

**Aplicación de SimaPro7.1 en el Análisis de Ciclo de Vida del Biodiesel de
Palma Africana Usando Catálisis Heterogénea Básica**

LUIS SEGOVIA GARCIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**Aplicación de SimaPro7.1 en el Análisis de Ciclo de Vida del Biodiesel de
Palma Africana Usando Catálisis Heterogénea Básica**

LUIS SEGOVIA GARCIA

**Trabajo de Grado para Optar el Título de
Ingeniero Químico**

Director

Dr. Viatcheslav Kafarov

Co-director

Ing. Diego Armando Martínez

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

SALMOS 20. Oración pidiendo la victoria

Al músico principal. Salmo de David.

¹ Jehová te oiga en el día de conflicto;
El nombre del Dios de Jacob te defienda.

² Te envíe ayuda desde el santuario,
Y desde Sion te sostenga.

³ Haga memoria de todas tus ofrendas,
Y acepte tu holocausto. *Selah*

⁴ Te dé conforme al deseo de tu corazón,
Y cumpla todo tu consejo.

⁵ Nosotros nos alegraremos en tu salvación,
Y alzaremos pendón en el nombre de nuestro Dios;
Conceda Jehová todas tus peticiones.

⁶ Ahora conozco que Jehová salva a su ungido;
Lo oirá desde sus santos cielos
Con la potencia salvadora de su diestra.

⁷ Estos confían en carros, y aquéllos en caballos;
Mas nosotros del nombre de Jehová nuestro Dios tendremos memoria.

⁸ Ellos flaquean y caen,
Mas nosotros nos levantamos, y estamos en pie.

⁹ Salva, Jehová;
Que el Rey nos oiga en el día que lo invoquemos.

RVR1960

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Papito Dios por permitirme cumplir los anhelos de mi corazón.

A mi familia por tenerme presente en sus vidas.

A la familia de mi esposa por apoyarnos en la decisión de terminar la profesión.

A mi familia en la fe con respaldarnos con cadenas de oración, y por acogernos y hacernos parte de su familia.

Al grupo de investigación CIDES por darme la oportunidad de realizar mi proyecto en un tema de mi gusto.

Al ingeniero Diego Martínez por ser un compañero de trabajo en el desarrollo de este libro de grado.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. METODOLOGÍA | 16 |
| 1.1 SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS | 17 |
| 1.1.1 DISEÑO PROCESO DE PRE-TRATAMIENTO DE ÁCIDOS GRASOS LIBRES CON NEUTRALIZACIÓN Y POSTERIOR TRANSESTERIFICACIÓN HETEROGÉNEA BÁSICA | 17 |
| 1.1.2 DISEÑO PROCESO DE PRE-TRATAMIENTO DE ÁCIDOS GRASOS LIBRES CON ESTERIFICACIÓN Y POSTERIOR TRANSESTERIFICACIÓN HETEROGÉNEA BÁSICA | 23 |
| 1.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA | 26 |
| 1.2.1 INVENTARIO | 28 |
| 2. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 32 |
| 3. CONCLUSIONES | 39 |
| BIBLIOGRAFÍA | 40 |
| ANEXOS | 42 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Propiedades Críticas y Estructura UNIFAC de Triglicéridos | 17 |
| Tabla 2. Flujos Materiales Planta Pre-tratamiento con Neutralización de Ácidos Grasos Libres..... | 19 |
| Tabla 3. Constantes de Velocidad tipo Langmuir- Hinshelwood | 20 |
| Tabla 4. Parámetros de Arrhenius Estimados para los Triglicéridos..... | 22 |
| Tabla 5. Flujos Materiales Planta Biodiesel con Aceite Neutralizado..... | 22 |
| Tabla 6. Flujos Materiales Planta Pre-tratamiento con Esterificación de Ácidos Grasos Libres..... | 24 |
| Tabla 7. Flujos Materiales Planta Biodiesel con Aceite Esterificado | 25 |
| Tabla 8. Inventario planta de pre-tratamiento de aceite, 1 año | 30 |
| Tabla 9. Inventario planta biodiesel con transesterificación heterogénea básica, 1 año | 31 |
| Tabla 10. Inventario emisiones biodiesel puro | 31 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|------|
| Figura 1. Descripción General de las Simulaciones..... | 16 |
| Figura 2. Descripción General del ACV del Biodiesel | 16 |
| Figura 3. Planta Pre-tratamiento con Neutralización de Ácidos Grasos Libres..... | 18 |
| Figura 4. Planta Biodiesel con Transesterificación de Aceite Neutralizado | 22 |
| Figura 5. Planta Pre-tratamiento con Esterificación de Ácidos Grasos Libres | 24 |
| Figura 6. Planta Biodiesel con Transesterificación Aceite Esterificado..... | 25 |
| Figura 7. Inventario cultivo de palma, 25 años..... | 29 |
| Figura 8. Inventario planta extractora de aceite, 1 año | 30 |
| Figura 9. Calentamiento global para los sistemas bajo estudio basado en 1 MJ de combustible..... | 32 |
| Figura 10. Árbol de procesos para el ACV del biodiesel generado con SimaPro .. | 33 |
| Figura 11. Calentamiento global para la etapa del cultivo de palma, 1 MJ combustible..... | 34 |
| Figura 12. Calentamiento global planta extractora, 1MJ de combustible | 35 |
| Figura 13. Calentamiento global planta pre-tratamiento del aceite de palma, 1 MJ de combustible..... | 35 |
| Figura 14. Calentamiento global planta biodiesel con transesterificación heterogénea básica, 1 MJ de combustible..... | 36 |
| Figura 15. Calentamiento global "manejo de campo definitivo" alternativo, 1 MJ de combustible..... | 37 |
| Figura 16. Calentamiento global por uso de subproductos de planta extractora como fuente energética alternativa, 1 MJ de combustible | 37 |
| Figura 17. Calentamiento global producción de biodiesel vía catálisis heterogénea básica versus catálisis homogénea básica, 1 MJ de combustible | 38 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|---|------|
| Anexo A. Cultivo de palma de aceite africana..... | 42 |
| Anexo B. Código java | 66 |
| Anexo C. Escenario de subproductos planta extractora | 90 |
| Anexo D. Transesterificación homogénea básica de aceite de palma pre-tratado con esterificación de ácidos grasos | 95 |
| Anexo E. Transesterificación homogénea básica de aceite de palma pre-tratado con neutralización de ácidos grasos | 98 |

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE SIMAPRO7.1 EN EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL BIODIESEL DE PALMA AFRICANA USANDO CATÁLISIS HETEROGÉNEA BÁSICA.*

AUTOR: Luis Segovia García.**

PALABRAS CLAVES: Aceite de Palma Africana, Transesterificación de Aceite de Palma con Metanol, Catálisis Heterogénea Básica, Análisis de Ciclo de Vida.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se aplicó la técnica del análisis del ciclo de vida al biodiesel obtenido por transesterificación del aceite de palma africana con metanol mediante catálisis heterogénea básica para los procesos de: cultivo de palma de aceite africana, extracción del aceite de palma, pretratamiento del aceite de palma crudo extraído, producción del biodiesel a partir del aceite pretratado y su distribución final como B100 o mezcla B10 con el método de evaluación de impactos EPD 2007 versión 1.2 en el software SimaPro7.1.

Determinando que el proceso de transesterificación del aceite de palma africana con metanol tiene un aporte del 49.6% en emisiones de gases de efecto invernadero representativo por los consumos energéticos de la planta en el proceso de separación del biodiesel, el metanol y la glicerina, junto con un 49.2% de carga ambiental en emisiones que contribuyen al cambio climático por uso y distribución de B100.

También se realizaron escenarios adicionales como manejo de campo definitivo con poda de hojas de palma, con cultivo de leguminosa, además de raquis, fibras y cáscaras subproductos de la planta extractora como complemento al programa de fertilización; Y el uso de fibras y cáscaras como fuente energética alternativa en la planta extractora por combustión de estas.

* Proyecto de Grado

* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Viatcheslav Kafarov. Co-director: Ingeniero Diego Martínez.

ABSTRACT

TITLE: SIMAPRO7.1 APPLICATION IN THE LIFE CYCLE ANALYSIS OF AFRICAN PALM BIODIESEL USING HETEROGENEOUS CATALYSIS BASIC.

AUTHOR: Luis Segovia Garcia.*

KEY WORDS: African Palm Oil, Palm Oil Transesterification with Methanol Basic Heterogeneous Catalysis, Life Cycle Analysis.**

DESCRIPTION:

In this work we applied the technique of life cycle analysis on biodiesel obtained by transesterification of palm oil with methanol using basic heterogeneous catalysis processes : growing African oil palm , palm oil extraction , pre - treatment the extracted crude palm oil , biodiesel production from pretreated oil and final distribution as B100 or B10 blend with the impact assessment method EPD 2007 in software version 1.2 SimaPro7.1 .

Determining that the process of transesterification of palm oil with methanol has a contribution of 49.6 % in emissions of greenhouse gases representative for the energy consumption of the plant in the process of separation of the biodiesel, methanol and glycerin, along with cargo 49.2% environmental emissions that contribute to climate change by use and distribution of B100.

Additional scenarios were also performed as definitive field management pruning palm leaves with legume crop, plus rachis , fibers and shells of the extraction plant products to complement the program of fertilization , and the use of fibers and shells as a source alternative energy in the extraction plant for combustion of these .

* B. Sc. Thesis

** Physical – Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School.
Director: Dr. Viatcheslav Kafarov. Co-director: Ingeniero Diego Martínez.

INTRODUCCIÓN

El biodiesel es una alternativa energética al uso de combustibles fósiles con potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Comercialmente el biodiesel es producido por transesterificación de diferentes materias primas vegetales como el aceite de soja y el aceite de palma, siendo este último el más utilizado en el sureste de Asia (Verhé, Echim, and Greyt 2011). La transesterificación es una reacción química entre una molécula de triglicérido presente en un aceite vegetal o animal y un alcohol en presencia de un catalizador para producir un éster y glicerina (Borges and Díaz 2012).

Actualmente se emplea la transesterificación homogénea básica como proceso tradicional en la producción industrial de biodiesel (Verhé, Echim, and Greyt 2011), debido a la facilidad de consecución del catalizador por bajo costo, altas conversiones a presión atmosférica, bajas temperaturas de operación (40– 60 °C) y menos tiempo de reacción (30- 90 min) (Tariq, Ali, and Khalid 2012). Sin embargo, presentan algunos inconvenientes como son alto consumo energético, dificultad para recuperar o eliminar el catalizador de los productos, el tratamiento de las aguas residuales alcalinas y la interferencia de los ácidos grasos libres con el agua durante la reacción (Tariq, Ali, and Khalid 2012).

En los últimos años se han incrementado las investigaciones en escala de laboratorio para el desarrollo de catalizadores heterogéneos con fin de mejorar el proceso de producción de biodiesel, al buscar una reacción de flujo continuo donde no se consuma ni desactive el catalizador con el fin de reducir o eliminar la necesidad de separación aguas abajo y etapas de purificación dentro del proceso

(Helwani et al. 2009). Considerando como una posible opción el uso de zeolitas, hidrotalcitas, óxidos, alúmina, etc., como catalizadores en la transesterificación de aceites vegetales.

Como aplicación industrial está la planta Diester Industrie (Paris) en Sete, Francia, que emplea el proceso Esterfip-H que produce éster metílico por esterificación de aceite vegetal utilizando un óxido mixto (dos metales no nobles) como catalizador heterogéneo, eliminando varias etapas de neutralización y lavado necesarias en los procesos donde se utilizan catalizadores homogéneos. La pureza de los esteres metílicos y la glicerina excede el 98%, mejorando de manera global el proceso de producción de biodiesel a través de la utilización de los subproductos (Helwani et al. 2009).

Desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental existe la necesidad de cuantificar los impactos ambientales de estas tecnologías catalíticas heterogéneas y establecer un perfil comparativo con la tecnología ya implementada. El objetivo de este trabajo es evaluar los impactos ambientales del biodiesel de palma africana obtenido mediante transesterificación heterogénea básica a través de toda su cadena de producción. Para tal fin, se aplicó la metodología del análisis de ciclo de vida estandarizada en las normas ISO 14040- 14044, desde las etapas de cultivo hasta la distribución y uso del biocombustible pasando por la extracción de aceite y su transesterificación para producir biodiesel.

La norma española UNE-EN ISO 14040:2006 describe al análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto como la “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a

través de su ciclo de vida”. Y en ella misma también se contemplan cuatro fases necesarias para cualquier estudio de ACV:

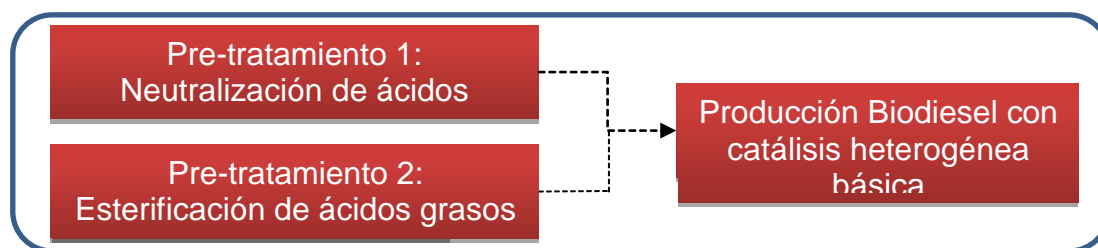
- a) Fase de definición del objetivo y el alcance,
- b) Fase del análisis del inventario,
- c) Fase de evaluación del impacto ambiental, y
- d) Fase de interpretación

En el ítem c) se empleó el indicador EPD 2007. Una EPD es una declaración ambiental certificada de un producto (Environmental Product Declaration), la cual reporta datos de productos en concordancia con la ISO 14025; además de proveer información de materiales y fuentes de energía en la evaluación de impactos potenciales en un número de categorías para un ACV (“Qué Es Un Sistema EPD? - Environmental Product Declarations - Product Category Rules” n.d.).

1. METODOLOGÍA

Este trabajo fue realizado en dos etapas. En la primera etapa se desarrollaron dos simulaciones; una simulación enfocada en la neutralización de los ácidos grasos libres seguida de la transesterificación heterogénea básica y la segunda, esterificación de los ácidos grasos libres con posterior transesterificación de triglicéridos (ver Figura 1).

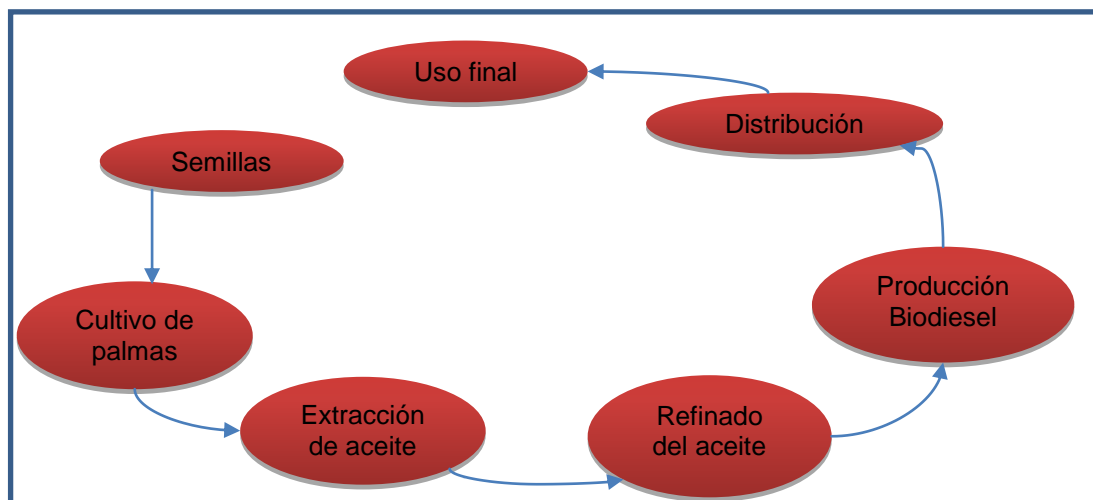
Figura 1. Descripción General de las Simulaciones



Fuente: El autor.

En la segunda etapa del trabajo se llevó a cabo la recopilación de la información técnica relacionada con todas las fases productivas y se realizó el montaje en SimaPro de los datos recolectados (ver Figura 2).

Figura 2. Descripción General del ACV del Biodiesel



Fuente: El autor.

1.1 Simulación de los procesos

Los procesos se simularon en Aspen HYSYS®. El aceite crudo de palma fue representado por los 3 triglicéridos de mayor porcentaje, tripalmitina 47.14%p, trioleína 37.52%p, trilinoleína 11.54%p y ácido palmítico 3.8%p (West, Posarac, and Ellis 2008). Los componentes no disponibles en la base de datos de HYSYS como trilinoleína y tripalmitina fueron creados como compuestos hipotéticos a partir de sus propiedades termodinámicas y la estructura UNIFAC mediante la herramienta Hypo Group (ver Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades Críticas y Estructura UNIFAC de Triglicéridos

| Sustancia | Teb (K) | Tc (K) | Pc (kPa) | Vc (m ³ /kmol) | Factor acéntrico | Estructura Funcional |
|--------------|---------|--------|----------|---------------------------|------------------|--|
| Trioleína | 822.5 | 943.2 | 322.4 | 3.25 | 0.56 | (CH ₃) ₃ (CH ₂) ₄₁ CH(CH=CH) ₃ (CH ₂ COO) ₃ |
| Trilinoleína | 820.9 | 942.8 | 321.9 | 3.21 | 4.59 | (CH ₃) ₃ (CH ₂) ₃₅ CH(CH=CH) ₆ (CH ₂ COO) ₃ |
| Tripalmitina | 804.6 | 923.3 | 328.3 | 2.94 | 6.80 | (CH ₃) ₃ (CH ₂) ₄₁ CH(CH ₂ COO) ₃ |

Fuente: (García et al. 2010).

