cimbras se compone de metanol es recirculado al proceso. En la corriente de fondos FAME, ácidos grasos y glicerol son enviados a un lavado para una posterior decantación

**Figura 14.** Corrientes de la torre de destilación.



**Fuente:** Elaboración propia

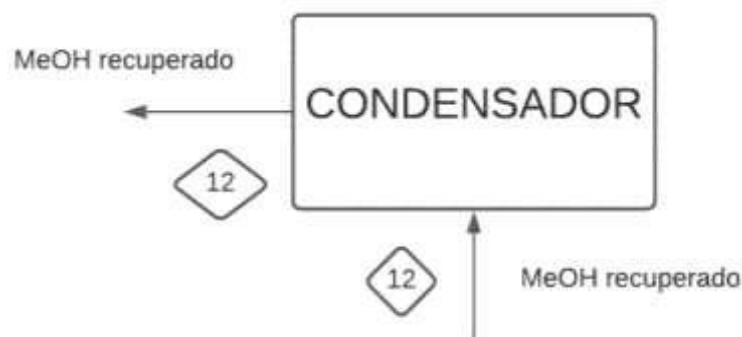
Parámetro de entrada de la torre de destilación:

- Temperatura: 70°C.

La entrada de la torre de destilación son las corrientes #8 y #9. La corriente # 8 presenta una temperatura fría del equipo del decantador con una mezcla de FAME, MeOH, glicerol y ácido grasso. La corriente #9 presenta una temperatura caliente por ser la salida del secado y enviada a la torre. Continuando con la separación de solventes volátiles y no volátiles, en la corriente # 12 es separado el metanol se recircula al proceso. En la corriente # 11, se compone de FAME, ácido grasso y glicerol es enviado a un lavado para la eliminación de los mismos y obtener FAME (biodiésel) puro.

**4.1.5 Condensador.** Es un equipo utilizado para la condensación de un solvente volátil y recuperado para ser enviado al reactor.

**Figura 15.** Corrientes del condensador



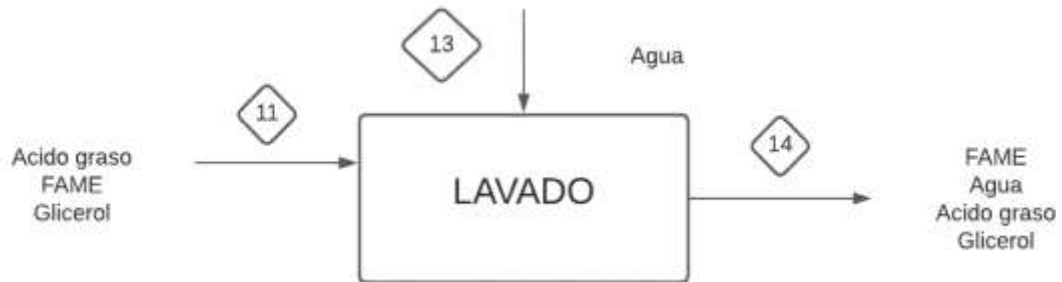
**Fuente:** Elaboración propia



En la corriente de entrada el metanol se encuentra en estado vapor para ser condensado, su fase cambie a estado líquido para utilizarse en otra etapa del proceso.

**4.1.6 Lavado.** El equipo su función es del producto de biodiesel (FAME) con trazas de metanol y ácidos son lavados con agua con el fin de retirar los coproductos del proceso son el resultado de las reacciones secundarias.

