

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO A PARTIR DE LA METODOLOGÍA
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN LA EMPRESA
ENERGÍAS BIODEGRADABLES DE COSTA RICA”**

**Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en la Escuela de Química para optar al grado y
título de Maestría Profesional en Química Industrial.**

ISAAC TOMÁS ARELLANO SALMERÓN

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2018

Agradecimientos

A mi madre, mi esposa, mi hermana y mi padre que son mi piedra angular para llevar a cabo cada proyecto.

A la familia Soler Ávila por su apoyo incondicional.

A mi directora de tesis la Dra. Giselle Lutz, por su incondicionalidad amistad, soporte profesional en cada etapa.

A mi asesor Antonio Monge por su disposición a guiarme en este campo.

Al profesor Roberto Quirós por su conocimiento único y por su incondicional asesoría en este campo de gestión ambiental.

Al profesor Jeffrey Sibaja por su conocimiento y enseñanza en análisis multivariado.

A Lorena Madriz, por la oportunidad de realizar este proyecto en la empresa Energías Biodegradables y gracias por toda la confianza brindada.

Gracias a Dios por todo.

"Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Química de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Química Industrial"



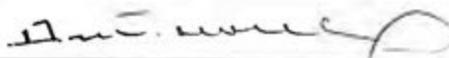
M.Sc. Giselle Lutz Cruz

Profesora Guía



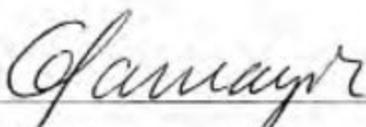
Dr. Roberto Quiros Vargas

Lector



Mag. Antonio Monge Santonastasio

Lector



Dra. Giselle Tamayo Castillo

Directora del Programa de Posgrado en Química



Isaac Tomás Arellano Salmerón

Estudiante

Observaciones: El Representante del Decano del Sistema de Estudios de Posgrado, el M.Sc. José Leitón Chacón estuvo ausente, por lo que el Tribunal lo presidió la Dra. Giselle Tamayo Castillo, Directora del Posgrado en Química.

Tabla de contenido

Resumen	vi
Resumen en inglés.....	vii
Índice de tablas	ix
Índice de figuras.....	x
Glosario	xi
I.- Objetivos	1
a) Objetivo general.....	1
b) Objetivos específicos	1
II.-Problema	2
III.-Introducción	3
Problemática ambiental asociada a los combustibles fósiles.....	3
Gases de efecto de efecto invernadero.....	4
Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.....	4
Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (EPA).....	5
Origen del biodiesel.....	5
La producción de biodiesel a partir de aceites usados.....	6
Métodos de obtención del biodiesel.....	10
Análisis de Ciclo de vida.....	13
Análisis estadístico multivariado aplicado.....	20
IV.-Metodología.....	23
Definición del objetivo.....	23
Definición del alcance.....	23
b.1) Sistema del producto bajo estudio.....	23
b.2) Funciones del sistema bajo estudio.....	24
b.3) Unidad funcional.....	24
b.4) Límites del sistema.....	24

b.5) Reglas de asignación.....	25
b.6) Tipos impactos ambientales.....	25
b.7) Tipos y fuentes de datos.....	25
Descripción del flujo de procesos.....	26
c.1) Primera etapa: Filtración.....	26
c.2) Segunda etapa: Pretratamiento térmico.....	26
c.3) Tercera etapa: Esterificación y Transesterificación.....	26
c.4) Cuarta etapa: Purificación.....	28
V.- Resultados.....	29
Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) para el proceso de producción y uso del biodiesel.....	29
a.1) Primera etapa: Filtración.....	32
a.2) Segunda etapa: Pretratamiento térmico.....	33
a.3) Tercera etapa: Reacción de Esterificación y Transesterificación.....	34
a.4) Cuarta etapa: Purificación del biodiesel.....	38
a.5) Quinta etapa: Distribución del biodiesel.....	39
a.6) Sexta etapa: Uso final del biodiesel.....	41
VI.- Discusión de resultados.....	43
VII.- Regresión lineal Múltiple.....	46
VIII.- Análisis económico en la producción del biodiesel.....	54
IX.- Conclusiones.....	58
X.- Bibliografía.....	60
ANEXOS.....	72

RESUMEN

El cambio climático producido por la actividad antropogénica ha sido identificado como uno de los mayores desafíos que enfrentan actualmente los gobiernos, las empresas y las personas. En respuesta, se están desarrollando iniciativas internacionales, para mitigar los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) ha desarrollado la norma ISO-14044:2007, la cual se refiere al enfoque del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la ISO-14067:2015 esta especificación técnica establece los principios, los requisitos y las directrices para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de un producto (HCP), con base en Normas Internacionales sobre el análisis del ciclo de vida para la cuantificación (INTE/ISO 14040 e INTE/ISO 14044). La empresa Energías Biodegradables de Costa Rica produce biodiesel a partir de aceites usados. El biodiesel producido se utiliza en una mezcla promedio de B10 en buses de transporte público que son propiedad de la empresa Consorcio Operativo del Este S.A. (COESA). El resultado final es la huella de carbono expresada en el total de GEI (kg CO₂eq), divididos por la cantidad de litros de biodiesel producidos en un año. En la Tabla 1 se puede apreciar la huella de carbono anual expresada en (kgCO₂ eq/ L).

Tabla1.- Huella de carbono reportada en kg CO_{2e}/L biodiesel.

Año	kg CO ₂ eq ciclo de vida	Volumen de producción de biodiesel (L)	Huella de carbono kg CO ₂ eq / L	Rendimiento de la reacción %
2013	94 420	514 633	0,18	83
2014	98 750	542 470	0,18	76
2015	79 520	447 673	0,18	71

Al realizar la comparación del promedio de los tres periodos de la huella de carbono del biodiesel (0,18 kg CO_{2e}/L) con la huella de carbono del diesel, reportada teóricamente por la Directiva de la Unión Europea sobre Energías Renovables de 2009 (3,03 kg CO_{2e}/L) se demuestra que la huella de carbono del biodiesel producido dentro del sistema bajo estudio, representa el 6% de la huella de carbono del diesel.

ABSTRACT

Climate change produced by anthropogenic activity has been identified as one of the biggest challenges facing governments, companies and people today. In response, the international initiatives are being developed to mitigate greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere. The International Organization for Standardization (ISO) has developed the ISO-14044:2007 standard, which it refers to the Life Cycle Analysis (LCA) approach and ISO-14067:2015, this technical specification establishes the principles, the requirements and the guidelines for the quantification and communication of the carbon footprint of a product (HCP), based on International Standards on the analysis of the life cycle for quantification (INTE / ISO 14040 and INTE / ISO 14044). The company "Energias Biodegradables" from Costa Rica produces biodiesel from waste oils. Four fundamental stages stand out in the production process: thermal pre-treatment, esterification, transesterification and purification. The biodiesel is used in an average mixture of B10 in public transport buses that owned by the company "Consorcio Operativo del Este S.A." (COESA). The final result is the carbon footprint expressed as numerical indicator that contemplates the total GHG (kg CO₂eq), divided by the amount of liters of biodiesel produced annually. Table 1 shows the annual carbon footprint expressed in (kg CO₂ eq / L).

Table1.- Carbon footprint reported in kg CO₂e / L biodiesel.

Year	kg CO ₂ eq life cycle	Biodiesel production volumen (L)	Carbon footprint kg CO ₂ eq / L	Reaction yield %
2013	94 420	514 633	0,18	83
2014	98 750	542 470	0,18	76
2015	79 520	447 673	0,18	71

When it is comparing the average of the three periods of the carbon footprint of biodiesel (0.18 kg CO₂e / L) with the carbon footprint of diesel reported theoretically by the European Union Directive on Renewable Energy 2009 (3.03 kg CO₂e / L), It shows that the carbon footprint of biodiesel produced into the system under study represents 6% of the carbon footprint of diesel.

Índice de Tablas

Tabla 2.- Principales empresas productores de biodiesel en Costa Rica.....	9
Tabla 3.- Diversas fuentes de biomasa y posibles grados de error de contabilización.....	13
Tabla 4.- Lista de fuentes de GEI en producción del biodiesel.....	29
Tabla 5.- Asignación energética por bomba (h/mes).....	30
Tabla 6.- Consumo eléctrico por proceso unitario.....	31
Tabla 7.- Factores de emisión de electricidad.....	32
Tabla 8.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de filtración.....	32
Tabla 9.- Flujo anual de GEI en la caldera.....	33
Tabla 10.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de pretratamiento térmico.....	34
Tabla 11.- Datos anuales de los consumos reportados por producción.....	35
Tabla 12.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de esterificación y transesterificación.....	35
Tabla 13.- Datos anuales de el volumen inicial de aceite reusado y el rendimiento de la reacción para producir biodiesel.....	36
Tabla 14.- Resultado de la asignación de CO ₂ e para el biodiesel en la etapa de esterificación y transesterificación.....	37
Tabla 15.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de purificación.....	38
Tabla 16.- Kilómetros recorridos anualmente por distribución del biodiesel.....	39
Tabla 17.- Factores de emisión usados en la distribución y uso final.....	40
Tabla 18.- Inventario de GEI calculados en la etapa de distribución.....	40
Tabla 19.- Kilómetros recorridos por las unidades de COESA.....	41
Tabla 20.- Inventario de GEI calculados en la etapa uso final del biodiesel.....	42
Tabla 21.- Huella de carbono en el ciclo de vida del biodiesel reportada en kg CO ₂ eq/L ...	43
Tabla 22.- Totalidad de GEI desde el 2012 al 2015 en cada una de las etapas.....	45
Tabla 23. Correlación lineal de Pearson (r) entre pares de variables del estudio bivariado.....	48

Tabla 24.- Resultado de las pruebas de distribución normal.....	49
Tabla 25.- Resultado de R2 la regresión lineal múltiple.....	50
Tabla 26.- Resultado de los coeficientes de la regresión lineal multivariable.....	51
Tabla 27.Resultados calculados comparados con los datos reales durante el periodo 12/14.....	53

Índice de Figuras

Figura 1.-Producción de biodiesel en la Unión Europea para los años 1998 a 2013.....	8
Figura 2.- Reacción de transesterificación.....	10
Figura 3.- Etapas del ACV según la norma ISO 14044:2007.....	14
Figura 4.- Fases del Análisis del Ciclo de Vida.....	17
Figura 5.- Esquema terminología relacionada con el alcance de un ACV.....	18
Figura 6.- Ejemplo de homocedasticidad en gráfico de dispersión.....	21
Figura 7.- Esquema de los procesos involucrados en el sistema bajo estudio.....	23
Figura 8.- Diagrama de flujo de proceso del biodiesel.....	26
Figura 9.- Reacción general del biodiesel.....	28
Figura 10.- Representación de los GEI acumulativos desde el 2012 hasta el 2015 obtenidos por etapa de los GEI en el ciclo.....	45
Figura 11.- Rutina de cálculo para realizar un análisis lineal bivariado.....	47
Figura 12.- Volumen de producción estimado vs el real.....	53

GLOSARIO

AGL	Ácidos Grasos Libres
ASTM	American Society for Testing and Materials - Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
B100	Biodiesel al 100 % v/v
B10	Biodiesel al 10 % v/v en diesel de petróleo
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
COESA	Consortio Operativo del Este S.A.
COP	Conferencia de las Partes de la Convención Marco sobre el Cambio Climático
EBB	European Biodiesel Board - Junta Europea de Biodiesel
EICV	Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida
EPA	Environmental Protection Agency - Agencia de Protección Ambiental
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INTE	Norma INTECO - Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ISCC	Instituto de Sostenibilidad y Certificación Internacional de Carbono
ISO	International Standard Organization - Organización Internacional para la Estandarización
MRLM	Modelo de Regresión Lineal Múltiple
PCG	Potencial de Calentamiento Global
VOC	Volatile Organic Compounds - Compuestos Orgánicos Volátiles

I. OBJETIVOS

a. Objetivo General:

Determinar las emisiones de gases de efecto invernadero en la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica utilizando el enfoque del Análisis del Ciclo de Vida para la producción de biodiesel a partir de aceites usado y su uso final.

b. Objetivos específicos:

- Aplicar la metodología análisis de ciclo de vida para cuantificar y determinar el impacto de las emisiones de gases GEI dentro de un ciclo productivo.
- Determinar cuáles son las etapas del proceso productivo que tienen mayor contribución en la generación de los GEI, y de su uso en la etapa final.
- Elaborar un modelo lineal multivariable para realizar estimaciones de huella de carbono en función a las características de la materia primas y consumo de energía.

II. PROBLEMA

Durante los últimos años, los biocombustibles han adquirido gran importancia global debido a la creciente demanda por los productos sustentables y la preocupación por los crecientes índices en las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido es importante para Costa Rica cuantificar cuál es el impacto ambiental real que tiene la generación de biodiesel a partir de aceites usados, tomando como referencia los datos de producción de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica ya que es la principal empresa productora de biodiesel a nivel nacional

III. INTRODUCCIÓN

a. Problemática ambiental asociada a los combustibles fósiles

La demanda de combustible en el sector de transporte ha alcanzado volúmenes tan grandes en casi todos los países del mundo que sus emisiones, causantes del efecto invernadero, se han convertido en uno de los principales problemas ambientales de la actualidad (CIEMAT, 2006). El sector transporte es responsable del 66 % del consumo de hidrocarburos y del 54% de las emisiones de CO₂ de Costa Rica. La principal contribución de emisiones de CO₂ del sector transporte de Costa Rica la realizan los vehículos particulares con un 41 % del total, seguido en orden de importancia por el transporte tanto de carga liviana como pesada, motocicletas, autobuses de servicios especiales, equipo especial y transporte público (MINAE -Plan Nacional de Energía 2015).

Por esta razón, además del agotamiento de los combustibles fósiles y el incumplimiento de los compromisos de reducciones de CO₂, nace la necesidad de minimizar el consumo de energía primaria y fortalecer el desarrollo de fuentes energéticas renovables (Avellaneda, 2010).

Uno de los principales retos ambientales a los que se enfrentan los países es el compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Hoy en día la introducción de biocombustibles en el sector del transporte es una de las medidas activas para continuar avanzando con el compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asumido mundialmente por el Protocolo de Kyoto 2005. Estas acciones se seguirán promoviendo dentro de la negociación del Acuerdo de París que se realizó en diciembre del 2015. Este acuerdo será una etapa clave en los esfuerzos que lleva a cabo la humanidad para mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C por el bien del planeta y las personas (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

b. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero, o gases de invernadero, son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes (López, 2007).

En la atmósfera de la Tierra existen una gran cantidad y variedad de gases de efecto invernadero directo e indirecto (precursores). En el Protocolo de Kioto se consideraron las emisiones de siete gases de efecto invernadero:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido nitroso (N_2O)
- Hidrofluorocarburos (HFC)
- Perfluorocarburos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF_6)
- Trifluoruro de nitrógeno (NF_3)

c. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su siglas en inglés, Intergovernmental Panel on Climate Change) se creó en 1988 con la finalidad de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

La principal misión del IPCC es proveer evaluaciones científicas comprensivas sobre las informaciones científicas, técnicas y socioeconómicas actuales relacionadas con el riesgo de cambio climático provocado por la actividad humana, sus potenciales

consecuencias medioambientales y socioeconómicas, y las posibles opciones para adaptarse a esas consecuencias o mitigar sus efectos (IPCC, 2016).

d. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés, Environmental Protection Agency) se dedica a resguardar la salud de los seres humanos, el medio ambiente y los recursos naturales (EPA, 2016).

La EPA busca prevenir y controlar la contaminación del aire y el agua mediante el desarrollo de estándares para la calidad del aire y las emisiones de vehículos, programas para asegurar la limpieza del agua e información sobre la salud ambiental. La EPA recopila varios tipos de bases de datos de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos datos ayudan a las personas que formulan las políticas, a negocios y a la agencia a monitorizar las tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como, a identificar oportunidades para reducir las emisiones y aumentar la eficiencia de los procesos (EPA, 2016).

e. Origen del biodiesel

En 1911 cuando el ingeniero alemán Rudolf Diesel (1858-1913), inventor tanto del combustible como del motor de combustión interna que llevan su apellido, predijo que "hoy en día puede considerarse insignificante el empleo de aceites vegetales como combustible para motores, pero con el paso del tiempo estos aceites pueden llegar a ser tan importantes como lo son el petróleo y el carbón en la actualidad" (Murugesan, 2009).