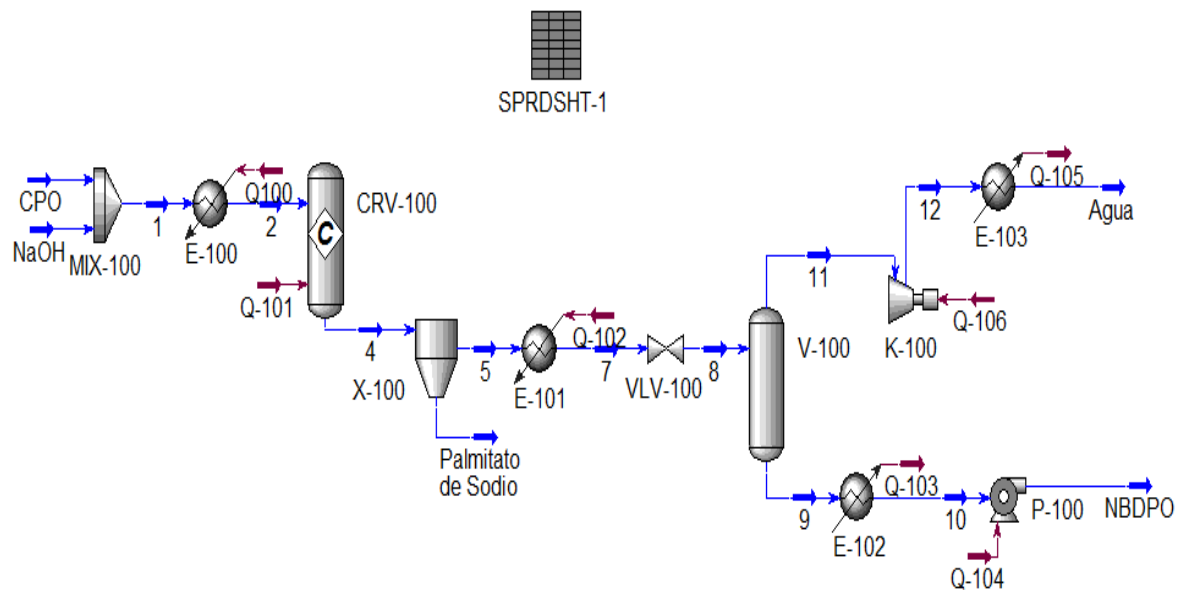
Se utilizó el modelo termodinámico NRTL (Non- Random Two Liquid) para describir el equilibrio líquido-líquido y NRTL para describir el líquido-vapor, considerando la presencia de compuestos altamente polares como son el metanol y la glicerina (Zapata et al. 2007), estimando los parámetros de interacción binaria para cada modelo. Todas las simulaciones fueron desarrolladas en estado estable.

1.1.1 Diseño proceso de pre-tratamiento de ácidos grasos libres con neutralización y posterior transesterificación heterogénea básica

La simulación fue diseñada para producir 5.56×10^4 ton de aceite de palma neutralizado por año. La Figura 3 muestra la etapa de neutralización de ácidos

grasos. El flujo de hidróxido de sodio (NaOH) fue ajustado con la estequiometría de la reacción para una conversión completa del ácido palmítico. Al iniciar el proceso fueron mezcladas 5.78×10^4 ton de aceite crudo de palma (CPO, Crude Palm Oil)/ año con 342.9 ton NaOH/ año, y la mezcla fue calentada a 65°C . La corriente fue ingresada a un reactor de conversión CRV-100 (Conversion Reactor Volume) donde el ácido palmítico fue neutralizado para producir palmitato de sodio (sólido), el cual fue posteriormente separado de la fase líquida (corriente 5). La corriente 5 libre de ácido palmítico y principalmente compuesto de triglicéridos fue calentada ligeramente hasta los 100°C para retirarle el agua. La corriente de fondos del separador flash (corriente 9) fue ajustada a la temperatura de 60°C y presión de 1 atm para luego ingresar al proceso de transesterificación como aceite de palma neutralizado (corriente NBDPO). La Tabla 2 muestra las condiciones de las corrientes principales de la Figura 3.

Figura 3. Planta Pre-tratamiento con Neutralización de Ácidos Grasos Libres



Fuente: El autor.

Tabla 2. Flujos Materiales Planta Pre-tratamiento con Neutralización de Ácidos Grasos Libres

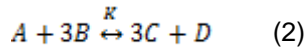
| | Corrientes alimento | | Corrientes producto | | | |
|-----------------------------|---------------------|-------|---------------------|--------------------|-------|-------|
| | CPO | NaOH | 4 | Palmitato de sodio | Agua | NBDPO |
| Temperatura (°C) | 25 | 25 | 65 | 65 | 25 | 60.11 |
| Presión (kPa) | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.2 | 101.3 | 101.3 |
| Flujo molar (kmol/h) | 8.49 | 0.97 | 9.47 | 0.98 | 0.97 | 7.51 |
| Flujo másico (kg/h) | 6602 | 39.14 | 6641 | 275.1 | 17.71 | 6349 |
| Composición másica | | | | | | |
| Trioleína | 0.37 | 0.00 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.39 |
| Trilinoleína | 0.11 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.12 |
| Tripalmitina | 0.47 | 0.00 | 0.46 | 0.01 | 0.01 | 0.49 |
| Ácido palmítico | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Hidróxido de sodio | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Agua | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.99 | 0.00 |
| Palmitato de sodio | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.99 | 0.00 | 0.00 |

Fuente: El autor.

El aceite neutralizado (corriente NBDPO) fue enviado a la segunda etapa del proceso, donde se llevó a cabo la transesterificación de los triglicéridos presentes en el aceite. La Figura 4 muestra el diagrama de procesos en Aspen HYSYS de la etapa de transesterificación heterogénea en medio alcalino.

Al iniciar esta segunda etapa del proceso, el flujo de metanol fue calentado hasta la temperatura de reacción de 60°C y mezclado con la corriente NBDPO. La mezcla fue alimentada al reactor PBR (Packed Bed Reactor) donde se llevó a cabo la reacción de transesterificación usando di-glicérido de calcio soportado en óxido de calcio como catalizador sólido por alta conversión a esteres metílicos, estabilidad durante la reacción, reusabilidad y descripción apropiada para la ecuación de velocidad de reacción. En el reactor se alcanzó una conversión del 99.95 % de los triglicérido presentes en el aceite de palma. La cinética química de la reacción correspondió al modelo Langmuir- Hinshelwood, ecuación 1, donde los subíndices A, B, C y D son el triglicérido, metanol, éster metílico y glicerol (Hsieh, Kumar, and Wu 2010).

$$r_C = \frac{k C_B^{-2} \left(C_A C_B^3 - \frac{C_C^3 C_D}{K} \right)}{(1 + K_A C_A + K_B C_B + K_C C_C + K_D C_D)^2} \quad (1)$$



Se ingresó el modelo cinético en Simulation Basis Manager teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción de transesterificación, energías de activación, factores pre-exponenciales para reacción directa e inversa; así como también las constantes de equilibrio del término de adsorción (ver Tabla 3). Se realizó la conversión de unidades para la velocidad de reacción del modelo de reacción propuesto por Langmuir- Hinshelwood y la requerida por HYSYS. Para ello fue necesario conocer la densidad del catalizador sólido y porosidad del lecho empacado (Hesketh 2003), ecuación 4; que para efectos prácticos se asumió la densidad del soporte catalítico, y se trabajó con una porosidad de 0.33 de partículas esféricas en el lecho empacado como valor sugerido en la literatura para reactores catalíticos de lecho fijo (Smith and Gómez 1991).

Tabla 3. Constantes de Velocidad tipo Langmuir- Hinshelwood

| Temperatura | $k = \frac{L^2}{g_{cat} * mol * h}$ | K | $K_A \left[\frac{L}{mol} \right]$ | $K_B \left[\frac{L}{mol} \right]$ | $K_C \left[\frac{L}{mol} \right]$ | $K_D \left[\frac{L}{mol} \right]$ | $E_A \left[\frac{J}{mol} \right]$ |
|-------------|-------------------------------------|-----|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 60°C | 4.8×10^{-3} | 3.5 | 1.2 | 0.01 | 0.23 | 0.21 | 42 096 |

Fuente: (Hsieh, Kumar, and Wu 2010)

$$r_c [=] \frac{mol}{g_{Catalizador \cdot hora}} \quad (3a)$$

$$r_{hysys} [=] \frac{mol}{L \cdot hora} \quad (3b)$$

$$r_{hysys} = r * \rho_c * \frac{(1-\emptyset)}{\emptyset} \quad (4)$$

Cálculo dimensional

$$r_{hysys} = r_c * \rho_{CaCO_3} * \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}, \text{ donde } \varepsilon \text{ es la porosidad del lecho} \quad (5)$$

$$r_{hysys} [=] r_c \left\{ \frac{mol}{g_{Catalizador \cdot h}} \right\} * \left\{ 2.711 \frac{g_{CaCO_3}}{cm^3} * \frac{10^3 cm^3}{L} \right\} * \left\{ \frac{1-0.4}{0.4} \right\} \quad (6)$$

$\eta_{hysys} = \eta_c * factor1$ (7); donde factor 1 representa al segundo y tercer término de la ecuación 6

$$\eta_{hysys} = factor1 * \frac{k C_B^{-2} \left(C_A C_B^3 - \frac{C_C^3 C_D}{K} \right)}{(1 + K_A C_A + K_B C_B + K_C C_C + K_D C_D)^2} \quad (8)$$

$$\eta_{hysys} = [k * factor1] * \left[\frac{C_B^{-2} \left(C_A C_B^3 - \frac{C_C^3 C_D}{K} \right)}{(1 + K_A C_A + K_B C_B + K_C C_C + K_D C_D)^2} \right] \quad (9)$$

Analizando el término del primer paréntesis cuadrado

$$factor1 * k = k_{nueva} \quad (10)$$

$$k_{nueva} = A_0 * \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (11)$$

Reemplazando los términos conocidos: k, E_a , $R=8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, $T=313.15 \text{ K}$; para determinar el nuevo valor de A_0

$$A_0 = \frac{k_{nueva}}{\exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right)} \quad (12)$$

La energía de activación de los reactivos es igual al calor de reacción, valor leído en HYSYS más la energía de activación de los productos (Levenspiel 2002), ecuación 13.

$$E_a = E_a' + \Delta H \quad (13)$$

Y del parámetro pre-exponencial de Arrhenius

$$K = \frac{k_{nueva}}{k'} \quad (14)$$

$$k' = \frac{k_{nueva}}{K} \quad (15)$$

$$k' = A_0' * \exp\left(\frac{-E_a'}{R \cdot T}\right) \quad (16)$$

$$A_0' = \frac{k'}{\exp\left(\frac{-E_a'}{R \cdot T}\right)} \quad (17)$$

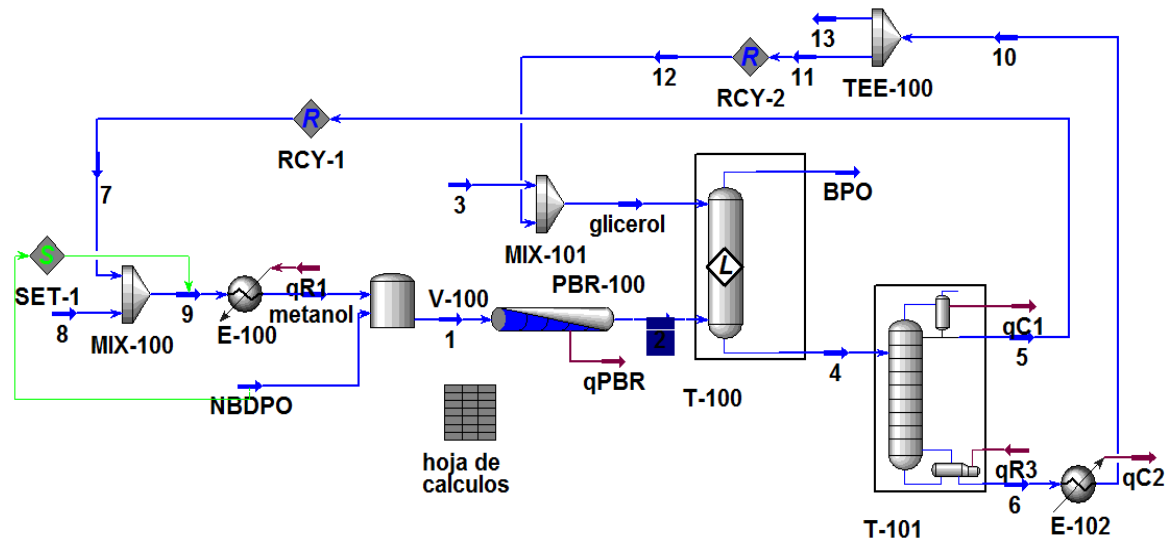
Este procedimiento se realizó con los tres triglicéridos considerados en el aceite de palma, determinando los parámetros de Arrhenius para la configuración del Set de reacción heterogénea en HYSYS (ver Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de Arrhenius Estimados para los Triglicéridos

| Triglicérido | A_0 , l/mol*K | ΔH_{rxn} , J/mc | E_a , J/mol | A_0 , l/mol*k |
|--------------|--------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|
| Trioleína | 7.78×10^7 | -5100 | 47196 | 1.40×10^8 |
| Trilinoleína | 7.78×10^7 | -21000 | 63096 | 4.36×10^{10} |
| Tripalmitina | 7.78×10^7 | -21000 | 63096 | 4.36×10^{10} |

Fuente: El autor.

Figura 4. Planta Biodiesel con Transesterificación de Aceite Neutralizado



Fuente: El autor.

Tabla 5. Flujos Materiales Planta Biodiesel con Aceite Neutralizado

| | Corrientes alimento | | | | Corrientes producto | |
|---------------------------|---------------------|-------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| | NBDPO | 8 | 2 | 3 | BPO | 13 |
| Temperatura (°C) | 60.11 | 25 | 60 | 25 | 25.02 | 25 |
| Presión (kPa) | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 |
| Flujo molar (kmol/h) | 7.51 | 22.83 | 233 | 152 | 22.58 | 159.2 |
| Flujo másico (kg/h) | 6349 | 731.5 | 1.35×10^4 | 1.4×10^4 | 6380 | 1.46×10^4 |
| Composición másica | | | | | | |
| Trioleína | 0.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Trilinoleína | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Tripalmitina | 0.49 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Metanol | 0.00 | 1.00 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Glicerol | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 1.00 | 0.00 | 0.99 |
| Oleato de metilo | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.39 | 0.00 |
| Linoleato de metilo | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.12 | 0.00 |
| Palmitato de metilo | 0.00 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.49 | 0.01 |

Fuente: El autor.

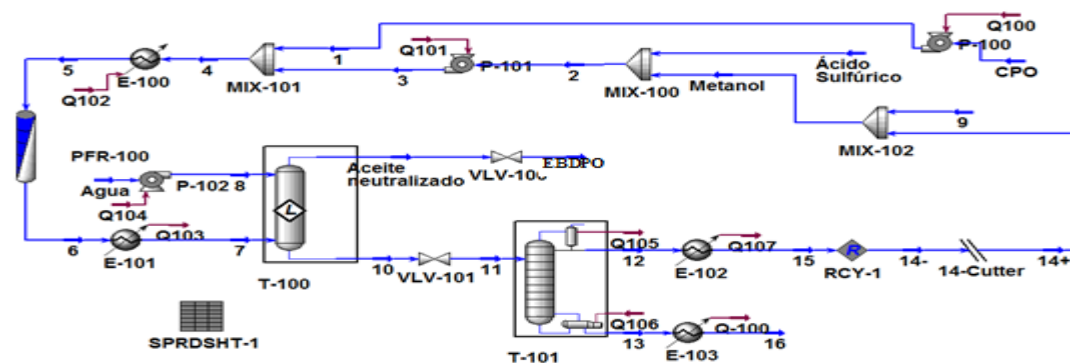
Continuando con la descripción de la planta Biodiesel con Transesterificación del Aceite Neutralizado en el flujo de salida del reactor PBR-100 (ver Figura 4), tenemos la corriente 2 compuesta principalmente por esteres metílicos, metanol y glicerina, fue enviada a una torre de lavado con glicerol simulada como una torre de extracción líquido- líquido con 2 etapas teóricas y a presión atmosférica, en la cual se llevó a cabo la remoción del biodiesel de palma (corriente BPO). La corriente de fondos de la extractora L-L fue llevada a una torre de destilación, operando con 5 platos teóricos y a 1 atm, obteniendo glicerol con alto grado de pureza. La Tabla 5 muestra las condiciones de operación para las corrientes principales de la Figura 4.

1.1.2 Diseño proceso de pre-tratamiento de ácidos grasos libres con esterificación y posterior transesterificación heterogénea básica

La planta procesa 5.78×10^4 ton de aceite crudo de palma/año (ver Figura 5). El aceite crudo de palma fue mezclado con metanol en una relación molar de ácido palmítico: metanol de 19:1. Luego, la corriente de entrada al reactor de esterificación (PFR 100; 7 m^3 con 200 tubos de 5 mm de espesor y 1 m longitud) fue acondicionada con ácido sulfúrico en un porcentaje correspondiente al 1 % del flujo másico de aceite y calentada a 60°C . El ácido sulfúrico fue escogido como catalizador ácido debido a que la reacción se lleva en condiciones más suaves y requiere menor consumo energético, ya que los catalizadores ácidos heterogéneos presentan tiempos de reacción elevados y por esta razón no son utilizados industrialmente (Tariq, Ali, and Khalid 2012). La reacción de esterificación fue modelada usando la cinética propuesta por *Zapata et al.* alcanzando una conversión del 94.9 % del ácido palmítico. Los parámetros cinéticos de Arrhenius son: $A_0=1.27 \text{ s}^{-1}$ y $E_a=13300 \text{ kJ/ kmol}$ (Zapata et al. 2007). La corriente de salida del reactor de esterificación fue bombeada a una torre de lavado con agua, donde el catalizador fue removido. La torre de lavado fue simulada para separar el aceite de palma esterificado (corriente EBDPO) y se

operó con 6 etapas teóricas y una presión de operación de 1.92 atm. Debido a la alta relación molar metanol: ácido palmítico utilizada, fue necesario separar el metanol en exceso mediante destilación y recircularlo luego dentro del proceso. La torre de destilación fue simulada para 10 platos, operando a 1 atm, con una relación de reflujo molar de 20.3 y una fracción molar de metanol en el condensador del 99.9 % molar y agua en la corriente de fondos de la torre (flujo 16). La Tabla 6 muestra las condiciones de operación para las principales corrientes del proceso mostrado en la Figura 5.

Figura 5. Planta Pre-tratamiento con Esterificación de Ácidos Grasos Libres



Fuente: El autor.