**Figura 16.** Corrientes del lavado

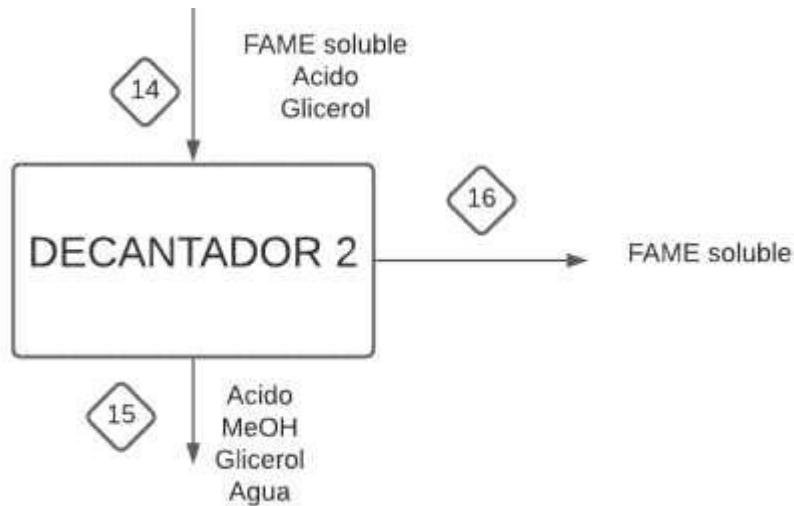


**Fuente:** Elaboración propia

En la corriente de entrada # 11 entran FAME es el producto de interés el biodiesel, con ácido separado previamente por la torre de destilación y unas pequeñas trazas de lípidos de la biomasa. La corriente # 13 entra al equipo para lavar el FAME y los coproductos del proceso. La corriente # 14 es la salida del lavado para separar los remanentes del FAME en el decantador.

**4.1.7 Decantador # 2.** En el equipo, se basa en la separación de líquidos por densidad. En este caso, es separar el producto de interés es el FAME de los componentes presentes en el proceso son glicerol, metanol y agua.

**Figura 17.** Corrientes del decantador # 2.



**Fuente:** Elaboración propia

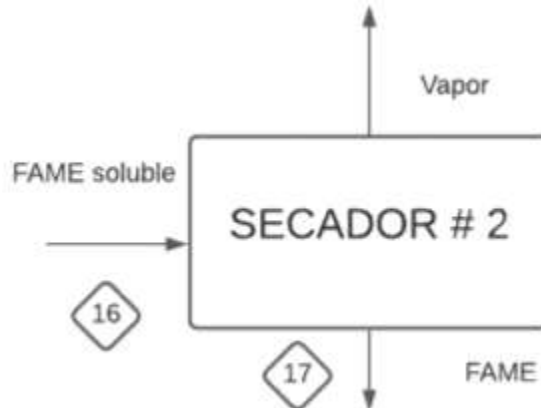
Parámetros de entrada del decantador:

- Agitación: 600 rpm.
- Contenido de humedad: 10% w.

En la corriente de entrada # 14 su composición es el FAME soluble, ácido y glicerol; corriente anteriormente paso por el lavado. En la corriente # 15 son separados por densidad metanol, ácido y glicerol, serían unos coproductos del proceso. En la corriente # 16 se compone de FAME es el producto interés, tiene pequeñas proporciones de agua es necesario ser separada del FAME.

**4.1.8 Secador # 2.** En la operación unitaria por medio de la evaporación, se separan líquidos por su punto de ebullición; por consiguiente, una corriente de salida sería de vapor de agua, la otra es el producto de interés FAME o biodiesel.

**Figura 18.** Corrientes del secador # 2



**Fuente:** Elaboración propia.

Parámetro de entrada del secador:

- Contenido de humedad: 10 % w.

La entrada del secador, la corriente # 16 su composición es FAME soluble. Donde se necesita en la corriente de salida FAME puro sin contenido de agua. Con la corriente de salida vapor, producto del calentamiento es liberado al ambiente. La siguiente corriente de salida # 17 con la composición de FAME como el producto final del proceso.

## **4.2 CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS A USAR EN EL PROCESO**

**4.2.1 Reactor.** La selección del reactor se basa, en participa en operaciones de control en el proceso y es pertinente mantener las condiciones adecuadas para el rendimiento y no sucedan fallas que perjudiquen al proceso.

