

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE  
BIODIESEL A PARTIR DE ÁCIDOS GRASOS DE MICROALGAS CULTIVADAS  
USANDO LODOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

**RUBÉN DARÍO ALVARADO BALLESTEROS  
JOHAN STEVEN QUINTANA ADRADRA**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2018**

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE  
BIODIESEL A PARTIR DE ÁCIDOS GRASOS DE MICROALGAS CULTIVADAS  
USANDO LODOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

**RUBÉN DARÍO ALVARADO BALLESTEROS  
JOHAN STEVEN QUINTANA ADRADRA**

**Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial**

**Tutor del proyecto  
NELSON HERNANDO CAICEDO ORTEGA  
Cotutor del proyecto  
KATHERINE ORTEGON MOSQUERA**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2018**

## CONTENIDO

<b>GLOSARIO</b> .....	7
<b>RESUMEN</b> .....	8
<b>Introducción</b> .....	9
<b>1 Problema de investigación</b> .....	10
<b>1.1 Contexto</b> .....	10
<b>1.2 Definición del problema</b> .....	11
<b>1.3 Justificación</b> .....	12
<b>2 Objetivos</b> .....	13
<b>2.1 Objetivo del Proyecto</b> .....	13
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>2.3 Entregables</b> .....	13
<b>3 Marco de Referencia</b> .....	14
<b>3.1 Antecedentes o Estudios Previos</b> .....	14
<b>3.2 Marco Teórico</b> .....	16
<b>3.2.1 Análisis de ciclo de vida</b> .....	16
<b>3.2.2 Biodiesel</b> .....	18
<b>3.2.3 Microalgas</b> .....	22
<b>3.3 Contribución intelectual o impacto del proyecto</b> .....	22
<b>4 Metodología</b> .....	23
<b>5 Resultados</b> .....	25
<b>5.1 Cadena productiva del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas e indicadores de competitividad</b> .....	25
<b>5.2 Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel.</b> .....	28
<b>5.3 Análisis comparativo</b> .....	31
<b>5.4 Conclusiones</b> .....	36
<b>5.5 Recomendaciones</b> .....	36
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	38
<b>ANEXOS</b> .....	41

## **Lista de Figuras**

Figura 1 Etapas macros de la producción de biodiesel Fuente: Creación propia .....	10
Figura 2 Ciclo de vida de un producto .....	11
Figura 3 Fases del ACV de acuerdo con la ISO 14040 .....	17
Figura 4 Esquema general de la cadena de biodiesel en Colombia.....	19
Figura 5 Cadena productiva del biodiesel de aceite de palma en Colombia .....	20
Figura 6 Despachos de galones de biodiesel B100 durante el segundo trimestre de 2017 ..	21
Figura 7 Unidades de proceso de elaboración de ácidos grasos.....	25
Figura 8 Proceso de extracción de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos de digestión anaerobia .....	26
Figura 9 Cadena productiva del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos anaerobios .....	27
Figura 10 Impactos de punto medio causados por cada etapa de fabricación .....	29
Figura 11 Análisis del impacto ambiental de la composición de lodos .....	29
Figura 12 Impactos de punto final causados por cada etapa de fabricación.....	30
Figura 13 Impactos evaluados con el eco-indicador IPCC.....	31
Figura 14 Demanda de energía acumulada.....	31
Figura 15 Comparación con ácidos grasos a partir de microalgas (otros artículos).....	33
Figura 16 Comparación impactos de punto medio causados por la extracción de aceites...	34
Figura 17 Comparación impactos de punto final causados por la extracción de aceites.....	34
Figura 18 Comparación de impactos por medio del eco-indicador IPCC.....	35
Figura 19 Comparación de demanda acumulada de energía .....	35

## **Lista de Tablas**

Tabla 1 Categorías de impacto .....	14
Tabla 2 Metodología Análisis de Ciclo de Vida.....	18
Tabla 3 Comparación de las propiedades fisicoquímicas del diésel y biodiesel .....	19
Tabla 4 Reducción de emisiones por vehículo por muestra .....	21
Tabla 5 Rendimiento industrial de la extracción de aceite. ....	28
Tabla 6 Indicadores de productividad y rendimiento en la extracción de aceite.....	32

## **Lista de Anexos**

Anexo 1 Matriz MED.....	41
Anexo 2 Esquema escalado en SuperPro Designer.....	42
Anexo 3 Impactos de punto medio por medio de eco-indicador ReCiPe.....	43
Anexo 4 Diagrama de Sankey biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos de digestión anaerobia.....	44
Anexo 5 Impactos de punto final por medio de eco-indicador ReCiPe.....	44
Anexo 6 Impactos del Cumulative Energy Demand.....	45
Anexo 7 Tabla de inventario del ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir de microalgas marinas.....	46
Anexo 8 Tabla de inventario de ciclo de vida de la producción de aceites a partir de microalgas marinas.....	47
Anexo 9 Tabla de inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de microalgas.....	47
Anexo 10 Comparación de Impactos de punto medio por medio de eco-indicador ReCiPe.....	48
Anexo 11 Comparación de Impactos de punto final por medio de eco-indicador ReCiPe.....	48

## GLOSARIO

**Anaerobio, a:** Organismo que puede vivir sin oxígeno (“BioDic,” n.d.).

**Biodiesel:** Combustible renovable que se deriva de grasas animales o aceites vegetales (aceite de canola, aceite de soja, aceite de girasol, aceite de palma). El biodiesel es un líquido amarillo ámbar transparente con una viscosidad similar la del diésel de petróleo (Demirbas, 2008).

**Cianobacterias:** Bacterias capaces de realizar fotosíntesis oxigénica. Son los únicos procariontes que llevan a cabo ese tipo de fotosíntesis, por ello también se les denomina oxifotobacterias (EcuRed, 2016).

**Ésteres:** Compuestos orgánicos en los cuales un grupo orgánico alquilo reemplaza a un átomo de hidrógeno (o más de uno) de un ácido oxigenado (EcuRed, n.d.-a).

**Heterotrófico:** Organismos que deben obtener su alimento de materia orgánica, incapaces de usar materia inorgánica para formar proteínas y carbohidratos (Hongos biofactory, n.d.).

**Lípido:** Grupo de compuestos biológicos generalmente apolar (carbono, hidrógeno y oxígeno), que hace que sean poco solubles en agua (Ciencia, n.d.).

**Lodos:** Subproductos líquidos, sólidos o semisólidos generados durante los procesos mecánicos, biológicos y químicos de purificación de las aguas servidas en las PTAR (Plantas de tratamiento de aguas residuales). Contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micronutrientes y agua (Diaz, Lorenzo, & Venta, 2015).

**Microemulsión:** Sistema de aceite, agua y surfactantes que forman una sola emulsión termodinámicamente estable y ópticamente transparente (Crop Care, n.d.).

**Mixotrófico:** Organismos (usualmente algas, bacterias), capaces de obtener energía metabólica tanto de la fotosíntesis como de seres vivos generada gracias a los procesos químicos de oxidación. Esos organismos pueden utilizar la luz como una fuente de energía, o tomarla de compuestos orgánicos o inorgánicos (Academic, n.d.).

**Tensoactivo, a:** Sustancias que disminuyen la tensión superficial de un líquido o la acción entre dos líquidos (AulaNatural, 2015).

**Vinaza:** Subproducto líquido espeso que queda después de la fermentación. En el texto se refiere a la materia prima que la origina la melaza de caña de azúcar (EcuRed, n.d.-b).

## RESUMEN

Las microalgas se consideran una materia prima con potencial destacable para la producción de biocombustibles. Sin embargo, su aporte ambiental aún no es claro y se encuentran numerosos artículos donde no se evidencia si trae un beneficio ambiental. Por esta razón, se han cultivado microalgas en lodos de digestión anaerobia. Estos lodos son residuos provenientes de la planta Levapan S.A. y brindan un ambiente necesario para la proliferación de las microalgas. De este modo, al partir de unos residuos se espera que en materia ambiental exista un beneficio marcado. Por esto, en este estudio se evalúan los impactos ambientales que se generan al aprovechar estos lodos para la producción de biodiesel a partir de 100,18 kg de ácidos grasos, haciendo uso de la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) apoyados en el programa SimaPro con el fin de justificar o no la producción del biodiesel.

En el análisis se tuvieron en cuenta 18 categorías de impacto de punto medio y 3 de punto final. A partir de este se obtuvo que la etapa que mayor impacto generaba es la del cultivo junto con la extracción de ácidos grasos. Además, se realizó una comparación con otras tres alternativas de producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas y se obtuvo que el biodiesel estudiado es aquel que tiene menor impacto ambiental con respecto a los comparados en todas sus etapas del ciclo de vida. El proceso se modeló usando la herramienta SuperPro Designer, hasta el proceso de extracción de ácidos grasos, donde se obtienen 100,18 kg de estos. Lo cual representa un rendimiento en la extracción de aceites del 75,6% sobre la extracción de biomasa seca y una productividad de 83,04 g/m<sup>2</sup>/día.

**Palabras claves:** Biodiesel, microalgas, lodos, digestión anaerobia, análisis de ciclo de vida.



## **Introducción**

El biodiesel es considerado una gran alternativa para reemplazar los combustibles fósiles y por ende disminuir la contaminación, ya que es un combustible renovable y de combustión limpia. La producción de biodiesel se puede desarrollar a partir de aceites vegetales y grasas animales, en este caso el análisis se centrará en la producción a partir de ácidos grasos de microalgas con una característica adicional, ya que la biomasa microalgal se genera a partir de un proceso de biotransformación de un subproducto industrial de la empresa Levapan S.A. que son los lodos de digestión anaerobia de vinazas.

A partir de este proceso de investigación se evidenció cómo es el proceso de obtención de biodiesel, comprendiendo todas las entradas y salidas de las etapas (cultivo, cosecha y deshidratación, Extracción de aceite, obtención de biodiesel), considerando igualmente los actores que intervienen en los mismos. Se realizó un análisis de ciclo de vida del proceso de obtención de biodiesel en cuestión, con el objetivo de determinar si es una alternativa con menor impacto con respecto a otros procesos reportados en la literatura y establecer si partiendo de un residuo (lodos de digestión anaerobia) el impacto ambiental es el adecuado y menor a los competidores. De este modo, poder determinar si el tratamiento de aguas residuales es el adecuado ya que es un tema que toma importancia para entender si la disposición final de estos residuos son los beneficiosos en la generación de biodiesel.

El análisis de ciclo de vida es un proceso que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para determinar el impacto del uso de recursos y emisiones, para poder así evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El análisis se realizó sobre la cantidad de biodiesel generado a partir de 132 kg de biomasa seca, la cual fue necesaria para la producción de 100,18 kg de aceite. Esta cantidad de aceite fue obtenida luego de modelar el proceso a escala mediante el programa SuperPro Designer. El análisis del ciclo de vida (ACV) incluye las etapas de extracción, procesado de materias primas, producción, transporte, uso, reutilización, mantenimiento, reciclado o disposición final.

# 1 Problema de investigación

## 1.1 Contexto

El biodiesel es un biocombustible sintético líquido que se obtiene mediante procesos de transesterificación y esterificación de ácidos grasos. Las fuentes principales para la producción del biodiesel son el aceite vegetal y el aceite animal (R. Ruiz & Roger, 2010). Considerando esto, el enfoque de este proyecto es realizar un análisis ambiental del proceso de obtención de biodiesel a partir de lípidos o ácidos grasos de microalgas. Estas se pueden cultivar de distintas maneras, pero en este caso estas se producirán gracias a los beneficios que ofrecen los residuos que quedan de una industria de levaduras (lodos de digestión anaerobia de vinazas), proveedores de nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las microalgas. Por esto, es importante considerar las etapas del proceso (Figura 1) que representan los procesos unitarios considerados en el estudio (Passell et al., 2013).

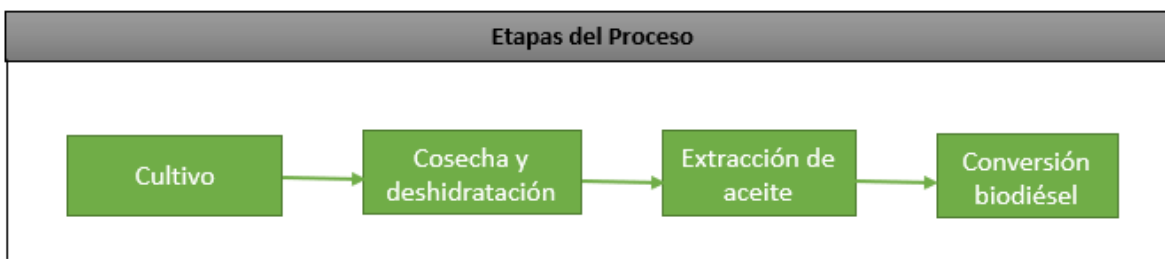


Figura 1 Etapas macros de la producción de biodiesel  
Fuente: Creación propia

Por otro lado, es importante considerar que el consumo continuo de energía primaria ha motivado a los científicos del mundo a buscar fuentes alternativas que puedan sustituir a los combustibles fósiles. En este caso, se ha encontrado que los ácidos grasos sintetizados por las microalgas pueden ser una materia prima renovable para la producción de biodiesel. Algunos estudios han evidenciado la factibilidad de producir microalgas debido a la capacidad de estas para usar el centrado de digestión anaerobia como la única fuente de nutrientes, reduciendo así el costo de producción de biomasa al evitar el uso de fertilizantes caros y no sostenibles. Por ende, esta combinación puede ayudar a aumentar las posibilidades de producción de biocombustibles a partir de microalgas mediante el acoplamiento de su producción a otros procesos de tratamiento (Morales, Gómez, Ación, & Fernández, 2015).

Por esto, es necesario realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) integral para evaluar el impacto ambiental de la producción del biodiesel obtenido a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas en aguas o lodos residuales. Aquí, se debe considerar todo el ciclo de vida (Figura 2) de la producción de biodiesel, el cual inicia con el cultivo de microalgas las cuales se dan a partir de lodos de digestión anaerobia, posterior a esto, se pasa a una etapa de cosecha y deshidratación de microalgas para poder extraer los ácidos grasos los cuales son insumo para la producción de biodiesel. Posteriormente se da una etapa de consumo de biodiesel, donde se generan emisiones de CO<sub>2</sub> que se compensarían con el CO<sub>2</sub> usado para el crecimiento mixotrófico de las microalgas (Xin et al., 2016).

También es importante resaltar que todos los componentes de las microalgas se pueden separar y transformar en diferentes productos con aplicaciones en la nutrición (animal y

humana), productos terapéuticos y cosméticos. Además, la producción de biocombustibles y bioproductos a partir de ácidos grasos de microalgas tienen varias ventajas en comparación con otros, tales como: alta productividad regional, competencia mínima con la agricultura convencional, beneficios ambientales al reciclar los nutrientes de las aguas residuales y capacidad para mitigar las emisiones de dióxido de carbono.



Figura 2 Ciclo de vida de un producto  
Fuente: (Agrelo, 2014)

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la tecnología utilizada para producir biocombustibles de manera eficiente aún no está establecida. Por esto, se deben estudiar y mejorar diferentes procesos biológicos y termoquímicos indistintamente de la viabilidad económica. Además, la alta versatilidad metabólica de las microalgas y las cianobacterias permite la producción de varios productos no combustibles, que tienen un valor muy alto y podrían desempeñar un papel importante en la mejora de los balances económicos y energéticos (Gouveia, 2014). Lo anterior puede ser adicionado a los beneficios ambientales que se evidencian en este documento.

## 1.2 Definición del problema

El manejo de los residuos se ha convertido en un reto importante en las empresas en aras de mitigar la contaminación ambiental. Actualmente, la empresa de levaduras Levapan S.A está generando alrededor de 2300 m<sup>3</sup> al día de residuos entre los que se encuentran la vinaza. Estos residuos son llevados a una planta de tratamiento de aguas residuales, donde se genera un subproducto (lodos de digestión anaerobia de vinazas), lo cual trae consigo afectaciones ambientales y altos costos por pago para su disposición.

Por esto, nace la importancia del cultivo de microalgas sobre estos lodos para la biosíntesis de aceites los cuales tendrán como uso la producción del biodiesel, combustible renovable y de combustión limpia. Este biocombustible se convierte entonces en una gran alternativa para mitigar la contaminación. Además, en este punto es importante saber que las microalgas se

pueden obtener de distintas formas para la producción de estos biocombustibles, y cada uno de estos procesos trae consigo afectaciones ambientales las cuales deben identificarse para el correcto análisis.