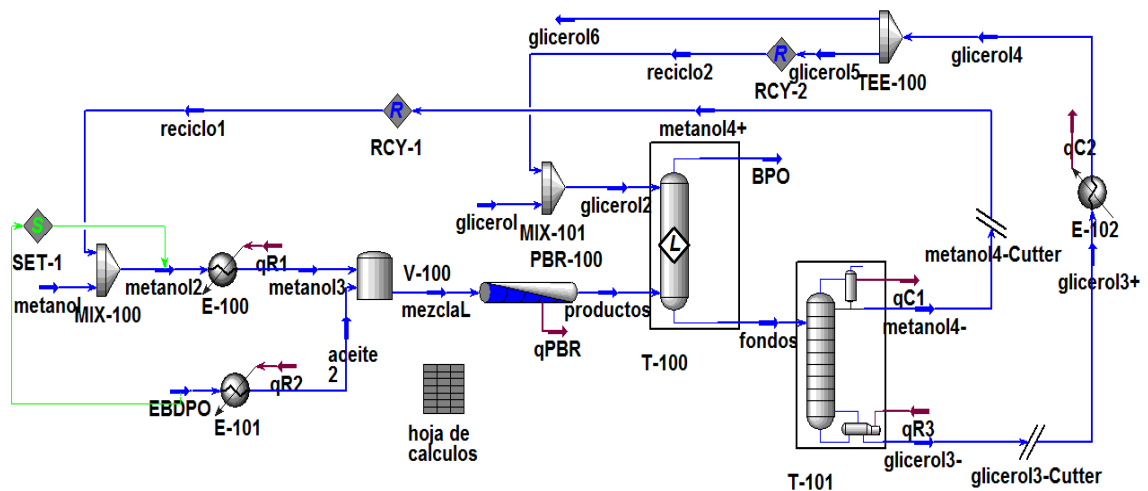
Tabla 6. Flujos Materiales Planta Pre-tratamiento con Esterificación de Ácidos Grasos Libres

| | Corrientes alimento | | | | Corrientes producto | | |
|----------------------------|---------------------|-----------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| | CPO | Ácido sulfúrico | 9 | Agua | 6 | EBDPO | 16 |
| Temperatura (°C) | 25 | 25 | 25 | 25 | 59.21 | 29.71 | 25 |
| Presión (kPa) | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 265 | 101.3 | 101.3 |
| Flujo molar(kmol/h) | 8.49 | 0.67 | 1.53 | 50.69 | 27.76 | 8.91 | 52.66 |
| Flujo másico (kg/h) | 6602 | 66.02 | 49.09 | 913.2 | 7264 | 6577 | 1059 |
| Composición másica | | | | | | | |
| Trioleína | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.34 | 0.37 | 0.01 |
| Trilinoleína | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.12 | 0.00 |
| Tripalmitina | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.42 | 0.47 | 0.00 |
| Ácido palmítico | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ácido sulfúrico | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.06 |
| Metanol | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.06 |
| Agua | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.01 | 0.87 |
| Palmitato de metilo | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.00 |

Fuente: El autor.

El desarrollo de la planta de biodiesel con transesterificación de aceite esterificado fue similar al descrito en el ítem 2.1.1. En este caso, la torre de extracción líquido-líquido fue operada con 4 platos y a 1 atm, mientras la torre de destilación operó con 5 platos teóricos, 1 atm, razón de reflujo molar de 1.3, La Figura 6 muestra el diagrama de procesos de la transesterificación de aceite esterificado y la Tabla 7 muestra sus condiciones de operación.

Figura 6. Planta Biodiesel con Transesterificación Aceite Esterificado



Fuente: El autor.

Tabla 7. Flujos Materiales Planta Biodiesel con Aceite Esterificado

| | Corrientes alimento | | | | Corrientes producto | |
|-----------------------------|---------------------|---------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| | EBDPO | metanol | productos | glicerol | BPO | glicerol6 |
| Temperatura (°C) | 30.45 | 25 | 60 | 25 | 25.01 | 25 |
| Presión (kPa) | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 |
| Flujo molar (kmol/h) | 8.62 | 23.01 | 266.6 | 152 | 23.36 | 161.4 |
| Flujo másico (kg/h) | 6557 | 737.3 | 1.53×10^4 | 1.4×10^4 | 6585 | 1.48×10^4 |
| Composición másica | | | | | | |
| Trioleína | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Trilinoleína | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Tripalmitina | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Metanol | 0.00 | 1.00 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Glicerol | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 1.00 | 0.00 | 1.00 |
| Oleato de metilo | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.37 | 0.00 |
| Linoleato de metilo | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.12 | 0.00 |
| Palmitato de metilo | 0.04 | 0.00 | 0.22 | 0.00 | 0.51 | 0.00 |
| Ácido palmítico | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Fuente: El autor.

1.2 Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) se realizó mediante la aplicación de las norma ISO 14040 (“Norma Europea, UNE-EN ISO 14040. Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Principios y Marco de Referencia” 2006).

Objetivo y Alcance

Desarrollar y comparar los perfiles ambientales de la producción de biodiesel basado en la transesterificación heterogénea básica del aceite de palma.

Alcance del estudio

Sistemas estudiados. Los sistemas bajo estudio en este proyecto fueron:

- Producción y combustión de biodiesel con esterificación/ transesterificación de aceite de palma africana, mezcla B10. Proceso I.
- Producción y combustión de biodiesel con neutralización/ transesterificación de aceite de palma africana, mezcla B10. Proceso II.
- Producción y combustión de biodiesel con esterificación/ transesterificación de aceite de palma africana, mezcla B100. Proceso III.
- Producción y combustión de biodiesel con neutralización/ transesterificación de aceite de palma africana, mezcla B100. Proceso IV.
- Producción y combustión de diésel fósil. Proceso V.

Unidad funcional. La unidad funcional fue establecida en 1 MJ de cada combustible de los sistemas bajo estudio.

Límites del sistema. Para los sistemas de biodiesel se tuvieron en cuenta todas las etapas que comprenden su ciclo de vida, es decir, se tuvieron en cuenta dentro del análisis las etapas de cultivo de la palma africana, transporte del fruto a la planta de beneficio o extractora de aceite, transporte del aceite, producción del biodiesel y su distribución y consumo. Para el caso del sistema de diésel fósil, el

inventario comprende las etapas de extracción, transporte, refinación y combustión del diésel.

Etapas excluidas del análisis. En este estudio no se tuvo en cuenta las cargas ambientales relativas a los bienes de capital (maquinaria e infraestructura) porque su vida útil es muy extensa. Esta suposición se fundamenta en la unidad funcional establecida, 1 MJ, y hace referencia a que las plantas podrían producir múltiplos muy grandes de la misma en un determinado tiempo y que los bienes de capital puedan ser utilizados por muchos años; por consiguiente, las emisiones generadas en la elaboración de los bienes de capital por cada MJ de biocombustible producido son muy pequeñas, y despreciables cuando se comparan con las emisiones generadas por la operación de la planta.

Procedimientos de asignación. Los procedimientos de asignación fueron aplicados en todas las etapas del ciclo de vida donde se obtuvieron más de un producto con valor agregado, como por ejemplo, en la etapa de transesterificación donde se produjo biodiésel y también glicerina. Por lo tanto, fue necesario evaluar las cargas ambientales asociadas a cada producto. En todos los casos se aplicó asignación másica.

Herramienta informática utilizada. El presente estudio de ACV se realizó utilizando el software SimaPro v7.1, desarrollado por la compañía PRéConsultants. Este recurso informático contiene un gran número de bases de datos y metodologías, las cuales son de gran ayuda para analizar y comparar los aspectos medio ambientales de un producto de forma sistemática y consistente, siguiendo la normatividad ISO 14040.

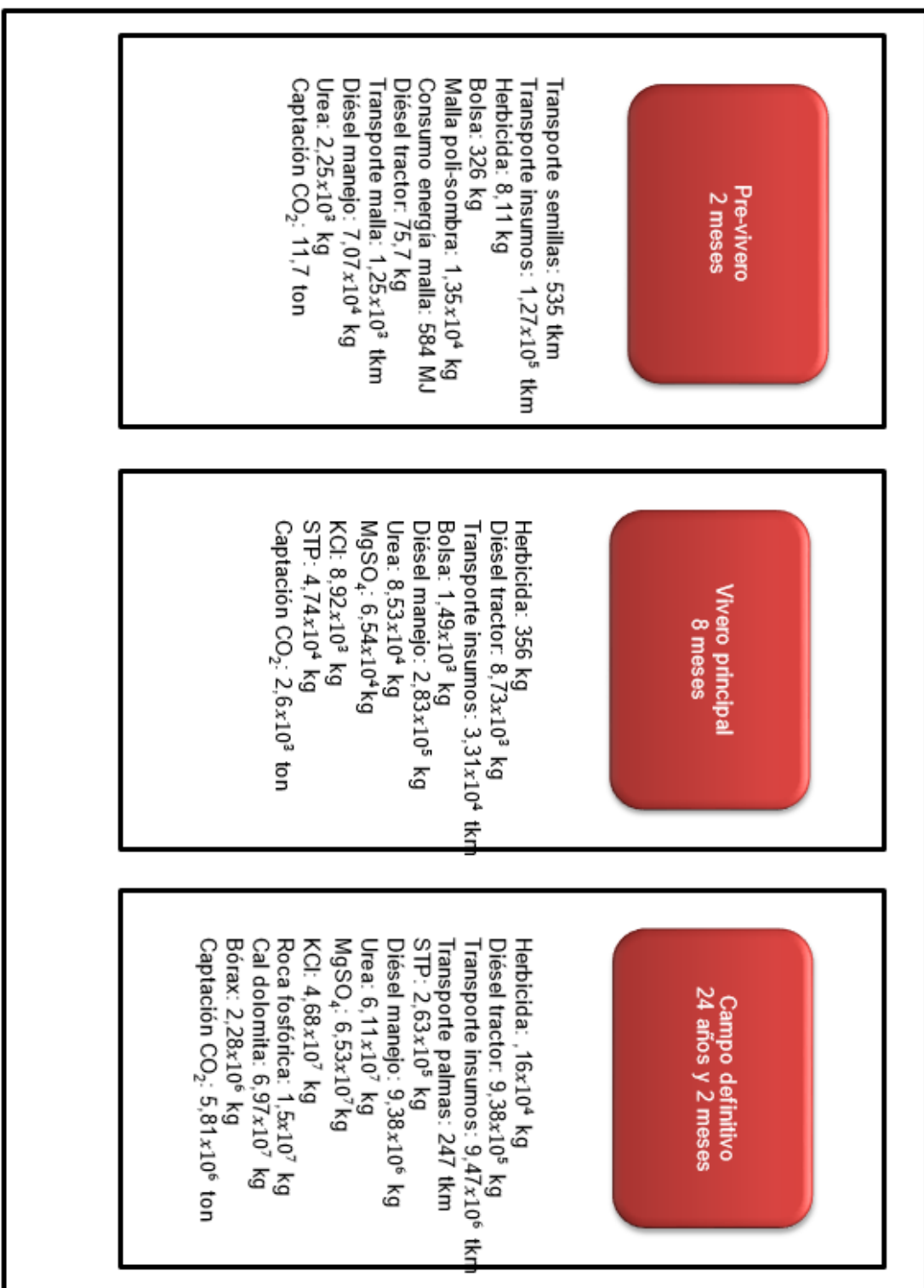
Metodología de impacto ambiental. La evaluación de impacto se realizó utilizando el método EPD 2007, el cual se fundamenta en el procedimiento de caracterización para calcular la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto ambiental determinada. Con este método es posible evaluar

seis categorías de impacto, pero este trabajo fue enfocado hacia la categoría de cambio climático.

1.2.1 Inventario

La recopilación de los datos para el sistema del producto se realizó en 5 etapas. La primera etapa corresponde al cultivo de palma donde se produce racimo de fruta de fresca (RFF), para su desarrollo se visitó las instalaciones del Campo Experimental La Vizcaína, Cenipalma, vía San Alberto Cesar. Esta etapa se dividió en 3 subprocesos principales: (i) pre-vivero con duración de 2 meses, (ii) vivero principal con duración de 8 meses y (iii) campo definitivo con una duración de 24 años y 2 meses (ver Anexo A). Dentro de este inventario se cuantificaron actividades como transporte por compra de semilla al cultivo, transporte por compra de diésel, transporte por compra de fertilizantes y herbicida, transporte de suelo para el sustrato, transporte de arena, transporte de bolsas y malla poli-sombra, uso de herbicida, preparación del terreno con labores de mecanización en tractor, uso de fertilizantes, manejo del cultivo con labores de riego y poda (ver Figura 7). La captación de CO₂ en la palma se consideró como 69.9 ton CO₂ retenidas/ Ha*año (Romero, Ayala, and R 2007).

Figura 7. Inventario cultivo de palma, 25 años



Fuente: Ver Anexo A.

La segunda etapa correspondió a la extracción del aceite de palma. La Figura 8 muestra los principales datos utilizados para el montaje en SimaPro de esta etapa del ciclo vida. La información corresponde a un proceso de extracción de aceite de palma por prensado, sin la utilización de ningún tipo de solvente químicos.

Figura 8. Inventario planta extractora de aceite, 1 año



Fuente: (“Wiley: Bailey’s Industrial Oil and Fat Products, 6 Volume Set, 6th Edition - Fereidoon Shahidi” n.d.)

La tercera etapa corresponde al inventario de la planta de pre-tratamiento del aceite crudo de palma, donde los flujos máxicos fueron ajustados a una base de cálculo de 1 año (ver Tabla 8). La información reportada por las simulaciones fue utilizada como información primaria de esta etapa.

Tabla 8. Inventario planta de pre-tratamiento de aceite, 1 año

| Proceso unitario | Unidad funcional | Flujos de referencia |
|--|--|---|
| Planta neutralización | 5.561x10 ⁴ ton aceite refinado/ año | 5.78x10 ⁴ ton aceite crudo |
| | | 43 km Puerto Wilches- Bca. |
| | | 407 km, soda cáustica. Medellín |
| | | 342.9 ton soda cáustica |
| | | 1.07x10 ¹⁰ kJ usada |
| | | 155.1 ton aguas de servicio |
| Planta esterificación | 5.762x10 ⁴ ton aceite refinado/ año | 2.41x10 ³ ton palmitato de sodio |
| | | 5.78x10 ⁴ ton aceite crudo |
| | | 682 km, metanol. Cali |
| | | 430.1 ton metanol |
| | | 465 km, ácido sulfúrico. Caldas |
| | | 578.4 ton ácido sulfúrico |
| | | 8.0x10 ³ ton agua usada |
| 9.27x10 ³ ton aguas de servicio | | |
| | | 1.14x10 ¹¹ kJ |

Fuente: El autor. Las distancias fueron halladas con la aplicación de Google maps

La cuarta etapa representa los flujos másicos y energéticos de la planta productora de biodiesel mediante transesterificación heterogénea básica ajustados a la misma base de cálculo (ver Tabla 9).

Tabla 9. Inventario planta biodiesel con transesterificación heterogénea básica, 1 año

| Proceso unitario | Unidad funcional | Flujos de referencia |
|---|--|--|
| Planta biodiesel aceite neutralizado | 5.589x10 ⁴ ton biodiesel/ año | 5.56x10 ⁴ ton aceite neutralizado |
| | | 11 km, planta pre-tratamiento |
| | | 425 km, catalizador. Bogotá |
| | | 103.018 ton catalizador |
| | | 682 km, metanol. Cali |
| | | 6408 ton metanol |
| | | 5900 ton glicerina producida |
| Planta biodiesel aceite esterificado | 5.787x10 ⁴ ton biodiesel/año | 2.1x10 ¹² kJ consumidos |
| | | 5.76x10 ⁴ ton aceite esterificado |
| | | 11 km, planta pre-tratamiento |
| | | 425 km, catalizador. Bogotá |
| | | 103.02 ton catalizador |
| | | 682 km, metanol. Cali |
| | | 6692 ton metanol |
| 7600 ton glicerina producida | | |
| | | 2.18x10 ¹² kJ consumidos |

Fuente: El autor. Las distancias fueron halladas con la aplicación de Google maps

La quinta etapa del inventario corresponde a las emisiones por combustión del biodiesel puro ajustado a una base de cálculo por año (ver Tabla 10). Las emisiones fueron estimadas a través de la calculadora de emisiones diseñada por “America’s Advance Biofuel” (“Emissions Calculator - Biodiesel.org” n.d.).

Tabla 10. Inventario emisiones biodiesel puro

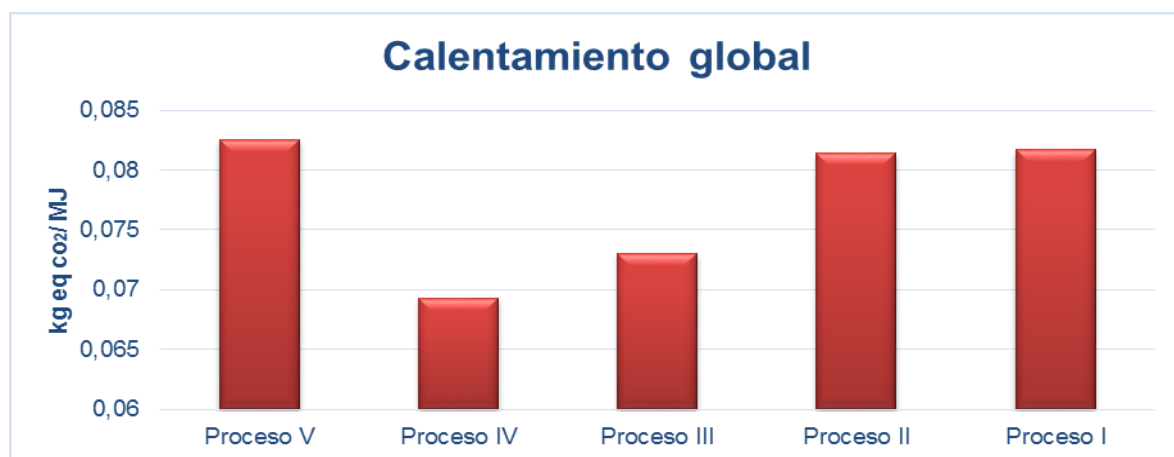
| Proceso unitario | Unidad funcional | Flujos de referencia |
|--|------------------------------------|--|
| B100. Aceite neutralizado. Catálisis heterogénea básica | 5.35x10 ⁵ ton B100/ año | 18262035 lb CO |
| | | 3.888x10 ⁹ lb CO ₂ |
| | | 1321749 lb HC |
| | | 24793276 lb NOx |
| | | 1687458.9 lb PM |
| | | 696780 lb SO ₂ |
| B100. Aceite neutralizado. Catálisis heterogénea básica | 5.54x10 ⁵ ton B100/ año | 18839948 lb CO |
| | | 4.011x10 ⁹ lb CO ₂ |
| | | 1363576.5 lb HC |
| | | 23880641 lb NOx |
| | | 1740859.5 lb PM |
| | | 718830 lb SO ₂ |

Fuente: (“Emissions Calculator - Biodiesel.org” n.d.)

2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al evaluar los impactos ambientales de los sistemas estudiados para un flujo de referencia o unidad funcional de 1 MJ de combustible (ver Figura 9), los resultados muestran una reducción del 16.07 % en kg eq de CO₂ en el Proceso IV, seguido de un 11.51 % kg eq de CO₂ en el Proceso III, también se observa una diferencia del 1.43 % y 1.02 % para los Procesos II y I. Esto puede ser debido a que en la planta de pre-tratamiento con neutralización se genera palmitato de sodio sólido como producto evitado y agua con pureza del 99.9%.