**Figura 19.** Reactor Batch



**Fuente:** Made-in-China. [Consultado 24 de octubre de 2020] Disponible en:<https://mcequipment.en.made-in-china.com/product/bXuxQJaDToUR/China-Industrial-Cstr- Steam-Heating-Reaction-Jacketed-Reactor.html>

El reactor seleccionado fue batch porque principalmente las corrientes y reacción que actúan en el reactor están presentes en fase líquida. Una de las características del equipo es su mezcla perfecta, se necesita para el proceso<sup>60</sup>. Y en la reacción es exotérmica, una de las condiciones del reactor es operar de forma semicontinua. A continuación, se presenta las especificaciones del reactor:

- Volumen: 500L
- Altura: 0,9 m
- Diámetro: 0,45 m
- Material: Acero inoxidable SS316L

**4.2.2 Decantador.** Este equipo se basa en separación de líquido por medio de la densidad. Posee un tambor cilíndrico-cónico de eje horizontal, se comparte igual que un agitador girando a una gran velocidad. El tornillo sinfín dentro del tambor, gira a una velocidad menor permitiendo la extracción de sólidos en la salida situada en la parte inferior del decantador<sup>61</sup>.

---

<sup>60</sup> Grau, Dolors. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE REACTORES DISCONTINUOS Y SEMICONTINUOS: MODELIZACIÓN Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL. [en línea]. Septiembre 2010.[consultado el 26 de octubre de 2020].Recuperadode:<[https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6463/02\\_grauVilalta\\_capitol\\_1.pdf](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6463/02_grauVilalta_capitol_1.pdf)>

<sup>61</sup>Decantación- Flotación. [en línea]. [consultado el 26 de octubre de 2020]. Disponible en:<<http://www.elaguapotable.com/Decantacion%20flotacion%20Degremont.pdf>>

En el proceso es útil es necesario separar residuos de la reacción de transesterificación, el glicerol del FAME.

**Figura 20.** Decantador



**Fuente:** DIRECTINDUSTRY. [Consultado el 26 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/matec/product-39799-400062.html>

Las especificaciones del decantador son las siguientes:

- Diámetro de decantador: 6 a 10 m<sup>62</sup>.
- Velocidad de angular: 300 a 600 rpm.
- Potencia: 0,18 KW

**4.2.3 Secador.** La operación de secado se basa en la remoción de parcial o total de agua, por medio de la evaporación de un material. El agua puede estar presente un material líquido o sólido.

---

<sup>62</sup> Hidrometálica. [Consultado 26 octubre de 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/76462722-Decantador-por-gravedad.html>

**Figura 21. Secador**



**Fuente:** PLASTICO. [Consultado el 26 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.plasticos.com/temas/Cuales-son-las-caracteristicas-fundamentales-del-secador-de-aire-caliente+123651>

En el proceso de retirar residuos y metanol en el decantador # 1, en el siguiente decantador para remover metanol, glicerol y agua. Se debe tener un control especial a la temperatura.

A continuación, las especificaciones técnicas del equipo son:

- Temperatura: 50 a 90°C.
- Flujo de aire: 0,5 MMBTU/hr a 300 MMBTU/hr.<sup>63</sup>

**4.2.4 Torre de destilación.** El equipo se basa en una separación a partir de evaporación o condensación, a través, de una alimentación líquida. La separación se ejecuta por medio de fracciones de un destilado volátil es hervido o vapor condensado, en otra fracción de fondos es residuo menos volátil.

En el caso del proceso, la mezcla de alimentación es metanol, fondos es el FAME y el destilado más volátil es el metanol es recuperado.

---

<sup>63</sup> NUTECBLIEY. [Consultado el 26 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.nutecbickley.com/es/que-hacemos/combustion-y-control/secadores-industriales>

Las especificaciones técnicas del equipo son:

- Material: Acero inoxidable.
- Serpentín: 50 cm
- Potencia: 600W<sup>64</sup>

**4.2.5 Condensador.** En el proceso se emplea para enfriar una corriente de estado gaseoso, cambiarla de fase y pase a estado líquido. Es útil para recuperar el metanol y tener un rendimiento alto en el proceso.