Por otro lado, la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas está lejos de representar una alternativa económicamente factible, sin embargo, omitiendo este aspecto, el uso de microalgas para la producción de biodiesel parece ser una buena alternativa para contribuir con el medio ambiente, debido a la capacidad de estas para acumular lípidos, reciclar los nutrientes de las aguas residuales y mitigar el dióxido de carbono.

### **1.3 Justificación**

El uso de ácidos grasos de microalgas para la producción de biodiesel se considera una buena alternativa, debido a la capacidad de estas para acumular lípidos. Sin embargo, actualmente no hay industrias dedicadas exclusivamente a la producción de biodiesel a partir de estos ácidos. Por el contrario, se encuentran industrias dedicadas a la producción de este biocombustible, pero a partir de otras fuentes tales como el aceite de palma. Por esto, esta forma alternativa de producción es importante para ampliar el espectro de los biocombustibles y determinar si es una buena alternativa para entrar en el mercado.

Por esto, nace la importancia de evaluar el impacto ambiental que tiene la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas usando lodos de digestión anaerobia de vinazas, que provienen a partir de los desechos de la producción de levadura de la empresa Levapan S.A. considerando que estos lodos se caracterizan por tener nutrientes necesarios para el rápido crecimiento de las algas, lo cual representa un elemento diferenciador ya que se parte de residuos industriales, generando por ende beneficios ambientales.

Por tanto, disponer de manera adecuada de estos residuos es un aporte importante, ya que para la empresa estos lodos además de un problema ambiental representan costos asociados al manejo y disposición de estos desechos. Pero para esto, es necesario realizar un análisis completo de la producción de biodiesel a partir de microalgas cultivadas usando estos lodos que garantizan la producción de la biomasa microalgal con alto contenido de ácidos grasos.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo del Proyecto**

Evaluar el impacto ambiental de la cadena productiva del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas que se dan a partir del proceso de biotransformación de lodos de digestión anaerobia provenientes de la planta de tratamiento de empresa Levapan S.A. apoyado en la metodología ACV (Análisis de Ciclo de Vida).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Definir la cadena productiva del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas provenientes del cultivo sobre lodos anaerobios para estimar la competitividad dentro del mercado por medio de indicadores.
- Analizar el ciclo de vida con todas sus etapas de transformación biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas haciendo uso de SimaPro para el análisis de ciclo de vida.
- Realizar un análisis comparativo del impacto ambiental de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos anaerobios respecto a otros procesos ya reportados en la literatura.

### **2.3 Entregables**

- Documento técnico con indicadores para especificar la competitividad del biodiesel estudiado.
- Análisis del impacto ambiental de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas.
- Comparativo del análisis de ciclo de vidas desarrollado con los estudios encontrados tradicionalmente en la literatura para el biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas.

### 3 Marco de Referencia

#### 3.1 Antecedentes o Estudios Previos

Hoy en día, el componente ambiental ha cogido más fuerza a nivel mundial, por lo que las compañías están enfocadas a buscar e implementar alternativas en busca de la sostenibilidad ambiental. Los combustibles fósiles por su parte, constituyen un gran impacto negativo para el medio ambiente, por esta razón en los últimos años se han encaminado una serie de proyectos e investigaciones enfocadas a la evaluación de los impactos ambientales en la producción de biocombustibles como el biodiesel, el cual ya se ha demostrado que al ser un combustible renovable y de combustión limpia mitiga la contaminación.

Elsevier el cual es uno de los mayores editoriales de literatura científica en el mundo, posee artículos relacionados con esta temática. (Passell et al., 2013) es un artículo que proporciona información relevante sobre cómo se realiza y se aborda un análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos en este caso de microalgas marinas. Para esto, se desarrolla de forma muy concreta un análisis comparativo de los impactos ambientales generados en un caso base donde la producción es a pequeña escala y un caso futuro donde la producción se da a gran escala, concluyendo finalmente que la alternativa más favorable es la producción a gran escala basado en siete categorías de impacto (Tabla 1).

Tabla 1 Categorías de impacto

<b>IMPACT CATEGORIES</b>
<b>GWP (Global Warming Potential)</b>
<b>NER (Net Energy Ratio, energy in/energy out)</b>
<b>PM (Particulate Matter Formation)</b>
<b>Water depletion</b>
<b>PCOP (Photochemical oxidation potential)</b>
<b>No<sub>x</sub> (Oxides of nitrogen)</b>
<b>So<sub>x</sub> (Oxides of sulfur)</b>

Fuente: (Passell et al., 2013)

De este editorial científico también se analizó el artículo de (Collet et al., 2014), en este se realiza igualmente la evaluación por medio del análisis de ciclo de vida. En este, se enfatiza que el balance energético es clave para hacer que el cultivo de microalgas sea ambientalmente sostenible, para reducir emisiones de gases del efecto, considerando que las microalgas constituyen unas de las fuentes potenciales de biocombustibles para el futuro. Sin embargo, en este artículo se menciona que el beneficio ambiental aún no está claro y muchas publicaciones científicas ofrecen resultados contradictorios a pesar de los múltiples beneficios que las microalgas ofrecen.

De igual forma, (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016) es un artículo en el cual se enfatiza el potencial como materia prima de las algas para la elaboración del biodiesel. En este, se hace referencia a coproductos que pueden ser usados para la elaboración de alimentos y químicos, lo cual es un beneficio adicional del uso de estos procesos para la elaboración de biocombustibles.

Por otro lado, (Campbell, Beer, & Batten, 2011) es también un artículo bastante interesante en el cual se realiza el análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel en Australia teniendo como principal categoría de impacto la combustión en camiones. Para poder determinar en el uso la reducción en la emisión de gases del efecto invernadero, todo esto asociado a una serie de consideraciones para evaluar la viabilidad económica.

En España y en países como Argentina y México, también se han desarrollado proyectos encaminados a la producción de biocombustibles a partir de microalgas, incluso en Chile científicos lograron resultados positivos después de desarrollar biodiesel a partir de microalgas para motores de alto cilindraje (Cambero, 2017). Algunos de los estudios que se han realizado en estos países de habla hispana no usan como metodología el análisis de ciclo de vida, sin embargo, todos parecen llegar a la misma conclusión y es el hecho de que las microalgas son una buena alternativa para la producción de biodiesel debido a que tiene algunas características importantes como la capacidad de crecimiento en suelos inadecuados para el crecimiento de otros vegetales (Zarini, 2011).

En Colombia, la unidad de planeación minero-energética (UPME) es consciente de que los biocombustibles como el biodiesel son de suma importancia para el avance en materia ambiental del país. Por esto, se han realizado diversos estudios para evaluar la situación actual del país en la producción de biocombustibles desde el 2003 año en el que incursiono Colombia en esta industria. En un estudio realizado por la UPME se resalta los beneficios que ofrece el biodiesel donde se resalta la reducción de emisiones contaminantes (Herrera Jaime, Leyva Rolon, Ortiz Ceron, Cardenas Valderrama, & Garzon Lozano, 2009).

De hecho, en el 2013 el gobierno colombiano con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo, contrato un estudio sobre la sostenibilidad de los biocombustibles en el país, en la realización de este proyecto participo el instituto Suizo Federal de Ciencias de Materiales, Ciencia y Tecnología, junto con demás expertos nacionales e internacionales, en este estudio se usó la metodología de análisis de ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales de algunos biocombustibles dentro de los cuales se encuentra el biodiesel. Evidenciando, que en comparación con sus equivalentes fósiles el biodiesel de palma tiene muy alto potencial de reducción de gases de efecto invernadero en particular de CO<sub>2</sub>, además de asegurar que para el cultivo de biocombustibles hay alrededor de un millón de hectáreas aptas y tres millones moderadamente aptas (Gauch, 2013).

Aparte de estos proyectos que se han hecho en general en Colombia, también se encuentran varios proyectos locales, por ejemplo, en ciudades como Bucaramanga y Cali se han realizado proyectos de análisis de ciclo de vida para la producción de biocombustibles como el bioetanol y el biodiesel a partir de bagazo de caña e higuierilla respectivamente. Estos análisis han permitido evaluar el impacto real de la producción de estos biocombustibles en Colombia, siendo una buena alternativa.

## **3.2 Marco Teórico**

Para el correcto desarrollo de este proyecto es importante tener claridad sobre una serie de conceptos los cuales serán abordados en esta sección.

### **3.2.1 Análisis de ciclo de vida**

“Desde la cuna hasta la tumba” “De la cuna a la cuna” son frases que hacen alusión al ciclo de vida de un producto el cual comprende todas las etapas desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto. El análisis de ciclo de vida se puede entender entonces como aquel proceso el cual permite identificar y evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad considerando las etapas en las que este se pueda encontrar.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta bastante útil, debido a que esta comprende el análisis completo de un sistema desde la extracción, procesamiento de la materia prima, producción, transporte, uso, reutilización, mantenimiento o disposición final, lo que permite que sea un análisis integrado y flexible ante posibles cambios. Esto es lo que la hace una herramienta diferente de otras medidas de evaluación ambiental las cuales se enfocan solamente en los impactos inmediatos.

La metodología de análisis de ciclo de vida se define entonces como el proceso que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía, para determinar el impacto ambiental, para poder así evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora. El análisis comprende la evaluación de todas las entradas y salidas energéticas, el cual tiene en cuenta la adquisición de materias primas, producción, uso, reúso y mantenimiento y la gestión de recursos para la obtención de emisiones atmosféricas, efluentes líquidos, residuos sólidos y otros vertidos.

Según la ISO (Organización Internacional para la Estandarización) el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto. El ACV proporciona entonces finalmente información relevante para la implementación de acciones correctivas para disminuir los impactos ambientales.

Hoy en día, el aspecto ambiental es de gran preocupación para todas las empresas, dado que se ha convertido en un tema el cual es analizado por los clientes quienes esperan gran compromiso por la conservación del medio ambiente, así como también la creciente presión regulatoria. Es por esto, que las empresas han optado por implementar en sus tareas, el componente ambiental y el desarrollo sostenible para mejorar la competitividad en el mercado, mediante la adopción de políticas y prácticas que mejoren o incrementen la sostenibilidad, sin embargo, el alto costo limita el acceso a aplicaciones o herramientas para el desarrollo de este componente en la empresa.

El análisis de ciclo de vida está compuesto por cuatro fases secuenciales e iterativas entre sí (Figura 3) las cuales se explican en los siguientes literales.



### a. Definición del objeto y alcance del estudio.

Durante esta etapa del proyecto se debe definir el objetivo y propósito del estudio, declarando así a donde se quiere llegar junto con el destinatario al cual se van a comunicar los resultados. Para la realización del ACV se deben definir, además, los sistemas a estudiar, los límites del sistema y la unidad funcional, las reglas de asignación y los requisitos de calidad y el método de evaluación.

La unidad funcional se define como la cantidad de producto o unidad de servicio que se estudia. Esta sirve de base para la comparación entre sistemas, y a partir de ella se cuantifican las entradas y salidas del sistema productivo.

### b. Análisis de inventario de ciclo de vida.

El análisis de inventario se define como un proceso de cuantificación de flujos de energía que entran y salen de una actividad durante su ciclo de vida. Se puede considerar que este es fundamentalmente un balance de materia y energía del sistema, en el cual se pueden incluir otros parámetros tales como la utilización de suelos, ruido, vibraciones, biodiversidad, entre otros aspectos (Herrera, Pérez, & Gamarra, 2016). El análisis de inventario entonces se convierte en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones ya que considera diversas estrategias para el manejo de residuos sólidos.

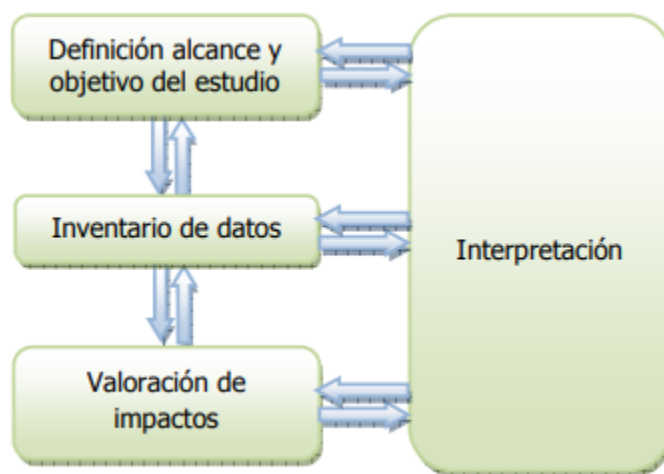


Figura 3 Fases del ACV de acuerdo con la ISO 14040  
Fuente: (Ramírez, Bayona, & Pabón, 2008)

### c. Evaluación de impactos de ciclo de vida

Durante esta etapa del análisis del ciclo de vida es de suma importancia evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales, que se pudieron identificar en la etapa previa. Para esto se deben considerar dos elementos obligatorios que abarcan el proceso de selección de categorías de impacto es decir los parámetros que van a ser objeto de estudio y los elementos optativos que son los relacionados con la normalización de los impactos.

#### d. Interpretación de ciclo de vida

Finalmente, en esta etapa se analizan todos los resultados de las etapas anteriores, así como los demás supuestos realizados a lo largo del estudio para una evaluación final, generando un informe con recomendaciones y conclusiones del proyecto.

Tabla 2 Metodología Análisis de Ciclo de Vida

Análisis de Ciclo de Vida	
Etapa	Objetivo
Problema	Comprender el problema a evaluar.
Objetivo y alcance del estudio	Determinar la Unidad Funcional y las fronteras del estudio de acuerdo con la descripción del proyecto.
Inventario	Recolección de datos de flujos de entrada y salida, definición de etapas del proyecto incluyendo fases como la distribución.
Evaluación de impactos	Definir el método a usar para un correcto análisis, considerando las configuraciones de cálculo para poder realizar comparaciones.
Interpretación	Documentar los resultados para poder analizar las fases del proceso que tuvieron mayor contribución.
Datos generales	Se incluyen referencias bibliográficas, unidades de conversión e imágenes utilizadas en el desarrollo del análisis.

Fuente: Autores

#### 3.2.2 Biodiesel

El biodiesel se define como un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales. Industrialmente se realiza mediante procesos de transesterificación y esterificación (Rincón educativo, 2016).

Dentro de las principales características del biodiesel se encuentra que es un combustible limpio, biodegradable, tiene alto índice de lubricidad por encima del diésel de poco azufre, en la (Tabla 3) se puede evidenciar una comparación fisicoquímica entre el biodiesel y el diésel. Es importante saber que el biodiesel se puede mezclar con el diésel elaborado a partir del petróleo en cualquier porcentaje, considerándose biodiesel B100 puro, y el B20 tiene por ejemplo 20% de biodiesel y 80% de diésel de petróleo, lo cual es bueno debido a que elimina el problema de combustión en climas fríos. A su vez, los motores y la infraestructura no requieren modificaciones para el uso de este biocombustible gracias a la similitud de las propiedades fisicoquímicas, siendo está una ventaja en la implementación de biodiesel, aunque en algunos casos estas propiedades para el biodiesel pueden cambiar según la materia prima de la cual se obtuvo.

El biodiesel, se puede obtener a partir de distintos procesos de producción dentro de los cuales se encuentran principalmente el uso directo y mezcla de aceites vegetales con gasoil, la microemulsión, el craqueo térmico (Pirólisis), y la transesterificación. Sin embargo, para efectos de este proyecto, el proceso de transesterificación es el más relevante.

Tabla 3 Comparación de las propiedades fisicoquímicas del diésel y biodiesel

	<b>Diésel</b>	<b>Biodiesel</b>
<b>Densidad a 15 °C (kg/m<sup>3</sup>)</b>	840	880
<b>Contenido en oxígeno (%m/m)</b>	0	11
<b>Contenido en parafinas (%m/m)</b>	67,8	0
<b>Contenido en azufre (mg/kg)</b>	<10	<1
<b>Poder calorífico (Mj/kg)</b>	43	38
<b>Emisiones de NO<sub>x</sub> frente al diésel</b>	-	10%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> (kg/Mj)</b>	0,08	0,06

Fuente: (Muriana, 2016)

La transesterificación consiste en una reacción química catalizada en la que intervienen el aceite vegetal y un alcohol para producir ésteres de alquilo de ácidos grasos (biodiesel) y glicerina. Para este proceso los alcoholes que se usan con más frecuencia son el metanol y etanol debido a sus propiedades y beneficios en cuanto a costos. Estas reacciones de transesterificación se pueden realizar por medio de la adición de diferentes tipos de catalizadores, homogéneos (alcalinos y ácidos) o heterogéneos (por enzimas) (Muriana, 2016).