Figura 9. Calentamiento global para los sistemas bajo estudio basado en 1 MJ de combustible

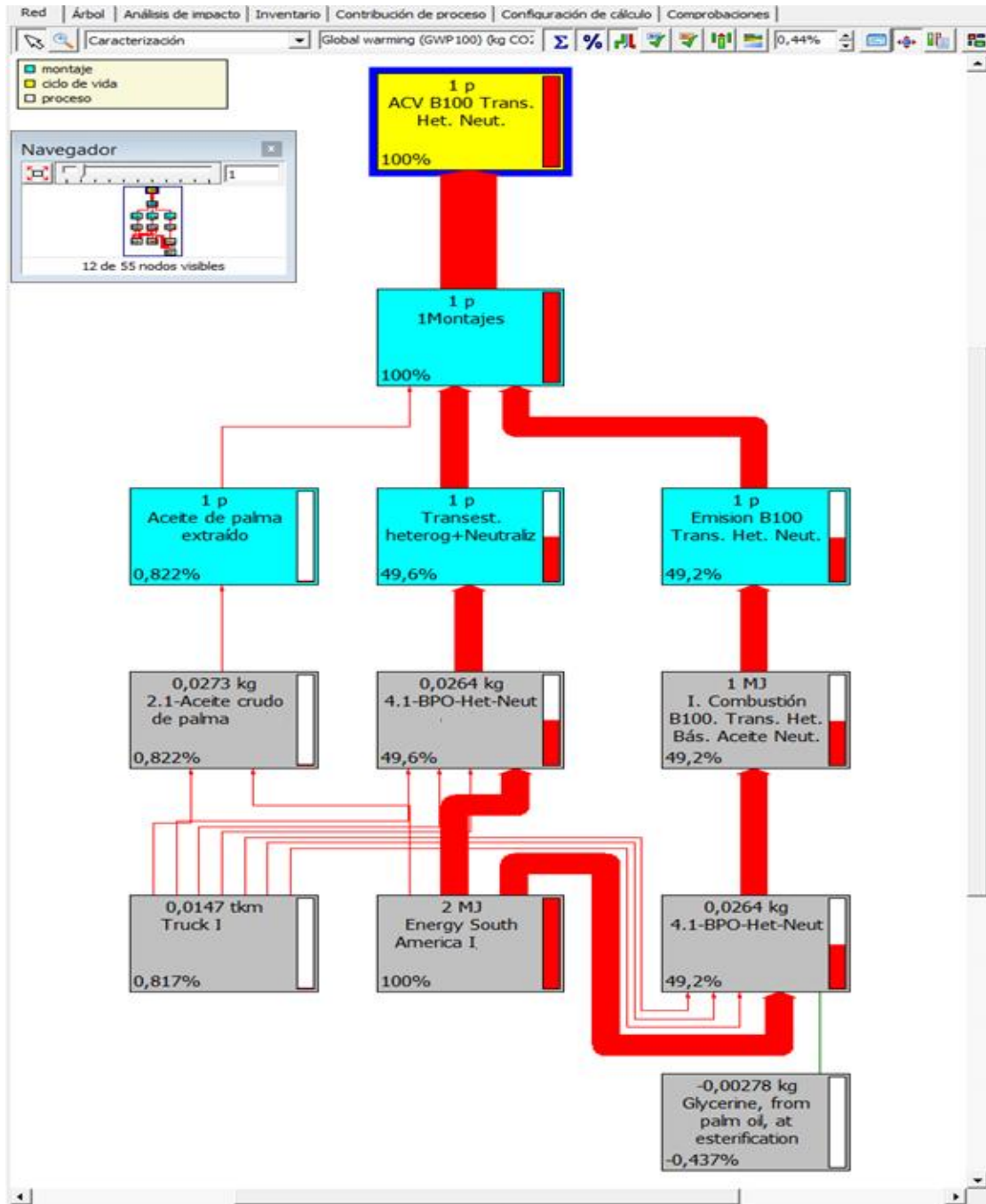


Fuente: El autor.

Analizando el árbol de procesos del ciclo de vida del biodiesel en la categoría de calentamiento global generado por SimaPro® (ver Figura 10), se observa que las etapas de cultivo y extracción del aceite no representan un impacto significativo en el ciclo de vida del biodiesel; ahora, las mayores cargas ambientales corresponden a la etapa de producción de biodiesel con 0.07 kg eq de CO₂ por MJ de combustible y, a las emisiones generadas por combustión del biodiesel con 0.0693 kg eq por MJ de combustible. Con respecto a la planta de biodiesel, la carga

estaría asociada al alto consumo energético en la torre de destilación, ya que en ella se consume la mayor cantidad de energía.

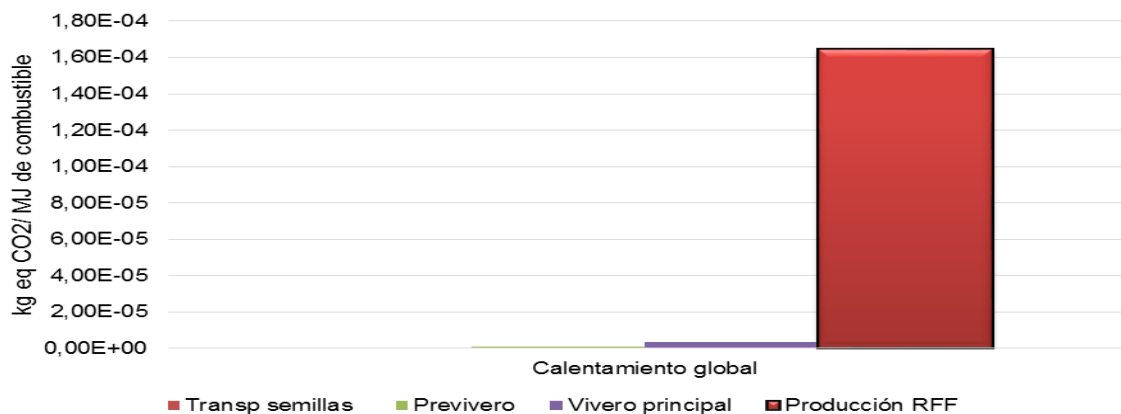
Figura 10. Árbol de procesos para el ACV del biodiesel generado con SimaPro



Fuente: El autor.

Examinando el perfil ambiental de la etapa del cultivo de palma (ver Figura 11), se observa que el proceso “Producción RFF” es el que presenta la mayor carga ambiental con 1.65×10^{-4} kg eq de CO₂/ MJ de combustible para la categoría de calentamiento global. Este impacto estaría directamente relacionado con el consumo de diésel en las actividades de mecanización (7.81 %), uso de fertilizantes en el cultivo (16.95 %) y consumo de diésel por uso de guadaña en tareas como plateo de la palma (71.4 %). El consumo de combustible por maquinaria liviana (guadaña) es mayor que el consumo de combustible por maquinaria pesada debido a que la maquinaria liviana es utilizada durante 24 años de los 25 años de vida del cultivo.

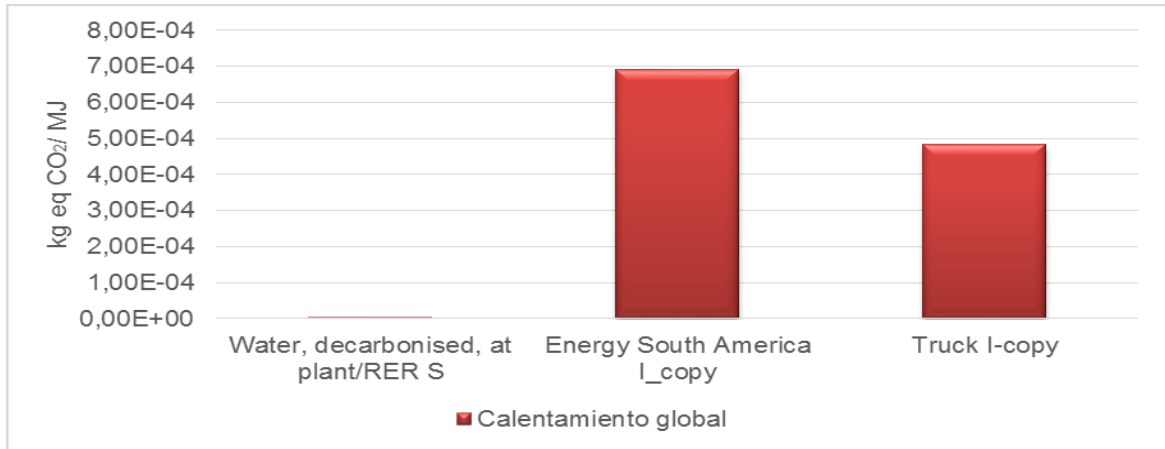
Figura 11. Calentamiento global para la etapa del cultivo de palma, 1 MJ combustible



Fuente: El autor.

Analizando las cargas ambientales asociadas solo para la etapa de extracción del aceite contenido en el fruto de palma (ver Figura 12), se muestran que los procesos más significativos en el calentamiento global son consumo energético por planta de beneficio (58.8%) y transporte de frutos del cultivo desde la plantación de palma hasta la extractora de aceite (41.2%). Estos resultados se dan por utilizar una planta con extracción mecánica.

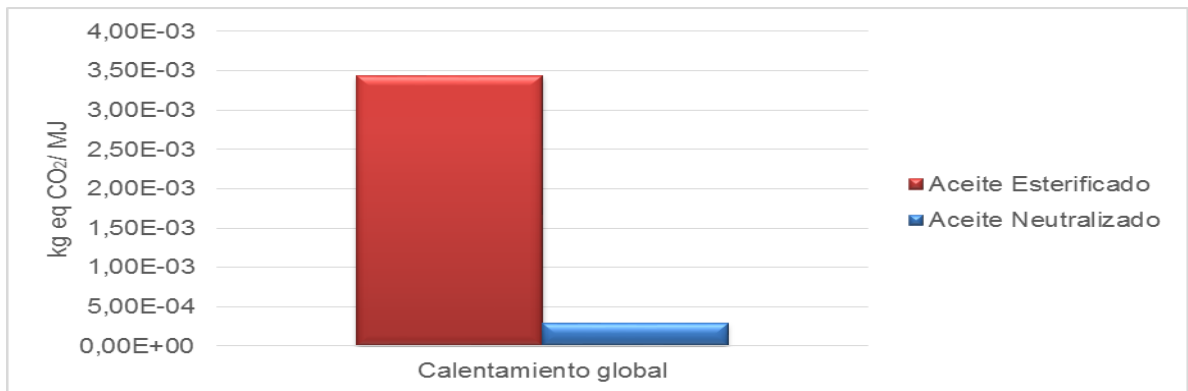
Figura 12. Calentamiento global planta extractora, 1MJ de combustible



Fuente: El autor.

Comparando las dos plantas de pre-tratamiento de aceite propuestas (ver Figura 13), se observa que el proceso con neutralización tiene 2.9×10^{-4} kg eq de CO₂ mientras que el de esterificación presenta 34.4×10^{-4} kg eq de CO₂ para la categoría de calentamiento global; en otras palabras, una disminución del 92.22% en kg eq de CO₂. Esto es debido a que en la planta de neutralización se produce agua con una pureza del 99.9%p y palmitato de sodio sólido, siendo este ultimo manejado como un producto evitado en los procesos de SimaPro.

Figura 13. Calentamiento global planta pre-tratamiento del aceite de palma, 1 MJ de combustible

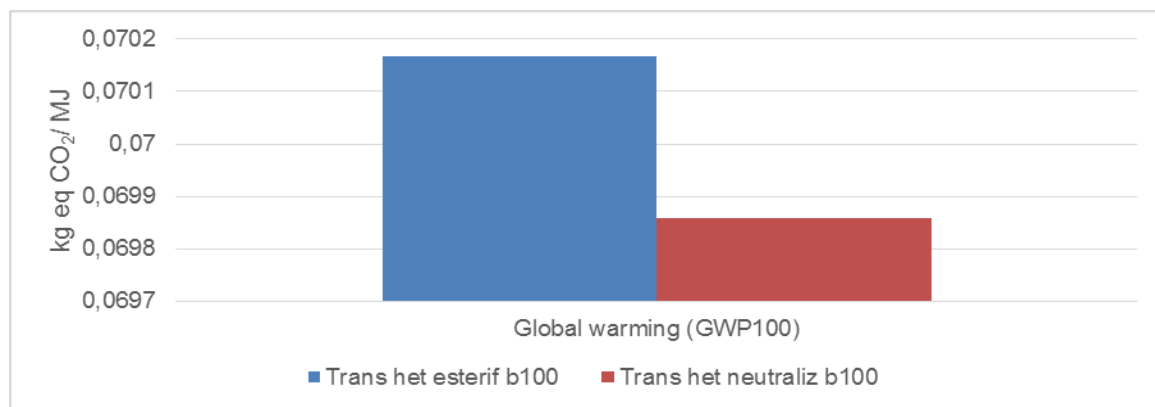


Fuente: El autor.

Observando el impacto ambiental referente al biodiesel producido mediante transesterificación heterogénea básica del aceite de palma pre-tratado

(neutralización y esterificación) con metanol (ver Figura 14), se encontró una diferencia del 5.0% en la categoría de calentamiento global con una emisión de 6.98×10^{-2} kg eq de CO_2 . Esta diferencia está relacionada con las propiedades fisicoquímicas del aceite, considerando que se hizo con el mismo diseño de la planta son dos aceites químicamente diferentes.

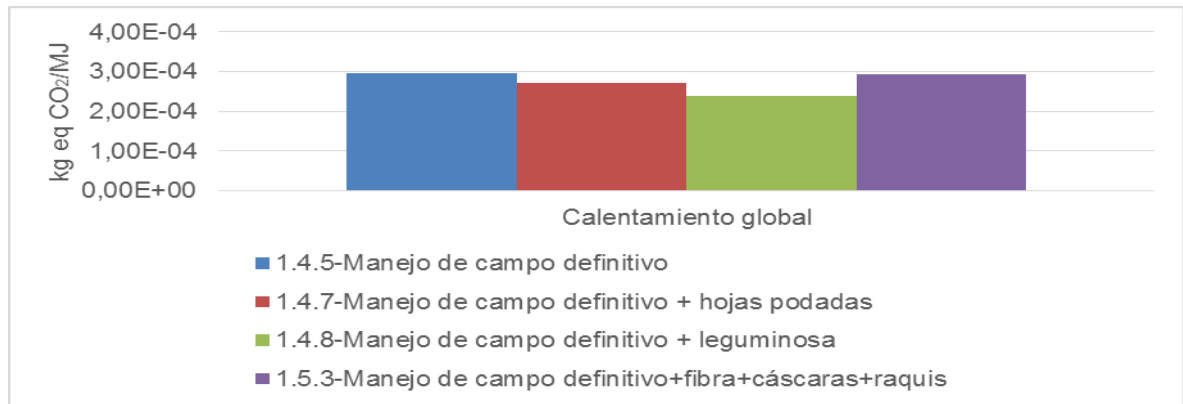
Figura 14. Calentamiento global planta biodiesel con transesterificación heterogénea básica, 1 MJ de combustible



Fuente: El autor.

Adicional al montaje de producción de RFF, se evaluó un escenario para la etapa “manejo de campo definitivo” donde se utiliza cultivo de leguminosa, hojas podadas y algunos subproductos generados por la planta extractora de aceite como complemento al uso de fertilizantes en el cultivo de palma (ver Anexo C). Los subproductos utilizados de la extractora fueron flujos de raquis, cáscaras y fibra de palma. Los resultados de la Figura 15 muestran que el uso de leguminosa kudzu sembrado en un radio de 2 m alrededor de la palma consigue aportar más nitrógeno del que requiere el cultivo, teniendo menor impacto al reducirse en un 18.8 % las emisiones de kg eq de CO_2 con respecto al manejo de fertilizantes si solo se usara éste, sustituyendo el uso de urea en el cultivo; además de afirmar el hecho que antes de utilizarse las hojas podadas o los subproductos de la extractora en el cultivo estos deben ser mezclados con algún tipo de concentrado de fertilizantes a fin de conseguir una dosis balanceada para la palma.

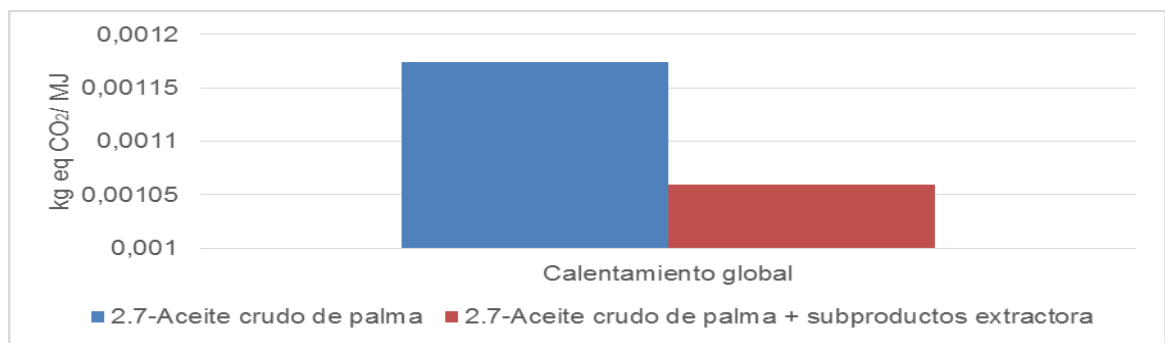
Figura 15. Calentamiento global "manejo de campo definitivo" alternativo, 1 MJ de combustible



Fuente: El autor.

Analizando los flujos de fibra y cáscaras como contribución energética a la planta extractora (ver Anexo C), se observa que para producir 1 MJ de combustible estas materias primas aportarían 75.35 kJ, mientras que la planta extractora solo consumiría 9.83 kJ (13.05 % del valor aportado por estos dos subproductos) logrando auto sostenerse. La utilización de estos recursos supondría una reducción del 10% en las emisiones de gases de efecto invernadero (ver Figura 16).