Según la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, se define biodiesel como ésteres metílicos, producidos a partir de un aceite vegetal o animal, de calidad similar al gasóleo, para su uso como biocombustible. Hoy en día el biodiesel es un combustible alternativo de

combustión limpia hecho con grasa o aceite (como el de soya o de palma) que se ha sometido a un proceso químico para extraerle la glicerina y otros productos secundarios (Directiva 2009/28/CE).

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM American Society for Testing and Materials) define el biodiesel como “un éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, tales como aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores diesel” El biodiesel se presenta en estado líquido y se obtiene a partir de recursos renovables como aceites vegetales de soya, colza/canola, girasol, palma y otros, como así también de grasas animales, a través del proceso de transesterificación (ASTM, 2009).

Para que sean una alternativa energética real, es necesario que los procesos de obtención consuman menos energía que la que producen en la combustión, y que lleguen al mercado a un costo similar al de los productos derivados del petróleo que van a sustituir (CIEMAT, 2006).

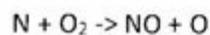
f. La producción de biodiesel a partir de aceites usados.

Flavin (2008) señala que la expansión de las áreas usadas para producir la materia prima para los biocombustibles, podría generar grandes cantidades de CO₂ del suelo y de la biomasa existente. Tales emisiones contrarrestarían en consecuencia, las ventajas presentadas por los biocombustibles en relación con su balance de gases invernaderos (Flavin, 2008).

Según Flavin (2008), de acuerdo con los resultados de estos estudios existen casos en los cuales es posible que la producción de los biocombustibles produzca cantidades de CO₂ aún mayores a las que se busca evitar durante su consumo. Esto ocurriría como consecuencia de convertir hábitats naturales en cultivos energéticos, e incluso donde se convierten cultivos alimenticios existentes en cultivos energéticos, y se expande al

mismo tiempo el área cultivada para producir los alimentos en otros lugares (Flavin, 2008).

El componente mayoritario de la atmosfera es el N_2 , gas muy inerte, pero por acción de la combustión del biodiesel puede reaccionar con el O_2 atmosférico produciendo diversas especies oxidadas en las zonas de alta temperatura, de acuerdo con las siguientes ecuaciones que involucran al mecanismo Zeldovich (Yang, 2012).



Especialmente la primera de estas reacciones es altamente dependiente de la temperatura y el tiempo de residencia. Las zonas de alta temperatura de una llama son por lo tanto centros en los que se favorecerá la formación de óxidos de nitrógeno, con ayuda de un tercer elemento catalizador. Las emisiones de N_2O surgen por el alto punto de inflamación del biodiesel (100 – 170) °C, el cual promueve la oxidación del nitrógeno atmosférico, situación que no ocurre en comparación con el punto de inflamación del diesel de petróleo (60 – 80) °C.

En el Reporte Obligatorio Anual de la EPA en el año 2013 “Factores de emisión revisados para determinados combustibles: Federal Register” se indica que por cada galón de biodiesel quemado se emiten 0,01 g de N_2O (EPA, 2013). Esto significa que la combustión de biodiesel presenta una huella de carbono superior a cero: en el Sistema Internacional corresponde a 0,0026 g de N_2O por litro de biodiesel, o sea 0,78 g CO_2eq . Existen alternativas en la producción de biocombustibles que ofrecen soluciones a problemas sociales y ambientales como, por ejemplo, la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados. Estos aceites suelen ser vertidos en las redes cloacales y desagües pluviales produciendo altos niveles de contaminación. Esta

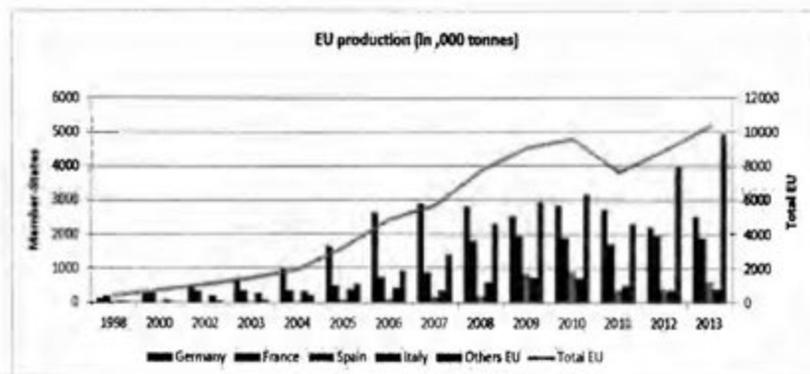
situación es más grave en locales de comida que utilizan grandes cantidades de aceite en sus cocinas (Garrido, 2010).

El aprovechamiento de estos desechos para producir combustibles puede resolver varios problemas a la vez:

- Permite reducir la contaminación que genera el vertido de estos residuos en las cloacas y los desagües pluviales.
- Permite reducir las emisiones de CO₂ con el uso del biodiesel.
- Ofrece una actividad económica alternativa relacionada con la recolección del aceite vegetal usado y con su procesamiento posterior (Garrido, 2010).

Para promover la producción de biodiesel en la Unión Europea se crea en 1997 la Junta Europea de Biodiesel (EBB European Biodiesel Board). La EBB es una organización sin fines de lucro que agrupa los principales productores de biodiesel de esa región. La Figura1 muestra la producción de biodiesel de los países de la comunidad europea entre los años de 1998 y 2013, de acuerdo con los datos recogidos por EBB (EBB, 2013).

Figura 1.- Producción de biodiesel en la Unión Europea para los años 1998 a 2013



En la Figura 1 se puede observar, que Alemania ha sido el mayor productor de biodiesel, seguido por Francia, España e Italia. Según la Figura1, a partir del 2007 se

aprecia un crecimiento significativo en la producción de biodiesel dentro de la comunidad europea.

En la actualidad existe una experiencia importante a destacar en Costa Rica, y es la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica. Esta empresa entró en operación a partir del mes de setiembre de 2006. Su planta de producción de biodiesel tiene la capacidad de producir hasta 36 000 metros cúbicos anuales de biodiesel a partir de aceite usado de restaurantes, casas de habitación y de cualquier otra oleaginosa que el mercado tenga disponible. Actualmente, la planta produce entre 5 000 y 6 000 metros cúbicos anuales (Programa Nacional de Biocombustibles, 2008).

La Tabla 2 muestra la capacidad instalada para la producción de biodiesel en Costa Rica.

Tabla 2.- Principales empresas productores de biodiesel en Costa Rica.

Nombre de la compañía	Lugar	Capacidad m ³ /año	Materia prima
Energías Biodegradables de Costa Rica	Ochomogo, Cartago	36 000	Aceite palma, soya y recuperado
Diesel Verde S.A.	Centro, Alajuela	1 900	Aceite palma y recuperados
Biodiesel H&M	San Carlos, Alajuela	1 200	Grasa animal
Coopvectoría R.L.	Grecia, Alajuela	1 000	Aceite recuperado

Fuente: Esquivel (2008) y Vindas (2014).

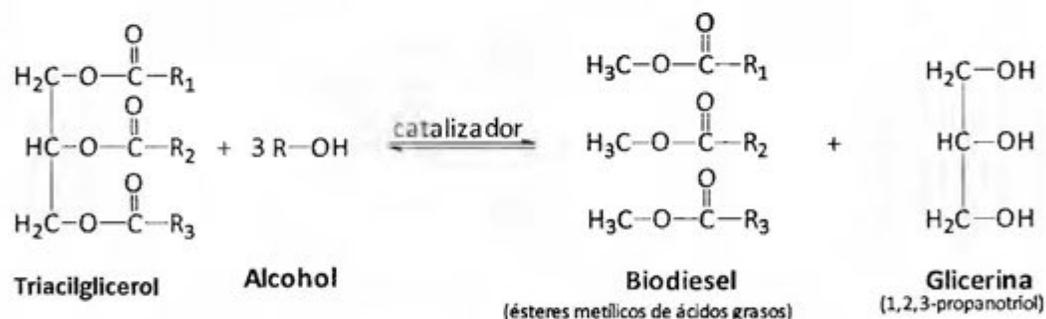
El cliente principal de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica, es la empresa Consorcio Operativo Del Este S.A. (COESA), la cual brinda el servicio de transporte público. El Consorcio opera actualmente con 136 unidades y representa el 58% del transporte público del sector este del área metropolitana, ya que administra unidades en Zapote, Sabanilla, Curridabat y Tres Ríos Montes de Oca.

g. Métodos de obtención del biodiesel.

Hay cuatro formas principales de transformación de aceites a combustibles para motores: el uso directo de aceites y mezcla de los mismos con gasóleo, micro-emulsiones, craqueo térmico y transesterificación. Es importante destacar que solo en el último caso (transesterificación) se obtiene un verdadero biodiesel. Es el método más económico a temperatura y presión atmosférica y permite obtener una conversión hasta del 90%.

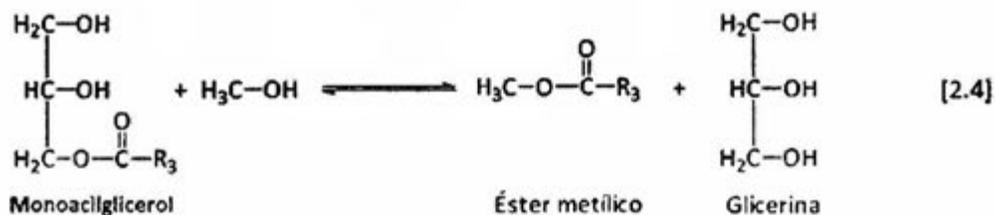
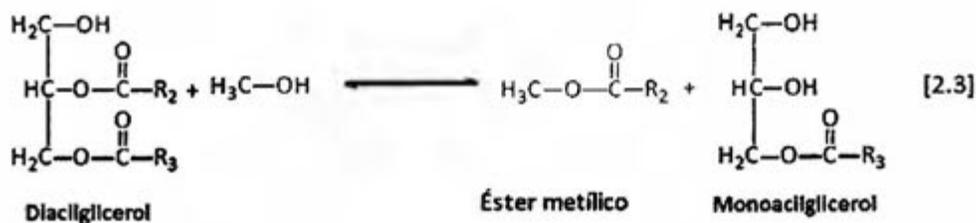
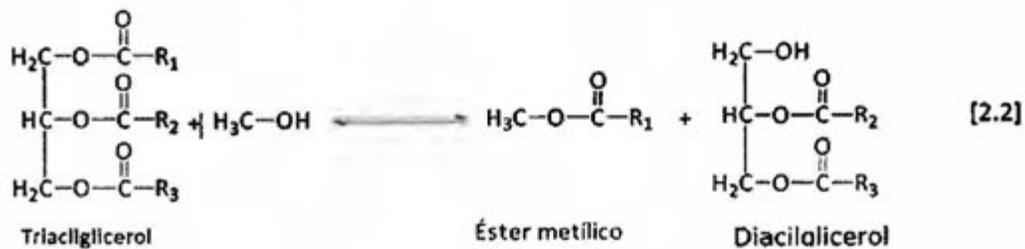
En la reacción de transesterificación de un aceite o grasa animal, los triacilgliceroles reaccionan con un alcohol, generalmente metanol o etanol, produciendo ésteres (biodiesel) y glicerina, tal como se muestra en la ecuación (Figura 2.1). Para que la reacción transcurra a una velocidad adecuada, es necesaria la presencia de un catalizador en el medio (Marchetti, 2007).

Figura 2.1.- Reacción de transesterificación



El proceso global implica una secuencia de tres reacciones reversibles en serie consecutivas (ecuaciones Figura 2.2).

Figura 2.2.- Secuencias de la reacción de transesterificación



En la reacción de transesterificación, un mol de triacilglicerol se combina con tres moles de un alcohol para formar un mol de glicerol y tres moles de ésteres de ácidos grasos. El proceso consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles, en las que una molécula de triacilglicerol se convierte paso a paso en un diacilglicerol, monoacilglicerol y glicerina (Rodríguez, 2012).

Cuando la materia prima (aceite reusado o aceite virgen) presenta alta acidez, los ácidos grasos libres (AGL) se pueden transformar en jabones en presencia de soluciones básicas y causar bajo rendimiento de reacción. Para aumentar la eficiencia de la reacción, se aplica una reacción de esterificación, la cual consiste en una catálisis ácida en presencia de un alcohol (metanol) como reactivo en exceso, se recomienda hacer la reacción de esterificación antes de la transesterificación. Se producen dos reacciones en la esterificación: por un lado, los ácidos grasos libres se transforman en

metil ésteres y agua; por otro lado, los triacilglicéridos se transforman en metil ésteres y glicerina. La ventaja de estas reacciones (esterificación y transesterificación) es que los dos productos, glicerina y éster metílico son inmiscibles entre sí, y por lo tanto forman dos fases lo cual favorece la separación de los productos.

La alternativa de producir biodiesel a partir de aceites reusados de origen vegetal, enriquece aún más los alcances positivos de la producción y uso del biodiesel como biocombustible, también se han considerado los impactos negativos de la producción, conversión y transporte del combustible, se han desarrollado propuestas para evaluar los riesgos ecológicos del biodiesel y del diesel convencional. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ que se producen, al provenir de un carbono retirado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico (biomasa), no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto no incrementan el efecto invernadero (IPCC, 2013) y (Iriarte, 2012).

De acuerdo con la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo, se indicó que el uso de aceites usados (desechos orgánicos) contribuye certeramente a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera cuando se utilizan como biocombustible. En la Tabla 3 se presentan diferentes formas de biomasa, y pone de manifiesto el grado de error potencial en las distintas fuentes de biomasa, la bioenergía reduce las emisiones de efecto invernadero solo si el crecimiento y la recolección de la biomasa es menor al carbono total secuestrado por la planta, compensando así las emisiones del uso de energía. (Searchinger, 2009).

Tabla 3.- Diversas fuentes de biomasa y posibles grados de error de contabilización

Fuente de biomasa	Grado de error
Conversión de bosques que actualmente capturan carbono en cosechas para bioenergía	Muy alto
Cosecha de árboles vivos para bioenergía, permitiendo la reforestación	Alto
Cosechas para bioenergía en cultivo de tierras que de lo contrario serían altamente productivas para la agricultura.	Alto
Uso de residuos de cosechas	Variable
Plantación de cosechas de alta producción en praderas invasivas no utilizadas	Bajo
Uso de desechos orgánicos que de lo contrario se depositarían en vertederos	Escaso o nulo

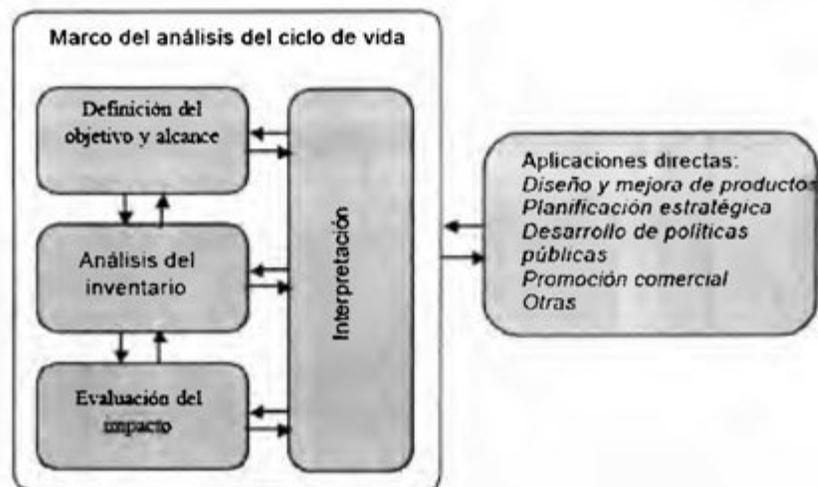
Fuente: Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo (2009)

h. Análisis del Ciclo de Vida

El ACV es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo. Se puede usar el enfoque de la metodología del ACV contenido en la norma ISO 14044, para determinar la huella de carbono de un producto calculando los gases de efecto invernadero desde el inicio de la producción hasta su uso final (ISO 14044:2007; Blengini, 2009; Bravo, 2009; Ávila, 2010).