Por otro lado, la cadena macro de los combustibles en Colombia, está enmarcada por las empresas explotadoras, las productoras y los distribuidores mayoristas y minoristas para llegar al cliente final. Por tanto, para la producción del biodiesel también se ha definido, un esquema general de la cadena de abastecimiento compuesto por tres niveles: agrícola, industrial y de servicios, incluyendo así entonces el entorno institucional, gremial y gubernamental.

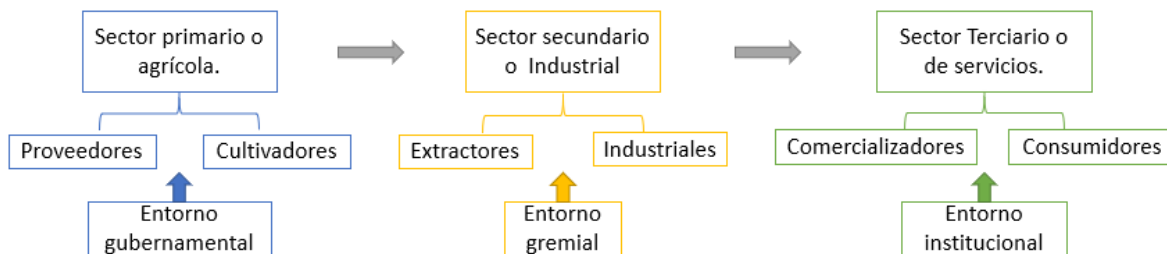


Figura 4 Esquema general de la cadena de biodiesel en Colombia

Fuente: (Lombana, Vega, Britton, & Herrera, 2015)

A partir de este esquema, es más fácil identificar entonces los agentes e instituciones que intervienen en la cadena de abastecimiento de los biocombustibles en Colombia. Los entes gubernamentales que regulan el sector de biocombustible en Colombia son el Ministerio de Minas y Energía, Comisión de regulación de energía y gas (CREG), Comisión internacional de biocombustibles. Estos entes están inmersos en el entorno gubernamental donde el gobierno Nacional promueve acciones para el desarrollo de la cadena productiva de los

biocombustibles brindando apoyo financiero por medio de Colciencias. Por otro lado, los gremios como Fedebiocombustibles y Fedepalma, entre otros, están orientados a desarrollar estrategias que incluyan proyectos de investigación encaminados a nuevas alternativas (Lombana et al., 2015).

En Colombia la producción de biodiesel se da mayoritariamente a partir del aceite de palma siendo así la cadena de abastecimiento más robusta de los biocombustibles en la (Figura 5) se muestra un esquema de esta cadena. Sin embargo, alrededor de esto se ha generado otra problemática relacionada con el uso de este aceite catalogado como comestible lo cual puede traer repercusiones futuras en el suministro de alimentos y en los costos de estos. Por esto, la búsqueda de materias primas no comestibles se han vuelto eje de investigación y desarrollo.

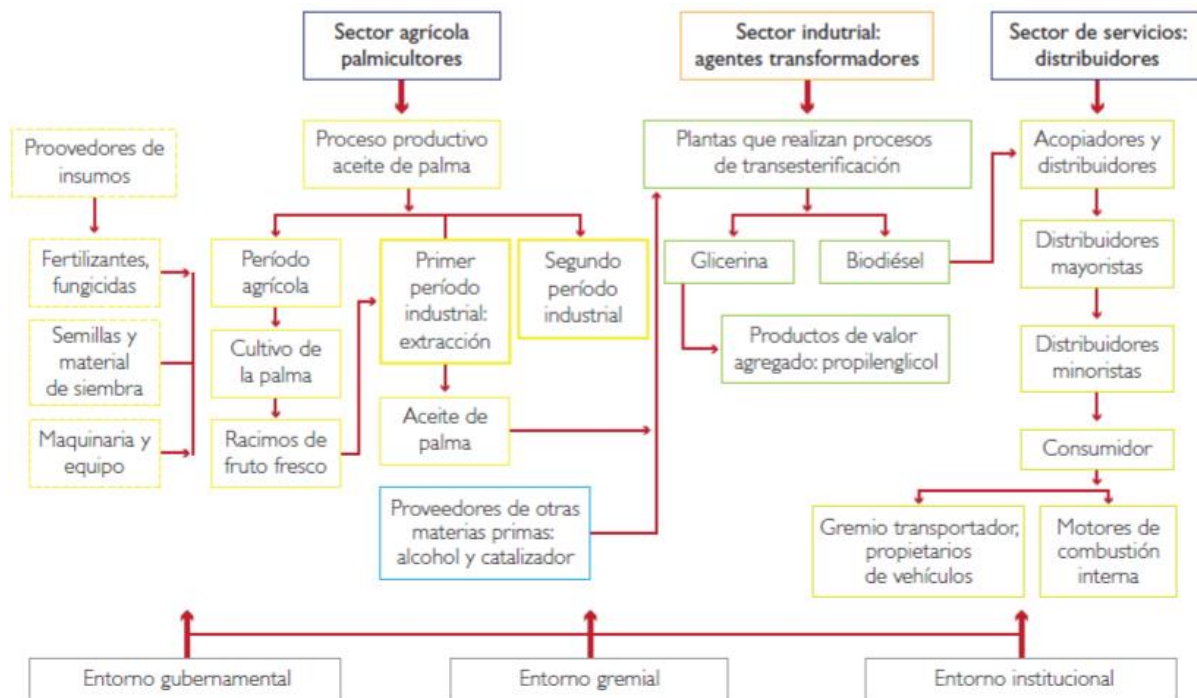


Figura 5 Cadena productiva del biodiesel de aceite de palma en Colombia  
Fuete:(Lombana et al., 2015)

Los biocombustibles se clasifican en función de la materia prima y el tipo de tecnología que se emplea en la producción. Se habla hoy en día de tres generaciones de biocombustibles. La primera generación hace referencia al biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales extraídos de los cultivos de palma. La segunda generación se refiere a los combustibles producidos a partir de fuentes como el aceite de higuera, y materiales lignocelulósicos como hojas y ramas secas de árboles. Finalmente, la tercera generación del biodiesel tiene como fuente principal las microalgas, la cual apunta a ser una materia prima efectiva cuyo aceite brinda un rendimiento 25 veces mayor que la obtenida a partir de fuentes oleaginosas, además de crecer en distintas condiciones ambientales y no requieren de grandes extensiones de tierra para su cultivo en caso de realizarse heterotróficamente. (Plaza, 2016)

En Colombia, hoy en día los combustibles más usados para el transporte son la gasolina, el diésel de petróleo (ACPM) y el gas natural. Teniendo a Ecopetrol como un proveedor

referencia, esta es una compañía que ha enfocado sus esfuerzos por entregar combustibles más limpios, logrando por ejemplo disminuir la cantidad de partículas por millón (ppm) de azufre para el diésel (Tellez, 2014). Por otro lado, el uso de biocombustibles en Colombia se está trabajando hoy en día con mezclas de etanol-gasolina y de biodiesel-diésel, lo cual trae consigo beneficios en materia ambiental (Tabla 4).

Tabla 4 Reducción de emisiones por vehículo por muestra

Tipo de emisiones	B100	B20	B2
<b>Hidrocarburos no quemados</b>	-67%	-20%	-2,20%
<b>Monóxido de carbono</b>	-48%	-12%	-1,30%
<b>Material particulado</b>	-47%	-12%	1,3%
<b>Óxidos de nitrógeno</b>	10%	2%	2%

Fuente: (Fedebiocombustibles, n.d.)

En Colombia, normalmente está mezcla varía entre el 7% y el 10% de biodiesel presente en la mezcla y el restante formado por diésel de petróleo. Es decir, las mezclas que se encuentran mayormente en el país son de B7 a B10. Esto, a pesar de los esfuerzos que ha adelantado el gobierno para lograr mejores mezclas, invirtiendo en plantas de biodiesel ubicadas principalmente en la costa caribe, Barrancabermeja y en el Meta, lo cual no ha sido suficiente debido a que la capacidad instalada de las plantas productoras de biodiesel B100 no es suficiente para cumplir la demanda y satisfacer el consumo. En la (Figura 6), se muestra la producción de galones de biodiesel para el segundo trimestre de 2017, según el ministerio de minas y energía, este proviene principalmente del aceite de palma.

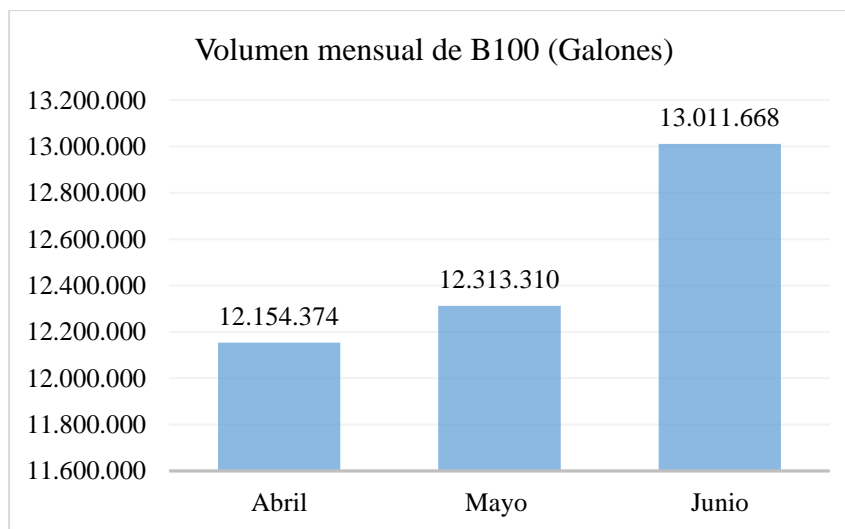


Figura 6 Despachos de galones de biodiesel B100 durante el segundo trimestre de 2017

Fuente: (Energía, 2017)

Finalmente, la distribución desde las plantas productoras de biodiesel en Colombia se puede hacer de forma pura B100, por carro tanque hasta las estaciones de los distribuidores mayoristas donde se hacen las mezclas con el diésel de petróleo autorizadas por el Ministerio de Minas y Energía, para posteriormente ser distribuidas en las estaciones de servicio a nivel nacional, para el consumo final ya sea en vehículos de carga, buses, carros, entre otros.

### 3.2.3 Microalgas

Las microalgas, son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos capaces de transformar la energía luminosa en energía química con una eficiencia cuatro veces superior a la de las plantas, son a su vez productores primarios de la cadena trófica siendo formadoras de materia orgánica (G. A. Ruiz, 2016).

Existen varias especies de microalgas las cuales poseen diferentes características. Por esta razón, las condiciones óptimas de luminosidad, temperatura, salinidad y pH para el crecimiento de estas microalgas varían dependiendo de la especie.

El desarrollo y comprensión de este concepto es de gran importancia en el proyecto, debido a que las microalgas que se consideran en este estudio son provenientes de lodos de digestión anaerobia, los cuales como su nombre lo indican carecen de oxígeno. Por esta razón es importante saber que algunos géneros de microalgas como *Chlorella*, son potencialmente adecuadas para estos casos debido a su alta tasa de crecimiento y la elevada tolerancia a la variación estacional (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Por otro lado, es importante resaltar que es posible utilizar el centro de la digestión anaeróbica como la única fuente de nutrientes para la producción de microalgas, lo cual es muy relevante para este proyecto en el cual las microalgas se desarrollan a partir de los lodos de digestión anaeróbica de vinazas provenientes de Levapan S.A.

### 3.3 Contribución intelectual o impacto del proyecto

Actualmente, existen una serie de estudios encaminados a analizar el impacto ambiental de la producción de biodiesel a partir de distintos aceites ya sea vegetal o animal. Sin embargo, la información se reduce cuando se indaga sobre la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas, pero aun así es posible encontrar artículos y proyectos que abordan esta problemática por medio del análisis de ciclo de vida para determinar el impacto ambiental de estos procesos, que en la mayoría de los casos se han realizado en otros países ajenos a Colombia.

En Colombia, hay proyectos encaminados de igual manera al análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental de la producción de biocombustibles, pero hasta el momento no se han encontrado proyectos que estudien el análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas a partir de lodos de digestión anaerobia provenientes de una planta de tratamiento, siendo este un aporte significativo de este proyecto.

Estos lodos de digestión anaerobia, los cuales pueden ser la única fuente de nutrientes para la producción de microalgas, son provenientes de la planta de tratamiento de Levapan S.A. En este sentido, este proyecto también es relevante para esta empresa, debido a que se están buscando alternativas para el manejo de sus residuos que permitan reducción de costos por disposición de residuos. Además, el hecho de usarlos como materia prima para la realización de otro producto es la mejor forma de lograr este objetivo convirtiéndose en una oportunidad de mejora para esta compañía.

## 4 Metodología

El análisis comenzó con el establecimiento de la cadena productiva del biodiesel en Colombia, la identificación de las características del biodiesel y el establecimiento de los indicadores de rendimiento, que constituyen la base para evaluar la calidad de este biocombustible respecto a otros combustibles, evidenciando así, si es competitivo en el mercado.

A su vez, se realizó el análisis del impacto ambiental de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas utilizando la herramienta SimaPro RM, teniendo en cuenta que este método es el procedimiento recomendado por la norma ISO 14040 para obtener los datos relacionados con la energía total del sistema. Esta herramienta, permite realizar estudios de huella de carbono, huella hídrica, declaración ambiental del producto, eco-diseño, etc. Incorporando bases de datos importantes, que facilitan el análisis y representación gráfica de ciclos de vida, de manera sistemática y transparente.

Para el análisis de ciclo de vida se definió cada una de las etapas de la siguiente forma:

### 1. Objetivo y alcance de la metodología

El objetivo es analizar el impacto ambiental de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas usando lodos de digestión anaerobia, por medio de SimaPro. Considerando todo el proceso, desde la obtención de lodos hasta la combustión de biodiesel. Con este análisis, se identificó la etapa del ciclo de vida que genera mayor impacto ambiental en el producto.

La principal motivación para el desarrollo de este estudio se basó en realizar un análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de una materia prima que no es muy convencional, pero que tiene un gran potencial, esto encaminado a la tendencia de encontrar combustibles alternativos que sean cada vez más limpias y amigables con el medio ambiente. El desarrollo de este análisis comprende todas las etapas del proceso de producción hasta el fin de vida del biodiesel, siendo este un estudio de la puerta a la tumba (Gate to Grave) el cual comprende las etapas cultivo de microalgas, la cosecha y deshidratación de las microalgas, el proceso de extracción de ácidos grasos, la refinación, transesterificación y distribución final del biodiesel.

En este punto es importante considerar que las entradas y salidas consideradas deben encaminarse a una unidad funcional que sea comparable. Para este estudio, la unidad funcional será “Cantidad de biodiesel producido a partir de 100 kilogramos de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos de digestión anaerobia”.

### 2. Inventario de ciclo de vida

Para realizar el análisis de ciclo de vida del biodiesel objeto de estudio, se consideraron cada una de las etapas considerando desde la etapa del cultivo hasta la distribución del biodiesel, considerando que los procesos de refinación y transesterificación se obtuvieron de fuentes bibliográficas. En el (Anexo 1), se muestra la matriz MED, donde se especifica la información de los materiales y la energía necesaria en cada etapa del proceso, las cuales se analizaron en SimaPro.

Estas entradas y salidas de materia y energía, se asocian a ciertas cantidades las cuales provienen de un proceso de laboratorio el cual fue escalado a nivel industrial haciendo uso del programa SuperPro Designer, donde se creó el diagrama del (Anexo 2). Las cantidades en la etapa de refinación, transesterificación y distribución son provenientes de fuentes bibliográficas tales como el artículo de (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016), donde la etapa de inventario está completa. Esta información, permite dar una buena aproximación de análisis para comprender así todas las etapas en la evaluación de impactos del ciclo de vida, lo anterior debido a que el proceso actual solo se está desarrollando hasta la extracción de ácidos grasos.