Figura 16. Calentamiento global por uso de subproductos de planta extractora como fuente energética alternativa, 1 MJ de combustible

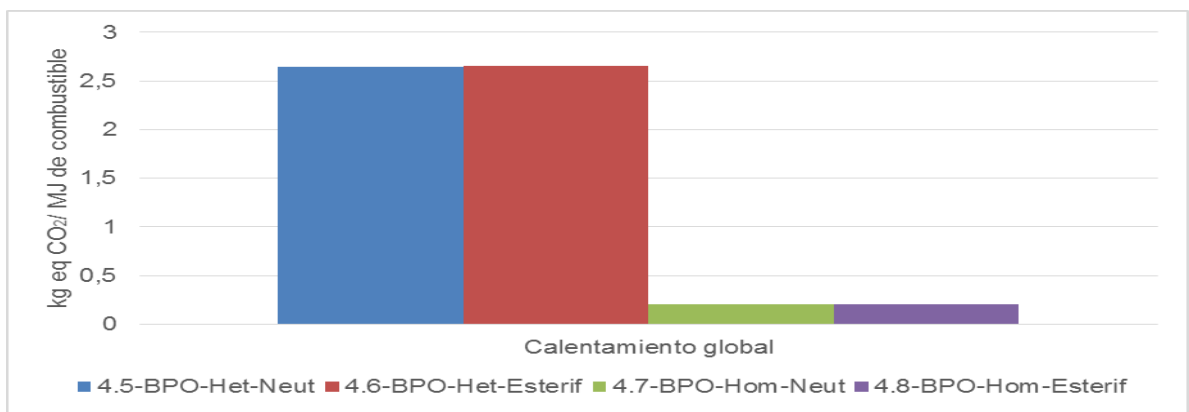


Fuente: El autor.

Comparando los resultados obtenidos en este trabajo con los propuesto por Zapata et al. relacionados con catálisis homogénea básica se pudo observar que

la transesterificación homogénea básica con neutralización de ácidos grasos libres produce 2.45 kg eq de CO₂/ MJ de combustible menos; es decir, un ahorro del 93 % en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto al Proceso III y un 92 % para el Proceso IV. Esta diferencia está asociada con los menores consumos energéticos, la baja calidad de la glicerina inferior al 97% de pureza, el orden de los equipos.

Figura 17. Calentamiento global producción de biodiesel vía catálisis heterogénea básica versus catálisis homogénea básica, 1 MJ de combustible



Fuente: El autor.

3. CONCLUSIONES

En el desarrollo de las simulaciones para la producción de biodiesel a través de transesterificación heterogénea básica se logró evidenciar que la producción de biodiesel por este medio requiere menores flujos de materias primas, menor número de equipos para el desarrollo de la misma, eliminación de etapas de separación, generación de productos de elevada pureza y altos consumos energéticos.

El ciclo de vida del biodiesel que generó menos emisiones de gases de efecto invernadero fue el proceso de transesterificación heterogénea básica con pretratamiento de neutralización de ácidos grasos libres, requiriendo un menor consumo de energía para el flujo de referencia de 1 MJ de combustible.

Al observar el árbol de procesos descrito por SimaPro® se tiene que la etapa de transesterificación heterogénea básica representa una carga ambiental del 49.6 % en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Al comparar los procesos de transesterificación homogénea básica y este trabajo se observó una diferencia significativa de un 90 % en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, a favor de la catálisis homogénea básica.

BIBLIOGRAFÍA

- Borges, M.E., and L. Díaz. 2012. "Recent Developments on Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production by Oil Esterification and Transesterification Reactions: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2839–49. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112000834> (August 9, 2013).
- "Emissions Calculator - Biodiesel.org." <http://www.biodiesel.org/using-biodiesel/handling-use/emissions-calculator>.
- García, Manuel, Alberto Gonzalo, José Luis Sánchez, Jesús Arauzo, and José Angel Peña. 2010. "Prediction of Normalized Biodiesel Properties by Simulation of Multiple Feedstock Blends." *Bioresource technology* 101(12): 4431–39. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20171086> (September 25, 2013).
- Helwani, Z., M.R. Othman, N. Aziz, W.J.N. Fernando, and J. Kim. 2009. "Technologies for Production of Biodiesel Focusing on Green Catalytic Techniques: A Review." *Fuel Processing Technology* 90(12): 1502–14. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382009002148> (August 6, 2013).
- Hesketh, Robert P. 2003. "Catalytic Rates & Pressure Drop in PFR Reactors: HYSYS 3.0."
- Hsieh, Li-Shan, Umesh Kumar, and Jeffery C.S. Wu. 2010. "Continuous Production of Biodiesel in a Packed-Bed Reactor Using Shell–core Structural $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_7\text{O}_3)_2/\text{CaCO}_3$ Catalyst." *Chemical Engineering Journal* 158(2): 250–56. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138589471000046X> (September 25, 2013).
- Levenspiel, O. 2002. *Ingeniería de Las Reacciones Químicas*. http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=jF_1vse6AKoC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Ingenier%C3%ADa+de+las+Reacciones+Qu%C3%ADmicas&ots=a28slsmra5&sig=YVr1XqsRo-aTWk4ylhde3zCcppM8 (November 14, 2013).
- "Norma Europea, UNE-EN ISO 14040. Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Principios y Marco de Referencia." 2006.

- “Qué Es Un Sistema EPD? - Environmental Product Declarations - Product Category Rules.” <http://www.environdec.com/es/Que-es-un-sistema-EPD/#.UoVQse93vmJ> (November 14, 2013).
- Romero, HM, IM Ayala, and R Ruíz R. 2007. “Ecofisiología de La Palma de Aceite.” *Revista Palmas*.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Ecofisiología+Palma+Aceitera#0> (November 14, 2013).
- Smith, JM, and AE Gómez. 1991. “Ingeniería de La Cinética Química.” <http://dspace.ucbscz.edu.bo/dspace/handle/123456789/4551> (November 14, 2013).
- Tariq, Muhammad, Saqib Ali, and Nasir Khalid. 2012. “Activity of Homogeneous and Heterogeneous Catalysts, Spectroscopic and Chromatographic Characterization of Biodiesel: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8): 6303–16.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112004467> (August 16, 2013).
- Verhé, R, C Echim, and W Greyt. 2011. “Production of Biodiesel via Chemical Catalytic Conversion.” *Handbook of biofuels production* 5: 97–133.
<http://www.cabdirect.org/abstracts/20113192970.html> (November 13, 2013).
- West, Alex H, Dusko Posarac, and Naoko Ellis. 2008. “Assessment of Four Biodiesel Production Processes Using HYSYS.Plant.” *Bioresource technology* 99(14): 6587–6601. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18234493> (September 23, 2013).
- “Wiley: Bailey’s Industrial Oil and Fat Products, 6 Volume Set, 6th Edition - Fereidoon Shahidi.” <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471384607.html>.
- Zapata, Carlos David, Iván Darío Martínez, Erika Arenas Castiblanco, and Carlos Andrés Henao Uribe. 2007. “Producción de Biodiesel a Partir de Aceite Crudo de Palma:1. Diseño y Simulación de Dos Procesos Continuos.” *Dyna*: 71–82.

ANEXOS

Anexo A. Cultivo de palma de aceite africana

Se supuso como referencia un cultivo es sobre la Troncal del Magdalena, en los alrededores del Campo Experimental Palmar de la Vizcaína, 30 min de Barrancabermeja.

Cultivo. Los cálculos del cultivo se realizaron con una proyección de 0 a 25 con 1871533.86 palmas, donde se consideraron las siguientes etapas: compra de semillas, pre-vivero, vivero principal y campo definitivo.

Compra de semillas germinadas

Proceso unitario: compra de semillas germinadas

Función principal: compra de semillas en casa comercial Híbrido Indupalma, vía San Alberto Cesar (pg.53 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite) y transportada hasta la zona del futuro cultivo.

Unidad funcional: 1871533.86 palmas en campo definitivo para 13087.6 ha de cultivo

| <i>Flujo de referencia</i> | Fuente de información | Suposición |
|-----------------------------------|--|-------------------|
| 143 km | Google maps. Trayecto casa comercial- cultivo | |
| Peso de semilla 2 g aprox. | Pg. 47 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite, semilla no germinada | Semilla germinada |
| 143 palmas/ha | http://www.palmaceite.com/index.php/palmicultores | |

1 ha cultivo
143 semillas * 1871533.86 semillas = 13087.6 ha cultivo

Pre-vivero. Duración dos meses.

Captación CO₂

Proceso unitario: captación de CO₂ por el cultivo de palma

Función principal: cuantificar CO₂ asimilado

Unidad funcional: 11.7 ton CO₂

$$\text{asimilación } CO_2 \text{ en sitio seco} = \frac{69.9 \text{ ton } CO_2}{\text{ha} \cdot \text{año}}$$

pérdidas por respiración = 76.1% de la cantidad asimilado

Tomado de la pg. 12 del documento iv. Eco-fisiología de la Palma Aceitera

$$CO_2 \text{ retenido} = 69.9 * (1 - 0.761) \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ha cultivo} * \text{año}} * 4.21 \text{ ha} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} * 2 \text{ meses} = 11.7 \text{ ton } CO_2$$

Transporte insumos

Proceso unitario: transporte de insumos al pre-vivero

Función principal: proveer insumos al pre-vivero

Unidad funcional: un (1) pre-vivero. Es decir, el cultivo de palma de aceite solo requiere de una etapa de pre-vivero en sus 25 años de vida

| Distancias de referencia | Fuente de información | Suposición |
|--------------------------|---|------------|
| 35 km | Volante informativo Campo Experimental la Vizcaína. Trayecto Barrancabermeja- cultivo | |
| 92.7 km | Google maps. Trayecto Bucaramanga- cultivo | |

Adecuación del terreno

Proceso unitario: preparación del terreno para el pre-vivero

Función principal: adecuación de un terreno dentro de la finca para la instalación del pre-vivero

Unidad Funcional: un lote pre-vivero.

| Flujo de referencia | Fuente de información | Referencia - Suposición |
|---------------------|-----------------------|-------------------------|
|---------------------|-----------------------|-------------------------|

| | | |
|---|--|--|
| Densidad arena 1650 kg/m³ Cantidad de arena seca: 3.47*10⁶ kg | http://www.crushersouthafrica.com/mining-equipment/density-of-course-sand.html | |
| Malla poli-sombra: 1.35*10 ⁴ kg HDPE Densidad: 250*10 ⁻³ kg/m ² Consumo eléctrico: 584 kW-h | http://www.weimeng.com.tw/es/wmh.htm http://es.made-in-china.com/co_10221022/product_Shadow-Netting_hehyonsog.html | 50-320 g/m ² =~250 g/m ² 2.2-7.5 kWh= 6 kWh Cap 100 ton/mes=139 kg/h |
| Glifosato: 8.11 kg | Pg. 3 Glifosato ultra 88.8 DVA Herbicida Gránulos Solubles | 1.5 kg/ha |
| Consumo diésel por corte de maleza y nivelación: 75.7 kg | Gerente MaquinAgro. Reparación motor tractor y plantas eléctricas (Bucaramanga) | 8 horas/día |

Para 1871533.86 bolsas de dimensiones 15x25 cm y 5 µm de espesor, pg. 66 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite) con semillas germinadas, tenemos

bolsas a lo ancho de la cama = 100 unid

bolsas a lo largo de la cama = 100 unid

diámetro bolsa = 0.15 m

*ancho de cama = bolsas a lo ancho de la cama * diámetro bolsa = 15 m*

*largo de cama = bolsas a lo largo de la cama * diámetro bolsa = 15 m*

*área cama = ancho de cama * largo de cama = 225 m²*

*bolsas por cama = 100 * 100 = 10000 bolsas*

*área previvero = 1871533.86 bolsas * $\frac{225 \text{ m}^2}{1 * 10^4 \text{ bolsas}}$ * $\frac{1 \text{ ha}}{1 * 10^4 \text{ m}^2}$ = 4.21 ha*

altura capa arena sobre cama = 0.05 m

El dato de la capa de arena fue tomado de pg. 61 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

$$\text{densidad arena} = 1650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned} \text{masa arena seca} &= \text{semillas} * \frac{\text{área cama}}{1 * 10^4 \text{bolsas}} * \text{altura capa arena sobre cama} * \text{densidad arena} \\ &= 3.47 * 10^6 \text{ kg} \end{aligned}$$

Para el área de la malla poli sombra se extendió 1m a cada lado del lote

$$\text{ancho malla} = \text{ancho de cama} + 2 \text{ m} * 1 = 17 \text{ m}$$

$$\text{largo malla} = \text{largo de cama} + 2 \text{ m} * 1 = 17 \text{ m}$$

$$\text{área malla} = 1871533.86 \text{ bolsas} * \frac{\text{ancho malla} * \text{largo malla}}{10000 \text{ bolsas}} = 5.41 * 10^4 \text{ m}^2 = 5.41 \text{ ha}$$

$$\text{densidad malla} = 250 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\text{masa malla} = \text{área malla} * \text{densidad malla} = 1.35 * 10^4 \text{ kg}$$

Consumo eléctrico en producir malla

$$\frac{6 \text{ kW}}{139 \text{ kg}} * \text{masa malla} = 584 \text{ kWh}$$

Para el cálculo del glifosato se tomó como referencia 1.5 kg/ha para maleza perenne

$$\text{masa glifosato} = 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \text{área previvero} = 8.11 \text{ kg}$$

Consumo diésel, datos proveídos por el gerente de MaquinAgro, entonces

| Tractor | Actividad | Consumo ACPM (gal/hora) | Rendimiento(ha/día) | Característica |
|---------|-----------|-------------------------|---------------------|----------------|
|---------|-----------|-------------------------|---------------------|----------------|

| | | | | |
|-------|--------------|-------|---|------------------------|
| 60 hp | Corte maleza | 1 | 3 | Liviano |
| | Rastra | 16/12 | 6 | Emparejamiento a nivel |

horas día = 8 h/día

$$\text{densidad ACPM} = 832 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

consumo ACPM total

$$= \sum \text{Consumo ACPM}_i * \text{horas día} * \text{rendimiento}_i * \text{factores conversion} * \text{área malla} * \text{densidad ACPM}$$

consumo ACPM total = 75.7 kg

Haciendo uso del proceso tractor I de la base de datos de SimaPro7.1, tenemos que relacionar la cantidad de diésel con una distancia de referencia, es decir

$$75.7 \text{ kg diesel} * \frac{1 \text{ km recorrido por tractor}}{0.28 \text{ kg diesel}} = 270 \text{ km}$$

Preparación del sustrato

Proceso unitario: preparación de sustrato para el pre-vivero

Función principal: proveer de alimento a la plántula los dos primeros meses

Unidad funcional: un proceso

| Flujo referencia | Fuente de información | Suposición |
|---|---|--|
| Masa bolsa: 3.3*10² kg LDPE Consumo: 384.11 kW-h | Pg. 9 del documento Guía metodológica para el uso de la energía en el sector: Plásticos | Al final de su vida se recicla. Son compradas en Bucaramanga |
| Masa suelo: 4.5*10⁴ kg Densidad: 5.515 kg/m³ 1 m³ suelo: 230 bolsas | http://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_interna_de_la_Tierra Pg. 65 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite | |
| Urea (46%): 2.2*10³ kg | http://www.angelfire.com/biz2/palmaaceite/ra/infotecnica.html | 30 g quincenal para 100 plántulas |

| | | |
|---|---|---------------------------------------|
| Emisión por urea: 63.7 kg N₂O | Pg. 2 del documento Urea aplicada en la superficie del suelo: un pésimo negocio | Urea volatiliza como N ₂ O |
|---|---|---------------------------------------|

$$\text{ancho bolsa} = 15 \text{ cm}$$

$$\text{alto bolsa} = 25 \text{ cm}$$

$$\text{espesor bolsa} = 5 * 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\text{densidad bolsa} = 0.93 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \text{ Tomado de la base de datos de SimaPro}$$

$$\text{bolsas} = 1871533.86 \text{ bolsas} * \text{ancho bolsa} * \text{alto bolsa} * \text{espesor bolsa} * \text{densidad bolsa} = 326 \text{ kg}$$

Flujos energéticos considerados en la producción de una bolsa:

**0,314 kW-h /kg producto en el proceso de mono-extrusión y soplado de película de polietileno y polipropileno

** 0,689 kW-h /kg producto en el proceso de laminación de poli-etileno y polipropileno

** 0,174 kW-h /kg producto en el proceso de sellado automático de bolsas

$$\text{consumo energético total bolsa} = 1.177 \frac{\text{kWh}}{\text{kg bolsa}} * \text{masa bolsa} = 384 \text{ kWh}$$

$$\text{relación suelo - bolsa} = \frac{1 \text{ m}^2 \text{ suelo}}{230 \text{ bolsas}}$$

$$\text{densidad suelo} = \frac{5.515 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{cant suelo} = 1871533.86 \text{ bolsas} * \text{relación suelo - bolsa} * \text{densidad suelo} = 4.49 * 10^4 \text{ kg}$$

$$\text{cant urea} = \frac{120 \text{ g urea}}{100 \text{ plántulas}} * \frac{1871533.86 \text{ plántulas}}{\text{previvero}} * \text{factor conversión} = 2.25 * 10^3 \text{ kg CH}_4\text{N}_2\text{O}$$

$$\text{urea como N} = 2.25 * 10^3 \text{ kg urea} * \frac{1 \text{ kmol urea}}{62.0538 \text{ kg urea}} * \frac{2 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol urea}} * \frac{14.0057 \text{ kg N}}{\text{kmol N}} = 1.01 * 10^3 \text{ kg}$$

urea volatiliza N_2O

$$= \text{cant urea} * 0.04 \text{ kg } CH_4N_2O * \frac{1 \text{ kmol } CH_4N_2O}{62.0538 \text{ kg } CH_4N_2O} * \frac{2 \text{ kmol } N}{1 \text{ kmol } CH_4N_2O} * \frac{1 \text{ kmol } N_2O}{2 \text{ kmol } N} \\ * \frac{44.0217 \text{ kg } N_2O}{1 \text{ kmol } N_2O} = 63.7 \text{ kg } N_2O$$

Manejo del pre-vivero

Proceso unitario: manejo del pre-vivero

Función principal: proveer de agua al pre-vivero con servicio de aspersores

Unidad funcional: un pre-vivero

| Flujo referencia | Fuente de información | Suposición |
|---|------------------------------------|------------|
| Diésel para bomba: $7.07 \cdot 10^4$ kg Consumo: 2 galones acpm / (1e4 bolsa * día) | Técnico de finca Bomba de 11 hp | |

diésel por bomba

$$= 2 * 10^{-4} * 3.78528 \frac{\text{litros acpm}}{\text{bolsa} * \text{día}} * 1871533.86 \text{ bolsas} * 60 \text{ días} * \frac{1 \text{ m}^3}{1 * 10^3 \text{ litros}} \\ * 832 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7.07 * 10^4 \text{ kg}$$

Ajustando la masa de diésel al valor energético, de acuerdo con lo propuesto por SimaPro7.1

$$7.07 * 10^4 \text{ kg diesel} * \frac{45.4 \text{ MJ}}{1 \text{ kg diesel}} = 3.21 * 10^6 \text{ MJ}$$

Vivero principal. Duración de 8 meses.