Esta metodología considera el ciclo de vida total desde la extracción de las materias primas, síntesis, producción, transporte, uso y disposición final. El uso de recursos naturales escasos, la posibilidad de reciclaje y/o la recuperación parcial de la energía en la incineración de residuos/basura desempeñan papel determinante en la evaluación del ciclo de vida del producto (ISO 14044:2007). Las etapas que componen el ACV son las que se presentan en la Figura 3.

Figura 3.- Etapas del ACV según la norma ISO 14044:2007



Fuente: Norma ISO 14044:2007

La norma ISO-14044:2007 en combinación con la norma la ISO-14067:2015, logran un enfoque del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de un producto (HCP), con base en Normas Internacionales sobre el análisis del ciclo de vida para la cuantificación (INTE/ISO 14040 e INTE/ISO 14044).

La Norma ISO 14044:2007 detalla los requisitos para desarrollar eficazmente la metodología del Análisis del Ciclo de Vida, dichos requisitos están contemplados en las siguientes fases:

i. Fase de la definición del objetivo y el alcance (ACV).

Según la Figura 3, la primera fase es la definición de objetivos y alcance del estudio, donde se definen la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio, el público previsto y el ámbito del estudio; en el alcance se define, entre otras cosas, la unidad funcional, además se debe garantizar la calidad de los datos (Ihobe, 2009; ISO 14044:2007).

ii. Fase del análisis del inventario (ICV).

La segunda fase es el Inventario de Ciclo de Vida (ICV), el cual se expresa mediante un diagrama de flujo donde aparecen todas las etapas del proceso y se resuelven los balances de materia y energía del sistema en estudio que da lugar a las diferentes cargas ambientales (Ihobe 2009, ISO 14040:2006).

Las etapas a seguir para la contabilidad del inventario del ciclo de vida son:

- *Establecer el diagrama de flujo del proceso:* Se deben considerar las etapas principales, para luego continuar agregando las etapas secundarias, previas y posteriores a los módulos centrales. Es importante que aquellas etapas secundarias de las cuales no se tenga una completa o adecuada información, queden debidamente establecidas para una posterior revisión (Ihobe, 2009; Lockwood, 2006).

- *Recolección de los datos:* se recolectan los datos para cada proceso que se incluye en el estudio. Los datos para cada operación unitaria dentro de los límites del sistema pueden clasificarse bajo grandes títulos que incluyen:
 - Las entradas de energía, de materia prima, entradas auxiliares, entre otras
 - Los productos, coproductos y residuos
 - Las emisiones al aire, los vertidos al agua y al suelo.

La recolección de datos es la etapa más intensiva en materia de recursos. Las limitaciones prácticas en la recolección de datos deberían tenerse en cuenta en el alcance y documentarse en el informe del estudio. La asignación de flujos, de emisiones y vertidos es importante clasificarlos correctamente, ya que en pocos procesos industriales producen una salida única o están basados en una relación lineal entre las entradas y las salidas de materias primas. Por lo contrario, es común que se produzca más de un producto y se reciclen los residuos de productos con el fin de ser más eficientes y proporcionar menor impacto ambiental (Ihobe, 2009; Pasqualino, 2009).

- *Perfeccionar o depurar los límites del sistema:* luego de la recolección inicial de datos, se deben revisar los límites del sistema previamente especificados, ya que se pueden redefinir. Por ejemplo, la exclusión de determinados procesos del producto o subsistemas, exclusiones de flujos de materiales o inclusiones de nuevas unidades de procesos que tendrán efectos directos sobre el análisis (ISO 14044:2007).
- *Procesamiento de datos:* En esta fase se deben procesar y almacenar los datos en forma adecuada para obtener resultados. Se puede realizar de forma sencilla en una hoja de cálculo o en programas especialmente diseñados para ACV. Los procedimientos de cálculo que se incluyen son:
 - La validación de los datos recopilados.
 - La relación de los datos con los procesos unitarios
 - La relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional.

Estos procedimientos de cálculo son necesarios para generar los resultados del inventario del sistema definido para cada proceso unitario y para la unidad funcional definida del sistema del producto que se va a modelar. Por ejemplo, se pueden transformar entradas de combustibles fósiles en entradas de energía multiplicando por el calor de combustión de la sustancia; también se pueden transformar las entradas de combustibles en emisiones de CO₂ con su correspondiente factor de emisión. Todas las entradas y salidas deben asignarse a una operación unitaria (ISO 14044:2007).

Los elementos que se incorporan dentro del ACV, comúnmente se conocen como entradas/salidas:

- Entradas: uso de recursos y materias primas, partes, transporte, electricidad, energía etc., que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema.
- Salidas: emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residuos y los productos y subproductos que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema.

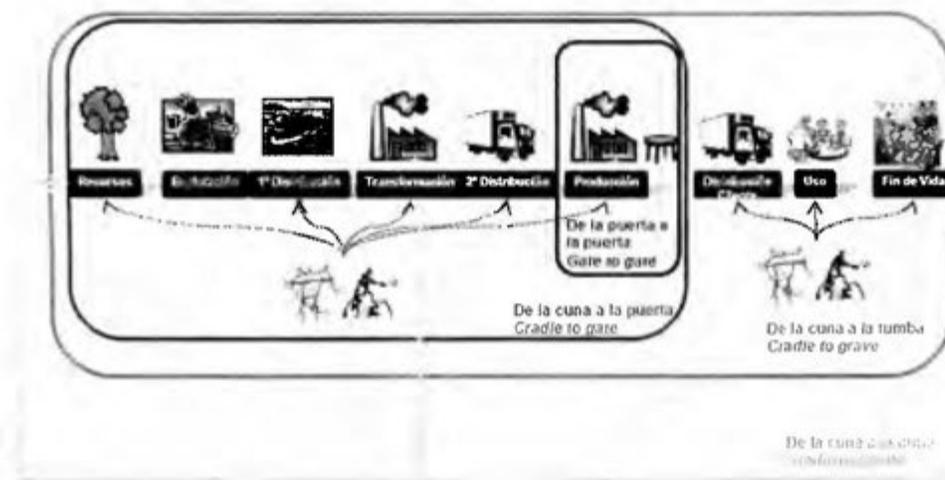
La manera y forma en la que se recopilan estas entradas/salidas se conoce como *Inventario de Ciclo de Vida ICV*, es la fase del ACV que implica la recopilación y la cuantificación de entradas/salidas de un sistema durante su ciclo de vida. En las Figuras 4 y 5 se describe los elementos que deben tomarse en cuenta dentro de un ACV de un producto, es importante incluir todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesado de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente.

Figura 4.- Fases del Análisis del Ciclo de Vida (Ihobe, 2009).



A este tipo de ciclo de vida se le denomina comúnmente "de la cuna a la tumba" (Ihobe, 2009).

Figura 5.- Esquema terminología relacionada con el alcance de un ACV



iii. Fase de la Evaluación del Impacto Ciclo de Vida (EICV)

Es la fase del ACV dirigida a conocer el significado y evaluar la magnitud de los impactos ambientales potenciales de un sistema. Esta fase tiene como propósito determinar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados ICV. En general, este proceso implica la asociación de los datos del inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías para entender dichos impactos (Aranda, 2006). Estos son algunos ejemplos de Categorías de Impactos Ambientales asociados al Ciclo de Vida de productos y servicios:

- Impactos sobre los recursos renovables
- Impactos sobre los recursos no-renovables
- Potencial de calentamiento global (Huella de carbono)
- Potencial de deterioro de la capa de ozono
- Potencial de acidificación
- Potencial de creación foto-química de ozono
- Uso de energía
- Uso de agua

iv. Fase de la interpretación de datos.

La interpretación es la fase del ACV, en la cual los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impacto se consideran juntos. La fase de interpretación debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance definido, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones (Yang, 2011; ISO 14044:2007, Herrera, 2011).

La interpretación deberá reflejar el hecho de que los resultados de la EICV están basados en un enfoque relativo, indican efectos ambientales potenciales, no predicen los impactos reales en los puntos finales de categoría, ni se sobrepasan los umbrales, los márgenes de seguridad ni los riesgos.

Los hallazgos de esta interpretación pueden dar como resultado conclusiones y recomendaciones para quienes toman decisiones coherentes con el objetivo y alcance del estudio.

La interpretación del ciclo de vida intenta ofrecer una lectura comprensible, completa y coherente de la presentación de los resultados de un ACV, de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance del estudio (ISO 14044:2007; Ortega, 2013).

El ACV es importante porque contribuye con:

- La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- La aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el diseño y rediseño de productos o procesos)
- La selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición.
- La mercadotecnia, por ejemplo, para implementar un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental o una declaración ambiental del producto en cuestión (Ihobe, 2009; ISO 14044:2007).

Análisis estadístico multivariado aplicado.

La técnica de análisis estadístico multivariado de datos se ha convertido en una estrategia útil en el procesamiento de grandes volúmenes de datos en el sector industrial (Díaz, 2013).

La regresión lineal múltiple es un modelo estadístico multivariado aplicado, donde el análisis de datos permite evaluar múltiples variables simultáneamente, con el propósito de estudiar la posible relación entre varias variables independientes o explicativas y otra variable dependiente (respuesta) (Díaz, 2013).

Mediante un modelo de regresión lineal múltiple (MRLM) se intenta explicar el comportamiento de una determinada variable que se denomina variable a explicar, variable endógena o variable dependiente; en función de un conjunto de variables explicativas X_1, X_2, \dots, X_k (Kyzis, 2007).

El modelo de regresión lineal múltiple es idéntico al modelo de regresión lineal simple, con la única diferencia de que aparecen más variables explicativas:

Modelo de regresión simple:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + u$$

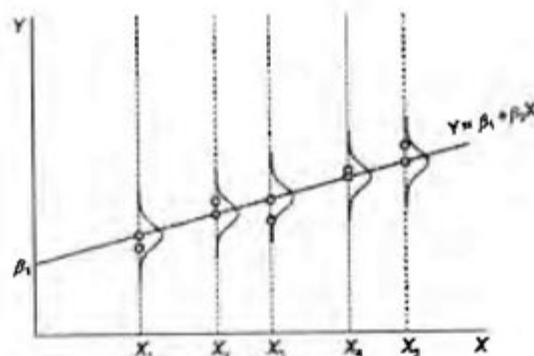
Modelo de regresión múltiple:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_k \cdot x_k + u$$

Para determinar el modelo anterior, es necesario estimar el valor de los coeficientes b_1, b_2, \dots, b_k . Al igual que en regresión lineal simple, los coeficientes b van a indicar el incremento correspondiente de la variable explicativa. Por lo tanto, estos coeficientes van a tener las correspondientes unidades de medida (Gujarati, 2006). La regresión lineal múltiple debe cumplir con los requerimientos de la hipótesis sobre las variables explicativas, tal y como se describen a continuación (Kyzis, 2007):

- Las variables explicativas no presentan relación lineal exacta entre sí.
- Se supone que las variables explicativas son medidas sin error.
- *Normalidad*: La validez del modelo requiere que los residuos de las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los realmente observados en la variable dependiente, se distribuyan de modo normal y con la misma dispersión para cada combinación de valores de las variables independientes.
- *Homocedasticidad*: Hipótesis donde se supone que la variable se distribuye con igual varianza en cualquiera de las estimaciones hechas mediante el modelo. En otras palabras, la varianza de los errores es constante (Mahía, 2010). La importancia del análisis de homocedasticidad (varianzas iguales), o su opuesto, heterocedasticidad (varianzas diferentes), es máxima en el análisis de la bondad de ajuste. El no cumplimiento de esta propiedad podría causar que las conclusiones que se extraigan del modelo sean imprecisas. Por ejemplo, en la Figura 6 se representa una recta de regresión sobre un gráfico de dispersión X/Y, donde los puntos grises son los puntos poblacionales. Los puntos azules representan los datos muestrales extraídos de las poblaciones (Mahía, 2010). La varianza entre los puntos azules y los puntos grises para un valor X, son aceptables dentro del rango de tolerancia, por lo cual se puede inferir que en la gráfica de la Figura 6 existe homocedasticidad.

Figura 6.- Ejemplo de homocedasticidad en gráfico de dispersión.



Fuente: Mahía (2010)

Finalmente si logra combinar el análisis estadístico multivariado con los datos obtenidos en el inventario, se podrá lograr predecir los impactos ambientales de acuerdo con variables de gestión del departamento de producción.

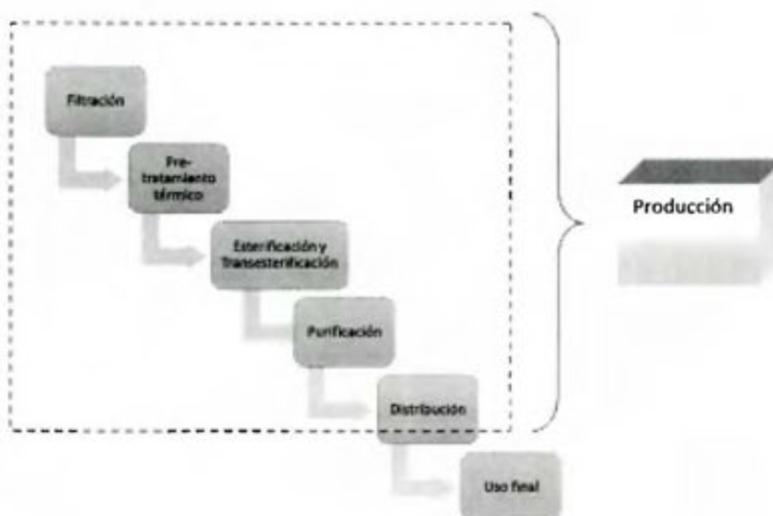
IV. METODOLOGÍA

El desarrollo de este estudio se realizó con base en la norma INTE ISO 14044:2007, la cual proporciona los requisitos y directrices para el Análisis de Ciclo de Vida. De acuerdo con la normativa se definieron las siguientes etapas.

- a) **Definición del objetivo:** cuantificar la huella de carbono dentro de la cadena productiva del biodiesel que es generado a partir del aceite reusado de cocina, en la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica, e identificar las etapas del proceso productivo y uso final que más contribuyen con los gases de efecto invernadero.
- b) Definición del alcance

b.1) Sistema del producto bajo estudio: El sistema bajo estudio fue la producción y uso final del biodiesel obtenido a partir de aceites reusados, inicialmente mediante esterificación en medio ácido. Posteriormente transesterificación en medio alcalino y finalmente su uso en la flota de buses de COESA. A continuación, se muestra el esquema de los procesos unitarios dentro del sistema bajo estudio (Figura 7).

Figura 7.- Esquema de los procesos involucrados en el sistema bajo estudio.



b.2) Funciones del sistema bajo estudio: El sistema bajo estudio cumple con la función de brindar combustible para los buses del Consorcio Operativo del Este S.A. que administra unidades en Zapote, Sabanilla, Curridabat y Tres Ríos que trabajen con motores diesel, sin necesidad de ser modificados.

b.3) Unidad funcional: Se estableció usar como unidad funcional la cantidad anual de litros producidos y consumidos de biodiesel (L / año).

b.4) Límites del sistema: Los límites del sistema comprenden el proceso desde el ingreso de la materia prima aceites reusados de cocina, pasando por la conversión a biodiesel, el transporte a los predios de los transportistas, y finalmente su uso por la flota de buses de COESA.

Criterios de corte para el proceso: En el presente estudio no se aplicaron criterios de corte en ningún proceso unitario con el objetivo de reflejar en detalle el impacto de transformación química, distribución y uso final del biodiesel para analizar minuciosamente los gases de efecto invernadero de dicho proceso y poder establecer conclusiones y propuestas de mejora.

Criterios de corte geográficos: El estudio tiene validez únicamente para el consumo del biodiesel usado por COESA.

Criterios de corte temporales: Producción y consumo de biodiesel para el período comprendido entre el año 2013 hasta el año 2015.