Para poder realizar el montaje a SimaPro, fue necesario crear primero los procesos, cargándole una serie de insumos y de salidas las cuales en ocasiones pasan como materia prima para el otro proceso o simplemente salen del sistema. Además, fue necesario crear la composición de los lodos y otros elementos. En cuanto a la etapa de distribución se consideró que el proceso escalado a nivel industrial se realiza en Levapan S.A. ubicada en Tuluá, la cual tiene una distancia aproximada a la universidad Icesi en la ciudad de Cali de 103 kilómetros. Además, se considerará que el biodiesel será transportado en un camión cisterna de 10.000 litros. Finalmente, el uso del biodiesel será en un vehículo de pasajeros convencional. Una vez creado todo esto, se agruparon en el análisis de ciclo de vida del biodiesel para obtener los impactos generados en cada etapa.

### **3. Evaluación de impactos**

Para realizar la evaluación del impacto se escogió en primer lugar el eco-indicador ReCiPe ya que este engloba 18 categorías de impacto en la cuales se encuentran categorías tales como el potencial de calentamiento global, la formación de material particulado, el agotamiento del agua, entre otras, las cuales son de relevancia en el proceso de producción del biodiesel. Además, con ReCiPe también se puede simplificar el análisis evaluando los daños en la salud humana, los ecosistemas y la escasez de recursos (endpoints). De igual forma, se trabajó con el IPCC (Panel intergubernamental del cambio climático), el cual comprende las emisiones de dióxido de carbono que impactan directamente sobre el efecto invernadero. A su vez, se analizó el Cumulative Energy Demand, relacionado directamente con los consumos energéticos. Varios artículos encaminados al análisis de ciclo de vida del biodiesel trabajaron con estos eco-indicadores siendo base para la comparación.

Finalmente, se realizó la interpretación de los resultados y se comparó el impacto de la producción de biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas empleando lodos anaerobios, con los siguientes artículos reportados en la literatura: (Passell et al., 2013), (Collet et al., 2014), (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016). La información obtenida de estos artículos también se cargó en SimaPro para tener así la misma base de comparación sobre las mismas categorías de impacto definidas por el eco-indicador ReCiPe.



## 5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los objetivos del proyecto.

### 5.1 Cadena productiva del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas e indicadores de competitividad

El proceso de obtención de biodiesel se está desarrollando actualmente de forma heterotrófica, es decir teniendo aire como insumo, esto a escala de laboratorio, llegando a la etapa de la extracción de ácidos grasos los cuales son el insumo principal del biodiesel. Por esto, como se había mencionado este proceso se escaló a nivel industrial con ayuda del programa SuperPro Designer para lograr realizar un análisis acertado. En la (Figura 7), se muestra las unidades macro de procesamiento que se consideraron para escalar el proceso, esta se encuentra ampliada en el (Anexo 2).

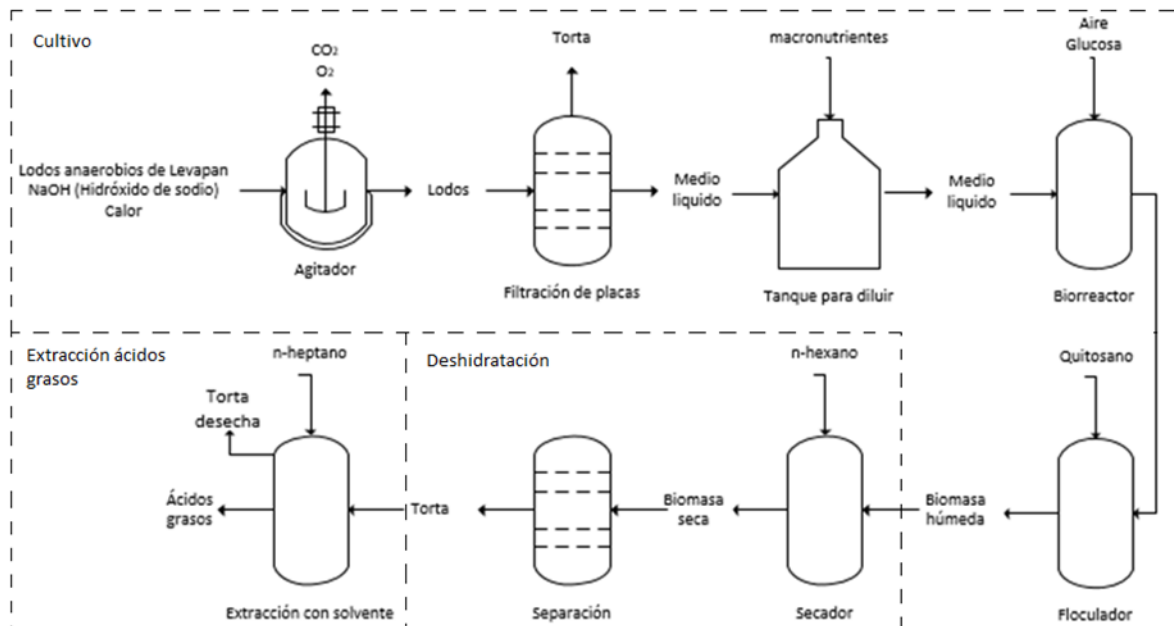


Figura 7 Unidades de proceso de elaboración de ácidos grasos

Fuente: Creación propia

En la (Figura 8), se ilustra el diagrama de flujo donde se especifica la forma en la que actualmente se está realizando el proceso de producción de ácidos grasos para la elaboración de biodiesel a partir de microalgas cultivadas usando lodos de digestión anaerobia provenientes de la industria de levaduras de Levapan S.A.

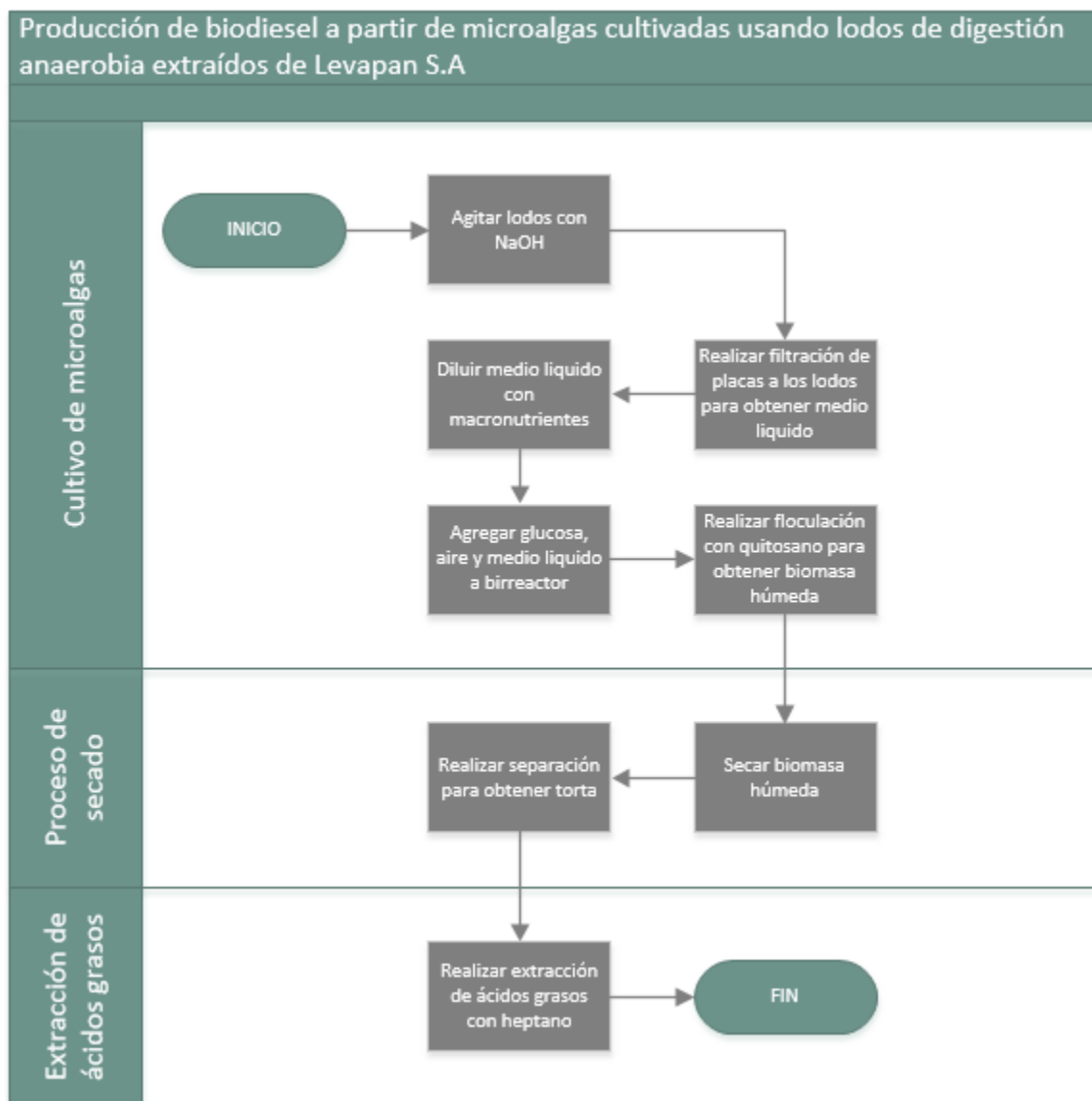


Figura 8 Proceso de extracción de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos de digestión anaerobia  
Fuente: Creación propia

A partir de este proceso y considerando el proceso de refinación y transesterificación, necesarios para la elaboración final del biodiesel, se definió la cadena de productiva del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas por medio de digestión anaerobia (Figura 9). Esta cadena, contempla todas las unidades de proceso que se deben llevar a cabo para la elaboración del biodiesel. Esto teniendo como principal proveedor de insumos de lodos de digestión anaerobia a Levapan S.A. En caso de que el cultivo de las microalgas se hiciera de manera autotrófica las únicas modificaciones del diagrama serían en los insumos el dióxido de carbono el cual requiere de luz como fuente de energía.

Del proceso de elaboración del biodiesel, sale un co-producto el cual es la glicerina la cual es materia prima del propilenglicol siendo este un compuesto orgánico capaz de absorber, exhalar y conservar la humedad, pero que actualmente no se fabrica en Colombia. Normalmente este producto se usa para productos alimenticios, cosméticos o farmacéuticos.

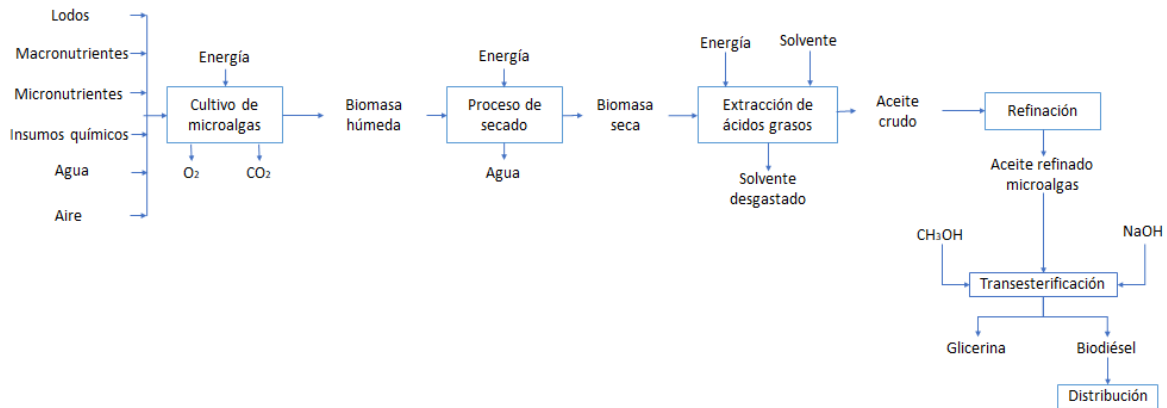


Figura 9 Cadena productiva del biodiésel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos anaerobios

Para el análisis de la cadena, donde se considera que el proceso se desarrollaría en Levapan S.A se debe considerar que el cultivo de este proceso se desarrolla en un biorreactor el cual tiene una dimensión de 8 metros de diámetro por 24 metros de altura, teniendo un volumen aproximado de 1200 m<sup>3</sup> y una ocupación de terreno plano de 64 m<sup>2</sup>. Además, dentro de los principales insumos para la elaboración del biodiésel se tendrían que los lodos, insumo principal para el cultivo de las microalgas, no requieren un transporte debido a que estos se generan en el mismo lugar donde se realizaría el proceso de elaboración del biodiésel. Mientras que la glucosa, la cual se le suministra al proceso a razón de 300 kg/día se consigue en puntos relativamente cercanos a Levapan S.A. ya que la glucosa proviene del tratamiento de la caña de azúcar. Por su parte, el hexano que circula por toda la fase productiva del producto es en mayor medida hexano que se recircula (596,40 kg) y sólo se añaden 3,6 kg de este para completar el balance energético. Por esta razón, los costos logísticos se verán representados por la compra de la glucosa y la inversión inicial en adquisición del hexano y quitosano (2 kg). Además de los costos generados por el traslado de la planta en Tuluá hasta la ciudad de Cali.

En cuanto a nivel de servicios, la planta estará en capacidad de inicialmente producir 100,18 kg de aceite por día, sin embargo, este número podrá aumentar conforme se mejoren los procesos y se otorgue una mayor cantidad de lodos al proceso ya que la capacidad del biorreactor lo permite. Además, a diferencia de métodos de extracción de aceite como el algodón, colza, girasol, entre otros, el proceso tal como se está desarrollando requiere un cultivo en tierra.

En el modelo escalado en el (Anexo 2) se procesan 1000 kg de lodos al día, los cuales son la fuente principal en la transformación de energía para la producción de biodiésel. A este se le hace un tratamiento de aguas residuales en una solución química con 5 kg NaOH. De este proceso se obtienen 976,71 kg de lodo cargado con los nutrientes necesarios para el crecimiento y propagación de las microalgas y 28,29 kg de torta lisado (residuos) que sale del sistema. Estos lodos son el insumo principal del biorreactor que tiene una capacidad de 665 litros, de aquí salen 1169,98 kg de biomasa para el proceso de floculado y de este se obtienen 692,81 kg de biomasa húmeda. Luego, esta biomasa húmeda pasa por una centrifuga hasta que se obtienen 310,06 kg de biomasa compuesta por 132,04 kg de biomasa seca y

178,02 kg de otros componentes. A partir de esto, se obtienen finalmente 100 kg de ácidos grasos.

A partir de la biomasa obtenida después del proceso de centrifugado, se calcula el rendimiento industrial de la extracción de aceite ya que se conoce la cantidad de biomasa que se obtiene de este proceso y la cantidad final de ácidos grasos que se obtiene. Es decir, se conoce la cantidad de biomasa centrifugada (aún queda con agua) y se conoce la cantidad de ácidos grasos obtenidos en el proceso, por tanto, por medio de la razón entre la cantidad de ácidos obtenidos (100,18 kg) y la biomasa centrifugada (310,06 kg) se obtiene un rendimiento en la extracción de aceite de 32,30%, estando así por encima del rendimiento del aceite obtenido del algodón y la colza (Tabla 5). Esto es positivo ya que indica un mayor aprovechamiento de recursos. Sin embargo, este proceso no está aprovechando todas las propiedades que ofrecen la microalgas, ya que después del proceso de centrifugado está saliendo una concentración de solo el 42,58% de biomasa seca. De este modo, si se logra aumentar esta concentración, se podría llegar a obtener un rendimiento en la extracción de aceites hasta del 75,75 %.

Tabla 5 Rendimiento industrial de la extracción de aceite.

Cultivo	Microalgas Levapan	Algodón	Colza	Girasol	Soya
<b>Rendimiento [%]</b>	32,30%	15,00%	40,00%	41,50%	18,00%

Fuente: (Iermanó & Sarandón, 2007)

## 5.2 Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel.

Para realizar el correcto análisis se consideró la información obtenida por medio de SuperPro Designer (Anexo 2), con lo anterior la información obtenida se cargó en SimaPro. Sin embargo, el proceso modelado solo llega hasta la extracción de ácidos grasos, por esto, para realizar el análisis completo del ciclo de vida, fue necesario recurrir a información de los otros artículos que se han trabajado para determinar las cantidades en la etapa de refinación, transesterificación y distribución, de este modo se construyó la matriz del (Anexo 1).