Captación CO_2

Proceso unitario: captación de CO_2 por el pre-vivero de palma

Función principal: cuantificar el CO_2 asimilado

Unidad funcional: $2.6 \cdot 10^3$ ton CO_2

Las referencias para los cálculos fueron citadas anteriormente en pre-vivero

$$CO_2 \text{ retenido por palma} = 69.9 * (1 - 0.761) \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ha} * \text{año}} * \text{área vivero} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} * 8 \text{ meses}$$

$$= 2.6 * 10^3 \text{ ton } CO_2$$

Transporte insumos:

Proceso unitario: transporte de insumos para 8 meses

Función principal: etapa indispensable en el sustento de vivero

Unidad funcional: un escenario

Los insumos fueron traídos de Barrancabermeja y Bucaramanga, siendo referenciados con anterioridad

Preparación del sustrato

Proceso unitario: preparación del sustrato para el vivero

Función principal: suplir de alimento a la plántula desde la raíz

Unidad funcional: un proceso

| Referencias | Fuente de información | Suposición |
|---|---|---------------------------------------|
| Bolsa de 38x45 cm Consumo: 1.177 kW-h/kg bolsa | Pg. 65 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite Pg. 9 del documento Guía metodológica para el uso de la energía en el sector: Plásticos | Al final se recicla |
| 1 m³ suelo: 23 bolsas 38x45 cm | Pg. 65 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite | |
| Urea (46% N): 2.2*10⁵ kg | http://www.angelfire.com/biz2/palmaaceitera/infotecnica.html | 120 g urea para 100 plántulas |
| Emisión por urea: 63.7 kg N₂O | Pg. 2 del documento Urea aplicada en la superficie del suelo: un pésimo negocio | Urea volatiliza como N ₂ O |

ancho bolsa = 38 cm

alto bolsa = 45 cm

*espesor bolsa = 5 * 10⁻⁴ cm*

$densidad\ bolsa = 0.93 * 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}$ Tomado de la base de datos de SimaPro

$masa\ bolsa = 1871533.86\ bolsas * ancho\ bolsa * alto\ bolsa * espesor\ bolsa * densidad\ bolsa$
 $= 1.49 * 10^3\ kg$

$consumo\ energético\ total\ bolsa = 1.177 \frac{kWh}{kg\ bolsa} * masa\ bolsa = 1.75 * 10^3\ kWh$

$relación\ suelo - bolsa = \frac{1\ m^2\ suelo}{23\ bolsas}$

$cantidad\ suelo = 1871533.86\ bolsas * relación\ suelo - bolsa * densidad\ suelo = 4.49 * 10^5\ kg$

$cantidad\ urea = \frac{120\ g\ urea}{100\ plántulas} * \frac{1871533.86\ plántulas}{previvero} * factor\ conversión = 2.25 * 10^3\ kg\ CH_4N_2O$

$urea\ como\ N = 2.25 * 10^3\ kg\ urea * \frac{1\ kmol\ urea}{62.0538\ kg\ urea} * \frac{2\ kmol\ N}{1\ kmol\ urea} * \frac{14.0057\ kg\ N}{kmol\ N} = 1.01 * 10^3\ kg$

$urea\ volatiliza: 0.04 * 2.25 * 10^3\ kg\ CH_4N_2O * \frac{1\ kmol\ CH_4N_2O}{62.0538\ kg\ CH_4N_2O} * \frac{2\ kmol\ N}{1\ kmol\ CH_4N_2O} * \frac{1\ kmol\ N_2O}{2\ kmol\ N}$
 $* \frac{44.0217\ kg\ N_2O}{1\ kmol\ N_2O} = 63.7\ kg\ N_2O$

Preparación del terreno

Proceso unitario: preparación del terreno en el vivero principal

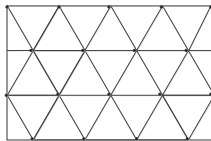
Función principal: acomodar el terreno con las actividades de mecanización

Unidad funcional: una preparación de vivero

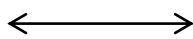
| Flujo de referencia | Fuente de información | Suposición |
|--|--|-------------|
| Distancia entre bolsas: 80 cm | Pg. 59 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite | |
| Glifosato: 1.1~2.2 kg/ha | Referido anteriormente | 1.5 kg/ha |
| Consumo diésel por corte de maleza y nivelación: 8.73*10 ³ kg | Gerente MaquinAgro. | 8 horas/día |
| Dimensiones bolsa: | Pg. 65 del libro Principios agronómicos | |

| | | |
|-----------------|---|--|
| 38x45 cm | para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite | |
|-----------------|---|--|

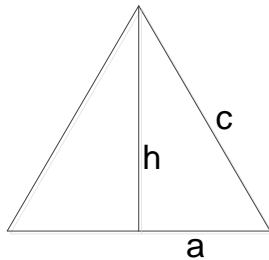
Área del vivero: La distribución de palmas es en forma de triángulo equilátero. Pg. 42 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite



... Ancho vivero: 572 bolsas



.... Largo vivero: $3.27 \cdot 10^3$ bolsas.



Lados (distancias) iguales para triángulo equilátero: pg. 59 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

$$a = c = 0,8 \text{ m}$$

Teorema de Pitágoras:

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2 = c^2 = a^2$$

$$h^2 = a^2 - \frac{a^2}{4} = \frac{3}{4} * a^2$$

$$h = \sqrt{\frac{3}{4} * a^2} = \frac{a}{2} * \sqrt{3} = 0.4 * \sqrt{3} \text{ m} = 0.69 \text{ m}$$

Donde h es la distancia entre plántulas a lo largo del vivero, y a sería entre plántulas a lo ancho del vivero.

ancho de vivero = 572 bolsas

$$\text{largo de vivero} = \frac{1871533.86 \text{ bolsas}}{\text{ancho de vivero}} = 3.27 * 10^3 \text{ bolsas}$$

diámetro bolsa = 0.38 m

separacion bolsas horizontal = 0.8 m

separacion bolsas vertical = 0.69 m, por teorema de Pitágoras

Llevando las dimensiones del vivero a metros, tenemos

$$\text{ancho vivero} = 572 \text{ bolsas} * \frac{0.38 \text{ m}}{\text{bolsa}} + 571.5 \text{ tramos} * \text{separación bolsas horizontal} = 675 \text{ m}$$

Entre dos bolsas hay un tramo, entre tres bolsas hay dos tramos, entre cuatro bolsas hay 3 tramos, etc.

$$\begin{aligned} \text{largo vivero} &= 3.27 * 10^3 \text{ bolsas} * \text{diámetro bolsa} + (3.27 * 10^3 - 1) \text{ tramos} \\ &* \text{separacion bolsas vertical} = 3.51 * 10^3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{area vivero} = \text{ancho vivero} * \text{largo vivero} = 237 \text{ ha}$$

Adecuando una franja de 1 m a cada lado del vivero, tenemos

$$\text{ancho vivero2} = \text{ancho vivero} + 2 * 1 \text{ m}$$

$$\text{largo vivero 2} = \text{largo vivero} + 2 * 1 \text{ m}$$

$$\text{area vivero2} = \text{ancho vivero2} * \text{largo vivero2} = 238 \text{ ha}$$

$$\text{masa glifosato} = 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{1e4 \text{ m}^2} * \text{área vivero2} = 356 \text{ kg}$$

Consumo diésel, datos proveídos por el gerente de MaquinAgro, entonces

| Tractor | Actividad | Consumo ACPM | Rendimiento(ha/día) | Característica |
|---------|-----------|--------------|---------------------|----------------|
|---------|-----------|--------------|---------------------|----------------|

| | | (gal/hora) | | |
|--------------|------------------|------------|----|--|
| 60 hp | Corte maleza | 1 | 3 | Liviano |
| | Arado con cincel | 16/12 | 4 | Movimiento de tierra profundo |
| | Rastra (3 pases) | 16/12 | 6 | Emparejamiento a nivel, movimiento de tierra superficial |
| | Canal drenaje | 1.25 | 10 | Terreno sencillo, sin estancar agua |

horas día = 8 h/día

$$densidad\ ACPM = 832 \frac{kg}{m^3}$$

consumo ACPM total

$$= \sum (Consumo\ ACPM_i * \frac{horas\ día}{rendimiento_i}) * factores\ conversion * área\ vivero2 * densidad\ ACPM$$

$$consumo\ ACPM\ total = 8.73 * 10^3\ kg$$

$$8.73 * 10^3\ kg\ diesel * \frac{1\ km\ recorrido\ tractor}{0.28\ kg\ diesel} = 3.12 * 10^4\ km$$

Manejo del vivero

Proceso unitario: manejo de vivero por 8 meses

Función principal: aplique de fertilizantes al cultivo y suministro de agua

Unidad funcional: un manejo de vivero principal

| Flujo de referencia | Fuente de información | Suposición |
|------------------------------|---|--------------|
| Características bomba | Es la misma del pre-vivero | |
| Fertilizantes dosis | Pg. 11 del documento Cultivo de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq) | |
| Volatilización urea | http://www.yara.com.co/doc/36627_Urea%20DAP%20Fertiboro.pdf | Supuesto 17% |

$$consumo\ bomba = 2e - 4 * 3.78528 \frac{litros\ diesel}{bolsa * día}$$

8 meses = 240 días

$$\text{densidad diesel} = 832 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned} \text{diesel bomba} &= \text{consumo bomba} * 1871533.86 \text{ bolsas} * 8 \text{ meses} * \text{factor conversion} \\ &* \text{densidad diesel} = 2.83 * 10^5 \text{ kg} \end{aligned}$$

Programa de fertilización.

| Meses | Urea | SPT | KCl | Kieserita |
|-------|------|-----|-----|-----------|
| 1-1.5 | 250 | | | |
| 2 | 350 | | | |
| 2.5 | 350 | | | |
| 3 | 2.5 | 5 | | |
| 4 | 5 | 5 | | |
| 5 | 5 | 5 | | 10 |
| 6 | 10 | 10 | | |
| 7 | 10 | 10 | 5 | |
| 8 | 10 | 10 | 5 | 30 |

Todas las dosis están en g/planta

$$\text{fertilizante}(j) = \sum(\text{tabla fertilizantes})_i * 1871533.86 \text{ plántulas} * \text{factor conversión};$$

j son los fertilizantes en la tabla, i son las cantidades de ese fertilizante para los 8 meses

$$\text{urea} = 8.31 * 10^4 \text{ kg}$$

$$\text{urea como N} = 8.31 * 10^4 \text{ kg urea} * \frac{1 \text{ kmol urea}}{62.0538 \text{ kg urea}} * \frac{2 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol urea}} * \frac{14.0057 \text{ kg N}}{\text{kmol N}} = 3.75 * 10^4 \text{ kg}$$

$$\text{stp} = 4.74 * 10^4 \text{ kg } P_2O_5$$

$$\text{KCl} = 8.92 * 10^3 \text{ kg } K_2O$$

$$\text{MgSO}_4\text{H}_2\text{O} = 6.51 * 10^4 \text{ kg mgso4}$$

$$\begin{aligned} \text{urea volatiliza: } &0.17 * 8.31 * 10^4 \text{ kg } CH_4N_2O * \frac{1 \text{ kmol } CH_4N_2O}{62.0538 \text{ kg } CH_4N_2O} * \frac{2 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol } CH_4N_2O} * \frac{1 \text{ kmol } N_2O}{2 \text{ kmol N}} \\ &* \frac{44.0217 \text{ kg } N_2O}{1 \text{ kmol } N_2O} = 10^4 \text{ kg } N_2O \end{aligned}$$

Campo definitivo. Duración de 24 años y 2 meses.

$$\text{Producción promedio anual de RFF} = \frac{20.08 \text{ ton rff}}{\text{ha} * \text{año}}$$

Tomado del documento Palm oil por Yusof Basiron pg. 36, menor a 35 ton RFF/ (ha * año) que es lo propuesto en la pg. 167 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

$$\text{Producción promedio 25 años de RFF} = \frac{20.08 \text{ ton rff}}{\text{ha} * \text{año}} * \text{área campo} * 25 \text{ años} = 7.23 * 10^6 \text{ ton}$$

Captación CO₂

Proceso unitario: captación de CO₂ por el pre-vivero de palma

Función principal: cuantificar el CO₂ asimilado

Unidad funcional: 5.81*10⁶ ton CO₂

Las referencias para los cálculos fueron citadas anteriormente en pre-vivero

$$CO_2 \text{ retenido por palma} = 69.9 * (1 - 0.761) \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ha} * \text{año}} * \text{área campo} * 24.167 \text{ años} = 5.81 * 10^6 \text{ ton } CO_2$$

Transporte de insumos:

Proceso unitario: transporte de insumos

Función principal: proveer de alimento al cultivo en la etapa de campo

Unidad funcional: un proceso

Los insumos fueron traídos de Barrancabermeja y Bucaramanga, siendo referenciados con anterioridad

Preparación del terreno:

Proceso unitario: preparación del terreno en campo definitivo

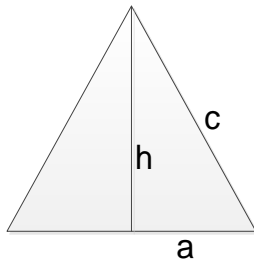
Función principal: acondicionar el suelo para sembrar las palmas

Unidad funcional: un lote de terreno

| Flujo de referencia | Fuente de información | Suposición |
|------------------------------|---|------------------------------------|
| Diámetro hueco: 35 cm | Pg. 103 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite | 40 cm, 2 cm más que la bolsa 38x45 |
| Glifosato=1.5 kg/ha | ... Citada anteriormente | |

Área del campo:

La distribución de palmas es en forma de triángulo equilátero. Pg. 42 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite



Lados (distancias) iguales para triángulo equilátero: distancia entre palmas de 9 m. pg. 101 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

$$a = c = 9 \text{ m.}$$

Teorema de Pitágoras:

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2 = c^2 = a^2$$

$$h^2 = a^2 - \frac{a^2}{4} = \frac{3}{4} * a^2$$

$$h = \sqrt{\frac{3}{4} * a^2} = \frac{a}{2} * \sqrt{3} = 4.5 * \sqrt{3} \text{ m} = 7,79 \text{ m}$$

Donde h es la distancia entre palmas a lo largo del campo, y a sería entre palmas a lo ancho del campo.

ancho de lote = 572 palmas

*largo de lote = $3.27 * 10^3$ palmas*

diámetro hueco = 0.4 m. Pg. 103 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

separacion entre palmas horizontal = 9 m

separacion palmas vertical = 7.79 m, por teorema de Pitágoras

Llevando las dimensiones del campo definitivo a metros, tenemos

$$\text{ancho lote} = 572 \text{ palmas} * \frac{0.4 \text{ m}}{\text{palma}} + 571.5 \text{ tramos} * \text{separación palmas horizontal}$$

Entre dos palmas hay un tramo, entre tres palmas hay 2 tramos, entre cuatro palmas hay 3 tramos, etc.

$$\text{largo lote} = 3.27 * 10^3 \text{ palmas} * \text{diametro hueco} + (3.27 * 10^3 - 1) \text{ tramos} * \text{separacion palma vertical}$$

$$\text{area lote} = \text{ancho lote} * \text{largo lote} * \text{factor conversion} = 1.44 * 10^9 \text{ m}^2$$

Adecuando una franja de 1 m a cada lado del campo definitivo, tenemos

$$\text{ancho lote2} = \text{ancho lote} + 2 * 1 \text{ m}$$

$$\text{largo lote2} = \text{largo lote} + 2 * 1 \text{ m}$$

$$\text{area lote2} = \text{ancho lote2} * \text{largo lote2} * \text{factor conversion} = 1.44 * 10^8 \text{ m}^2$$

$$\text{masa glifosato} = 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} * \text{área lote2} = 2.16 * 10^4 \text{ kg}$$

Consumo diésel, datos proveídos por el gerente de MaquinAgro, entonces

| Tractor | Actividad | Consumo ACPM (gal/hora) | Rendimiento (ha/día) | Característica |
|---------|----------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| 60 hp | Corte maleza | 1 | 3 | Liviano |
| | Arado con cincel | 16/12 | 4 | Movimiento Tierra profundo |
| | Rastra (3 pases) | 16/12 | 6 | Emparejamiento a nivel, movimiento de tierra superficial |
| | Canal drenaje (10 canales) | 1.25 | 10 | Terreno sencillo, sin estancar agua |

$$\text{horas día} = 8 \text{ h/día}$$

$$\text{densidad ACPM} = 832 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

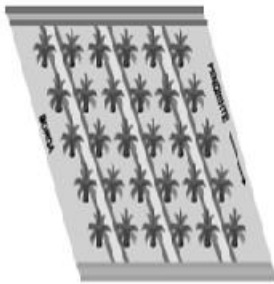
consumo ACPM total

$$= \sum (\text{Consumo ACPM}_i * \frac{\text{horas día}}{\text{rendimiento}_i}) * \text{factores conversion} * \text{área lote2} * \text{densidad ACPM}$$

$$\text{consumo ACPM total} = 9.38 * 10^5 \text{ kg}$$

$$9.38 * 10^5 \text{ kg diesel} * \frac{1 \text{ km tractor recorrido}}{0.28 \text{ kg diesel}} = 3.35 * 10^5 \text{ km}$$

Dato informativo: se asumió la siguiente configuración de canales para riego por gravedad (melgas)



Ver dibujo en la pg. 134 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

$$stp = \frac{250 \text{ g CaH}_6\text{P}_2\text{O}_9}{\text{palma}} * 1871533.86 \text{ palmas} * \frac{1 \text{ kg CaH}_6\text{P}_2\text{O}_9}{1 * 10^3 \text{ g CaH}_6\text{P}_2\text{O}_9} * \frac{1 \text{ kmol CaH}_6\text{P}_2\text{O}_9}{252.07 \text{ kg CaH}_6\text{P}_2\text{O}_9} * \frac{2 \text{ kmol P}}{1 \text{ kmol CaH}_6\text{P}_2\text{O}_9} * \frac{1 \text{ kmol P}_2\text{O}_5}{2 \text{ kmol P}} * \frac{141.9446 \text{ kg } 1 \text{ kmol P}_2\text{O}_5}{1 \text{ kmol P}_2\text{O}_5} = 2.63 * 10^5 \text{ kg P}_2\text{O}_5$$

Solo en el momento de la pre-siembra en campo definitivo, tomado del documento Tecnología de palma aceitera Cultivo e industria de la palma aceitera (Elaeis guineensis) pg. 19

Transporte de palmas a campo definitivo

Proceso unitario: transporte de palmas a campo

Función principal: transportar palmas del pre-vivero a campo definitivo

Unidad funcional: un transporte

| Flujo de referencia | Fuente de información | Suposición |
|--|-----------------------------|---------------------------------|
| 1871533.86 palmas =4.94*10 ⁵ ton | Cálculos de suelo en vivero | suelo pre-vivero + suelo vivero |
| Distancia pre vivero-campo: 500 m | | Distancia máx. |