Etapas excluidas del análisis. Para este estudio, las cargas ambientales relativas a la producción de la maquinaria, infraestructura necesaria para la producción y los residuos en la trampa de grasa se han excluido del análisis porque su contribución al balance global es muy pequeña, menor al 1% (CIEMAT, 2006).

b.5) Reglas de asignación: siguiendo la jerarquía de métodos de asignación detallada en la norma INTE ISO 14044:2007 se debe aplicar el método de balance de masa. Este método consiste en tomar todas las entradas que de manera acumulativa permitan balances de masa en cada una de las operaciones unitarias correspondientes.

También hay que tomar como parámetro relevante para realizar la asignación de las cargas ambientales la cantidad producida de cada co-producto (glicerina) en el momento en el que se separan del sistema.

b.6) Tipos de impacto y metodología de evaluación: Se evaluó únicamente la categoría de impacto ambiental de cambio climático para lo cual se utilizó como unidad de medida kg CO₂eq.

b.7) Tipos y fuentes de datos: Los datos del ACV se obtuvieron a partir de entrevistas a la gerente de producción y al encargado de producción de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica, por lo tanto, los datos son primarios y están relacionados directamente con los procesos unitarios definidos en los límites del sistema.

También se utilizaron fuentes secundarias como referencias bibliográficas y los datos que se solicitaron a entidades nacionales como Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y la EPA. Los requisitos de la calidad de los datos que se utilizaron en el estudio consideran los siguientes elementos (IMN, 2015):

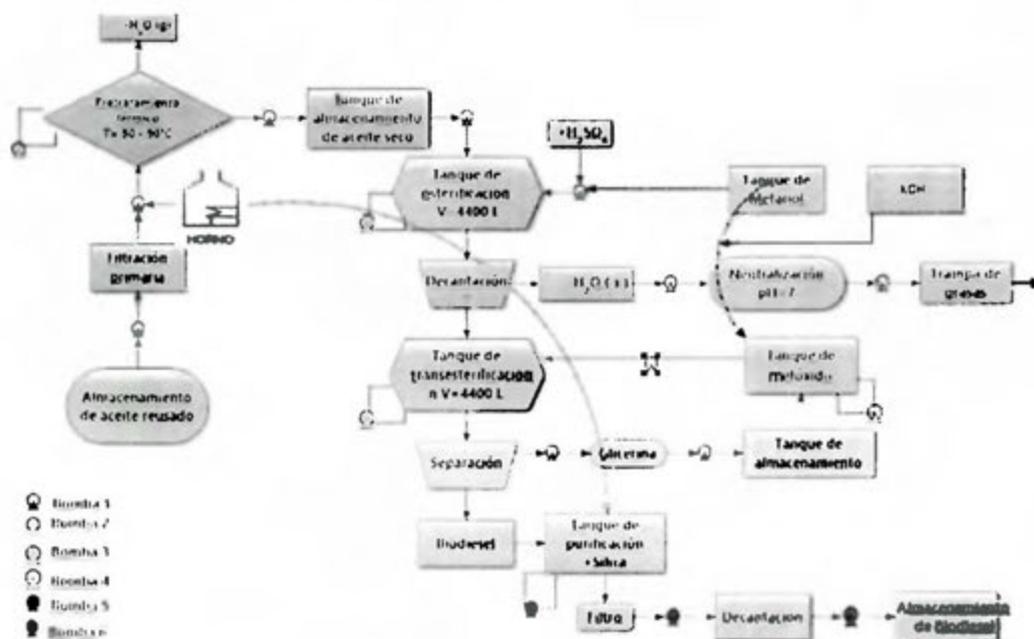
- **Tiempo:** La antigüedad de los datos fue desde el año 2013 hasta el 2015.
- **Geografía:** Los datos de producción se recolectaron en la planta de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica en Ochomogo, Cartago y los datos de emisiones correspondientes al uso final del biodiesel se registraron en las unidades de buses de COESA.

- Integridad: Los flujos se expresaron en función de $\text{kg CO}_2\text{e/ L}$ de biodiesel que corresponde a la unidad funcional que se utilizó en el estudio.

c) Descripción Del Flujo De Proceso

Como etapa de preparación para la recopilación de los datos, se realizó una descripción detallada del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites usados (Figura 8).

Figura 8.- Diagrama de flujo de proceso del biodiesel.



c.1) Primera etapa: Filtración

El primer paso en este proceso es la recepción del aceite usado el cual se filtra por medio de un tamiz primario para eliminar la materia orgánica gruesa y se trasiega hacia un contenedor de 500 L. El residuo orgánico se entrega a la empresa Biofutura que es una micro-empresa nacional del sector de agro-industria, dedicada a la recuperación y transformación de diversas formas de biomasa, especialmente la recuperación y valorización de residuos orgánicos a nivel urbano para su aprovechamiento en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el desarrollo de nuevos productos como el abono orgánico EM-Compost.

c.2) Segunda etapa: Pre-tratamiento térmico

Se traslada el aceite filtrado hacia el tanque de calentamiento por medio de la bomba 1 (bomba móvil), donde se realiza una premezcla de distintos lotes de aceites filtrados, se precalienta a 60 °C mientras se aplica un reciclo a través de la bomba 2 (Figura 8), para inducir mayor efecto de convección calórica sobre la mezcla, y así eliminar la mayor cantidad de agua en el sistema. La temperatura se aumenta gradualmente hasta llegar a 80 °C. Finalmente se realiza un control de calidad al aceite "seco" pretratado donde se fijan dos parámetros de calidad para aprobar el aceite seco.

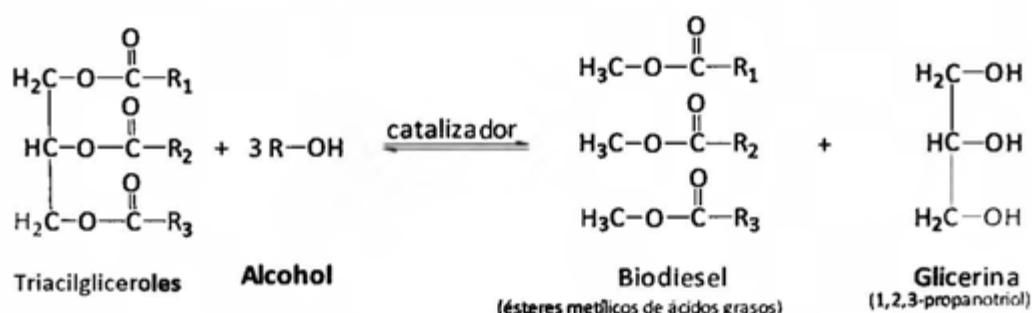
- ❖ Humedad relativa < 0,20 %
- ❖ Ácidos grasos libres (AGL) < 3,80 %

c.3) Tercera etapa: Etapa de esterificación y transesterificación

Se bombea el aceite "seco" por medio de la bomba 1 (móvil) hacia el reactor donde ocurre la esterificación y la transesterificación, en la primera reacción se hace reaccionar el aceite "seco" con ácido sulfúrico y metanol (Figura 8). En esta etapa se transforman los ácidos grasos libres en ésteres metílicos; para mejorar el rendimiento de la reacción se aplica una recirculación con la bomba 3 (recirculación esterificación). Luego se decanta la fase acuosa formada con sobrante de ácido sulfúrico, se neutraliza y se drena hacia una trampa de grasas.

El aceite esterificado que está dispuesto dentro del reactor se hace reaccionar con metóxido de potasio formado en el tanque correspondiente, producto de la reacción entre hidróxido de potasio (KOH) y metanol (CH₃OH). Para ello se bombea el metóxido desde su tanque hacia el reactor a través de la bomba 4 donde se realiza el proceso de transesterificación (Figura 9).

Figura 9.- Reacción general del biodiesel.



El biodiesel formado es un compuesto no polar, por lo tanto no se mezcla con el metóxido sobrante y con la glicerina formada. En este paso final es donde el monoacilglicerol, diacilglicerol y los jabones dificultan la separación del producto.

c.4) Cuarta etapa: Purificación

En esta etapa se separa la fase de glicerina por decantación, se traslada a través de la bomba 1 (móvil) hacia el tanque de almacenamiento de la glicerina (Figura 8). El biodiesel en el reactor, se traslada por medio de bombeo hacia el tanque de purificación donde se mezcla con sílica y se calienta hasta 110 °C acompañado de una recirculación promovida por la bomba 5 (purificación) para eliminar monoacilgliceroles, diacilgliceroles, jabones, exceso de metóxido y agua. Posteriormente se filtra y se traslada por medio de la bomba 6 hacia el tanque de almacenamiento de biodiesel.

Es importante destacar que las bombas, desde la 1 hasta la 6, funcionan por electricidad y son bombas que fueron recuperadas y carecen de información técnica para su adecuada descripción. El calentamiento se logra a través del vapor generado por la caldera que funciona con biodiesel, dicha caldera cumple con los reportes operacionales de los últimos años.

V. RESULTADOS

- a) Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) para el proceso de producción y uso del biodiesel

Teniendo definido el objetivo y el alcance del sistema bajo estudio, se procede a la recopilación de los datos cualitativos y cuantitativos que se incluyen en el inventario del ACV. Estos datos se calculan para cada etapa dentro de los límites del sistema bajo estudio, con lo que se logra cuantificar las emisiones de GEI respectivas en cada etapa. A continuación, se describe como se recolectan los datos por etapa:

a.1) Producción del biodiesel

El proceso productivo descrito anteriormente, permite identificar cuáles son las principales fuentes de GEI dentro de la planta productiva de biodiesel (Tabla 4).

Tabla 4.- Lista de fuentes de GEI en producción del biodiesel.

Fuente de GEI	Tipo de dato
Bomba 1	Primario
Bomba 2	Primario
Metanol	Primario
Ácido sulfúrico H₂SO₄	Primario
Bomba 3	Primario
Bomba 4	Primario
Bomba 5	Primario
Bomba 6	Primario
Caldera (biodiesel)	Primario

La planta de producción de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica cuenta con un medidor eléctrico exclusivo para el área de producción, lo cual facilita el trabajo de rastrear los consumos eléctricos dentro de la planta durante el periodo 2013 hasta 2015. A continuación se detallan las fuentes de GEI:

- Bomba 1: se usa como bomba móvil en distintas etapas para trasegar producto de una etapa a otra.
- Bomba 2: se usa como bomba reciclo en el tanque de tratamiento térmico.
- Insumos de conversión: el metanol, el hidróxido de potasio y el ácido sulfúrico son insumos que se usan para la reacción de esterificación y transesterificación.
- Bomba 3: se usa como bomba reciclo en el reactor de esterificación y transesterificación.
- Bomba 4: se usa como bomba reciclo en el tanque de metóxido.
- Bomba 5: se usa como bomba de reciclo en el tanque de purificación.
- Bomba 6: se usa como bomba de trasiego hasta el tanque de almacenamiento de biodiesel terminado.
- Caldera (horno): funciona con biodiesel B100 opera 10 horas por día de lunes a viernes y 5 horas los días sábados con un caudal de 12,8 m³/min.

Debido a la falta de información técnica de las bombas en planta, se utiliza como método de asignación, el consumo energético para cada bomba de acuerdo con las horas operativas por periodo, esta información se recolectó y se analizó.

Tabla 5.- Asignación energética por bomba (h/mes)

Bomba	Filtración	Pretratamiento térmico	Esterificación – Transesterificación	Purificación	Trasiego final
1	3,4	6,87	6,87	6,87	0
2	0	60	0	0	0
3	0	0	110	0	0
4	0	0	18,32	0	0
5	0	0	0	120	0
6	0	0	0	0	20
Total /mes	3,4	66,9	135,2	126,9	20,0
Total /anual	40,8	802,4	1 622,4	1 522,8	240,0
Factor	0,01	0,19	0,38	0,36	0,06

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

En la Tabla 5 se utilizó un factor ponderado energético para cada bomba, el cual permitió designar el consumo proporcional en kilovatios-hora para cada etapa del proceso. Para ello se recopiló el consumo eléctrico desde el año 2013 hasta el año 2015 bajo el medidor trifásico # 200393 Este medidor contempla únicamente el consumo eléctrico de las 6 bombas eléctricas dentro de la planta de producción, se calculó el número de horas en operación de cada bomba eléctrica por jornada laboral y a su vez se totalizó el consumo de horas mensuales y anuales. De este modo, se obtuvo el factor ponderado energético dividiendo el número de horas por bomba entre el número total de horas de operación de todas las bombas que representan el consumo eléctrico reportado por el medidor trifásico #200393.

La empresa posee otro medidor que contempla las oficinas administrativas, las cuales están fuera del alcance de este estudio. Conforme a lo explicado se calculan los consumos eléctricos del proceso unitario (Tabla 6).

Tabla 6.- Consumo eléctrico por proceso unitario.

		Filtración	Pretratamiento térmico	Esterificación – Transesterificación	Purificación	Trasiego de producto terminado
Asignación por horas de operación		0,01	0,19	0,38	0,36	0,06
Año	Consumo anual (kwh)					
2013	5 964	60	1 133	2 266	2 147	358
2014	6 380	64	1 212	2 424	2 297	383
2015	7 074	71	1 344	2 688	2 547	424

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

Para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero en esta etapa productiva fue necesario conocer los factores de emisión por electricidad para cada año desde el 2013 hasta el 2015 (IMN, 2016).

Tabla 7.- Factores de emisión de electricidad.

Año	F.e. (kg CO ₂ eq/kWh)
2013	0,1300
2014	0,1170
2015	0,0381

Fuente: Instituto Metereológico Nacional.

Con los datos recolectados en las Tablas 5 y 6, y los factores de emisión reportados anualmente por el Instituto Metereológico Nacional IMN, se calcularon los GEI para cada una de las etapas del sistema bajo estudio..

a.1.1) Primera etapa: Filtración

Los resultados obtenidos de los GEI en la etapa de filtración, porque en esta etapa solo se usó la bomba 1. En la Tabla 8 se reportan los resultados obtenidos.

Tabla 8.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de filtración

Asignación	Filtración		
	0,01		
Año	kwh asignado	F.e. (kg CO ₂ eq/kWh)	kg CO ₂ eq
2013	60	0,1300	7,8
2014	64	0,1170	7,5
2015	71	0,0381	2,7

a.1.2) Segunda etapa: Pretratamiento térmico

En esta etapa se contabilizan las emisiones, donde se tomó en cuenta la emisión generada por el consumo eléctrico de la bomba 2 y la emisión generada por el uso del vapor producido por la caldera de biodiesel.

En cuanto a las emisiones GEI generadas por la caldera se usó la información recolectada en los reportes operacionales de la caldera que se realizan anualmente, donde se describe el consumo mensual promedio de litros de biodiesel (Tabla 9).

Tabla 9.- Flujo anual de GEI en la caldera.

Año	Consumo de biodiesel anual (L)	F.e (kg N ₂ O/L)	N ₂ O kg anual
2013	25 320	1,43E-05	0,36
2014	30 084	1,43E-05	0,43
2015	26 700	1,43E-05	0,38

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

Para calcular la cantidad de g N₂O se usó el factor de emisión publicado en las Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006).

En esta etapa no se contabilizan las emisiones de CO₂, de acuerdo a la De acuerdo con la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo, las emisiones de CO₂ generadas por la combustión del biodiesel no contribuyen a los inventarios de efecto invernadero ya que al provenir de la biomasa están son retornadas a la atmósfera en un ciclo corto (Directiva 2009/28/CE, 2009).

En el caso de la caldera trabaja con combustible biodiesel B100, por lo tanto, se considera que el 100% de las emisiones son atribuidas a la producción de biodiesel. El cálculo se realizó tomando en cuenta los factores de emisión de energía y el factor de

emisión de combustión estacionaria, los resultados se describen en la Tabla 10 y se determinaron de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{kg CO}_2\text{eq} = [\text{kWh} \times \text{f.e. (kg CO}_2\text{eq/kWh)}] + (\text{kg N}_2\text{O} \times \text{PCG N}_2\text{O})$$

Tabla 10.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de pretratamiento térmico.

Pretratamiento térmico				
Año	kWh asignado	F.e (kg CO ₂ eq/kWh)	N ₂ O kg anual	kg CO ₂ eq
2013	1 133	0,1300	0,36	259
2014	1 212	0,1170	0,43	275
2015	1 344	0,0381	0,38	169

a.1.3) Tercera etapa: Reacción de esterificación - transesterificación.