Con la información cargada en el programa, se procedió a realizar el análisis de los impactos ambientales generados por cada una de las etapas que comprende la fabricación y transporte del biodiesel (cultivo, cosecha, extracción ácidos grasos, refinación, transesterificación y distribución). En la (Figura 10) se puede observar los resultados obtenidos a partir del análisis.

Del análisis, se puede observar que la etapa la cual está causando mayor afectación al medio ambiente es la extracción de ácidos grasos, generando afectación principalmente en la toxicidad humana la cual contabiliza la presencia, exposición y los efectos generados por el uso de químicos. La toxicidad humana se ve afectada en alrededor de 60.331 mPt, seguido por el cambio climático en la salud humana con 3.134 mPt, lo cual aumenta el potencial de calentamiento global. La otra etapa que tiene un alto impacto es la etapa de cultivo, afectando de igual forma categorías como la toxicidad humana y el cambio climático en 24.7 mPt y 12.5 mPt respectivamente. De igual forma, la etapa de refinación presenta un impacto considerable en dichas categorías. De este modo, se tiene que todo el ciclo de vida del biodiesel tiene un impacto negativo sobre la toxicidad humana en alrededor de 120.39 mPt y

sobre el cambio climático en alrededor de 22.67 mPt. La información de los impactos se encuentra ampliada en el (Anexo 3).

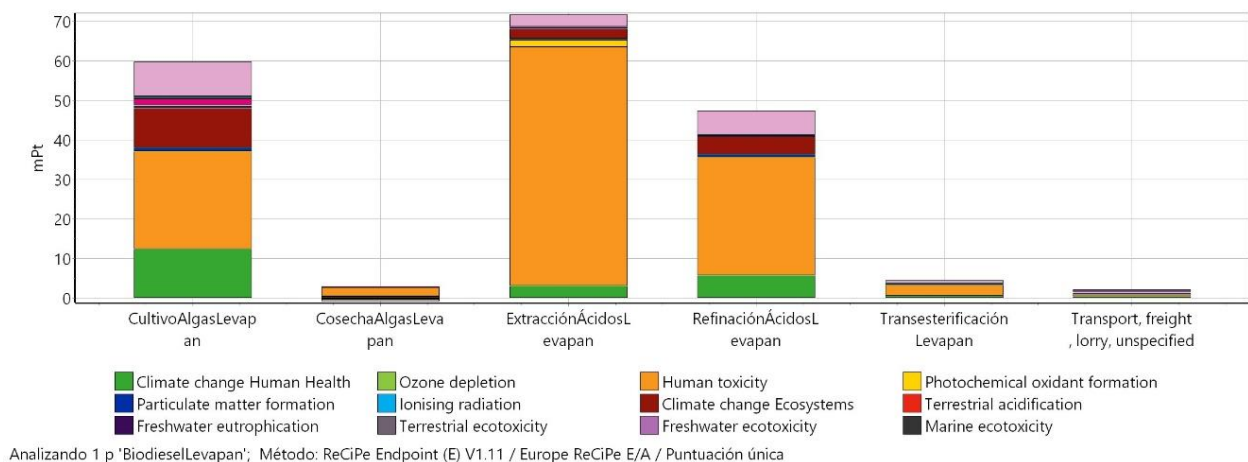


Figura 10 Impactos de punto medio causados por cada etapa de fabricación  
Fuente: SimaPro

Por otro lado, siguiendo los resultados mediante el diagrama de Sankey se tiene que la afectación en las etapas más críticas, están representadas por el consumo energético (Anexo 4). En el diagrama el uso de lodos de digestión anaerobia, se ven afectados principalmente debido a la ceniza, el carbono presente en estos lodos, sin embargo, esto se compensa ya que en este caso estos están siendo aprovechados como insumo del proceso, reduciendo estos impactos que se reflejan en la torta de lisado.

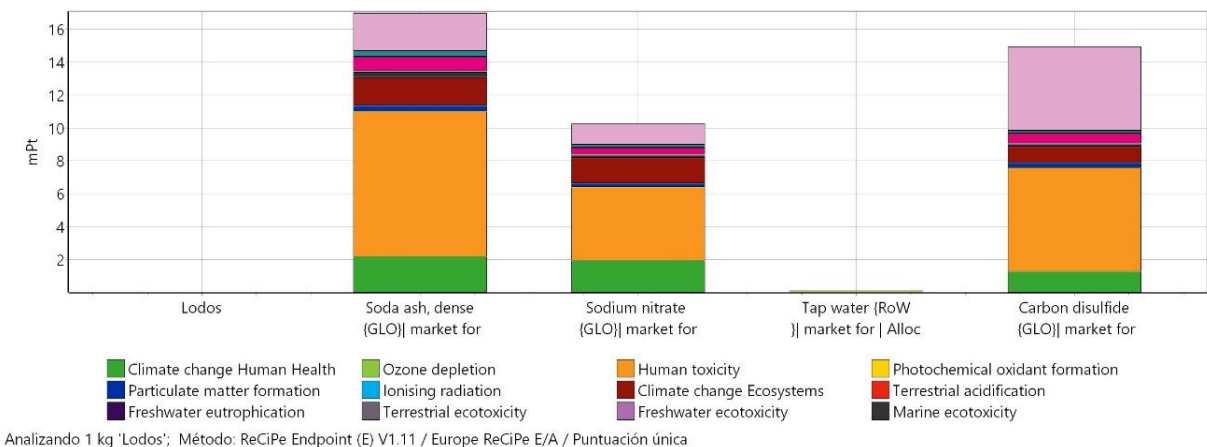
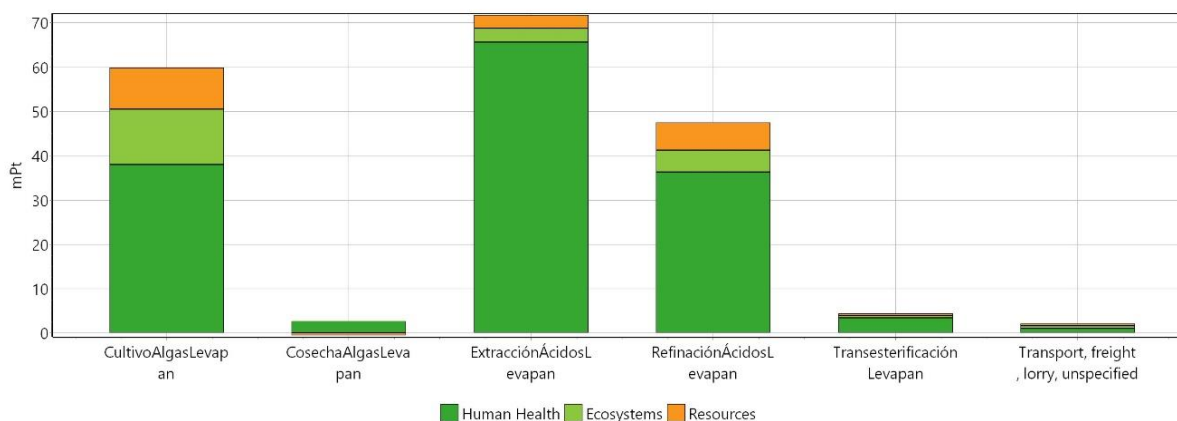


Figura 11 Análisis del impacto ambiental de la composición de lodos  
Fuente: SimaPro

En cuanto a las categorías de impacto de punto final o endpoints, para la evaluación del daño, la etapa de extracción de ácidos grasos está generando un mayor impacto que las demás categorías, ocasionando afectaciones principalmente en la salud humana en alrededor de 36.331 mPt (Figura 12). La salud humana, está representada por DALY's (Años de vida

ajustados por discapacidad), es decir el número de años de vida perdidos por alguna enfermedad. En cuanto al uso de recursos y la afectación al ecosistema, la etapa de cultivo es la que está representando una mayor afectación en alrededor 9.33 mPt y 12.5 mPt respectivamente. Las afectaciones al ecosistema se ven reflejadas en la reducción del número de especies por año, y la afectación en los recursos se ve reflejada directamente en temas económicos, debido a que esta se asocia directamente con el agotamiento de metales y recursos fósiles. La etapa de refinación, está generando igualmente afectaciones en la evaluación del daño a estas categorías de impacto. De este modo, analizando el ciclo de vida en general, la principal afectación se da sobre la salud humana en alrededor de 147 mPt. La información de los impactos se encuentra ampliada en el (Anexo 5).



Analizando 1 p 'BiodieselLevapan'; Método: ReCiPe Endpoint (E) V1.11 / Europe ReCiPe E/A / Puntuación única

Figura 12 Impactos de punto final causados por cada etapa de fabricación  
Fuente: SimaPro

Por otro lado, también se realizó el análisis por medio del eco-indicador IPCC (Panel Internacional del Cambio Climático) (Figura 13), a partir de este se determinó que el proceso de fabricación del biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas usando lodos de digestión anaerobia está generando una emisión de 0,774 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes. La etapa que está generando una mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera es la etapa de cultivo la cual genera 0,413 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes, esto debido al uso de los lodos los cuales contienen una gran cantidad de ceniza, nitrato de sodio y carbono orgánico que genera afectaciones en cuanto al cambio climático. La etapa de refinación de ácidos grasos genera una emisión de 0.208 kg de CO<sub>2</sub> siendo así la segunda etapa que mayor emisión de gases está generando debido principalmente al consumo energético que demanda esta etapa.

Finalmente, en cuanto al consumo energético, la etapa que más está generando una afectación es la etapa de cultivo debido al uso de energía no renovable generando un consumo de 4,31 MJ de los 9,53 MJ que consume todo el proceso. De igual forma, en la (Figura 14) se puede observar que la gráfica de la etapa de la cosecha está por debajo de cero, esto quiere decir que no se está generando un impacto negativo en el medio ambiente por el contrario se está generando un beneficio en materia ambiental. En el (Anexo 6) se encuentran las cantidades de forma específica.

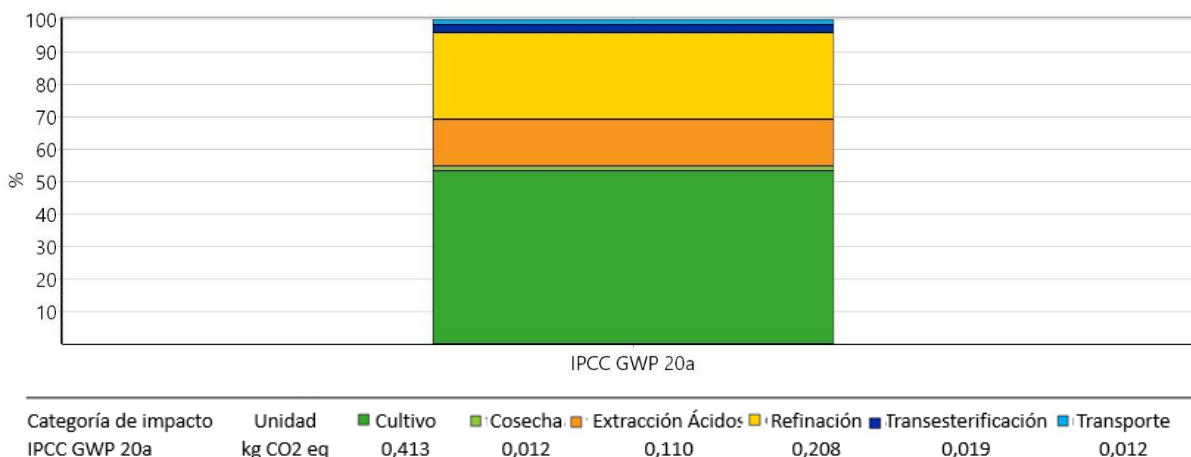


Figura 13 Impactos evaluados con el eco-indicador IPCC  
Fuente: SimaPro

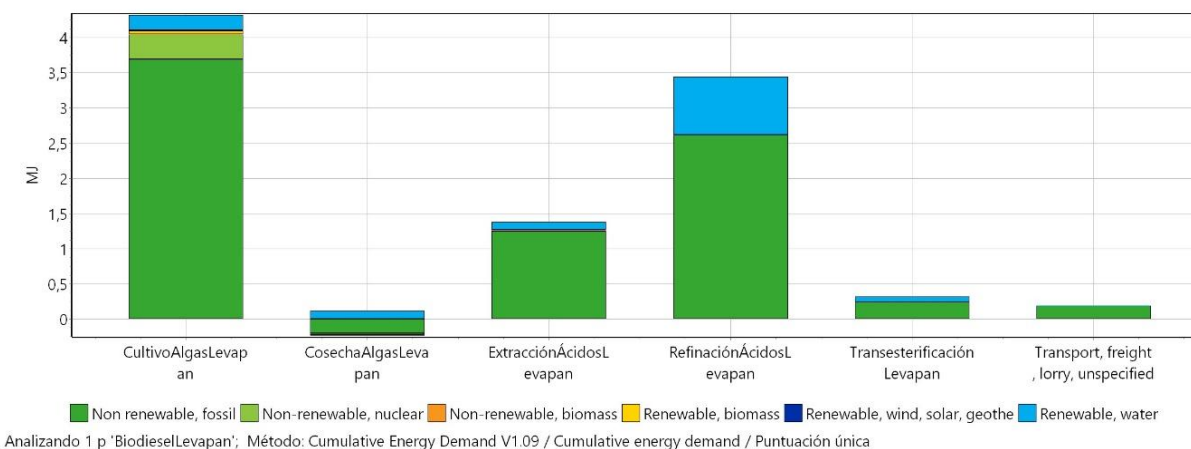


Figura 14 Demanda de energía acumulada  
Fuente: SimaPro

De este modo, con los resultados obtenidos mediante el uso de SimaPro, se evidencia que el proceso que se está desarrollando actualmente tiene muy poca afectación sobre el medio ambiente. Debido a que los insumos los cuales demanda no generan afectaciones considerables como la formación de material particulado y agotamiento de la capa de ozono. Los impactos en este caso se dan en su mayor parte debido al uso de sustancias químicas y al consumo energético.

### 5.3 Análisis comparativo

Para el análisis comparativo del biodiesel a partir de microalgas cultivadas en lodos anaerobios, con otros ya reportados en la literatura con respecto a biodiesel generado a partir de aceite proveniente de microalgas, se tuvo en cuenta la productividad del proceso de cultivo, cosecha diaria y el rendimiento en la extracción de aceite dada por la relación entre los kilogramos de aceites y los kilogramos de biomasa seca. Los datos para el análisis se

encuentran registrados en la (Tabla 6). Se tiene que el proceso de obtención de ácidos grasos del caso objeto de estudio, registra una productividad de 83,04 g/m<sup>2</sup>/día, la cual se calculó con la razón entre la cantidad de ácidos que se producen al día (100.180 g) y la capacidad volumétrica del biorreactor (1.206,37 m<sup>3</sup>). Esta productividad está por encima de la productividad reportada por día de los diferentes artículos que oscilan entre 20 – 30 g/m<sup>2</sup>/día.

Para el cálculo del rendimiento en la extracción de aceites se relacionaron los kilogramos de aceites producidos entre los kilogramos de biomasa seca. Para el proceso actual se genera 132,04 kg de biomasa seca al día, a partir de esto se puede calcular igualmente la productividad que está dada por (132.040 g) que se producen al día sobre la capacidad volumétrica del biorreactor (1.206,37 m<sup>3</sup>), equivalente a 109,45 gramos de biomasa seca al día por metro cuadrado. De este modo el rendimiento industrial se puede obtener con la razón entre ambas productividades o la razón entre los kilogramos de aceite al día (100,18 kg) sobre los kilogramos de biomasa seca (132,04 kg) obteniendo así un rendimiento del 75,87% el cual es comparable con el rendimiento arrojado por el artículo de (Passell et al., 2013) en su proceso que usa energías limpias en el cultivo logrando obtener una productividad de 50 g/m<sup>2</sup>/día.