**Figura 22.** Condensador



**Fuente:** SACOME. [Consultado el 27 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.sacome.com/condensadores-metanol-tolueno-para-refinerias/>

Las especificaciones técnicas del equipo son:

- Temperatura de diseño: 104,4 °C.
- Presión de diseño: 3,5 bar.
- Material: AISI 316L
- Diámetro exterior: 19,05 mm
- Grosor: 1,65 mm
- Longitud: 5486,4 mm

---

<sup>64</sup>SEVMEXICO. [Consultado el 26 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.sevmexico.com/categorias/productos/?pr=133>

## 5. CONCLUSIONES

- Se estableció a partir de la revisión bibliográfica el solvente verde D-limoneno registro eficiencias altas de 76% y 129% para la extracción de lípidos, lo cual es considerado útil para el proceso.
- Se determinó de la revisión bibliográfica el solvente verde D-limoneno consigno una selectividad de 0,11. Hay una mayor presencia del producto deseado son los lípidos respecto al no deseado es la biomasa.
- Para los parámetros del proceso de transesterificación, en la variable del perfil lipídico se seleccionaron ácido linoleico, ácido oleico, ácido linolénico y ácido palmítico. En base de la revisión bibliografía de diferentes autores con varios tipos de microalga entre la especie estudiada *Scenedesmus dimorphus* y *Chlorella vulgaris*.
- A partir de los parámetros seleccionados para el proceso de transesterificación (perfil lipídico, contenido de humedad 10%, tiempo de reacción 60 h, temperatura 35°C, agitación 600 rpm) se diseñó el proceso iniciando, con el reactor donde se requirió el uso de la mayor parte de los parámetros. Del producto del reactor pasa al decantador para separar residuos, ácidos, glicerol, metanol y el FAME. Posteriormente, se pasó a un secador y torre de destilación para separar por métodos termodinámicos el FAME del metanol.

Finalmente, de la torre de destilación es enviado el FAME a un lavado, decantador y un secador. Con operaciones unitarias de separación tener en composición pura el FAME y en otras corrientes los co-productos acompañantes del proceso son ácidos, metanol, glicerol y agua.



## 6. RECOMENDACIONES

- Para el proceso de transesterificación es necesario determinar el catalizador del proceso porque ayuda a acelerar el tiempo de la reacción de transesterificación.
- Considerar la disrupción celular de la microalga *Scenedesmus dimorphus*.
- Realizar la extracción de lípidos con el solvente verde D-limoneno y la especie microalgal *Scenedesmus dimorphus*.
- Realizar una comparación de los datos de la extracción lipídica empleando otro solvente verde.
- Realizar el proceso de transesterificación a nivel laboratorio a partir de biomasa microalgal.
- Diseñar el proceso de transesterificación con datos experimentales de perfil de lípidos y otros parámetros, para que se determine el proceso a nivel escala piloto.

## BIBLIOGRAFÍA

ABDEL-RAOUF, N et al. Microalgae and wastewater treatment. En: Saudi Journal of Biological Sciences. Beni-Suef, Egypt. King Saud University, mar-May 2012. vol 12, p 257-275. [Citado en 27 marzo de 2020]. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7498057/>

Algaebase. *Scenedesmus dimorphus*. [En línea] <[https://www.algaebase.org/search/species/detail/species\\_id=58629](https://www.algaebase.org/search/species/detail/species_id=58629)> [Citado en 19 de febrero de 2020]

ANDERSEN, R. Algal Culturing Techniques.

ANGLES, Emilie., et al. Wet lipid extraction from the microalga *Nannochloropsis* sp.: Disruption, physiological effects and solvent screening. Revista Algal No 21. 2017. p 27-34. [En línea]

Biología-geología. Ácidos grasos saturados e insaturados. [En línea] <[https://biologiageologia.com/biologia2/3211\\_acidos\\_grasos\\_saturados\\_e\\_insaturados.html](https://biologiageologia.com/biologia2/3211_acidos_grasos_saturados_e_insaturados.html)> [Citado en 27 de febrero de 2020]

BENAVENTE, J.R. Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Universidad Autónoma de Coahuila. Departamento de Investigación en Alimentos. Facultad de Ciencias Químicas. Coahuila, México. Ene-Jun 2012. Año 4, N°. 7. [En línea]. <<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>>. [Citado en 15 de Abril 2020].