En esta etapa se toman en cuenta los volúmenes de los reactivos usados en ambas reacciones, específicamente se contabilizó anualmente el consumo de metanol y ácido sulfúrico únicamente, porque el hidróxido de potasio posee un factor de emisión igual a cero (ISCC, 2011). Como segunda fuente de emisión se calculó el consumo de energía eléctrica por parte de la bomba 1, bomba 2 y bomba 4 como emisiones indirectas de GEI.

Los factores de emisión que se usaron para los insumos reportados en la Tabla 11, se obtuvieron de la publicación del Instituto de Sostenibilidad y Certificación Internacional de Carbono "Metodología para el cálculo de emisiones de GEI y auditoría de GEI" (ISCC, 2011).

Tabla 11.- Datos anuales de los consumos reportados por producción.

	Insumos	Volumen (L)	Densidad (kg/L)	Masa (kg)	Factor de emisión kg CO ₂ eq /kg
2013	H ₂ SO ₄	2 569	1,84	4 727	0,21
	CH ₃ OH	102 551	0,79	81 221	1,25
	KOH	-	-	4 962	1,94
2014	H ₂ SO ₄	3 749	1,84	6 899	0,21
	CH ₃ OH	116 904	0,79	92 588	1,25
	KOH	-	-	5 587	1,94
2015	H ₂ SO ₄	2 980	1,84	5 483	0,21
	CH ₃ OH	99 909	0,79	80 117	1,25
	KOH	-	-	5 033	1,94

La lista se desarrolla conforme a la experiencia adquirida en una fase piloto de dos años de duración de ISCC y en una fase operativa en 2010. En la medida de lo posible, la lista se basa en el proyecto BioGrace, es un proyecto que tiene como objetivo concertar los cálculos de emisiones por gases de efecto invernadero por bioenergía en Europa (Sánchez, 2012). Con estos datos se calcularon las emisiones de GEI en unidades de CO₂e.

Tabla 12.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de esterificación y transesterificación.

Año	kg H ₂ SO ₄	F.e (kg CO ₂ eq/kg H ₂ SO ₄)	kg CH ₃ OH	F.e (kg CO ₂ eq/kg CH ₃ OH)	kg KOH	F.e (kg CO ₂ eq /kg KOH)	Kwh asignado	F.e (kg CO ₂ e/kWh)	Total kg CO ₂ eq biodiesel
2013	4 727	0,21	81 221,1	1,25	4 962	1,94	2 288,4	0,130	112 443
2014	6 899	0,21	92 588,0	1,25	5 587	1,94	2 448,1	0,117	128 311
2015	5 484	0,21	80 117	1,25	5 033	1,94	2 714,3	0,038	111 167

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

En esta etapa se calculó el balance de masa como método de asignación de GEI al biodiesel y productos secundarios, suponiendo que los triacilglicerolos presentes en los aceites que constituyen la materia prima están constituidos por 50 % trioleína y 50 % aceite de soya (Anexo A).

Los productos secundarios como monoacilglicerolos, diacilglicerolos y jabones se venden en conjunto con la glicerina ya que no hay procesos de separación o purificación en la planta para estos subproductos. En la trampa de grasa quedan residuos como consecuencia del lavado del equipo de la planta. El sólido acumulado en esa trampa se mezcla con aserrín y bacterias y se entierra en el jardín de la empresa. El líquido que fluye de la trampa de grasa va al servicio de alcantarillado y se convierte en responsabilidad de la Municipalidad de Cartago.

En la Tabla 13 se recopilan los datos y los cálculos relacionados con el porcentaje de conversión de la reacción en la producción de biodiesel por parte de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica.

Tabla 13.- Datos anuales de el volumen inicial de aceite reusado y el rendimiento de la reacción para producir biodiesel.

Año	Volumen inicial de aceite (L)	Volumen de producción de biodiesel (L)	Volumen de biodiesel estequimétrico (L)	Volumen de glicerina estequimétrico (L)	% Rendimiento de la reacción
2013	581 475	514 633	618 689	44 192	83
2014	668 693	542 470	711 489	50 821	76
2015	586 998	447 673	627 758	44 840	71

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

Se ideó una metodología para la asignación de las emisiones de GEI a la producción de biodiesel anual, la cual se fundamentó en el cálculo del rendimiento de la reacción

para cada año. Se contabilizaron los GEI totales y se multiplicó por el factor anual (el rendimiento de la reacción) para obtener los kilogramos de CO₂eq correspondientes exclusivamente al biodiesel y no a la glicerina obtenida como subproducto, dentro del sistema productivo (ISO: 14044:2006).

El rendimiento de producción de biodiesel del año 2015 fue bajo en comparación con los dos años anteriores, porque el contenido de ácidos grasos libres en los aceites reusados que se recibieron durante el año 2015, estaban en promedio por encima del 3%. Este último parámetro es de gran importancia para un buen rendimiento de reacción, según el estudio realizado por Hamze & Akia (2015) quienes optimizaron los parámetros de producción del biodiesel usando la metodología de superficie de respuesta en el año 2015, demostraron que los contenidos de ácidos grasos y de humedad son los parámetros determinantes de la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal. Para que se realice la reacción completa se necesita un valor de ácidos grasos libres, menor al 3%. Cuanta más alta es la acidez del aceite, menor es la conversión (Hamze *et al.*, 2015). Los datos del histórico de todos los valores de los parámetros de calidad están en anexos.

Tabla 14.- Resultado de la asignación de CO_{2e} para el biodiesel en la etapa de esterificación - transesterificación.

Año	Factor de asignación del biodiesel	Total kg CO _{2e}	Asignación kg CO _{2e} q biodiesel
2013	0,83	112 442	93 327
2014	0,76	128 311	97 516
2015	0,71	111 167	78 929

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

De esta manera se obtuvo la asignación de CO₂eq para el biodiesel producido en la etapa de esterificación y transesterificación. El Inventario del Ciclo de Vida se basó en los balances de materia para las entradas y salidas. Por lo tanto, los procedimientos de

asignación se aproximan lo más posible a estas relaciones fundamentales de entrada / salida conforme a lo establecido en la ISO 14044:2007

a.1.4) Cuarta etapa: Purificación del biodiesel

En esta etapa se toman en cuenta las emisiones de GEI aportadas por el consumo eléctrico de las bombas 5 y 6. El factor de asignación se calculó tomando el número de horas de operación de cada bomba eléctrica por jornada laboral, así mismo, se totaliza el consumo de horas mensuales y anuales. De este modo, se obtuvo el factor ponderado energético dividiendo el número de horas por bomba entre el número total de horas de operación de todas las bombas que representan el consumo eléctrico reportado por el medidor trifásico #200393. Los resultados se reportan en la Tabla 15.

Tabla 15.- Resultados obtenidos de GEI en la etapa de purificación

	Purificación		Trasiego de producto	
Asignación por horas de operación	0,36		0,06	
Año	kwh asignado	kg CO ₂ eq	kwh asignado	kg CO ₂ eq
2013	2 147,6	279,2	338,6	44,0
2014	2 297,4	268,8	362,2	42,4
2015	2 547,3	97,05	401,6	15,3

Fuente: Energías Biodegradables de Costa Rica

De esta manera se calcularon las contribuciones de GEI en cada etapa del proceso productivo dentro de la planta de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica.

a.1.5) Quinta etapa: Distribución del biodiesel

El biodiesel almacenado se transporta hacia el centro de suministro de combustible del Consorcio Operativo del Este S.A. a través de un camión cisterna el cual usa biodiesel B50 como combustible, haciendo un recorrido de 9,6 km por cada entrega, considerando la ida y vuelta. La distribución de biodiesel se realiza por cargas de 3 000 L aproximadamente en cada viaje al centro de suministro. Con el dato promedio de número de viajes de distribución se calcularon los datos de la Tabla 16.

Tabla 16.- Kilómetros recorridos anualmente por distribución del biodiesel.

Distancia anual por distribución					
AÑO	N° de viajes ida	Distancia desde la planta hasta el centro de distribución	N° de viajes regreso	Distancia desde el centro de distribución hasta la planta	Total km recorridos
2013	73	4,9	73	2,3	526
2014	98	4,9	98	2,3	706
2015	47	4,9	47	2,3	338

Energías Biodegradables de Costa Rica

Consecuentemente se estimó el consumo de combustible en función de los kilómetros recorridos. Para ello se tomó el "coeficiente consumo máximo de combustible" reportado en el foro del modelo tarifario realizado por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos ARESEP en enero 2015 (Aresep, 2015).

La mezcla de biodiesel que se usó para transportar el producto final al centro de suministro del Consorcio Operativo del Este S.A., fue al 50% combinado con diesel de petróleo (B50)

El combustible B50 es una composición 50 % diesel de petróleo y 50 % biodiesel, el cálculo se realizó a partir del factor de emisión reportado por las Directrices del IPCC

del 2006, donde se contabilizó la contribución de N₂O del biodiesel y el CO₂ de diesel de petróleo reportado por el IMN (EPA, 2015).

Los factores de emisión (Tabla 17) usados en la combustión son de base sustentable, provienen de bases de datos oficiales del total de emisiones de gases de efecto invernadero de Estados Unidos a nivel nacional desde 1990 (EPA, 2015).

Tabla 17.- Factores de emisión usados en la distribución y uso final.

Factor de emisión	Unidades	Valor	Fuente de referencia
Coefficiente consumo máximo combustible	L/km	0,42	ARESEP 2015
Factor de emisión biodiesel (B100)	kg N ₂ O/L	1,43E-5	IPCC - 2006
Factor de emisión diesel de petróleo	kg CO ₂ /L	2,69	IMN 2015

Los cálculos de los GEI en función de CO₂eq se realizaron proporcionalmente a la composición del combustible B50, de la siguiente manera:

$$kg CO_{2e} = [(L \text{ diesel} \times f.e.kg CO_{2e}/L) \times 0,5 + (L \text{ biodiesel} \times f.e.kg N_2O/L \times PCG N_2O) \times 0,5]$$

Los resultados de consumo se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18.- Inventario de GEI calculados en la etapa de distribución.

Año	Consumo L/km	km recorridos	L combustible	F.e (kg CO ₂ /L biodiesel)	F.e (kg N ₂ O/L biodiesel)	F.e (kg CO ₂ eq/L diesel)	kg CO ₂ eq
2013	0,42	526	220,8	-	1,43E-5	2,69	297,0
2014	0,42	706	296,4	-	1,43E-5	2,69	398,6
2015	0,42	338	142,1	-	1,43E-5	2,69	191,2

a.1.6) Sexta etapa: Uso final del biodiesel.

En esta etapa se realizó el levantamiento de datos históricos sobre los kilómetros recorridos mensualmente por todas las unidades de Consorcio Operativo del Este S.A., desde el 2013 hasta el 2015, los datos se describen en la Tabla 19.

Tabla 19.- Kilómetros recorridos por las unidades de COESA

MES	2013	2014	2015
	Kilómetros		
ENERO	675 230	625 213	459 429
FEBRERO	319 530	313 030	452 324
MARZO	513 783	507 283	506 903
ABRIL	464 149	457 649	481 548
MAYO	518 282	511 782	534 311
JUNIO	489 302	482 802	524 324
JULIO	532 874	526 374	501 718
AGOSTO	517 050	510 550	487 467
SETIEMBRE	464 561	458 061	482 739
OCTUBRE	506 961	500 461	535 668
NOVIEMBRE	478 242	471 742	527 054
DICIEMBRE	464 024	457 524	502 217
TOTAL	5 943 988	5 822 471	5 995 702

Fuente: Consorcio Operativo del Este S.A.

Al igual que en la etapa de distribución se realizó el cálculo de los GEI a partir del factor de emisión proporcional al porcentaje de biodiesel y el consumo de combustible anual. El consumo de combustible promedio en las unidades de COESA es de 0,42 L/km, dato primario reportado por COESA. Las unidades de COESA varían el porcentaje de biodiesel en su combustible de acuerdo con el año, se determinó que realmente usan entre el 6% y el 12 % de biodiesel, de acuerdo con la cantidad de biodiesel que se

suministró anualmente. Los cálculos del inventario se basaron en los factores de consumo y factores de emisión que se recopilaron en la Tabla 20.

Tabla 20.- Inventario de GEI calculados en la etapa uso final del biodiesel

Año	Recorrido km	Consumo L/km	Consumo de combustible (L)	Consumo de biodiesel (L)	% de biodiesel	F.e. (kg N ₂ O/L biodiesel)	kg CO ₂ eq
2013	5 943 988	0,42	2 496 475	249 648	10	1,43E-05	205
2014	5 822 471	0,42	2 445 437	293 453	12	1,43E-05	241
2015	5 995 702	0,42	2 518 194	151 092	6	1,43E-05	116

Fuente: Consorcio Operativo del Este S.A.

Los cálculos de los GEI en función de CO₂ eq se calcularon proporcionalmente a la composición del combustible, de la siguiente manera:

$$Kg\ CO2eq = f.e\ CO2eq\ biodiesel\ ajustado \times L\ combustible.$$

Finalmente con los cálculos de los inventarios de GEI para cada etapa, se procedió a la evaluación del inventario del ciclo de vida.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos se calculó la huella de carbono del ciclo de vida en función de los litros de biodiesel consumidos anualmente por COESA, se calculó la huella de carbono en kg CO₂ eq/L como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21- Huella de carbono en el ciclo de vida del biodiesel reportada en kg CO₂ eq/L biodiesel.

Año	kg CO ₂ eq emitidos del ciclo de vida	Volumen de producción de biodiesel (L)	kg CO ₂ eq/ L
2013	94 419	514 633	0,18
2014	98 750	542 470	0,18
2014	79 520	447 673	0,18

Con la cuantificación de la huella de carbono del biodiesel en el sistema bajo estudio, se procedió a realizar un análisis comparativo con la huella de carbono de combustibles derivados del petróleo.

Con los datos anteriores se compararon cuantitativamente ambos combustibles en cuanto a su impacto ambiental. Al realizar la comparación del promedio de los tres periodos de la huella de carbono del biodiesel (**0,18 kg CO₂ eq/L**) con la huella de carbono del diesel, reportada teóricamente por la Directiva de la Unión Europea sobre Energías Renovables de 2009 (**3,03 kg CO_{2e}/L**) se demuestra que la huella de carbono del biodiesel producido dentro del sistema bajo estudio comparada con la huella de carbono del diesel, representa el 6% de la huella de carbono del diésel. El cálculo se demuestra con la ecuación de siguiente

$$E \% = \frac{(HC \text{ petróleo} - HC \text{ biodiesel})}{HC \text{ petróleo}} \times 100$$

De acuerdo con los resultados se logró interpretar que el proceso de producción de biodiesel en el año 2013 fue el más eficiente, esto se explica por el rendimiento de la reacción, el cual fue de un 83% lo que significó que los AGL se transformaron en un 83% en estéres (biodiesel) prueba de ello fue que se usó menor cantidad de kg de KOH en el PROCESO de transesterificación.

En concordancia con Hamze y Akia (2015), se demostró que los contenidos de ácidos grasos y de humedad son los parámetros determinantes de la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal. Para que se realice la reacción completa se necesita un valor de ácidos grasos libres, menor al 3%. Cuanta más alta es la acidez del aceite, menor es la conversión. La materia prima (aceite usado) recibido durante el año 2013 siempre cumplió con estos parámetros de calidad y por ende su conversión fue más completa que la del año 2015, el cual presentó valores de AGL por encima del 3%. También se logró determinar el porcentaje de contribución de cada una de las etapas consideradas en el sistema bajo estudio para la producción, distribución y uso final del biodiesel, siempre de acuerdo con la categoría de impacto ambiental de cambio climático donde únicamente se valoraron los GEI durante los años 2013 hasta 2015.