Tabla 6 Indicadores de productividad y rendimiento en la extracción de aceite

<b>Fuente</b>	<b>Caso</b>	<b>Productividad (g/m<sup>2</sup>/día)</b>	<b>Rendimiento de aceite (kg aceite/kg biomasa seca)</b>
(Passell et al., 2013)	Producto comercial	3	0,25
	Mejora realizada en la electricidad	25	0,5
	Usando energías limpias	50	0,75
(Collet et al., 2014)	Caso de laboratorio	5	0,27
	Caso de laboratorio ampliado	10	0,33
	Nominal	20	0,44
	Mejora en la energía	25	0,5
	Mejoras tecnológicas	40	0,65
Levapan S.A.	Escenario estudiado	83,04	0,76

A partir de la tabla anterior, se obtuvo la (Figura 15) en la cual se da una relación lineal entre la productividad y el rendimiento del aceite. Según (Passell et al., 2013) , cuando la productividad es baja se obtiene un rendimiento menor, tal como se ve en la figura, es decir cuando la productividad aumenta el rendimiento también lo hace, sin embargo, en el caso de Levapan, ya que para lograr un buen rendimiento se requiere de tener una gran productividad. Por otro lado, en cuanto a la parte ambiental, al aumentar la productividad se tienen mejoras en pro del medio ambiente. Según Collet , para pasar de una productividad de 5 a 10 g/m<sup>2</sup>/día



tiene una reducción del 15% de emisiones de gases de efecto invernadero y es consecuente cuando se observa una reducción del 35% de emisiones para el paso de 5 a 40 g/m<sup>2</sup>/día.

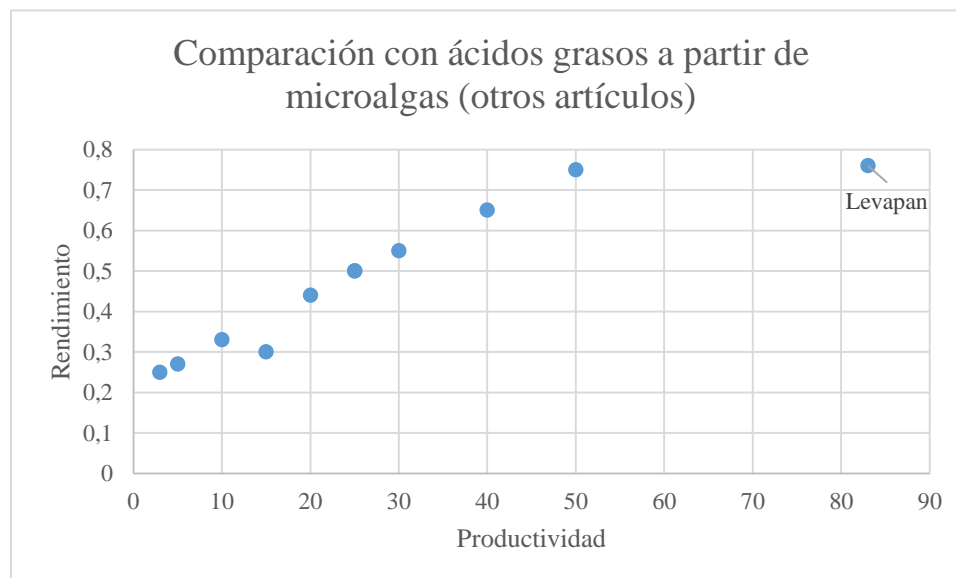
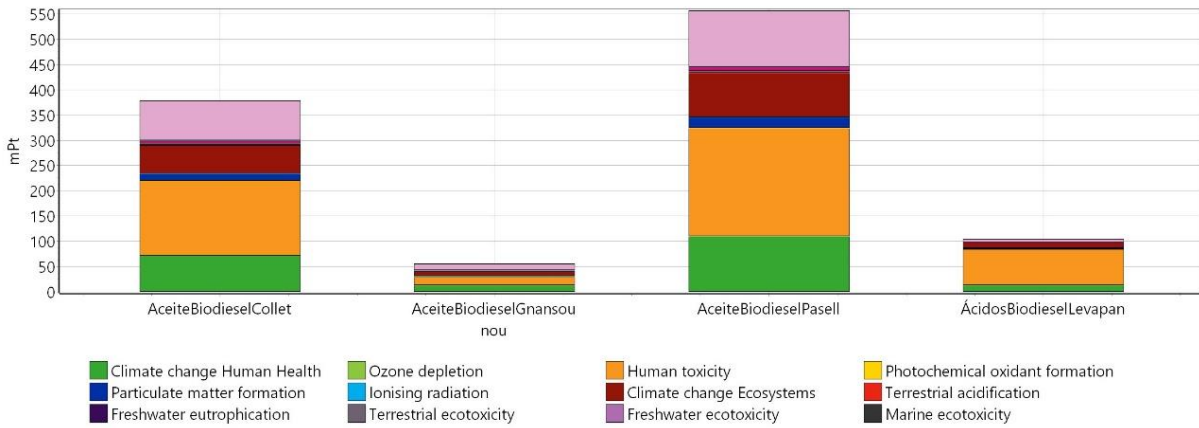


Figura 15 Comparación con ácidos grasos a partir de microalgas (otros artículos)  
Fuente: Creado a partir de la (Tabla 6)

Por otro lado, se realizó la comparación de los impactos ambientales del proceso que se está desarrollando contra otros procesos reportados en la literatura basados igualmente en la extracción de aceites a partir de microalgas. Para esto, fue necesario realizar el montaje de las tablas de inventario que se encuentran en el (Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9) en SimaPro, para tener así la misma base de comparación.

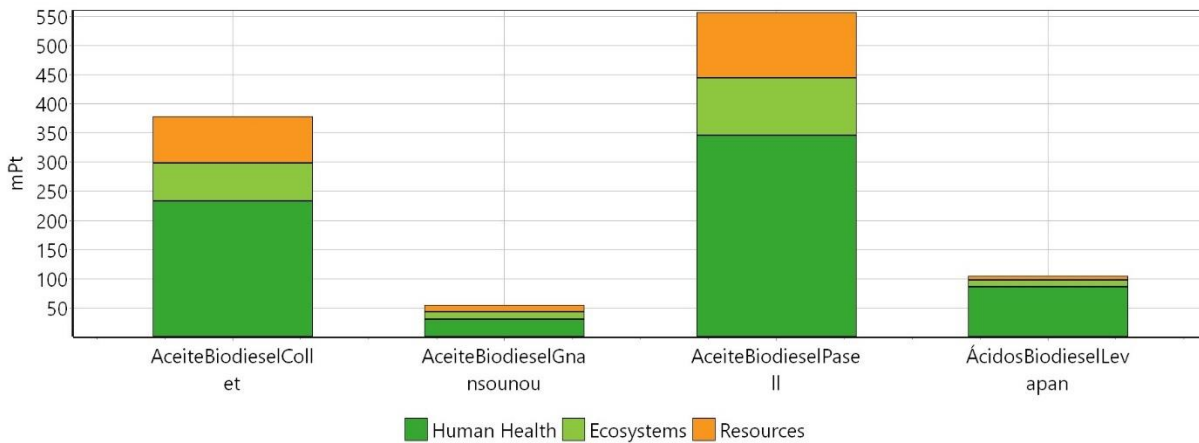
Por medio del eco-indicador ReCiPe, evaluando las categorías de impacto generales de punto medio (Figura 16). A partir de esto, se tiene que los ácidos grasos obtenidos a partir de microalgas cultivadas usando lodos de digestión anaerobia tiene un impacto relativamente bajo comparado con el análisis de (Passell et al., 2013) y (Collet et al., 2014). Los cuales tienen impactos negativos en categorías como la toxicidad humana y el cambio climático, debido al uso de energía eléctrica que se da en estos artículos. La energía considerada en estos artículos es proveniente de Estados Unidos, la cual genera un mayor impacto debido a que esta energía proviene de fuentes fósiles no renovables, lo cual genera una mayor contribución sobre las categorías de impacto. Por otro lado, el artículo de (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016), presenta un impacto un poco menor que el biodiesel objeto de estudio, el impacto generado en este artículo se da principalmente por el calor y energía que se consume en la extracción de ácidos grasos, sin embargo en la india la generación de energía se viene desarrollando a partir de fuentes renovables. La información complementaria de los impactos generados está en el (Anexo 10).



Comparando 1 p 'AceiteBiodieselCollet', 1 p 'AceiteBiodieselGnansounou', 1 p 'AceiteBiodieselPasell' y 1 p 'ÁcidosBiodieselLevapan'; Método: ReCiPe Endpoint (E) V1.11 / Europe ReCi

Figura 16 Comparación impactos de punto medio causados por la extracción de aceites  
Fuente: SimaPro

Lo anterior, se refleja en la evaluación del daño por medio de los indicadores de punto final, donde se están generando afectaciones principalmente en la salud humana, seguido por el uso de recursos y finalmente la afectación en los ecosistemas. En este caso igualmente la extracción de ácidos del biodiesel objeto de estudio tiene un impacto relativamente bajo. La información complementaria está en el (Anexo 11).

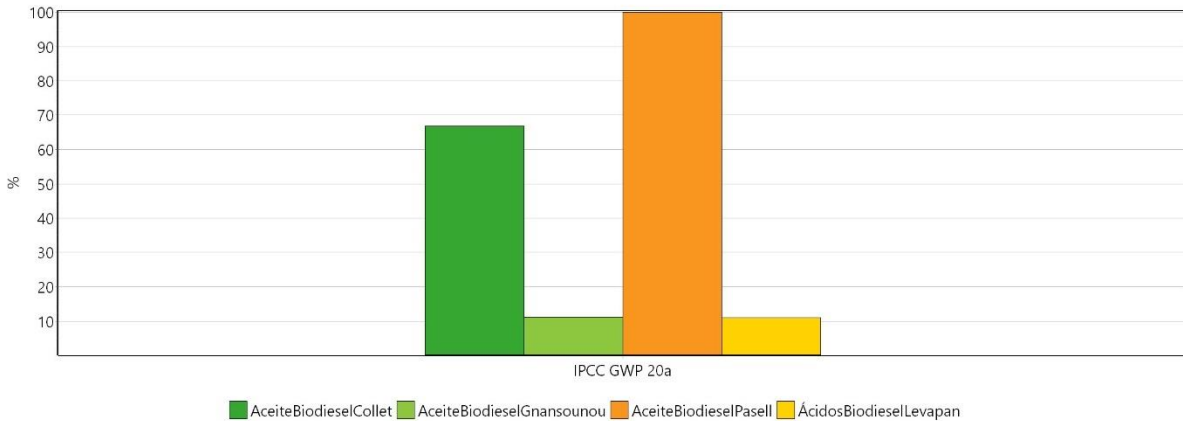


Comparando 1 p 'AceiteBiodieselCollet', 1 p 'AceiteBiodieselGnansounou', 1 p 'AceiteBiodieselPasell' y 1 p 'ÁcidosBiodieselLevapan'; Método: ReCi

Figura 17 Comparación impactos de punto final causados por la extracción de aceites  
Fuente: SimaPro

Por otro lado, en cuanto a gases que afectan el efecto invernadero se tiene que la extracción de ácidos grasos provenientes de lodos de digestión anaerobia, está generando el menor impacto (Figura 18), ya que se generan 0,413 kg de CO<sub>2</sub> equivalente estando por debajo del artículo de (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016) el cual genera 0,422 kg de CO<sub>2</sub> equivalente. De igual forma, se encuentra por debajo de las emisiones que se generan en (Passell et al., 2013) y (Collet et al., 2014) en alrededor del 90 y 83,57 por ciento respectivamente, lo cual es bastante positivo para el medio ambiente debido a que se está dejando de emitir una gran cantidad de gas perjudicial para el ecosistema. Además,

considerando la posibilidad de realizar la producción de forma autotrófica es decir captando el CO<sub>2</sub> presente en la atmosfera y usando la luz, se puede lograr disminuir aún más los efectos sobre el cambio climático.

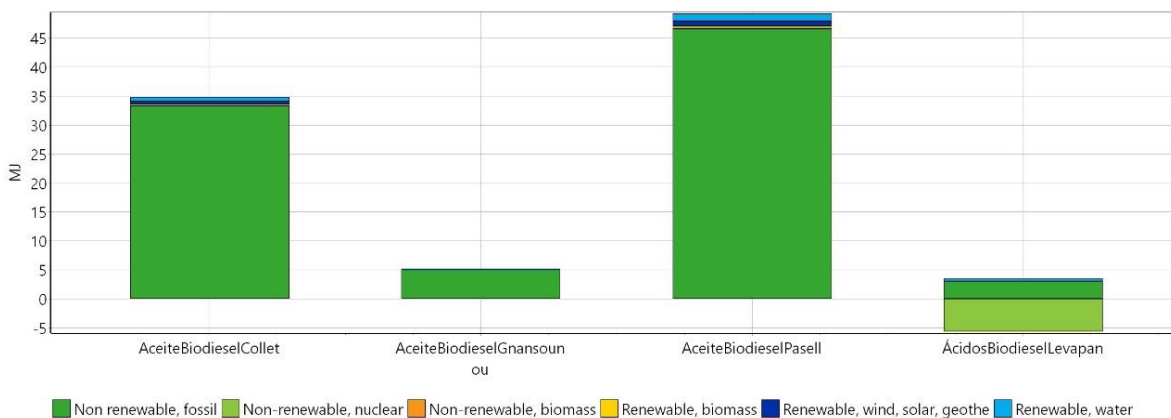


Comparando 1 p 'AceiteBiodieselCollet', 1 p 'AceiteBiodieselGnansounou', 1 p 'AceiteBiodieselPasell' y 1 p 'ÁcidosBiodieselLevapan'; Método: IPCC 2013 GWP 20a V1.00 / Caracterizac

Categoría de impacto	Unidad	Collet	Gnansounou	Passell	Levapan
IPCC GWP 20a	kg CO2 eq	2,520	0,423	3,767	0,414

Figura 18 Comparación de impactos por medio del eco-indicador IPCC  
Fuente: SimaPro

Finalmente, en cuanto al Cumulative Energy Demand (Figura 19), el biodiesel objeto de estudio se encuentra por debajo del eje del cero, lo cual indica que es beneficioso para el medio ambiente comparado con los otros artículos que están por encima del eje del cero y por ende generan afectaciones negativas al medio ambiente. Esto, se debe al hecho de que la energía la cual es usada en los artículos de (Passell et al., 2013) y (Collet et al., 2014) es proveniente de Estados Unidos la cual proviene de fuentes fósiles, mientras que la energía usada en el artículo de (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016) es proveniente de la india y en el caso de Levapan la energía es Colombiana, países donde la energía es más limpia.



Comparando 1 p 'AceiteBiodieselCollet', 1 p 'AceiteBiodieselGnansounou', 1 p 'AceiteBiodieselPasell' y 1 p 'ÁcidosBiodieselLevapan'; Método: Cumulative Energy Demand V1.09 / Cum

Figura 19 Comparación de demanda acumulada de energía  
Fuente: SimaPro

## 5.4 Conclusiones

- El uso de microalgas obtenidas a partir de lodos de digestión anaerobia, le permiten a Levapan aprovechar los residuos generados a partir de los procesos asociados a la industria de levadura. Además, en el proceso se genera glicerina, materia prima del propilenglicol usado para la elaboración de productos alimenticios, cosméticos o farmacéuticos.
- El rendimiento en la extracción de aceite de las microalgas a partir de ácidos grasos es de 32,30% siendo competitivo contra el aceite obtenido de la soya y del algodón, ya que se encuentra por encima en 14,25 y 17,25 por ciento respectivamente. Lo cual indica que se obtiene un mayor aprovechamiento de recursos que en estos dos casos. Por otro lado, es inferior al rendimiento en la extracción del aceite de girasol y la colza en 9,25 y 7,75 por ciento respectivamente.
- El proceso de obtención de biodiesel a partir de ácidos grasos obtenido de microalgas cultivadas usando lodos de digestión anaerobia, tiene bajo impacto sobre el medio ambiente, que se da por el tratamiento de los lodos como insumo principal para la generación de micro y macronutrientes, generando beneficio a Levapan en el manejo de residuos.
- La productividad de las microalgas es de 83,04 gramos de aceite por m<sup>2</sup> al día, siendo una productividad mayor a la estudiada en los otros artículos, considerando que el cultivo de las microalgas se realiza un biorreactor. Además, se tiene un rendimiento en la extracción del aceite del 76% siendo a su vez superior a la obtenida a partir de las microalgas estudiadas en los otros artículos. De este modo, para lograr un buen rendimiento se requiere de tener una gran productividad.
- Comparado con los otros artículos relacionados con biodiesel a partir de microalgas, el biodiesel estudiado presenta un impacto considerablemente menor frente a los otros procesos, principalmente en las emisiones de kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes logrando una reducción mayor al 80% durante el ciclo de vida del producto, respecto al análisis de (Passell et al., 2013) y (Collet et al., 2014) lo que implica que el proyecto tiene un impacto menor.