Manejo de campo definitivo

Proceso unitario: manejo de campo definitivo

Función principal: nutrir el cultivo por 24 años+ 2 meses y plateo

Unidad funcional: un manejo de campo

| Flujo de referencia | Fuente de información | Suposición |
|---|--|---|
| Urea: $6.11 \cdot 10^7$ kg ($2.76 \cdot 10^7$ kg N) | Pg. 11 del documento Cultivo de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq) | 1.5 kg/palma urea de 4 a 24 años |
| P ₂ O ₅ : $1.5 \cdot 10^7$ kg K ₂ O: $4.68 \cdot 10^7$ kg | | 1.75 kg/palma KCl de 4 a 24 años |
| MgSO ₄ : $6.53 \cdot 10^7$ kg | | 1.25 kg/palma MgCl ₂ de 4 a 24 años |
| Bórax anhídrido SimaPro: $2.28 \cdot 10^6$ kg | Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O, Wikipedia | Conversión SimaPro7.1 a Na ₂ B ₄ O ₇ |
| Cal dolomita: $6.97 \cdot 10^7$ kg | | Tabla diego |
| Urea volatilizada como N ₂ O: $7.36 \cdot 10^6$ kg | | |
| Consumo diésel por guadaña: $9.38 \cdot 10^6$ kg | | |

Programas de fertilización en campo definitivo. Casi un año corresponde al pre-vivero y vivero.

| Fuente | Año 0, g/plántula | Año 1, g/plántula | Año 2, g/plántula | Año 3, g/plántula |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Urea(46% N) | 125 | 250 | 250 | 250 |
| P | 500 | 1000 | 1000 | 1000 |
| KCl | 250 | 500 | 500 | 1250 |
| MgSO ₄ H ₂ O | | 500 | 500 | 650 |
| Bórax(60% B) | | 50 | 75 | 75 |

Y del cuarto año en adelante hasta completar los 25 años

| Fertilizante | kg/palma*año |
|-------------------|--------------|
| Urea | 1.5 |
| KCl | 1.75 |
| MgCl ₂ | 1.25 |
| Bórax | 0.1 |

Procediendo con lo anterior, calculamos las cantidades de fertilizantes para 1871533.86 palmas

$$\sum_{j=0 \text{ año}}^{j=3 \text{ año}} \text{fertilizante}(i)_j + \sum_{j=4 \text{ año}}^{24.167 \text{ año}} \text{fertilizante}(i)_j =$$

$$\sum_{j=0 \text{ año}}^{j=3 \text{ año}} \text{fertilizante}_i \left(\frac{g}{\text{plántula}} \right)_j * 1871533.86 \text{ palmas} * \text{factor conversion}$$

$$+ \sum_{j=4}^{24.167 \text{ año}} \text{fertilizante}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{palma}} \right)_j * 1871533.86 \text{ palmas}$$

Para $0 \leq j \leq 3$ años, $i = g \text{ urea}, g \text{ escorias Thomas}, g \text{ KCl}, g \text{ MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}, g \text{ bórax}(60\% \text{ B})$

Para $4 \leq j \leq 24$ años, $i = \text{kg urea}, \text{kg KCl}, \text{kg MgCl}_2, g \text{ bórax}(60\% \text{ B})$

Resolviendo obtenemos:

$$\text{urea}_{\text{total}} = 1871533.86 \text{ palmas}$$

$$* \left[\sum_{j=0}^{3 \text{ año}} \text{fertilizante urea}_j * \text{factor conversion} + \sum_{j=4}^{24.167 \text{ año}} \text{fertilizante urea}_j \right]$$

$$\text{urea como N} = \text{urea}_{\text{total}} * \frac{1 \text{ kmol urea}}{62.0538 \text{ kg urea}} * \frac{2 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol urea}} * \frac{14.0057 \text{ kg N}}{\text{kmol N}}$$

$$\text{escorias thomas}(P)_{\text{total}}$$

$$= 1871533.86 \text{ palmas}$$

$$* \left[\sum_{j=0}^{3 \text{ año}} \text{fertilizante escorias thomas}(g P)_j * \text{factor conversión} \right] * \frac{1 \text{ kmol P}}{30.9738 \text{ kg P}}$$

$$* \frac{1 \text{ kmol P}_2\text{O}_5}{2 \text{ kmol P}} * \frac{141.9446 \text{ kg P}_2\text{O}_5}{1 \text{ kmol P}_2\text{O}_5}$$

$$\text{KCl}_{\text{total}} = 1871533.86 \text{ palmas}$$

$$* \left[\sum_{j=0}^{3 \text{ año}} \text{fertilizante g KCl}_j * \text{factor conversión} + \sum_{j=4}^{24.167 \text{ año}} \text{fertilizante kg KCl}_j \right]$$

$$* \frac{1 \text{ kmol KCl}}{74.5510 \text{ kg KCl}} * \frac{1 \text{ kmol K}}{1 \text{ kmol KCl}} * \frac{1 \text{ kmol K}_2\text{O}}{2 \text{ kmol K}} * \frac{94.1954 \text{ kg K}_2\text{O}}{1 \text{ kmol K}_2\text{O}}$$

$$MgSO_{4total} = 1871533.86 \text{ palmas}$$

$$\begin{aligned} & * \left(\frac{1 \text{ kmol } MgSO_4H_2O}{138.38 \text{ kg } MgSO_4H_2O} * \frac{1 \text{ kmol } Mg}{1 \text{ kmol } MgSO_4H_2O} * \right. \\ & * \sum_{j=0}^{j=3} \text{fertilizante } MgSO_4H_2O_j * \text{factor conversión} + \frac{1 \text{ kmol } MgCl_2}{95.211 \text{ kg } MgCl_2} \\ & * \left. \frac{1 \text{ kmol } Mg}{1 \text{ kmol } MgCl_2} * \sum_{j=4}^{j=24.167} \text{fertilizante } MgCl_{2j} \right) * \frac{1 \text{ kmol } MgSO_4}{1 \text{ kmol } Mg} \\ & * \frac{120.366 \text{ kg } MgSO_4}{1 \text{ kmol } MgSO_4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{bórax}_{total} = 1871533.86 \text{ palmas} * & \left[\sum_{j=0}^{j=3 \text{ año}} \text{fertilizante } \text{bórax}_j + \sum_{j=4}^{24.167 \text{ año}} \text{fertilizante } \text{bórax}_j \right] \\ & * \text{factor conversión} * \frac{1 \text{ kmol } Na_2B_4O_7 * 10H_2O}{381.3188 \text{ kg } Na_2B_4O_7 * 10H_2O} * \frac{1 \text{ kmol } Na_2B_4O_7}{1 \text{ kmol } Na_2B_4O_7 * 10H_2O} \\ & * \frac{201.2194 \text{ kg } Na_2B_4O_7}{1 \text{ kmol } Na_2B_4O_7} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{cal dolomita} = & \left(\frac{1 \text{ kg cal}}{\text{hueco}} + \frac{1.5 \text{ kg cal}}{\text{palma} * \text{año}} * 24 \text{ años} + \frac{1.5 \text{ kg cal}}{\text{palma} * \text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} * 2 \text{ meses} \right) \\ & * 1871533.86 \text{ palmas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{urea volatiliza como } N_2O: & 0.17 * \text{urea total} * \frac{1 \text{ kmol } CH_4N_2O}{62.0538 \text{ kg } CH_4N_2O} * \frac{2 \text{ kmol } N}{1 \text{ kmol } CH_4N_2O} * \frac{1 \text{ kmol } N_2O}{2 \text{ kmol } N} \\ & * \frac{44.0217 \text{ kg } N_2O}{1 \text{ kmol } N_2O} \end{aligned}$$

Equipo: guadaña.

| Actividad | Consumo ACPM (gal/día) | Rendimiento(palmas/día) | Característica |
|-----------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| Poda | 1 | 60 | Ref. 420 Maruyama |

$$\text{horas trabajadas} = 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}}$$

$$\text{consumo diésel} = 1 \frac{\text{gal}}{\text{día}}$$

palma joven = $8 \frac{\text{veces}}{\text{año}}$, tres primero años.

palma adulta = $3 \frac{\text{veces}}{\text{año}}$, cuarto año hasta los 24 años.

Los datos del plateo fueron tomados de la pg. 116 del libro Principios agronómicos para el establecimiento de una plantación de Palma de Aceite

Plateo en una palma adulta para compensar los dos meses de los 24 años, entonces

$$\text{palma adulta}_{2 \text{ meses}} = \frac{3 \text{ veces}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} * 2 \text{ meses} = 0.5 \text{ veces}$$

consumo diesel = 8

$$* \sum_{i=0}^{i=3 \text{ año}} \frac{\text{consumo diesel}}{\text{rendimiento}} * 1871533.86 \text{ palmas} * \text{factor conversion}$$

* *densidad diesel* + 3

$$* \sum_{i=4}^{i=24 \text{ año}} \frac{\text{consumo diesel}}{\text{rendimiento}} * 1871533.86 \text{ palmas} * \text{factor conversion}$$

$$* \text{densidad diesel} + 0.5 * \frac{\text{consumo diesel}}{\text{rendimiento}} * 1871533.86 \text{ palmas} * \text{factor conversion}$$

* *densidad diesel*

$$\text{Conversión a base de datos SimaPro} = \text{consumo diesel (kg)} * \frac{45.4 \text{ MJ}}{1 \text{ kg diesel}}$$

Leguminosa Kudzu y fertilizantes

Proceso unitario: manejo de campo definitivo con leguminosa kudzu y fertilizantes

Función principal: nutrir el cultivo por 24 años+ 2 meses y plateo

Unidad funcional: 1 manejo para 1871533.86 palmas en 24 años + 2 meses

Para este proceso, solo se va a cambiar la dosis de N proporcionada para él fertilizante urea y lo que implique usar la leguminosa (transporte), las demás dosis de fertilizantes no cambiarán para este escenario. Entonces, tenemos

| Flujo de referencia | Fuente de información | Suposición |
|---|---|----------------------------------|
| Kudzu, Puerto. Tiempo de vida: perenne Densidad de siembra: 4- 6 kg /ha Crecimiento estimado: 75 cm./9 meses Fijación N aprox.: 600kg /ha*año N fijado: 3.39*10⁷ kg | http://www.huallamayo.com.pe/kudzu.htm | 5 kg leguminosa/ha |
| Consumo diésel por guadaña: 9.38*10⁶ kg | Pg. 11 del documento Cultivo de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq) | 1.5 kg/palma urea de 4 a 24 años |

Solo se sembrara en un radio de 2.0 m de la base de la palma

$$Area_{kudzú}^{palma} = \pi * r^2 = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$Area_{kudzú}^{cultivo} = \frac{\pi * d^2}{4} * 1871533.86 \text{ palmas} * \frac{1 \text{ ha}}{1e4 \text{ m}^2} = 2.35 * 10^3 \text{ ha}$$

$$Cantidad \text{ kudzú} = \frac{5 \text{ kg}}{\text{ha}} * Area_{kudzú}^{cultivo} = 1.18 * 10^4 \text{ kg}$$

$$N \text{ fijado por kudzú} = \frac{600 \text{ kg N}}{\text{ha} * \text{año}} * Area_{kudzú}^{cultivo} * 24.167 \text{ años} = 3.39 * 10^7 \text{ kg}$$

$$N_2O \text{ evitado: } N \text{ fijado por kudzú} * \frac{1 \text{ kmol N}}{14.0057 \text{ kg N}} * \frac{1 \text{ kmol } N_2O}{2 \text{ kmol N}} * \frac{44.0217 \text{ kg } N_2O}{1 \text{ kmol } N_2O} = 5.32 * 10^7 \text{ kg}$$

Poda hojas de palmas y fertilizantes

Proceso unitario: manejo de campo definitivo con fertilizantes y con poda de palmas anualmente

Función principal: nutrir el cultivo por 24 años+ 2 meses y poda de palmas por 22 años

Unidad funcional: un manejo de fertilizantes

Para este proceso, solo se van a cambiar las dosis de fertilizantes industriales de acuerdo con las cantidades propuestas por las hojas de palmas podadas

Considerando los valores tomados del documento: Palm oil por Yusof Basiron pg. 36, tenemos

| Sustancia | 0.4 ton/ha*año | Ajuste a kg/ha*año | Para 1.4*10 ⁴ ha y 22 años |
|------------------|----------------|---|---|
| Nitrógeno | 26 kg N | 26 kg N | 8.24*10 ⁶ kg N |
| Fósforo | 4.6 kg P | 10.54 kg P ₂ O ₅ | 3.34*10 ⁶ kg P ₂ O ₅ |
| Potasio | 60.7 kg K | 73.12 kg K ₂ O | 2.32*10 ⁷ kg K ₂ O |
| Calcio | 20.5 kg Ca | 94.318 kg CaMg(CO ₃) ₂ | 2.99*10 ⁷ kg CaMg(CO ₃) ₂ |
| Magnesio | 11.2 kg Mg | 55.466 kg MgSO ₄ | 1.76*10 ⁷ kg MgSO ₄ |

Modelo de cálculos

$$\frac{0.4 \text{ ton hojas palma podadas}}{\text{ha} * \text{año}} * 1.4 * 10^4 \text{ ha} * 22 \text{ años} = 1.27 * 10^5 \text{ ton hojas podadas}$$

$$\frac{i \text{ kg componente}}{\text{ha} * \text{año}} * \text{ha} * 22 \text{ años} * \text{relaciones másicas/molares}$$

$$N_2O \text{ evitado: } N \text{ poda} * \frac{1 \text{ kmol } N}{14.0057 \text{ kg } N} * \frac{1 \text{ kmol } N_2O}{2 \text{ kmol } N} * \frac{44.0217 \text{ kg } N_2O}{1 \text{ kmol } N_2O} = 1.29 * 10^7 \text{ kg}$$

Reciclo bolsas usadas

Del material reciclado solo se aprovechara el 12%, el resto será dirigido a relleno sanitario

Anexo B. Código java

El siguiente código fue desarrollado en java con el software Netbeans IDE para resolver los cálculos de la etapa de cultivo.

```
public static void main(String args[]) {  
  
    // cantidad semillas cultivo  
  
        double ha = 6. * 365 * 24 * 5 / 20.08; // ha de cultivo  
  
        double s = 143 * ha; // unid. semillas, cultivo de palma  
  
    //    System.out.printf("semillas = %.2f unids\n", s);  
  
  
    // área, previvero  
  
        double bacp = 100; // bolsas a lo ancho de la cama, previvero  
  
        double blcp = 100; // bolsas a la largo de la cama, previvero  
  
        double dbp = 0.15; // m, diámetro de bolsa, previvero  
  
        double bcp = bacp * blcp; // bolsas por cama, previvero  
  
        double bacp1 = bacp * dbp; // m, ancho de cama, previvero  
  
        double blcp1 = blcp * dbp; // m, largo de cama, previvero  
  
        double acp = bacp1 * blcp1; // m2, área cama, previvero  
  
        double ap = s * acp / bcp; // m2, área previvero  
  
    //    System.out.printf("área, previvero = %.2f m2\n", ap);  
}
```

```

// cantidad de arena, previvero

    double cacp = 5e-2; // m, capa de arena por cama, previvero

    double da = 1650; // kg/m3 densidad de la arena

    double mas = s * acp * cacp * da / bcp; // kg, masa arena seca, previvero

//    System.out.printf("cantidad arena, previvero = %.2f kg\n", mas);

// cantidad malla polisombra, previvero

    double am = 1; // m, ancho malla cultivo, previvero

    double cmam = bacp1 + 2 * am; // m, cama más ancho de malla, previvero

    double cmlm = blcp1 + 2 * am; // m, cama más largo de malla, previvero

    double amp = s * cmam * cmlm / bcp; // m2, área malla polisombra, previvero

//    System.out.printf("área malla polisombra, previvero = %.2f m2\n", amp);

    double dm = 250e-3; // kg/m3, densidad malla polisombra

    double mmp = amp * dm; // kg malla polisombra, previvero

//    System.out.printf("cantidad malla polisombra, previvero = %.2f kg\n", mmp);

    double cem = 6 / 139.; // kWh/kg malla, consumo eléct malla, previvero

    double cemp = cem * mmp; // kWh, consumo eléctrico por malla polisombra,
previvero

    System.out.printf("energía malla polisombra, previvero = %.2f kWh\n", cemp);

```

```

// cantidad herbicida, previvero

    double rg = 1.5e-4; // kg/m2, rendimiento glifosato

    double rgp = rg * amp; // kg glifosato, previvero

//      System.out.printf("cantidad glifosato, previvero = %.2f kg\n", rgp);

// cantidad diésel por mecanización, previvero

    double rt[] = {3e4, 6e4, 4e4, 10e4}; // m2/día, rendimiento tractor por corte
maleza, rastra, arado con cincel, canal drenaje

    double cd[] = {1, 16. / 12, 16. / 12, 1.25}; // gal diesel/h, consumo diesel corte
maleza, rastra, arado con cincel, canal drenaje

    double hdt = 8; // h, horas por día trabajo

    double mdtp = 0; // kg, diesel por tractor, previvero

    double dd = 832; // kg/m3, densidad diesel

    double fcv = 3.78528e-3; // m3/gal, factor de conversión volumen

    for (int i = 0; i <= 3; i++) {

        mdtp += (cd[i] * fcv * hdt * amp * dd / rt[i]); // galon diésel totales

    }//      System.out.printf("diésel mecanización, previvero = %.2f kg\n", mdtp);

    double rtp = 1 / 0.28; // km/kg diesel, recorrido tractor, previvero

    double drtp = mdtp * rtp; // km, distancia recorrida por tractor, previvero

    System.out.printf("recorrido tractor, previvero = %.2f km\n", drtp);

```

```

// cantidad de bolsa pequeña, previvero

double abp = 25; // cm, alto bolsa, previvero

double ebp = 5e-4; // cm, espesor bolsa, previvero

double db = 0.93e-3; // kg/cm3, densidad bolsa

double mbp = s * dbp * 1e2 * abp * ebp * db; // kg, masa bolsa previvero

// System.out.printf("masa de bolsas peq, previvero = %.2f kg\n", mbp);

double ceb = 0.314 + 0.689 + 0.174; // kWh/kg bolsa, consumo energetico
bolsa, previvero

double cebp = ceb * mbp; // kWh, consumo energetico por bolsas, previvero

System.out.printf("energía bolsas peq, previvero = %.2f kWh\n", cebp);

// cantidad de suelo, previvero

double rsbp = 1 / 230.; // m3 suelo/bolsa, relación suelo-bolsa, previvero

double ds = 5.515; // kg/m3, densidad suelo

double csp = s * rsbp * ds; // kg suelo, previvero

// System.out.printf("ctd de suelo, previvero = %.2f kg\n", csp);

// cantidad de fertilizante(sustrato), previvero

double w[] = {30, 30, 30, 30}; // dosis de g fertilizante cada 2 semanas para
100 plántulas

double usp = 0; // kg/plántula, urea sustrato previvero