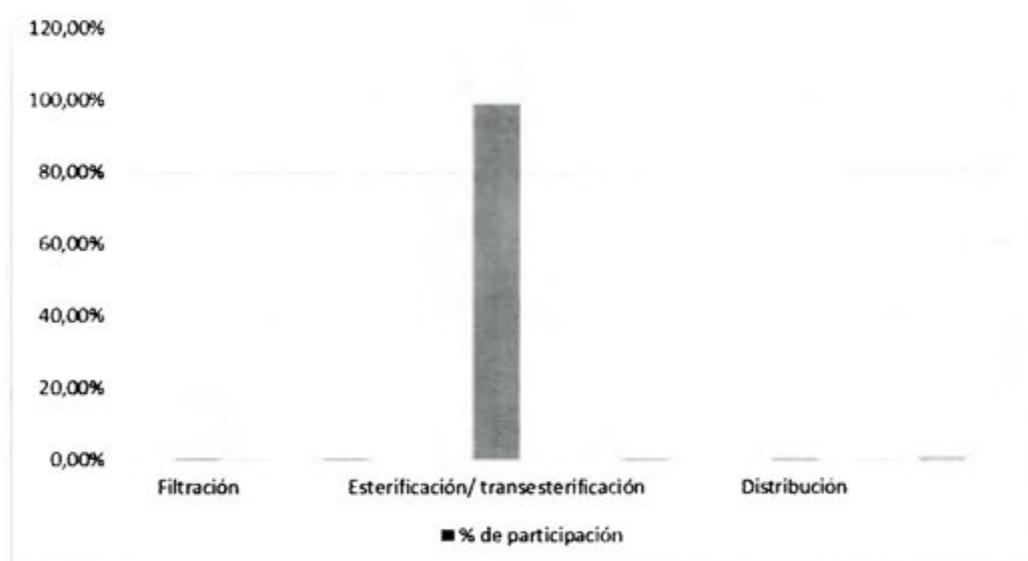
En la etapa de esterificación/transesterificación la fuente más importante de emisión es el metanol, que se usa para la formación del metóxido como agente catalizador en la transesterificación de los triacilgliceroles. El cual es un indicador ambiental a valorar para reducir las emisiones en el ciclo de vida y hacer el proceso más competitivo y limpio.

Conforme a los cálculos obtenidos de las emisiones de GEI por cada etapa se logró describir porcentualmente y gráficamente la contribución específica de cada etapa del proceso, los resultados se reportaron de manera acumulativa desde el año 2012 al 2015. En Tabla 2 y Figura 10 se exponen dichos resultados.

Tabla 22.- Totalidad de GEI desde el 2012 al 2015 en cada una de las etapas

Etapa	Kg CO2e	% de contribución
Filtración	17	0,0%
Pretratamiento	703	0,3%
Esterificación / Transesterificación	269 772	98,9%
Purificación	747	0,3%
Distribución	888	0,3%
Uso Final	561	0,2%

Figura 10.- Representación de los GEI acumulativos desde el 2012 hasta el 2015 obtenidos por etapa de los GEI en el ciclo.



En la Figura 10 se indentifica la etapa crítica que más contribuye con las emisiones de GEI es la etapa de esterificación/transesterificación.

En la etapa de esterificación y transesterificación, se emiten el 99,0% de los GEI. El uso del metanol para la producción del metóxido, contribuye con 1,25 kilogramos de CO₂ eq por cada kilogramo de metanol usado en la reacción, mientras que el etanol

contribuye con 1,19 Kg de CO₂ eq por cada litro de etanol usado, según el estudio realizado por Roy (2015).

VII. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.

El modelo de regresión lineal múltiple se utiliza como método predictivo para estimar la variable dependiente (respuesta) y comprender su comportamiento según las variables independientes (explicativas).

Para realizar los cálculos se recolecta la mayor cantidad de variables medibles en el proceso productivo del biodiesel, la selección de variables es la siguiente:

- Humedad inicial (%)
- Ácidos grasos libres iniciales (%)
- Volumen de metanol (L)
- Volumen de aceite usado inicial (L)
- Consumo eléctrico durante el proceso (kwh)
- Volumen de producción de biodiesel (L)

La variable dependiente que se estudia es el volumen de producción de biodiesel. Los datos recolectados corresponden al período de enero del 2013 hasta enero del 2015, lo que representa un total de número de muestras de N=24(Anexo B).

Para aplicar la regresión lineal múltiple se realizan pruebas para comprobar los requerimientos expuestos en la hipótesis sobre las variables explicativas (Montanero, 2015). Los cálculos se realizan con el programa Past 3.13 Copyright Hammer 2016, con el propósito de comprobar los requerimientos de no colinealidad, normalidad y homocedasticidad.

- **Prueba de no colinealidad:** Esta prueba consiste en el análisis correlación de Pearson entre las variables explicativas para lo cual se seleccionan las variables que no presentan relación lineal exacta ($r > 0.85$) entre sí (Montanero, 2015).

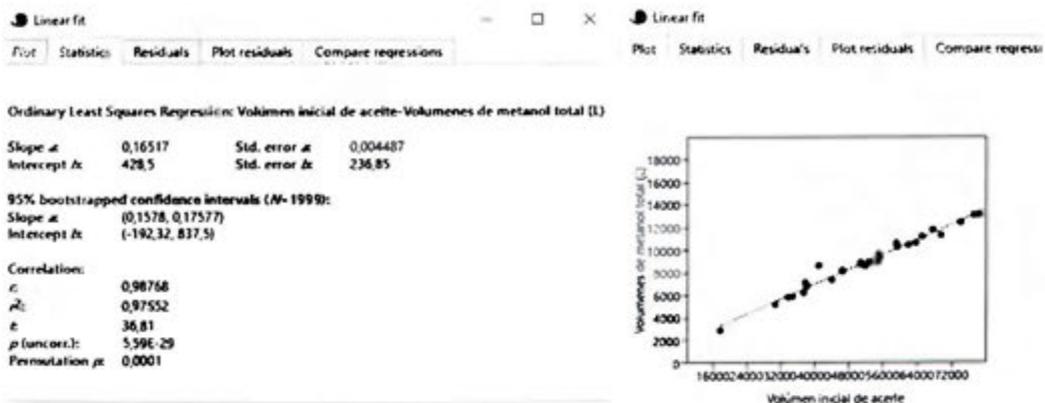
Esta selección se realiza aplicando el modelo lineal bivariado. Para lo cual se realiza la siguiente rutina de cálculo: *Model* → *Linear* → *Bivariate* (Figura 11):

Figura 11.- Rutina de cálculo para realizar un análisis lineal bivariado

The screenshot shows a software interface with a menu path: **Model** → **Linear** → **Bivariate**. A dropdown menu is open, showing options: **Generalized Linear Model**, **Polyaerial**, **Nonlinear**, **Sum of residuals**, **Smoothing spline**, **LOESS smoothing**, **Abundance calculation**, **Species pooling (Gaussian)**, **Mixture analysis**, and **Logarithmic spiral**. A sub-menu for **Generalized Linear Model** is also visible, showing **Multivariate (1 independent, n dependent)**, **Multiple (1 dependent, n independent)**, and **Multivariate multiple (m dependent, n independent)**.

Below the menu, a data table is displayed with the following columns: **Year**, **AGL litros**, **Volumenes de metano total (L)**, and **Volume**. The data rows are numbered 1 through 13.

Year	AGL litros	Volumenes de metano total (L)	Volume
1	42437,0	125,34	
2	37944,0	68,23	
3	36795,0	210,57	
4	54534,0	294,34	
5	49651,0	252,30	
6	45018,0	254,30	
7	44315,0	252,30	
8	47812,0	275,37	
9	43395,0	231,74	
10	44776,0	231,57	
11	55572,0	231,35	
12	28235,0	158,34	
13	34411,0	210,57	



En la Figura 11 se demuestra la correlación lineal de cada par de variables explicativas, con estos análisis se seleccionaron las variables con menor colinealidad entre sí. A continuación se reportan los resultados del análisis bivariado para cada par de variables explicativas (Tabla 23).

Tabla 23. Correlación lineal de Pearson (r) entre pares de variables del estudio bivariado.

Variable explicativa 1	Variable explicativa 2	r
% Humedad	Volumen metanol	0,889
% Humedad	Volumen de aceite inicial	0,887
% Humedad	% AGL	0,722
% Humedad	Consumo eléctrico	0,230
% AGL	Volumen de aceite inicial	0,843
% AGL	Volumen metanol	0,816
% AGL	Consumo eléctrico	0,418
Volumen metanol	Volumen de aceite inicial	0,978
Volumen metanol	Consumo eléctrico	0,228
Volumen aceite inicial	Consumo eléctrico	0,334

La correlación Pearson entre dos variables refleja el grado en que las puntuaciones están asociadas, es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas.

De acuerdo a este concepto estadístico se logra la selección de variables explicativas que presentan menor grado de colinealidad

- a) % AGL
- b) Consumo eléctrico anual
- c) % Humedad inicial.
- d) Volumen de metanol.

Esto por presentar una baja correlación ($r < 0,85$) entre ellas.

Las variables explicativas seleccionadas se utilizaron para comprobar las pruebas de normalidad y homocedasticidad con el fin de poder dar consistencia y estabilidad en el modelo de regresión lineal múltiple.

- *Normalidad:* Se comprobó la distribución normal de cada una de las variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk. La validez de esta se da si el valor de $p \geq 0,05$ (Tabla 25)

Tabla 24.- Resultado de las pruebas de distribución normal.

Prueba de distribución normal (N=24)					
Tipo de prueba	Volumen de producción	Humedad	AGL	Volumen de metanol	Consumo eléctrico
Shapiro-Wilk W	0,983	0,971	0,903	0,981	0,942
p(normal)	0,943	0,689	0,026	0,916	0,176
Anderson-Darling A	0,179	0,191	0,919	0,202	0,134
p(normal)	0,907	0,8876	0,016	0,863	0,907
p(Monte Carlo)	0,919	0,899	0,017	0,872	0,135
Jaque-Bera JB	0,0467	0,892	3,232	0,345	1,761
p(normal)	0,977	0,64	0,199	0,842	0,415
p(Monte Carlo)	0,979	0,507	0,071	0,824	0,189

En la Tabla 24 se observa que la variable % AGL no califica como una distribución normal reportado por distintas pruebas, específicamente con la prueba de Shapiro

Wilk, donde el valor de p es menor que 0,05. Se rechazó la variable % AGL y se realizó el análisis multivariable con las variables que sí cumplieron con la prueba de Shapiro Wilk.

- *Homocedasticidad*: En estadística un modelo predictivo presenta homocedasticidad cuando la varianza del error de la variable endógena se mantiene a lo largo de las observaciones. Se habla de homocedasticidad si el error cometido por el modelo tiene siempre la misma varianza. En particular, si el modelo es homocedástico, el valor de las variables explicativas no afectará a la varianza del error. (Mahía, 2010).

Se encontró una asociación positiva y alta entre el volumen de producción con las variables explicativas del proceso productivo (R múltiple = 0,89, $F=26,67$, $df1.= 3,20$, $p<0.001$).

Tabla 25.- Resultado de R^2 la regresión lineal múltiple.

Regresión lineal múltiple	
N	24
múltiple R	0,89
múltiple R^2	0,79
múltiple R^2 ajustado	0,77

En la Tabla 26 se describen los coeficientes obtenidos en la regresión lineal multivariable, donde se logró diseñar una ecuación predictiva que permitió estimar el volumen de producción de biodiesel en función de las variables de consumo de metanol, humedad y consumo eléctrico.

Tabla 26.- Resultado de los coeficientes de la regresión lineal multivariable.

VARIABLES EXPLICATIVAS	COEFICIENTE	ERROR ESTÁNDAR MEDIA	t	p	r ²
Constante (C)	-2112,4	5827,5	-0,36	0,72	
Humedad (H)	41,68	67,51	0,62	0,54	0,61
Volumen de metanol (MeOH)	3,17	1,1	2,88	0,01	0,69
Consumo eléctrico (E)	24,53	7,69	3,18	0,005	0,25

Ecuación predictiva:

$$\text{Vol de prod.} = (41,68 \cdot H) + (3,17 \cdot \text{MeOH}) + (24,53 \cdot E \text{ Kwh}) + C$$

El error estándar de la media estima la variabilidad entre muestras, en la Tabla 26 se visualiza la alta variabilidad en la humedad inicial y por sí sola esta variable no es estadísticamente crítica para la predicción de la producción del biodiesel, mientras que el volumen producido sí se puede explicar por el volumen de metanol en un 69% y por el consumo eléctrico en solo un 25%. Pero estas tres variables en conjunto hacen que la variancia del volumen de producción explicada sea de un 77%. Quiere decir que un 23% de variación en la producción se debe a otros factores no medidos en su estudio, por tal motivo se recomienda determinar otros parámetros fisicoquímicos en la materia prima al momento de su ingreso, como por ejemplo, densidad, viscosidad, número de basicidad entre otros, que puedan aportar mayor información cuantitativa para lograr un mejor ajuste.

Finalmente con la ecuación predictiva se calcula el volumen de producción de biodiesel en función de las variables explicativas que son el consumo de metanol, el porcentaje de humedad y el consumo eléctrico. Los cálculos obtenidos son valores estimados que se compararon con el volumen real de producción y de esta manera se describe el grado de ajuste.

Tabla 27. Resultados calculados comparados con los datos reales durante el periodo 2012 - 2014.

Humedad (L)	Volumen de metanol (L)	Consumo eléctrico kwh	Volumen de producción calculado (L)	Volumen de producción real (L de biodiesel)	% dispersión
93	8 262	597	46 811	42 407	10%
73	6 758	402	36 444	37 944	-4%
106	8 140	559	46 032	36 799	25%
108	10 434	597	54 346	54 504	0%
109	8 906,	444	45 802	49 661	-8%
112	8 833	525	47 696	45 018	6%
127	8 872,	489	47 555	44 315	7%
148	9 569	597	53 293	47 813	11%
97	8 128	535	45 057	43 589	3%
137	11 847,	264	51 860	48 776	6%
61	6 925	475	38 271	35 572	8%
53	5 873	480	34 715	28 235	23%
107	9 700	473	48 961	39 511	24%
64	6 226,	470	36 053	32 037	13%
80	8 657	249	39 030	27 193	44%
87	7 154	401	38 269	33 021	16%
139	10 330	454	51 809	49 399	5%
158	11 246	504	56 723	43 553	30%
135	10 666	571	55 577	56 372	-1%
124	10 660	553	54 650	50 766	8%
138	11 355	599	58 578	53 188	10%
156	13 138	682	67 028	65 345	3%
118	8 766	581	49 083	45 927	7%
94	9 006	843	55 287	46 158	20%

Con el programa Past se realizó la prueba de normalidad multivariable con respecto al volumen calculado contra el volumen real de producción de biodiesel y se obtuvo un valor $p=0,995$ lo cual implica que el modelo es apropiado en predecir porque la homoscedasticidad es mayor a 0,05.

Mardia tests

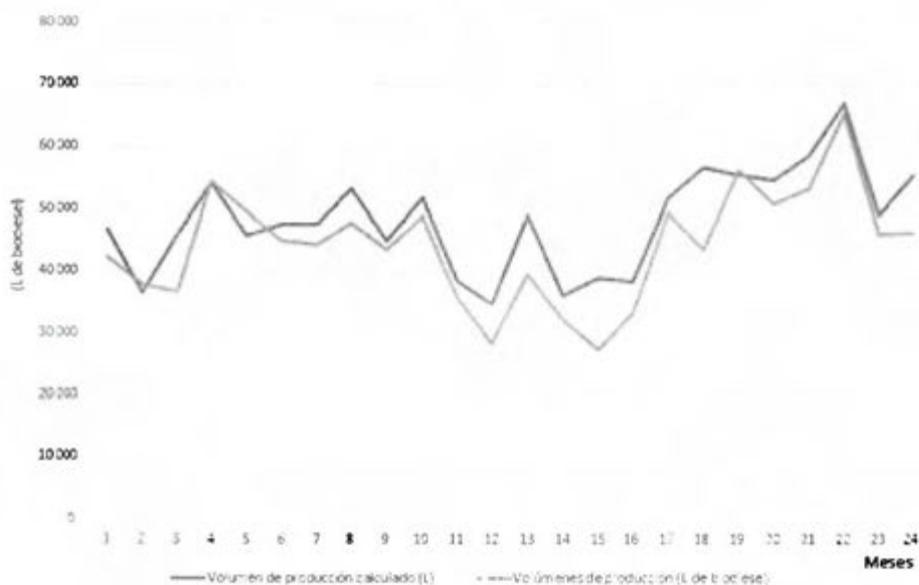
Parameter	Value	Statistic	df	p (normal)
Skewness:	0,1176	0,4702	4	0,9763
Skewness, small sample corrected:		0,575	4	0,9658
Kurtosis:	6,615	-0,848		0,3964

Doornik and Hansen omnibus

$E\hat{p}$	0,2063
p (normal):	0,995

El modelo permite estimar el volumen de producción de biodiesel con un **error promedio del 11 %** cuando se compara con el valor real de producción de biodiesel. En la Figura 12 se puede visualizar el comportamiento del modelo predictivo en función de los valores reales de producción del biodiesel.