## 5.5 Recomendaciones

- Debido a que el análisis arrojó que el proceso hasta la extracción de ácidos grasos es comparable con el de otros artículos, obteniendo una alta productividad y un rendimiento de alrededor del 76%. Además, los impactos generados en el medio ambiente son bajos, generando poca afectación a categorías normalmente críticas como el cambio en la capa de ozono y la formación de material particulado. Se debería realizar el proceso hasta la obtener una muestra representativa de biodiesel que pueda ser analizada en laboratorio para determinar de una forma más certera su competitividad dentro del mercado.
- Para realizar el montaje en SimaPro, se presentaron varios inconvenientes debido a que la información suministrada era muy limitada presentando vacíos en la misma, lo que puede llegar a afectar las comparaciones. Además, los procesos de los artículos se desarrollaban para distintas cantidades de aceites que salían del proceso en su mayoría relativamente bajas, mientras que el proceso objeto de estudio se obtienen 100 kg, por lo que en el proceso de análisis realizados internamente por SimaPro, pueden existir

confusiones ya que estos procesos no se comportan de forma lineal. Por esta razón, se debe trabajar en estudios futuros con estudios que posean una mayor similitud en la información.

- Para lograr mejorar el rendimiento en la extracción del aceite a partir de microalgas, se debe lograr un mayor nivel de concentración de biomasa seca, ya que después del proceso de centrifugado está saliendo una concentración de solo el 42,58% de biomasa seca. De este modo, si se logra aumentar esta concentración, se podría llegar a obtener un rendimiento en la extracción de aceites hasta del 75,75 %.
- Se recomienda hacer una recirculación de los lodos residuales con el objetivo de aprovechar al máximo la biomasa que se obtiene de estos lodos (Anexo 2).
- La implementación de este proyecto bajo los parámetros considerados se debería llevar a cabo, ya que el uso de lodos de digestión anaerobia provenientes de la industria de levadura son los que soportan la contribución ambiental del proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

- Academic. (n.d.). ACADEMIC. Retrieved from <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/815547>
- Agrelo, M. (2014). Eco-Huella. Retrieved from <https://www.eco-huella.com/2014/06/analisis-ciclo-vida.html>
- AulaNatural. (2015). Aula Natural. Retrieved from <https://aula-natural.com/que-es-un-tensoactivo/>
- BioDic. (n.d.). Retrieved from <https://www.biodic.net/palabra/anaerobio/#.W7-2GGhKjIU>
- Camero, F. A. (2017). Científicos chilenos logran producir biodiesel a partir de microalgas. Retrieved from <https://lta.reuters.com/article/domesticNews/idLTAKBN19L26B-OUSLD>
- Campbell, P. K., Beer, T., & Batten, D. (2011). Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. *Bioresource Technology*, *102*(1), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.048>
- Ciencia, L. (n.d.). CONCEPTDEFINICION.DE. Retrieved from <https://conceptdefinicion.de/lipidos/>
- Collet, P., Lardon, L., Hélias, A., Bricout, S., Lombaert-Valot, I., Perrier, B., ... Bernard, O. (2014). Biodiesel from microalgae - Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. *Renewable Energy*, *71*, 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.009>
- Crop Care. (n.d.). CRODA. Retrieved from <https://www.crodacropcare.com/es-mx/products-and-applications/microemulsion>
- Demirbas, A. (2008). *Biodiesel*. New York.
- Diaz, A. A., Lorenzo, E. V., & Venta, M. B. (2015). Tratamiento de lodos , generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, *46*(2), 1–10. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/1816/181642434003/>
- EcuRed. (n.d.-a). EcuRed. Retrieved from <https://www.ecured.cu/Ésteres>
- EcuRed. (n.d.-b). EcuRed. Retrieved from <https://www.ecured.cu/Vinaza>
- EcuRed. (2016). EcuRed. Retrieved from <https://www.ecured.cu/Cianobacterias>
- Energía, M. de M. y. (2017). *Boletín Estadístico Trimestre II 2017*. Retrieved from [https://www.minminas.gov.co/documents/10180/486207/boletin\\_trimestre\\_2\\_2017\\_inicial.pdf/40a652e6-03ee-4582-8549-a31e141cd43b](https://www.minminas.gov.co/documents/10180/486207/boletin_trimestre_2_2017_inicial.pdf/40a652e6-03ee-4582-8549-a31e141cd43b)
- Fedebiocombustibles. (n.d.). Federación Nacional de Biocombustibles en Colombia. Retrieved from <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>

- Gauch, M. (2013). Ciclo de vida del biodiesel en Colombia. *Palmas*, 34(Especial, Tomo II), 331–344.
- Gnansounou, E., & Kenthorai Raman, J. (2016). Life cycle assessment of algae biodiesel and its co-products. *Applied Energy*, 161, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.043>
- Gouveia, L. (2014). From Tiny Microalgae to Huge Biorefineries. *Journal of Oceanography and Marine Research*, 2. Retrieved from <https://www.omicsonline.org/open-access/from-tiny-microalgae-to-huge-biorefineries-2332-2632-2-120.php?aid=24524>
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Herrera, I., Pérez, J. C., & Gamarra, A. R. (2016). *Análisis de ciclo de vida de la producción de etanol combustible proveniente del bagazo de caña de azúcar*. Valencia. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/317065800\\_Analisis\\_de\\_ciclo\\_de\\_vida\\_de\\_la\\_produccion\\_de\\_etanol\\_combustible\\_proveniente\\_del\\_bagazo\\_de\\_cana\\_de\\_azucar](https://www.researchgate.net/publication/317065800_Analisis_de_ciclo_de_vida_de_la_produccion_de_etanol_combustible_proveniente_del_bagazo_de_cana_de_azucar)
- Herrera Jaime, B., Leyva Rolon, S., Ortiz Ceron, V., Cardenas Valderrama, J. F., & Garzon Lozano, E. (2009). Biocombustibles en Colombia. *Report*, 22. Retrieved from [http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles\\_colombia.pdf](http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles_colombia.pdf)
- Hongos biofactory. (n.d.). Hongos biofactory. Retrieved from [http://www.hongosbiofactory.com/diccionario-micologico/H\\_67\\_heterotrofico](http://www.hongosbiofactory.com/diccionario-micologico/H_67_heterotrofico)
- Iermanó, M. J., & Sarandón, S. J. (2007). *ANÁLISIS DE LA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FOSILES*. Univeridad Nacional de la Plata. Retrieved from [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/62875/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/62875/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- ISM. (n.d.). Análisis del ciclo de vida:Conceptos y metodología. Retrieved from <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/analisis-del-ciclo-de-vida-conceptos-y-metodologia>
- ISM. (2018). SimaPro herramienta de análisis de ciclo de vida. Retrieved from <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/simapro-herramienta-de-analisis-de-ciclo-de-vida>
- Lombana, J., Vega, J., Britton, E., & Herrera, S. (2015). *Análisis del sector biodiesel en Colombia y su cadena de suministro*. Barranquilla: Universidad del Norte.
- Morales, M. del M., Gómez, S., Acién, G., & Fernández, J. (2015). Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source. *Algal Research*, 9. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926415000818>
- Muriana, V. (2016). *Planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*. Escuela

tecnic superior de Ingeniería. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70836/fichero/TFM+PLANTA+DE+PRODUCCION+DE+BIODIESEL+A+PARTIR+DE+MICROALGAS.pdf>

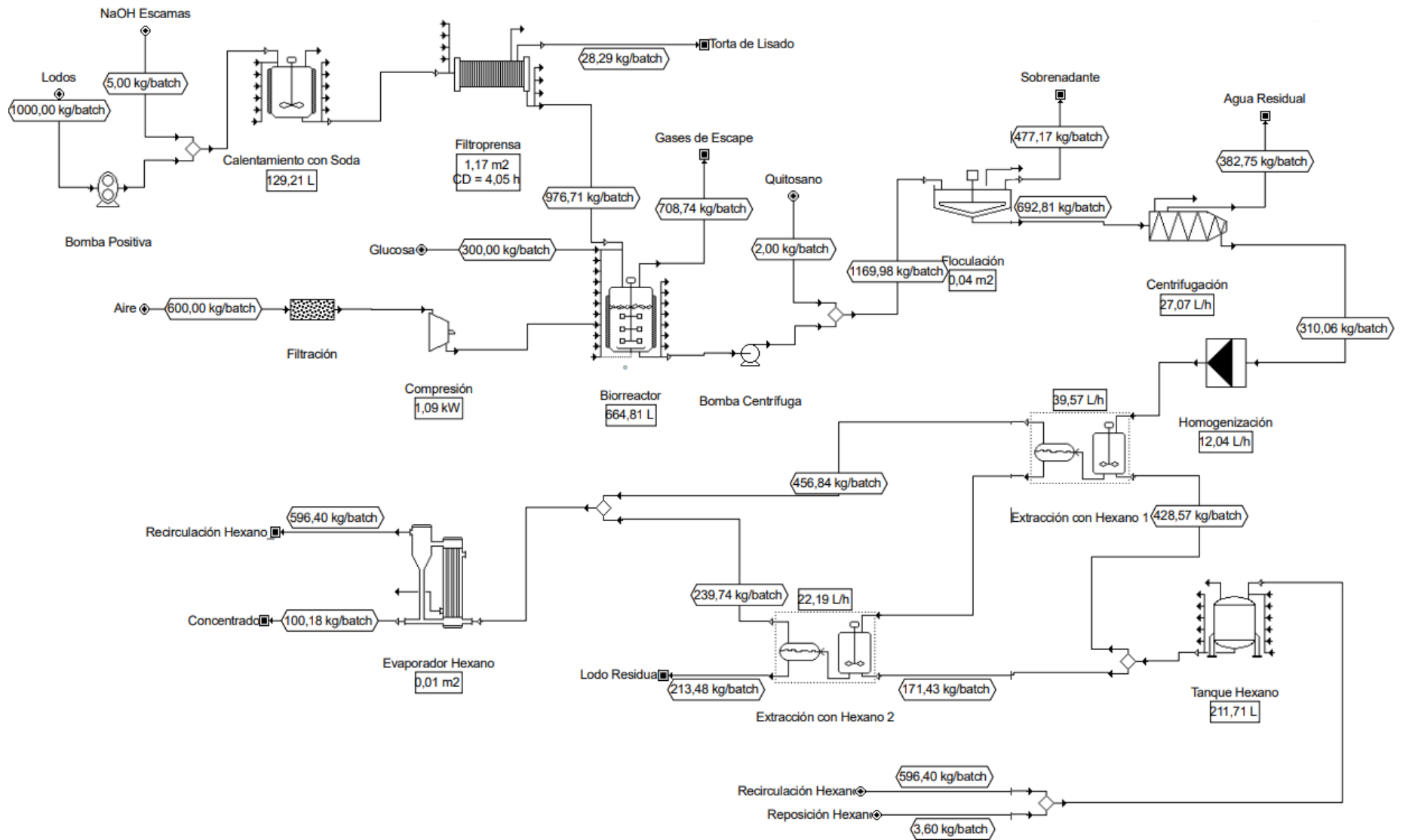
- Passell, H., Dhaliwal, H., Reno, M., Wu, B., Ben Amotz, A., Ivry, E., ... Ayer, N. (2013). Algae biodiesel life cycle assessment using current commercial data. *Journal of Environmental Management*, 129, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.055>
- Plaza, F. (2016). *Andrés Felipe Plaza Sánchez*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez, B., Bayona, S., & Pabón, P. (2008). Evaluación Del Análisis Del Ciclo De Vida Para La Producción De Biodiesel a Partir De Aceite De Higuera Empleando La Metodología “ De La Cuna a La Cuna .” *Revista ION*, 21(1), 17–26.
- Rincón educativo. (2016). Qué es biodiesel. Retrieved from <http://www.rinconeducativo.org/eu/node/111>
- Ruiz, G. A. (2016). *Generalidades de las microalgas*. Instituto Politécnico Nacional. Retrieved from <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20804/capitulo1.pdf>
- Ruiz, R., & Roger, J. (2010). *Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible*. Politécnica de Catalunya. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/9403/5/3.3.Biodiesel.pdf>
- Tellez, J. M. (2014). Diésel en Colombia, cada vez más limpio. Retrieved from <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines-2014/contenido/Diesel-en-Colombia,-cada-vez-mas-limpio>
- Xin, C., Addy, M., Zhao, J., Cheng, Y., Cheng, S., Mu, D., ... Ruan, R. (2016). Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study. *Bioresource Technology*, 211, 584–593. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852416304059?via%3Dihub>
- Zarini, P. (2011). *Tesis de grado de Ingeniería Industrial. Producción de biodiesel a partir de micro algas: una alternativa sustentable*. Instituto tecnológico de Buenos Aires. Retrieved from [https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/506/Z37p - Producción de biodiesel a partir de micro algas una alternativa sustentable.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/506/Z37p-Produccion-de-biodiesel-a-partir-de-micro-algas-una-alternativa-sustentable.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



## ANEXOS

Life Cycle	Material	Cantidad	Unidades	Proceso	Energía	Cantidad	Unidades	Salidas	Cantidad	Unidades
Materia Prima	Lodos de digestión anaerobia	1000	kg	Cultivo	Consumo energético	7,95	kWh	Torta de lisado	28,29	kg
	Glucosa	300	kg					Gases de escape	708,74	kg
	Aire	600	kg		Calor	109,01	kWh	Microalgas+fluidos	1169,98	kg
	Hidróxido de sodio	5	kg					Hidróxido de sodio	0,6	kg
				Cosecha/ deshidratación				Sobrenadante	477,17	kg
	Microalgas+fluidos	1169,98	kg		Electricidad	6,0938	kWh	Hidróxido de sodio	1,1	kg
	Quitosano Floculante	2	mg		Calor	14,84	kWh	Agua residual	382,75	kg
	Hexano	600	kg					Lodos residual	213,48	kg
				Extracción de ácidos grasos	Calor	65,74	kWh	Biomasa húmeda	696,58	kg
	Biomasa húmeda	696,58	kg					Ácidos grasos	100	kg
				Refinación	Electricidad	1,05	kWh	Hexano	596,4	kg
	Ácidos grasos	100	kg					Ácidos refinados	100	kg
				Transesterificación						
	Aceite refinado	100	kg							
Hexano	330	kg								
Metano	270	g								
Procesos	Cultivo	El proceso de cultivo es el método utilizado por la empresa Levapan S.A. para la obtención de algas a partir de lodos de digestión anaerobia. Estos lodos se someten a una agitación con hidróxido de sodio con macro y micronutrientes necesarias para la estimulación del crecimiento de biomasa algal.								
	Cosecha / deshidratación	El proceso se hace mediante un proceso de floculación, con ayuda de Quitosano teniendo como medio el agua. La floculación consiste en la separación de componentes por medio del asentamiento de los mismos, facilitando la decantación y posterior filtrado.								
	Extracción de aceite	El proceso de extracción de aceite permite que a partir de la biomasa seca se obtengan ácidos grasos mediante el uso de hexano.								
	Refinación de aceite	Una vez se obtengan los ácidos grasos, estos se deben refinar para obtener la calidad esperada para la posterior obtención de biodiesel. Esto se hace mediante una prensa que hace que separe los componentes sólidos del aceite y una electricidad que permite evaporar restos de agua.								
	Transesterificación	El proceso de transesterificación consiste en combinar el aceite algal con alcohol para la obtención de biodiesel. De este proceso resulta el glicerol que puede ser usado en la industria cosmética.								
Distribución	Camión cisterna	1 und	Capacidad 14,7 G	Diesel	0,0097	L/km	Emisiones al aire		kg CO <sub>2</sub>	
Uso	Vehículo convencional	1 und	Capacidad 8 G	Biodiesel	0,0097	L/km	Emisiones al aire		kg CO <sub>2</sub>	