Biologiasur. Lípidos y soluciones. [En línea] <<https://www.biologiasur.index.php/lipidos-2/90-lipidos/124-lipidos-2-soluciones>> [Citado en 2 marzo de 2020]

CASTILLO, Omar et al. Producción de biodiesel: avances y biotecnológicas. En: Hidrobiológica [En línea]. Celaya, México. Universidad de Guanajuato, mayo 2016-noviembre 2017. vol. 27, nro. 3. p. 337-352. [Citado en 2 marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v27n3/0188-8897-hbio-27-03-337.pdf>

CHAPARRO, Gina. Evaluación del suero lácteo en la producción de biomasa y lípidos en la microalga *Chlorella vulgaris* a escala laboratorio. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2017. p 36.

CORZO, Ruth y MANRIQUE, Ingrid. Evaluación de carotenoides y lípidos en la microalga *Scenedesmus dimorphus* a escala laboratorio bajo condiciones de fotobiorreactor. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2019. p. 27.

FERNANDEZ, José. Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas. En: UNIVERSIDAD DE ALMERIA. [Sitio web]. Sevilla. [Citado en 22 de Febrero de 2020]. Disponible en: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html>

FONSECA, Laura y GUARÍN, María. Evaluación de la remoción de cromo con cultivos de microalgas en un fotobiorreactor de panel plano. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Bogotá. p 22

GARCIA, Katherine y NOVOA, Jimmy W. (2019). Impacto en la producción de lípidos en la microalga *Scenedesmus dimorphus* en medio de cultivo BG-11 suplementado con vitamina B3 o vitamina B9. Universidad Francisco José de Caldas. Facultad de Ciencias y Educación. Bogotá. 2019. p 21.

GÓMEZ, Liliana. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. Revista Cubana de Química [En línea]. Santiago de Cuba, Universidad de Oriente, 2007.vol 19, nro. 2. p. 3-20. [Citado en 19 de Febrero de 2020]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543707001.pdf>. ISSN: 0258-5995

GONZALEZ BARRIOS, Iván. Biocatálisis en disolventes verdes: La mejor estrategia para la producción de fármacos en disolventes sostenibles. Complutense, España. Universidad de Complutense. Facultad de Farmacia. p 11 [Citado en 10 Abril de 2020]. Disponible en <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/IVAN%20GONZALEZ%20BARRIOS.pdf>

GROBBELAAR, J. Algal nutrition: mineral nutrition. [En línea] 2004, p 97-115. [Citado en 28 marzo de 2020]. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470995280.ch6>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 1018 ISBN9 9789588585673 p. 153

KUMAR, Jeevan, et al. Sustainable green solvents and techniques for lipid extraction from microalgae: A review. Algal Research, No 21. 2017. p. 139-141.

Lifeder. Diacilglicerido. [En línea] < <https://www.lifeder.com/diacilglicerol/> > [Citado en 28 de febrero de 2020]

LIPIDOS Y MEMBRANAS. Capítulo 11. [Anónimo]. [En línea]. Disponible en: <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/Bioquimica/12-O.pdf>

MALDONADO, Carmen. Inducción lipídica por limitación en los nutrientes *Scenedesmus dimorphus* y *Chlorella sorokiniana*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C División de Estudios de Posgrado. Chihuahua, México.2011. p 37.

MARTÍNEZ, L. Eliminación de CO<sub>2</sub> con microalgas autóctonas. Y Park, J. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production.

MAY, Elda. Cultivo de la microalga *Scenedesmus* sp. en un fotobiorreactor acoplado a un sistema de recuperación de biomasa. Centro de Investigación Científica Yucatán A.C. Posgrado en Ciencias en Energías Renovables. Merida, Mexico. 2015. p 7.