Figura 12.- Volumen de producción estimado vs el real.



La figura anterior demuestra el ajuste de los valores calculados según la ecuación obtenida por el modelo de regresión multivariado con un 95% de confianza, se ajusta en un 77% con los valores reales tomados en el histórico de producción, tomando en cuenta que existe una variación del 23% en la producción de biodiesel que se debe a otros factores no medidos en su estudio.

VIII. ANALISIS ECONÓMICO EN LA PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL.

Para el análisis económico de costos se consideró seguir con la metodología expuesta por Polimeni (1994), la cual se fundamenta en la contabilidad de costos por material directo, mano de obra y costos indirectos de producción (Polimeni, 1994):

$$\text{Costos de producción} = \text{Material directo} + \text{Mano obra directa} + \text{Costos indirectos de fabricación}$$

Los costos indirectos de fabricación incluyen la mano de obra indirecta por los supervisares, los materiales indirectos, la depreciación de la planta y de los equipos, los intereses por deudas, artículos de limpieza y mantenimiento, el control de calidad, la electricidad, los seguros de incendio, etc. Sin embargo no se logró determinar los costos de producción exactamente porque los costos indirectos de fabricación no fueron suministrados por la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica ya que los consideró confidenciales.

Por otro lado se logró calcular una estimación del costo de materiales, energía y vapor, en función a los litros de producción de biodiesel, esto con el fin de demostrar que la producción de este biocombustible es rentable económicamente.

Para realizar el cálculo de los costos de materiales y energía se utilizaron los datos mostrados en la Tabla 29.

Tabla 29.- Costos del biodiesel promediados desde 2012 al 2014

Costo	Cantidad	Precio unitario (colones)	Total (colones/año)
Metanol MeOH (L)	106 288	¢ 450	¢ 47 829 600
Hidróxido de potasio KOH (kg)	5 195	¢813	¢ 4 226 652
Compra aceite reusado (kg)	612 389	¢ 125	¢ 76 548 625
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) (L)	3 100	¢ 237	¢ 735 630
Mano de Obra (operarios) (jornadas 8h/d)	4	¢ 260 000	¢ 12 480 000
Energía (kWh)	6 473	¢ 84	¢ 543 732
Vapor (L)	22 794	¢ 620	¢ 14 132 280
Tot. Costo Op.			¢156 496 519

Fuente: Energías Biodegradables

La empresa compra el litro de aceite reusado entre 150 y 100 ¢ el litro, puesto en planta. El cálculo refleja que el aceite reusado puesto en planta tiene un costo promedio de 125 colones el litro. Para el metanol se tomó como costo 450 colones por litro, para el ácido sulfúrico 237,3 colones por litro y para el hidróxido de potasio 813,6 colones por kilogramo, todos de grados técnicos o industrial. Los precios fueron suministrados por el departamento de Producción, Investigación y Desarrollo de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica.

En lo referente a la mano de obra directa, se tomaron los valores del número de operarios por equipo por turno de lunes a viernes y sábados por la tarde. Se consideró un salario anual promedio por operario de 12 480 000 colones y una operación de 360 días al año, incluyendo las cargas sociales.

Finalmente en el caso de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica los costos relacionados a los insumos y consumo de energía se estiman en ₡156 496 519 por año, dividido entre una producción promedio anual de 475 600 litros de biodiesel, se obtiene un valor de 329 ₡ por litro producido. Lo cual representa un 53 % del precio de venta final del litro de biodiesel a 620 ₡. Esta estimación sugiere que la producción de biodiesel es una actividad rentable económicamente.

Estos costos por litro variarían en caso de que la empresa aumente el volumen de biodiesel producido o si incrementa la escala de planta. Una mayor escala de planta traería economías de escala y una mayor eficiencia, con menores costos unitarios de producción.

Considerando no solo el aspecto económico, el biodiesel presenta una serie de ventajas sobre el diesel derivado de los combustibles fósiles (i.e. diesel):

1. A nivel mecánico:

Se aumenta la vida útil del motor al poseer el biodiesel mayor poder de lubricación

La disminución en la concentración de azufre en los combustibles trae consigo una problemática de pérdida de lubricación que está afectando especialmente bombas de inyección, el biodiesel puede suplir esta lubricación al ser utilizado en mezclas diesel – biodiesel

Por su poder detergente mantiene limpio el sistema de combustible (tanque, mangueras, inyectores)

La combustión del biodiesel es más completa que la del diesel disminuyendo emisiones y maximizando el aprovechamiento del combustible

Aumenta el torque de los vehículos y por consiguiente el rendimiento.

2. A nivel ambiental

Disminución significativa de emisiones por lo que la implementación del biodiesel es una forma fácil y de rápida implementación para disminuir la huella de carbono en las compañías. Se puede utilizar no sólo en flotas vehiculares sino que también en calderas, generadores eléctricos, montacargas, maquinaria agrícola, etc.

Es una herramienta útil para lograr alcanzar la meta de carbono neutralidad que se propuso el gobierno.

El uso de biodiesel es una alternativa muy amigable cuando se deben utilizar motores diesel en espacios confinados pues es menos contaminante por lo que los operarios no están expuestos a tantos gases indeseables.

Es importante tomar en cuenta que el sector transporte es responsable de la mayor proporción de gases contaminantes de las ciudades y estos afectan directamente a los transeúntes causándoles enfermedades cardio respiratorias.

Reciclaje de un residuo contaminante de fuentes hídricas y su impacto en la conservación de la flora y fauna acuática y la disminución en costos de mantenimiento del alcantarillado (problemática por obstrucción de tuberías, reducción de costos en tratamiento de aguas, menos lixiviados en camiones repartidores de basura)

3. A nivel de flotas vehiculares

Al disminuir las emisiones, los vehículos se mantienen cumpliendo los parámetros ambientales que solicita el MOPT (RTV, análisis de emisiones en carretera). Por ejemplo para busetas, buses y taxis a los cuales les realizan análisis de emisiones en carretera, el uso de biodiesel les asegura no tener problemas con las emisiones.

IX. CONCLUSIONES

En este estudio se logra demostrar que la metodología ACV es útil para identificar y cuantificar los GEI asociados a la producción, distribución y utilización del biodiesel de aceites usados en una mezcla promedio B10 en la flota de buses de COESA.

Esta metodología se puede replicar en otros sistemas relacionados con la gestión de consumo de recursos (materias primas, energía, materiales), a través de la cuantificación de los flujos de entrada y salida en las diferentes etapas del proceso.

El análisis permitió determinar las principales emisiones de GEI en la producción de biodiesel de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica. Están directamente relacionadas con el consumo de materias primas y el uso de la energía.

El análisis muestra que las etapas de esterificación, transesterificación y pretratamiento son las etapas de mayor influencia con respecto al impacto de gases de efecto invernadero.

A medida que aumenta la proporción del biodiesel en la mezcla de combustible para buses, se estima una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.

El rendimiento de producción de biodiesel fue superior entre los años 2013 y 2014 en comparación al año 2015, porque el contenido de ácidos grasos libres en los aceites usados que se recibieron durante ese año, 2015 se encontraban por encima del 3%.

Al realizar la comparación del promedio de los tres periodos de la huella de carbono del biodiesel (0,18 kg CO_{2e}/L) con la huella de carbono del diesel, reportada teóricamente por la Directiva de la Unión Europea sobre Energías Renovables de 2009 (3,03 kg CO_{2e}/L) se demuestra que la huella de carbono del biodiesel producido dentro del sistema bajo estudio representa un 6% de la huella de carbono del diesel

Las emisiones de CO₂ que se producen, al provenir de un carbono retirado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico (biomasa), no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto no incrementan el efecto invernadero. Su uso contribuye a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera siempre que sustituya a un combustible fósil. Entre las diversas fuentes de biomasa para la producción de biodiesel, la fuente que presenta menor error por contabilización de CO₂ asumiendo su valor neutro son los aceites reusados de cocina, por esta razón este método es confiable y de bajo impacto ambiental.

La ecuación obtenida por el modelo de regresión multivariado con un 95% de confianza, se ajusta en un 77% con los valores reales tomados en el histórico de producción, tomando en cuenta que existe una variación del 23% en la producción de biodiesel que se debe a otros factores no medidos en su estudio.

Finalmente en el caso de la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica los costos relacionados a los insumos y consumo de energía se estiman en ₡156 496 519 por año, dividido entre una producción promedio anual de 475 600 litros de biodiesel, se obtiene un valor de 329 ₡ por litro producido. Lo cual representa un 53 % del precio de venta final del litro de biodiesel a 620 ₡. Esta estimación sugiere que la producción de biodiesel es una actividad rentable económicamente.

X. BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials (ASTM), Biodiesel, 2009. Disponible en <http://www.astmbiodieselfuel.com/pub/biodiesel/main.htm>

Aranda A., Zabalza I., Martínez A., Valero A. & Scarpellini S. FC Editorial. El análisis del ciclo de vida, como herramienta de gestión empresarial. Madrid, España (2006).

ARESEP. Fortalezas y debilidades de la metodología vigente para el cálculo de las tarifas de autobús. Costa Rica, (2015).

Avellaneda Vargas F. A. Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tarragona Universitat Rovira I Virgili. Departament d'Enginyeria Química., 244p. España. (2010).

Ávila O., Suárez J. Análisis de ciclo de vida e integración del proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña. Tesis de Pregrado en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia (2010).

Blengini G.A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*. (44), 319-330 (2009).

Brandt A. Upstream greenhouse gas (GHG) emissions from Canadian oil sands as a feedstock for European refineries. Department of Energy Resources Engineering Stanford University. EEUU, (2011).

Bravo Hidalgo L. Anàlisi del Cicle de Vida de l'EDAR del Baix Llobrega. Universitat Politècnica de Catalunya. España, (2009).

Centro de investigaciones energéticas medioambientales y tecnológicas Ministerio de Medio Ambiente-CIEMAT. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. fase ii. análisis de ciclo de vida comparativo del biodiésel y del diésel: energía y cambio climático. España. 141 p (2006).

Díaz Rodríguez M., González Ariza Á. Introducción al análisis estadístico multivariado aplicado. ISBN 978-958-741-358-8. Colombia, (2013).

Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009.

Esquivel J. Coopevictoria incursiona en producción de biodiesel. Noticias Novedades Radio 16. Costa Rica, Julio 31, 2008

EPA. Factores de emisión revisados para determinados combustibles: Federal Register. EEUU,(2013).

EPA. Emissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID). Consultado en <https://www.epa.gov/climateleadership/center-corporate-climate-leadership-ghg-emission-factors-hub>. Enero 2016.

European Biodiesel Board (EBB). "State of play of European biodiesel", General Assembly, Bruselas (2013).

Flavin C. Time to Move to a Second Generation of Biofuels.(2008)
<http://www.worldwatch.org/node/5616> (consultado 23.05.206).

Garrido S.J. Tecnología, territorio y sociedad, producción de biodiesel a partir de aceites usados. Íconos. Revista de Ciencias Sociales. Num. 37, Quito, pp. 75-86. (2010)

Gujarati D. Principios de Econometría. Mc Graw Hill, capítulo 13 (2006).

Herrera Bello V. Análisis de Ciclo de Vida del Plan de Gestión Ambiental de Xochitla Parque Ecológico. Tesis para obtener el grado de Maestría en Desarrollo Sostenible. Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México. Diciembre del 2011.

Hamze H., Akia M. *Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology*. Process Safety and Environmental Protection. 2015.

Ihobe S.A. Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. 2009.

Instituto de Sostenibilidad y certificación Internacional de Carbono, ISCC 205 *Metodología para el cálculo de emisiones de GEI y auditoría de GEI*. 2011.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN). Folleto "Factores de emisión de gases de efecto invernadero" 2015.

IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático cambio climático Resumen para responsables de políticas (2013)

ISO 14040:2007 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

ISO 14044:2007 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.

INTE/ISO 14044:2007 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.

Iriarte A., Rieradevall J. Transition towards a more environmentally sustainable biodiesel in South America: The case of Chile. *Applied Energy*. Volume 91, Issue 1, March 2012.

Kizys R. Modelo de Regresión Lineal Múltiple Proyecto e-Math 5 Universidad Abierta de Cataluña. 2007.

La ONU y el cambio climático

<http://www.un.org/climatechange/es/blog/2015/02/governments-track-reaching-paris-2015-universal-climate-agreement-2/> Consultado 11/06/2015

Lockwood Ch. Building the Green Way. *Harvard Business Review*. June (2006).

López C., Fernández P. V., Manso R., Valdés A. Gases de Efecto Invernadero. Emisiones y Remociones. Cuba 2007. ETGEI — Instituto de Meteorología, La Habana, Junio 2007, 29 pp.

Mahía R. Conceptos básicos sobre la heterocedasticidad en el modelo básico de regresión lineal. Dpto. de Economía Aplicada – Universidad Autónoma de Madrid. 2010.

Marchetti J. M., Miguel, V. U. Errazu, A. F. Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11(6): p. 1300-1311 (2007).

Montanero Fernández J. Manual abreviado de análisis multivariante. Universidad de Extremadura. España (2015)

Muñoz I. Using LCA to assess Eco-design in the automotive sector, *International Journal of Life Cycle Assessment*: (2006).

Murugesan A., Umarani C., Subramanian R., Nedunchezian N. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines--A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(3): p. 653-662.

Ortega H., Comparativa ambiental y económica del ciclo de vida de cubiertas planas. Master en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Instalaciones Industriales. Universitat Jaume I. (2013).

Pasqualino J.C., Meneses M., Abella M., Castells F. LCA as a Decision Support Tool for the Environmental Improvement of the Operation of a Municipal Wastewater Treatment Plant. *Environ Sci Technol*; 43(9):3300-3307 (2009).

Polimeni, Ralph y otros. Contabilidad de Costos. Conceptos y Aplicaciones para la Toma de Decisiones Gerenciales. Tercera Edición. Mc Graw Hill Interamericana, S.A. Colombia 1994.

Rodríguez Ibarra J., Hernández J., Rangel V. Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir del descarte procedente de la industria de la curtiduría. *Acta universitaria* (22) 5-13, (2012).

Sanchez S.T., J. Woods. Accounting for Indirect Land Use Change in the Life Cycle Assessment of Biofuel Supply Chains. *Journal of the Royal Society, Interface*, doi: 10.1098/rsif.2011.0769 (2012).

Searchinger, T.D. *et al.* "Fixing a Critical Climate Accounting Error". *American Association for the Advancement of Science*, 326, 527-528, Princeton University (2009).

Vindas Quirós L. (27 de abril 2014). "Productores de biodiesel no logran crecer más por falta de materia prima y de apoyo". *El Financiero*, Sección Negocios pp. 16-17.

Yang J., Golovitchev V.I., Lurbe P.R. and López Sánchez J.J. 2012. Chemical Kinetic Study of Nitrogen Oxides Formation Trends in Biodiesel Combustion. *International Journal of Chemical Engineering*. Volume 2012 (2012), Article ID 898742, 22 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/898742>

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

Ardente F., Beccali M., Cellura M., Mistretta M., Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board, *Energy and Buildings*, Vol 40, pp 1 - 10 (2008).

Arroyave J. & Garcés L. Tecnologías ambientalmente sostenibles. *Producción + limpia*, 1, (2), 78- 86 (2006).

Ashby M., Ball N. and Bream Ch. The CES EduPack Eco Audit Tool a white paper; Granta Design Ltd. P. 2 (2012).

Amaya Ramírez B., Becerra Bayona S., Acevedo Pabón P. 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), 17-26. Colombia – Bucaramanga (2008).

Blount E., Clarimon L., Cortes A., Riechmann J. & Romano D. *Industria como naturaleza: hacia la producción limpia*. Madrid, España -Catarata. (2003).

BP Statistical Review of World Energy: bp.com/statisticalreview (Junio 2015).