Anexo 1 Matriz MED

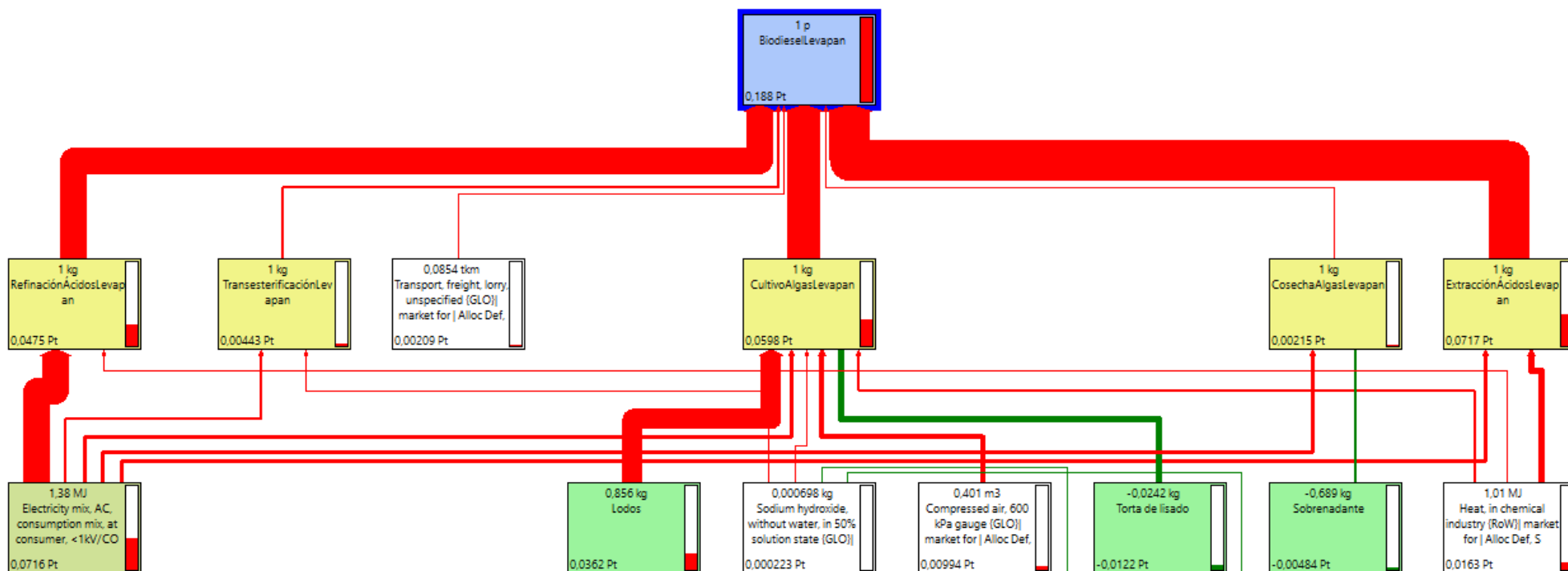


Anexo 2 Esquema escalado en SuperPro Designer

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>Cultivo Levapan</b>	<b>Cosecha Levapan</b>	<b>Extracción Ácidos Levapan</b>	<b>Refinación Ácidos Levapan</b>	<b>Transesterificación Levapan</b>	<b>Transporte</b>
<b>Total</b>	mPt	187,677	59,811	2,152	71,734	47,465	4,426	2,089
<b>Climate change Human Health</b>	mPt	22,671	12,456	0,381	3,135	5,773	0,538	0,388
<b>Ozone depletion</b>	mPt	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Human toxicity</b>	mPt	120,396	24,713	2,250	60,331	29,786	2,764	0,552
<b>Photochemical oxidant formation</b>	mPt	1,844	0,000	0,000	1,844	0,000	0,000	0,000
<b>Particulate matter formation</b>	mPt	2,144	0,857	0,019	0,342	0,773	0,074	0,080
<b>Ionising radiation</b>	mPt	0,006	0,006	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Climate change Ecosystems</b>	mPt	18,092	9,940	0,304	2,501	4,607	0,430	0,310
<b>Terrestrial acidification</b>	mPt	0,068	0,024	0,002	0,010	0,028	0,003	0,002
<b>Freshwater eutrophication</b>	mPt	0,004	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
<b>Terrestrial ecotoxicity</b>	mPt	0,082	0,039	-0,002	0,026	0,003	0,000	0,016
<b>Freshwater ecotoxicity</b>	mPt	0,005	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Marine ecotoxicity</b>	mPt	1,096	0,674	-0,017	0,118	0,273	0,027	0,021
<b>Agricultural land occupation</b>	mPt	0,112	0,108	-0,010	0,010	0,000	0,001	0,003
<b>Urban land occupation</b>	mPt	0,067	0,039	-0,005	0,008	0,000	0,000	0,024
<b>Natural land transformation</b>	mPt	2,049	1,620	-0,215	0,398	0,014	0,011	0,221
<b>Metal depletion</b>	mPt	0,535	0,547	-0,058	0,019	0,003	0,002	0,021
<b>Fossil depletion</b>	mPt	18,505	8,780	-0,494	2,989	6,203	0,576	0,452

Anexo 3 Impactos de punto medio por medio de eco-indicador ReCiPe

Fuente: SimaPro



Anexo 4 Diagrama de Sankey biodiesel a partir de ácidos grasos de microalgas cultivadas en lodos de digestión anaerobia

Fuente: SimaPro

Daño de categoría	Unidad	Total	Cultivo Levapan	Cosecha Levapan	Extracción Ácidos Levapan	Refinación Ácidos Levapan	Transesterificación Levapan	Transporte
<b>Total</b>	mPt	187,677	59,811	2,152	71,734	47,465	4,426	2,089
<b>Human Health</b>	mPt	147,062	38,032	2,649	65,653	36,332	3,377	1,020
<b>Ecosystems</b>	mPt	21,575	12,452	0,055	3,073	4,927	0,472	0,596
<b>Resources</b>	mPt	19,040	9,327	-0,552	3,008	6,206	0,577	0,473

Anexo 5 Impactos de punto final por medio de eco-indicador ReCiPe

Fuente: SimaPro

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>Cultivo Levapan</b>	<b>Cosecha Levapan</b>	<b>Extracción Ácidos Levapan</b>	<b>Refinación Ácidos Levapan</b>	<b>Transesterificación Levapan</b>	<b>Transporte</b>
<b>Total</b>	MJ	9,534	4,319	-0,120	1,379	3,444	0,320	0,192
<b>Non renewable, fossil</b>	MJ	7,783	3,693	-0,206	1,251	2,617	0,243	0,186
<b>Non-renewable, nuclear</b>	MJ	0,352	0,353	-0,023	0,014	0,001	0,002	0,003
<b>Non-renewable, biomass</b>	MJ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Renewable, biomass</b>	MJ	0,045	0,043	-0,004	0,004	0,000	0,000	0,001
<b>Renewable, wind, solar, geothe</b>	MJ	0,026	0,022	-0,001	0,001	0,003	0,000	0,000
<b>Renewable, water</b>	MJ	1,329	0,208	0,114	0,108	0,823	0,075	0,001

Anexo 6 Impactos del Cumulative Energy Demand

Fuente: SimaPro

Process/inputs	Value	Unit	Data source	Comment
Cultivation: inputs (kg <sup>-1</sup> dry biomass)				
Nitrogen fertilizer	0.26	kg	Seabiotic	52 g of nitrogen fertilizer is used per kg algae slurry at 20% solids.
Phosphorus fertilizer	0.045	kg	Seabiotic	9 g of phosphate fertilizer is used per kg algae slurry at 20% solids.
Freshwater	1.67	m <sup>3</sup>	Seabiotic	Added to offset evaporation and maintain salinity.
Electricity (paddlewheels)	30	kWh	Seabiotic	8 paddles wheels of increasing size (0.5 kW, 0.5 kW, 0.75 kW, 0.75 kW, 1.0 kW, 1.0 kW, 1.5 kW, 1.5 kW) are used for 12 h/day.
Electricity (flue gas blower)	12	kWh	Seabiotic	A 3 kW blower used to bubble the CO <sub>2</sub> into the ponds for 12 h/day.
Electricity (water pump)	3.33	kWh	Seabiotic	A 1 kW water pump used 10 h/day.
Electricity (algae inoculant prep)	6.77	kWh	Seabiotic	Florescent light (0.846 kW) used 24 h/day.
Electricity (algae inoculant prep)	14.9	kWh	Seabiotic	Air conditioner (0.746 kW) used 24 h/day.
Flue gas pumped in	-181	kg	Seabiotic	Flue gas at 180 m <sup>3</sup> /hr for 12 h/day with a CO <sub>2</sub> concentration of 13–15%. This input is modeled as an environmental credit.
Cultivation: outputs (kg <sup>-1</sup> dry biomass)				
CO <sub>2</sub> emitted	179	kg	Seabiotic	The ratio of CO <sub>2</sub> absorbed by the algae to dry biomass assumed to be 2:1.
Harvesting & dewatering: inputs (kg <sup>-1</sup> dry biomass)				
Electricity	2	kWh	Seabiotic	A 0.5 kW harvesting pump is used for 12 h/day.
Electricity	16	kWh	Seabiotic	A 4 kW centrifuge is used for 12 h/day for producing algae slurry.
Oil extraction: inputs (kg <sup>-1</sup> algae oil)				
Electricity	0.21	kWh	SRS	Electricity used per kg oil.
Heat (pretreatment and extraction)	4933	BTU	SRS	Energy input for the pretreatment and extraction of the oil.
Heat (solvent recovery)	6278	BTU	SRS	Energy input for recovery of hexane.
Heat (oil separation)	1805.57	BTU	SRS	Energy input for processing of the oil to separate the oil and other lipids.
Electricity (belt filter press)	2.0	kWh	Assumed	Energy input for belt filter press to dewater the biomass. Energy needed for this process is assumed to be comparable to the feed dryer energy.
Heat (feed dryer)	6417	BTU	SRS	Energy input for drying the biomass.
Hexane	0.33	kg	SRS	Solvent extraction method is used to extract the oil. Hexane is used as the solvent.
Chemical A	0.08	kg	SRS	Unidentified chemical. It is modeled by using a generic Ecoinvent process for organic chemicals.
Oil extraction: outputs (kg <sup>-1</sup> algae oil)				
Algae oil	1	kg	SRS	Primary output of the process. Allocated based on the high heat value (HHV) of 16,200 BTU/lb.
Algae residue (oilcake)	1.87	kg	SRS	Co-product of algae oil production. Allocated based on the HHV of 6107 BTU/lb (21)
Low value lipids	0.67	kg	SRS	Co-product of algae oil production. Allocated based on the HHV of 16,000 BTU/lb (assumed to be comparable to biodiesel).
Wastewater	17.35	l	SRS	The slurry contains 80% water and 20% solids. The water is sent to a treatment facility. Out of the 20% solids, about 3% remain in the water and are also sent to wastewater treatment. Chemical A is removed as wastewater also.
Hexane losses	0.0038	kg	SRS	A small amount of hexane is lost during the oil extraction as fugitive emissions.
Conversion to biodiesel: Transesterification from GREET 1_2011 (GREET, 2011).				
Biodiesel combustion: Combustion in a CIDI vehicle from GREET 1_2011 (GREET, 2011).				

Anexo 7 Tabla de inventario del ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir de microalgas marinas  
Fuente: (Passell et al., 2013)

Step	Influent flux (kg & [MJ <sub>CED</sub> ])	Energy (MJ & [MJ <sub>CED</sub> ])	Misc. CED ([MJ <sub>CED</sub> ])	Total CED ([MJ <sub>CED</sub> ])	Products (kg & [MJ <sub>LHV</sub> ])
Culture	Pond amortization 12.5 <sup>a</sup> & [250]	Carbonation 104 & [318]	[17]	[1251]	
	Ammonium nitrate 3.42 & [206] DAP 3.4 & [86]	Paddlewheel 65 & [199] Circulation 57 & [175]			Algae slurry 90 & [2085]
Harvesting – Dewatering	Algae slurry (prev. step) 90 & [2085]	Electricity 151 & [462]	[6]	[468]	Algae paste 86 & [1988]
Extraction – Esterification	Algae paste (prev. step) 86 & [1988]	Electricity 42 & [129]	[19]	[453]	Algal ME 26.9 & [1000]
	Hexane 0.37 & [23]	Heat 121 & [165]			Glycerol 2.9 & [53]
	Methanol 3 & [117]				Residue 58.2 & [974]
Total	[682]	Electricity 420 & [1284] Heat 121 & [165]	[42]	[2172]	[2027]

<sup>a</sup> Pond amortization is expressed as m<sup>2</sup>a (square-metre-years).

Anexo 8 Tabla de inventario de ciclo de vida de la producción de aceites a partir de microalgas marinas  
Fuente: (Collet et al., 2014)

Stages	In/out	Utilities/materials	Unit	Base case
Cultivation [29,51]	Input	Water	kg	221.75
		Urea	g	88.14
		Diammonium phosphate	g	79.28
		Concrete	g	$2.2 \times 10^{-4}$
		Steel	g	$7.5 \times 10^{-7}$
		Plastic	g	$5.08 \times 10^{-5}$
		Cast Iron	g	$1.8 \times 10^{-8}$
		Electricity	kW h	3.40
		Algal broth	kg	226.4
		Harvest [51]	Input	Chitosan
Electricity	kW h			3.46
Output	Algae broth		kg	255.5
	Dry algae		g	4620
Oil extraction [43]	Input	Hexane	g	2.95
		Electricity	kW h	0.08
		Heat	MJ	2.30
Protein extraction [43,45]	Output	Algal oil	g	1050
		Input	Deoiled algae biomass	g
Ethanol	g		139.6	
Methanol	g		7.4	
Electricity	kW h		0.08	
Heat	MJ		2.30	
Protein	g		1940.4	
Algae biomass	g		1629.6	
Anaerobic digestion [51]	Input	Electricity	kW h	0.32
		Heat	MJ	1.50
	Output	Algae biomass	g	1629.6
		Electricity	kW h	1.82
Biodiesel production [44]	Input	Heat	MJ	5.24
		Algal oil	g	1050
		Methanol	g	124.9
		Sodium hydroxide	g	10.5
		Sulfuric acid	g	15.8
		Electricity	kW h	0.041
		Heat	MJ	5.6
	Output	Water	kg	0.14
		Biodiesel	g	1000
		Glycerol	g	113.3
Transport	Biodiesel – from industry to outlet Protein – from Industry to outlet		km	100
			km	100

Anexo 9 Tabla de inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de microalgas  
Fuente: (Gnansounou & Kenthorai Raman, 2016)

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Collet</b>	<b>Gnansounou</b>	<b>Passell</b>	<b>Levapan</b>
<b>Total</b>	mPt	378,653	54,666	556,733	104,003
<b>Climate change Human Health</b>	mPt	70,902	12,393	109,504	12,868
<b>Ozone depletion</b>	mPt	0,002	0,001	0,003	0,000
<b>Human toxicity</b>	mPt	148,845	16,395	214,486	70,808
<b>Photochemical oxidant formation</b>	mPt	0,002	0,000	0,004	1,844
<b>Particulate matter formation</b>	mPt	13,814	1,937	21,246	0,609
<b>Ionising radiation</b>	mPt	0,006	0,002	0,010	-0,104
<b>Climate change Ecosystems</b>	mPt	56,581	9,890	87,387	10,269
<b>Terrestrial acidification</b>	mPt	0,499	0,066	0,775	0,022
<b>Freshwater eutrophication</b>	mPt	0,008	0,002	0,054	0,002
<b>Terrestrial ecotoxicity</b>	mPt	0,312	0,091	0,435	0,023
<b>Freshwater ecotoxicity</b>	mPt	0,008	0,001	0,011	0,001
<b>Marine ecotoxicity</b>	mPt	2,273	0,345	3,199	0,242
<b>Agricultural land occupation</b>	mPt	0,140	0,034	0,235	-0,083
<b>Urban land occupation</b>	mPt	0,104	0,028	0,149	-0,008
<b>Natural land transformation</b>	mPt	4,699	1,336	6,907	0,538
<b>Metal depletion</b>	mPt	1,024	0,067	0,708	-0,206
<b>Fossil depletion</b>	mPt	79,434	12,078	111,619	7,178

Anexo 10 Comparación de Impactos de punto medio por medio de eco-indicador ReCiPe

Fuente: SimaPro

<b>Daño de categoría</b>	<b>Unidad</b>	<b>Collet</b>	<b>Gnansounou</b>	<b>Passell</b>	<b>Levapan</b>
<b>Total</b>	mPt	378,653	54,666	556,733	104,003
<b>Human Health</b>	mPt	233,572	30,727	345,252	86,025
<b>Ecosystems</b>	mPt	64,623	11,793	99,153	11,006
<b>Resources</b>	mPt	80,458	12,146	112,327	6,972

Anexo 11 Comparación de Impactos de punto final por medio de eco-indicador ReCiPe

Fuente: SimaPro