MERCADO, Estefanía. Cultivo de la microalga *Scenedesmus Obliquus* var. *Dimorphus* (TURPIN) para la obtención de biomasa y lípidos. Universidad Ricardo Palma. Escuela de Posgrado. Lima, Peru. 2016.p 37

MONTES, Omar. Efecto de la intensidad de la luz y de la tasa de inyección de aire en el crecimiento. y la productividad de la microalga *Nannochloropsis* sp., cultivada en un biorreactor plano. [En línea]. Ensenada, Mexico. 2014.p 17. [Citado en 1 Abril de 2020]. Disponible en: <<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/121/1/235111.pdf>>

PARDO, Luz. Talleres de bioquímica. Universidad de América.2016. p 21.

PEREZ RIAL, Leticia; SALGUIERO FERNANDEZ, José y MACEIRA CASTRO, Rocío. Producción de biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. Meubook. 2014. p 58. [En línea]. Disponible en: <<https://www.researchgate.publication.305108885>>. [Citado en 8 junio de 2020].

PORTO, Alejandro. TEMA 6: LIPIDOS. [En línea]. Disponible en: <https://www.bionova.org.es/biocast/tema06.htm>. [Citado en 1 marzo de 2020].

RIVERON-RODRIGUEZ, Elier et al. Estación de trabajo para el estudio de la cinética de crecimiento de *Escherichia coli* mediante el método de turbidez. En: Revista CENIC Ciencias Biologicas [En línea]. Ciudad de La Habana, Cuba, mayo-agosto, 2012. vol 43, nro 2. p 1-5. [Citado en 30 marzo de 2020]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181223782002.pdf>. ISSN 0253-5688

RICHMOND, A. Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology.

TANZI, Celine., et al. Terpenes as Green Solvents for Extraction of Oil from Microalgae. Revista Molecules. 2012. p. 8196-8205. [En línea].

TEJEDA, Lesly et al. Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. En: Revista Facultad de Ingeniería [En línea]. Cartagena. Universidad de Cartagena, mayo-agosto 2015. vol. 24 nro. 39 p. 43-54. [Citado en 3 marzo de 2020]

Universidad de Murcia. Ácidos grasos. [En línea]<  
<https://www.um.es/molecula/agra.htm>> [Citado en 2 Marzo de 2020]

UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO. Acilgliceroles. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.ehu.eus/biomoleculas/lipidos/lipid33.htm#a>. [ Citado en 1 marzo de 2020]

Universidad RAFAEL LADÍNO (2013) Lípidos y membranas [En línea]. <  
<http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/Bioquimica/12-O.pdf>.> [Citado en 5 marzo de 2020].

XU, Xinmiao, et al. Cultivation of *Scenedesmus dimorphus* for C/N/P removal and lipid. Electronic Journal of Biotechnology. Fuzhou, China. Fuzhou University, august-december 2014. vol 18. P 46-50. [Citado en 5 marzo de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.12.003>

## **ANEXOS**

## ANEXO A. DELIMITACIÓN

El desarrollo del Trabajo de Grado tiene como título: **“DESARROLLO DEL DISEÑO DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACION PARA LA PRODUCCION DE BIODIESEL A PARTIR DE LA MICROALGA *Scenedesmus dimorphus* EMPLEANDO SOLVENTES VERDES”** este se llevará a cabo en la ciudad de Bogotá específicamente en las instalaciones de la Fundación Universidad de América con énfasis en un proyecto totalmente teórico.

Para la realización del siguiente Trabajo de Grado se estima la duración de 8 ocho meses a partir de Diciembre de 2019 hasta el mes de Agosto de 2020.

El área de interés para el Trabajo de Grado se enfocará en bioprocesos comenzando con el establecimiento los parámetros de cultivo para la extracción de lípidos con la microalga *Scenedesmus dimorphus* y los solventes; luego se seleccionará los parámetros adecuados para el proceso de tranesterificación. Y, por último, se diseñará el proceso de tranesterificación teniendo en cuenta la selección de los mejores parámetros y los mejores rendimientos de extracción de lípidos.

No nos comprometemos con el escalamiento a nivel Planta Piloto y la evaluación financiera del proyecto. La financiación del proyecto será de financiación propia.