Chacón J. Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV), con una bibliografía selecta. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, (72), 37-70 (2008).

Ciroth A., Franze J. LCA of an Ecolabeled Notebook - Consideration of Social and Environmental Impacts Along the Entire Life Cycle, ISBN 978-1-4466-0087-0, Berlin, (2011).

Compañía Española de Petróleo (Cepsa) Círculo de empresarios. Hacia una energía competitiva, sostenible y garantizada. España (2015).

CORINAIR. Combustion in Energy & Transformation Industries: Emission Inventory Guidebook. European Environment Agency, 2006.

Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo. Universidad de Vigo, Aula Selvicultura 2011.

EPA. Office of Air Quality Planning and Standards, Emission factor documentation for ap-42 section 1.4 natural gas combustión 1998.

Foley J, de Haas D, Hartley K, Lant P. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. Water Res 3; 44(5):1654-1666. (2010).

Frankl P., Rubik F. Life cycle assessment in industry and business. Springer, Heidelberg, Alemania 2000, ISBN 3-540-66469-6.

Fullana P. y Rieradevall J. Análisis del Ciclo de Vida del Producto ACV (I); Nueva herramienta de gestión ambiental - Innovación Química – Marzo 1995.

Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra CRANA. Óxidos de nitrógeno (NOX = NO + NO₂). 2010 España.

Goedkoop M.J., Spriensma R. The Eco-indicator 99 a Damage Oriented Approach for LCIA, Ministry VROM, La Haya, 1999.

Goedkoop M.J. Introducción a LCA (Análisis de Ciclo de Vida con SimaPro 6). (2004).

Grant T. Australian LCA Data Library. Centre for Design, RMIT, Melbourne. (2007).

Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products, United Nations Environment Programme, 2009.

Guzmán Mares L., Moreno Salazar A.C., Castellanos Villarruel M.S., Contreras Miranda W., Capuz Rizo S., Vivancos Bono J.L. . Análisis de ciclo de vida en la fábrica de muebles La Cibeles, Jalisco, México, en procura de la Ecoeficiencia de procesos y productos industriales. 2009

Hernández-Sánchez J. Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios Universidad Politécnica de Catalunya (2011)

Hischier R., Althaus H.J., Bauer Chr., Doka G., Frischknecht R., Jungbluth N., Margni M., Nemecek T., Simons A., Spielmann M.: Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v2.1. Final report ecoinvent data v2.1. Volume: 16. Swiss Centre for LCI, Dübendorf. CH, (2009).

Houillon G., and Jolliet O. Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. *Journal of Cleaner Production* 13 (3), 287-299 (2005).

INTE 12-01-06:2011 Sistema de gestión para demostrar la C- neutralidad. Requisitos.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies. (2006).

ISO 14050:2010 Gestión ambiental. Vocabulario.

Kumar U.D., Crocker J., Knezevic J., El-Haram, M. Reliability, Maintenance and Logistic Support: - A Life Cycle Approach. Springer Publishing Company, Incorporated (2012).

Lammel G. & Graßl H. Environmental Science & Pollution Res. Vol 2 : p.40. 1995.

Leff E. Globalización, ambiente y sustentabilidad. Saber Ambiental, 6a edición. Mexico: Siglo XXI. Editores (2010).

Leung D.Y.C., Wu X., Leung M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. Applied Energy, 2010. 87(4): p. 1083-1095.

Martin Puchet Anyul. Wassily Leontief, un creador de sus tiempos. Revista de Comercio exterior. Vol. 51. 2001.

McManus M. C. 2010. Life cycle impacts of waste wood biomass heating systems: a case study of three UK based systems. Energy, 35 (10), pp. 4064-4070.

Ministerio de Ambiente y Energía MINAE. VII Plan Nacional de Energía 2015-2030 / Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. – 1 ed. – San José, C.R.: PNUD, 2015. ISBN: 978-9968-794-70-1.

Ministerio del Ambiente y Energía MINAE. Programa Nacional De Biocombustibles 2008.

Mittelbach M. y Remschmidt C. Biodiesel, el manual completo. Asociación Catalana del Biodiesel. (2007).

Monge-Rojas R., Campos Nuñez H. Tabla de composición de alimentos de Costa Rica: Ácidos Grasos. INCIENSA, Universidad de Harvard, Escuela de Salud Pública (2006).

Monge A. Carbono Neutralidad. (2010)

<https://www.facebook.com/notes/fundaci%C3%B3n-energ%C3%ADas-renovables/carbono-neutralidad/111300748940384> Consultado 21/08/2014

Monge A. Agua Neutralidad. (2010)

<https://es-es.facebook.com/notes/fundaci%C3%B3n-energ%C3%ADas-renovables/agua-neutralidad/111300025607123> Consultado 21/08/2014

Monge A. Cómo hacer una Contabilidad de Carbono (2010)

<https://www.facebook.com/notes/fundaci%C3%B3n-energ%C3%ADas-renovables/c%C3%B3mo-hacer-una-contabilidad-de-carbono/111300385607087>
Consultado 21/8/2014

NIST, National International Standards Technology. Libro del Web de Química del NIST, SRD 69 (2016).

Norma PAS 2050:2008 Verificación de la Huella de Carbono. Asociación Española para la Calidad. 2008

Orrego A. El análisis de ciclo de vida (ACV) en el desarrollo sostenible: Propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos. Trabajo de investigación para el grado de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia (2012).

PNUMA. ¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida? (2004)
http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1731Why_take_a_life_cycle_approach_ES.pdf Consultado 22/08/2014

PNUMA. Manual de producción más limpia. (2009).
<http://209.239.118.175/biblio/biblio/industrial/Manual%20de%20Introducci%C3%B3n%20a%20la%20Producci%C3%B3n%20M%C3%A1s%20Limpia%20en%20la%20Industria.pdf>
Consultado 22/08/2014.

Rodríguez Castillo F. Biotecnología ambiental. Editorial Tebar, 2005

Romero Díaz de Ávila M. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Herramienta de Gestión Ambiental. Escuela de Negocios EOI. (2011).

Roy P., Dutta A. Greenhouse gas emissions and production cost of ethanol produced from biosyngas fermentation process. *Bioresour Technol* pp;192:185-91. 2015

Sampedro A., Buisson J. Aplicación de Ciclo de Vida para la valorización de la sostenibilidad del reciclado de mezclas asfálticas en caliente. *AsfaltosyPavimentos* Edición No. 25. 2012 Bucaramanga · Colombia ISSN 0123-8574.

Scott Matthews H. Thinking outside the box: Designing a Packaging Take-Back System. *Winter California Review Management* Vol. 46. No 2. (2004).

Sistema Español de Inventario (SEI) de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera. *Inventarios Nacionales de Emisiones o la Atmósfera 1990-2012* Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de gobierno de España Vol 2, 2012.

Uche J., Raluy G., Serra L. y Valero A. Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de desaladoras. Fundación CIRCE/Universidad de Zaragoza. (2010).

UN/Gro Harlem Brundtland. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. (1987).

UNEP.Life Cycle Assessment.

<http://www.unep.org/resourceefficiency/Consumption/StandardsandLabels/MeasuringSustainability/LifeCycleAssessment/tabid/101348/Default.aspx>

Consultado

01/09/2014

Vásquez J., Análisis de cambio de combustible en calderas a gas natural. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Perú (2011).

Vega Rodríguez J.A. Análisis de ciclo de vida de sistemas de tratamiento de aguas residuales: influencia de los materiales utilizados. BizkaiLab (2010).

Yang J., Xu M., Zhang X., Hu Q., Sommerfeld M., Chen Y. Corrigendum to "Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance". Bioresour. Technol. 102 159–165. (2011).

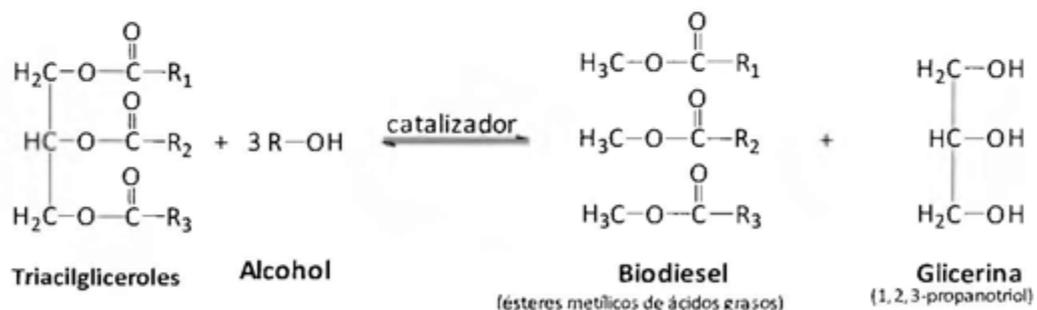
Zamagni, A. "Life Cycle Sustainability Assessment", The International Journal of Life Cycle Assessment. (2012).

ANEXOS

Anexo A:

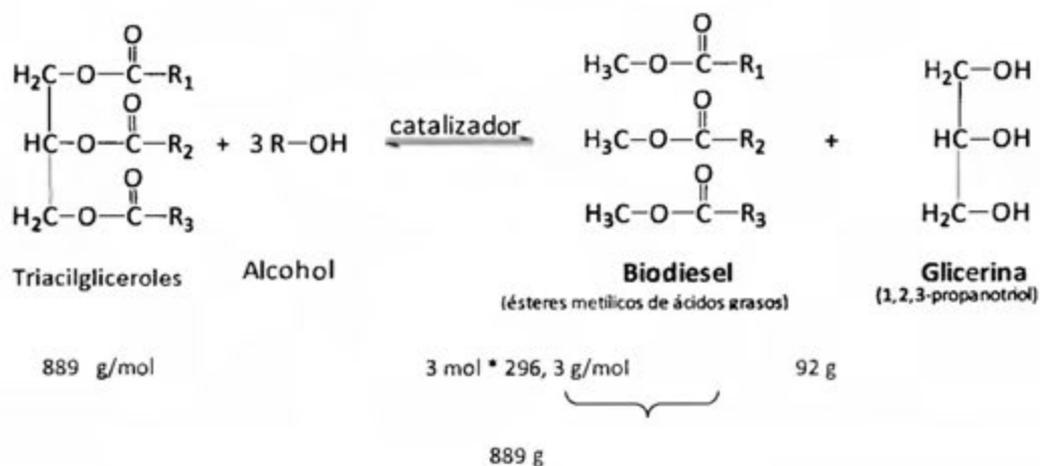
Cálculos del balance de masa:

Se usaron las relaciones molares de la reacción de transesterificación, suponiendo un 100 % de conversión, para estimar la cantidad de biodiesel y glicerina formados.



Se supuso que la masa molar de los triacilgliceroles, que son los aceites reusados que recibe la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica, están constituidos por una

mezcla 50:50 de aceite de soya y trioleína, ya que son los aceites más usados en Costa Rica (Monge, 2006).



Utilizando la densidad de los materiales se puede establecer la relación estequiométrica en volumen, lo cual se muestra en la Tabla A:

Tabla A.- Volúmenes teóricos calculados en la reacción de transesterificación a partir de 1 mol de triacilgliceroles

	Triacilgliceroles	Biodiesel	Glicerina
Masa (g)	889	889	92
Densidad (g/mL)	0,92	0,865	1,26
Volumen (mL)	966,3	1 027,8	73

La relación matemática en volumen que permite convertir triacilgliceroles en biodiesel es 1 027,8/966,3, o sea 1,064. La relación matemática en volumen que permite convertir triacilgliceroles en glicerina es 73/966,3, o sea 0,076. Con estos datos se puede calcular la conversión real a biodiesel, según se muestra en la Tabla B.

Tabla B- Conversión de triacilgliceroles a biodiesel en la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica

Año	Volumen de aceite usado como materia prima (L)	Volumen de biodiesel obtenido (L)	Volumen estequiométrico de biodiesel (L)	% conversión a biodiesel
2013	581 475	514 633	618 689	83
2014	668 693	542 470	711 489	76
2015	589 998	447 673	627 758	71

Si se utiliza el porcentaje de conversión a biodiesel anterior es posible calcular el volumen real obtenido de glicerina aplicando el factor 0,076

Tabla C- Volumen real de glicerina obtenido en la empresa Energías Biodegradables de Costa Rica

Año	Volumen de aceite usado como materia prima (L)	Volumen estequiométrico de glicerina (L)	% conversión a biodiesel	Volumen real de glicerina obtenido (L)
2013	581 475	44 192	83	36 679
2014	668 693	50 821	76	38 624
2015	589 998	44 840	71	31 836

Anexo B:

Datos históricos de producción:

Año		Volumen inicial de aceite (L)	Humedad inicial (L)	% AGL inicial	Volumen metanol (L)	Volumen ácido (L)	Masa de KOH (kg)	Volumen de producción biodiesel (L)
2013	Enero	46 343	93	0,020	8 262,1	105,34	394,79	42 407
	Febrero	37 917	73	0,020	6 758,5	63,20	335,54	37 944
	Marzo	46 343	106	0,021	8 140,7	210,67	405,15	36 799
	Abril	58 982	108	0,021	10 434,1	294,94	499,70	54 504
	Mayo	50 556	110	0,022	8 906,9	252,80	446,29	49 661

	Junio	50 556	113	0,022	8 833,0	252,80	429,79	45 018
	Julio	50 556	128	0,021	8 872,5	252,80	428,85	44 315
	Agosto	54 769	149	0,020	9 569,3	273,87	455,78	47 813
	Septiembre	46 343	97	0,020	8 128,2	231,74	389,41	43 589
	Octubre	67 408	137	0,020	11 847,8	231,67	569,34	48 776
	Noviembre	38 038	61	0,020	6 925,0	231,03	322,46	35 572
	Diciembre	33 664	53	0,020	5 873,7	168,34	284,91	28 235
	TOTAL	581 475		0,248	102 551,8	2569,20	4961,99	514 633
2014	Enero	54 769	108	0,023	9 700,0	284,41	453,34	39 511
	Febrero	37 295	64	0,028	6 226,0	207,56	285,12	32 037
	Marzo	40 787	81	0,030	8 657,0	366,35	344,92	27 193
	Abril	37 616	87	0,028	7 154,0	270,86	318,38	33 021
	Mayo	59 163	140	0,027	10 330,0	295,84	505,94	49 399
	Junio	64 864	158	0,033	11 246,0	370,50	568,76	43 553
	Julio	58 904	135	0,030	10 666,0	357,74	539,93	56 372
	Agosto	63 411	124	0,033	10 660,0	317,06	555,29	50 766
Año		Volumen inicial de aceite (L)	Humedad inicial (L)	% AGL inicial	Volumen metanol (L)	Volumen ácido (L)	Masa de KOH (kg)	Volumen de producción biodiesel (L)
	Septiembre	69 284	139	0,031	11 355,0	345,85	535,45	53 188
	Octubre	77 100	157	0,035	13 138,0	405,40	629,18	65 345
	Noviembre	50 865	118	0,035	8 766,0	254,83	418,89	45 927
	Diciembre	54 635	95	0,032	9 006,0	273,17	432,70	46 158
	TOTAL	668 693		0,364	116 904,0	3749,57	5587,90	542 470
2015	Enero	54 996	90	0,033	9 379,0	274,98	484,30	41 672
	Febrero	51 555	112	0,035	8 627,0	257,78	450,75	48 858
	Marzo	30 639	46	0,032	5 222,0	153,20	268,02	16 740
	Abril	43 884	84	0,036	7 400,0	219,42	377,53	43 391
	Mayo	52 513	105	0,033	8 929,0	262,83	475,78	27 844
	Junio	78 2 29	121	0,034	13 203,0	391,70	660,20	31 663
	Julio	73 9 74	148	0,033	12 470,0	413,20	605,10	41 651
	Agosto	61 716	115	0,032	10 514,0	308,90	494,60	34 329
	Septiembre	52 468	110	0,032	8 959,0	262,70	452,10	25 021
	Octubre	17 678	46	0,036	2 888,0	88,50	150,00	19 544
	Noviembre	34 694	89	0,038	5 909,0	173,70	308,20	18 811
	Diciembre	34 652	70	0,046	5 909,0	173,50	307,20	22 971
	TOTAL	586 998	0,024	0,419	99 409,0	2980,40	5033,78	447 623