```

```

for (int i = 0; i < w.length; i++) {
    usp += w[i] * 1e-5;
}

double ustp = usp * s; // kg urea, sustrato total, previvero

//    System.out.printf("urea, previvero = %.3f kg\n", ustp);

double ustnp = ustp * 2 * 14.0057 / 62.0538; // kg urea como N, sustrato total,
previvero

    System.out.printf("urea como N, sustrato previvero = %.2f kg\n", ustnp);

double vus = 0.04; // % volatilización urea como n2o en el sustrato, previvero

double ustvp = vus * ustp * 44.0217 / 62.0538; // kg, urea que volatilizó como
n2o, previvero

//    System.out.printf("urea volatilizada como N2O, sustrato previvero = %.3f
kg\n", ustvp);

// cantidad diésel por manejo, previvero

double rdbd = 2e-4; // gal diesel/bolsa*día, relacion diesel/bolsa*día, previvero

double dp = 60; // días previvero

double cdbp = s * rdbd * fcv * dp * dd; // kg, consumo diesel por bomba,
previvero

//    System.out.printf("diésel manejo, previvero = %.2f kg\n", cdbp);

double pcd = 45.4; // MJ/kg diesel, poder calorífico diesel

double pcdp = cdbp * pcd; // MJ, poder calorífico diesel, previvero

```

```

System.out.printf("energía combustión diésel, previvero = % .2f MJ\n", pcdp);

// cantidad CO2 captado por palmas, previvero

double cco2 = 69.9e-4; // ton co2/m2*año

double prco2 = 0.761; // % co2 perdido por respiración

double co2rp = cco2 * (1 - prco2) * ap / 6; // ton co2 retenido, previvero

// System.out.printf("CO2 retenido, previvero = %.2f ton\n", co2rp);

// cantidad de suelo, vivero

double csv = s * rsbp * 10 * ds; // kg, cantidad suelo, vivero

// System.out.printf("ctd de suelo, vivero = %.3f kg\n", csv);

// cantidad de fertilizante(sustrato), vivero. Se tomo igual al previvero

// System.out.printf("urea, vivero = %.3f kg\n", ustp);

// cantidad de bolsa grande, vivero

double lbv = 38; // cm, largo(ancho) bolsa, vivero

double abv = 45; // cm, alto bolsa, vivero

double mbv = s * lbv * abv * ebp * db; // kg, masa bolsa, vivero

// System.out.printf("cantidad bolsas grandes, vivero = %.3f kg\n", mbv);

```

```

double cebv = ceb * mbv; // kWh, consumo energetico bolsa, vivero

System.out.printf("energía bolsas grandes, vivero = %.3f kWh\n", cebv);

// área, vivero

double debv = 0.8; // m, distancia entre bolsas, vivero

double hv = 0.4 * Math.sqrt(3); // m, distancia perpendicular a la base del
triangulo equilatero, vivero

double bav = 1000; // bolsas, ancho de vivero

double dbv = 0.38; // m, diámetro bolsa, vivero

double blv = s / bav; // bolsas, largo de vivero

double bav1 = bav * dbv + (bav - 0.5) * debv; // m, bolsas ancho vivero

double blv1 = blv * dbv + (blv - 1) * hv; // m, bolsas largo vivero

double av = bav1 * blv1; // m2- área vivero

// System.out.printf("área, vivero = %.2f m2\n", av);

double av1 = (bav1 + 2 * am) * (blv1 + 2 * am); // m2, área vivero con
extensión de 1m a cada lado del vivero

// System.out.printf("área vivero con franja de 1m a cada lado, vivero = %.2f
m2\n", av1);

// cantidad herbicida, vivero

double rgv = rg * av1; // kg, glifosato vivero

```

```

//      System.out.printf("masa glifosato = %.2f kg\n", rgv);

// cantidad diésel por mecanización, vivero

double mdtv = 0; // kg diesel por tractor, vivero

for (int i = 0; i <= 3; i++) {

    if (i != 1) {

        mdtv += (cd[i] * fcv * hdt * av1 * dd / rt[i]); // galon diésel totales

    }

    if (i == 1) { // 3 pases de rastra

        mdtv += 3 * (cd[i] * fcv * hdt * av1 * dd / rt[i]); // galon diésel totales

    }

} // fin del for i

//      System.out.printf("diésel mecanización, vivero = %.2f kg\n", mdtv);

double drtv = mdtv * rtp; // km, distancia recorrida por tractor, vivero

System.out.printf("recorrido tractor, vivero = %.2f km\n", drtv);

// cantidad diesel por manejo, vivero

double dv = 240; // días vivero

double cdbv = s * rdbd * fcv * dv * dd;

//      System.out.printf("diésel manejo, vivero = %.2f kg\n", cdbv);

```

```

double pcdv = cdbv * pcd; // MJ, poder calorífico diesel, vivero

System.out.printf("energía combustión diésel, vivero = %.2f MJ\n", pcdv);

// cantidad de fertilizantes, vivero

double a8[][] = {{250. / 500, 0, 0, 0},
                 {350. / 500, 0, 0, 0}, {350. / 500, 0, 0, 0}, {2.5, 5, 0, 0}, {5, 5, 0, 0}, {5, 5, 0,
10}, {10, 10, 0, 0}, {10, 10, 5, 0},
                 {10, 10, 5, 30}};

double total[] = new double[4];

for (int columna = 0; columna < a8[ columna].length; columna++) {

    for (int fila = 0; fila < a8.length; fila++) {

        total[columna] += a8[fila][columna];

    }

} // fin for columna

double vuv = 0.17; // % volatilización urea en vivero

double ufv1 = s * total[0] * 1e-3; // kg urea fertilizante vivero

System.out.printf("urea, vivero = %.2f kg\n", ufv1);

double ucnfv = s * total[0] * 1e-3 * 2 * 14.0057 / 62.0538; //kg urea como N
fertilizante vivero

//    System.out.printf("urea como N, vivero = %.2f kg\n", ucnfv);

```

```

        double stpfv1 = s * total[1] * 1e-3 * 141.9446 / 252.07; // kg stpfv1 fertilizante
vivero

//    System.out.printf("p2o5, vivero = %.2f kg\n", stpfv1);

        double kclfv1 = s * total[2] * 1e-3 * 71.0971 / (2 * 74.551); // kg kclfv1
fertilizante vivero

//    System.out.printf("k2o, vivero = %.2f kg\n", kclfv1);

        double mgso4h2ofv1 = s * total[3] * 1e-3 * (120.37 / 138.38); // kg
mgso4h2ofv1 fertilizante vivero

//    System.out.printf("mgso4, vivero = %.2f kg\n", mgso4h2ofv1);

        double n2ofv = ufv1 * vuv * 44.0217 / 62.0538; // kg n2ofv volatilizado por
urea en el vivero

//    System.out.printf("n2o volatilizado por urea, vivero = %.2f kg\n", n2ofv);

// cantidad CO2 captado por palmas, vivero

        double co2rv = cco2 * (1 - prco2) * av * dv / 365; // ton co2 retenido, vivero

//    System.out.printf("CO2 retenido, previvero = %.2f ton\n", co2rv);

// área, campo

        double dh = 0.4; // m, diámetro hueco, campo

        double debc = 9; // m, distancia entre bolsas, campo

        double hc = 4.5 * Math.sqrt(3); // m, distancia perpendicular a la base del
triangulo, campo

```

```

double fpsc = 250; // g stp/palma, fertilizante presiembra, campo

double bac = bav * dh + (bav - 0.5) * debc; // m, bolsas ancho, campo

double blc = blv * dh + (blv - 1) * hc; // m, bolsas largo, campo

double ac = bac * blc; // m2, area campo

// System.out.printf("área, campo = %.2f m2\n", ac);

double ac1 = (bac + 2 * am) * (blc + 2 * am); // m2, area campo con franja de
1m a cada lado

// System.out.printf("área campo con franja de 1m = %.2f m2\n", ac1);

// cantidad herbicida, campo

double rgc = rg * ac1; // kg /ha rendimiento de glifosato

// System.out.printf("cantidad glifosato, campo = %.2f kg\n", rgc);

// cantidad diésel por mecanización, campo

double mdtc = 0; // kg diesel por tractor, campo

for (int i = 0; i <= 3; i++) {

    if (i == 0 || i == 2) {

        mdtc += cd[i] * fcv * hdt * ac1 * dd / rt[i]; // galon diésel totales

    } else if (i == 1) { // 3 pases de rastra

        mdtc += 3 * (cd[i] * fcv * hdt * ac1 * dd / rt[i]); // galon diésel totales

    } else { // 10 canales de riego

```

```

        mdtc += 10 * (cd[i] * fcv * hdt * ac1 * dd / rt[i]); // galon diésel totales
    } // fin if

} // fin for

// System.out.printf("diésel mecanización, campo = %.2f kg\n", mdtc);

double drtc = mdtc * rtp; // km, distancia recorrida por tractor, campo

System.out.printf("recorrido tractor, vivero = %.2f km\n", drtc);

double fpsc1 = fpsc * s * 141.9446e-3 / 252.07; // kg, p2o5 fertilizante
presiembra campo

System.out.printf("p2o5 presiembra, campo = %.2f kg\n", fpsc1);

// peso de palmas para transporte, campo

double mpc = csv + csp; // kg, masa de palmas para transportar al campo

System.out.printf("cantidad palmas a transp, campo = %.2f kg\n", mpc);

// cantidad de fertilizantes, campo

double a1[][] = {{125, 250, 250, 250}, {500, 1e3, 1e3, 1e3}, {250, 500, 500,
1250}, {0, 500, 500, 650}, {0, 50, 75, 75}};

double fertilizantes0_3[] = new double[5]; // urea, escoria thomas(P), kcl,
MgSO4H2O, bórax

for (int i = 0; i < a1.length; i++) { /*g/plántula- periodo de 0 a 3 años*/

    for (int j = 0; j < a1[i].length; j++) {

```

```

        fertilizantes0_3[i] += a1[i][j] * 1e-3; // kg/plántula- total de fertilizantes en
los años 0-3

    }

} // fin for i

double a2[] = {1.5, 1.75, 1.25, 0.1}; /*kg/palma- urea, kcl, mgcl2, bórax*/

double fertilizantes4_24[] = new double[4];

for (int j = 4; j <= 24; j++) { // periodo de 4 a 24 años

    for (int k = 0; k < a2.length; k++) {

        fertilizantes4_24[k] += a2[k]; // kg/palma- total fertilizantes en los años 4-
24

    }

} // fin for j

for (int l = 0; l < a2.length; l++) // agregando 2 meses para completar el primer
año(2meses previvero + 8meses vivero)

{

    fertilizantes4_24[l] += a2[l] / 6;

}

double ufc1 = (fertilizantes0_3[0] + fertilizantes4_24[0]) * s; // kg urea, campo
por 24,167 años

//    System.out.printf("urea, campo = %.3f kg\n", ufc1);

double ufcn = ufc1 * 2 * 14.0057 / 62.0538; // kg urea como nitrógeno, campo
por 24,167 años

```

```

System.out.printf("urea como N, campo = %.2f kg\n", ufcn);

double k2ofc1 = (fertilizantes0_3[2] + fertilizantes4_24[1]) * s * 94.1954 / (2 *
74.5510); // kg k2o, campo por 24,167 años

// System.out.printf("K2O, campo = %.2f kg\n", k2ofc1);

double bfc1 = (fertilizantes0_3[4] + fertilizantes4_24[3]) * s * 201.2194 /
381.3188; // kg bórax, campo por 24,167 años

// System.out.printf("bórax anhidrido, campo = %.2f kg\n", bfc1);

double mgso4fc1 = (fertilizantes0_3[3] / 138.38 + fertilizantes4_24[2] / 95.211)
* 120.365 * s; // kg mgso4, campo por 24,167 años

// System.out.printf("mgso4, campo = %.2f kg\n", mgso4fc1);

double p2o5fc1 = fertilizantes0_3[1] * s * 141.9446 / (2 * 30.9738); // kg p2o5,
campo por 24,167 años

System.out.printf("p2o5, campo = %.2f kg\n", p2o5fc1);

double cfc1 = (1. + 1.5 * (24. + 1. / 6)) * s; // kg cal dolomita, campo por
24,167 años

// System.out.printf("cal dolomita, campo = %.2f kg\n", cfc1);

double uvn2oc = ufc1 * vuv * 44.0217 / 62.0538;

// System.out.printf("urea volatilizada como n2o, campo = %.2f kg\n", uvn2oc);

// cantidad diesel por poda con guadaña, campo

double cdg = 1; // gal diesel/día, campo

double ppdc = 60; // plateos palmas/día, campo

```

```

double cdgc = 0; // kg diesel- consumo diesel por guadaña, campo

for (int m = 0; m <= 24; m++) { // años de plateos en el campo definitivo

    if (m <= 3) { // 8 podas por año en palma joven para los años 0, 1, 2, 3

        cdgc += 8 * (cdg / ppdc) * s * 3.78528e-3 * dd;

    } // fin if m<=3

    else { // 3 podas por año en palma adulta, para los años 4, 5, 6, ..., 24

        cdgc += 3 * (cdg / ppdc) * s * 3.78528e-3 * dd;

    } // fin else

} // fin for m

cdgc += 0.5 * (cdg / ppdc) * s * 3.78528e-3 * dd; // para los dos meses

//    System.out.printf("diesel guadaña, campo = %.2f kg\n", cdgc);

double pcdc = cdgc * pcd; // MJ, poder calorífico diesel, campo

System.out.printf("energía combustión diésel, campo = % .2f MJ\n", pcdc);

// cantidad CO2 captado por palmas, campo

double co2rc = cco2 * (1 - prco2) * ac * 24.167; // ton co2 retenido, vivero

//    System.out.printf("CO2 retenido, campo = %.2f ton\n", co2rc);

// Resumen

String insumos[] = {"semillas(und)", "área(m2)", "herbicida(kg)", "suelo(kg)",
"diesel M(kg)", "diesel B(kg)", "diesel G(kg)",

```

```

        "arena(kg)  ", "malla(kg)  ", "urea sust(kg)", "bolsas(kg)  ", "urea fert(kg)",
        "p2o5(kg)  ", "k2o(kg)  ", "mgso4(kg)  ",
        "bórax(kg)  ", "cal(kg)  ", "N2O(kg)  ", "CO2(ton)  ";
    String etapas[] = {"insumos  ", " compra", " previv ", "vivero", " campo"};
    // double ms = 2e-6 * s; // ton, masa de semillas

    for (int i = 0; i < etapas.length; i++) {
        System.out.printf("%s", etapas[i]);
    }

    System.out.println();

    double valor[][] = {{s, 0, 0, 0}, {0, amp, av1, ac1}, {0, rgp, rgv, rgc}, {0, csp,
    csv, 0}, {0, mdtp, mdtv, mdtc}, {0, cdbp, cdbv, 0},
        {0, 0, 0, cdgc}, {0, mas, 0, 0}, {0, mmp, 0, 0}, {0, ustp, ustp, 0}, {0, mbp,
    mbv, 0}, {0, 0, ufv1, ufc1}, {0, 0, stpfv1, fpvc1 + p2o5fc1},
        {0, 0, kclfv1, k2ofc1}, {0, 0, mgso4h2ofv1, mgso4fc1}, {0, 0, 0, bfc1}, {0, 0,
    0, cfc1}, {0, ustvp, n2ofv + ustvp, uvn2oc}, {0, co2rp, co2rp, co2rc}};

    for (int fila = 0; fila < insumos.length; fila++) {
        System.out.printf("%s", insumos[fila]);

        for (int columna = 0; columna < etapas.length - 1; columna++) {
            System.out.printf("%s %.1e", " ", valor[fila][columna]);
        }

        System.out.println();
    }
}

```

```

// producción RFF, campo

double prff = 20.08; // ton/ha*año, producción promedio anual RFF

double prff1 = prff * ac * 1e-4 * 25; // ton rff para el cultivo por 25 años, campo

System.out.printf("RFF = %.2e ton\n", prff1);

// escenario poda hojas de palma, campo

System.out.println("***hojas podadas en campo definitivo***");

double hpc = 4e-5; // ton hojas/m2*año

double hpc1 = hpc * ac * 22; // ton hojas podadas campo/año

System.out.printf("hojas podadas, campo = %.2f ton\n", hpc1);

double[] flow = {26, 4.6, 60.7, 20.5, 11.2}; // kg/ha*año de n, p2o5, k2o,
camg(co3)2, mgso4

double[] rel = {1, 141.9446 / (2 * 30.9738), 94.1954 / (2 * 39.098), 184.404 /
40.08, 120.366 / 24.305};

String[] titulo = {"N(kg)   ", "P2O5(kg) ", "K2O(kg)  ", "cal(kg)  ",
"MgSO4(kg) ", "N2O(kg)   "};

double[] flujo = new double[5];

for (int i = 0; i < flow.length; i++) {

    flujo[i] = flow[i] * 1e-4 * ac * 22 * rel[i];

}

```

```

double uvn2op = flujo[0] * 44.0217 / (2 * 14.0057); // kg N2O, poda
for (int i = 0; i < titulo.length; i++) {
    System.out.printf("%s", titulo[i]);
}
System.out.println();
double valor1[] = {flujo[0], flujo[1], flujo[2], flujo[3], flujo[4], uvn2op};
for (int i = 0; i < valor1.length; i++) {
    System.out.printf("%.2e ", valor1[i]);
}
System.out.println();

```

// escenario leguminosa Kudzú

```

double rkp = 2; // radio kudzú/palma campo
double nfkc = 600e-4; // kg N/m2*año; N fijado por kudzú campo
double akc = Math.PI * Math.pow(rkp, 2) * s; // m2, área kudzú campo
double ckc = 5e-4 * akc; // kg kudzú campo
System.out.printf("cantidad kudzú = %.2f kg\n", ckc);
double nfkcu = nfkc * akc * 24; // kg N fijado por kudzú
System.out.printf("N fijado por kudzú = %.2f kg\n", nfkc);
double uvn2ok = nfkc * 44.0217 / (2 * 14.0057); // kg N2O, kudzú

```

```

System.out.printf("cantidad n2o evitado, kudzu = %.2f kg\n", uvn2ok);

// extracción cpo para 1 año

System.out.println("****Extratora de aceite****");

double vrffe = prff1 / 25.; // ton rff/año, extractora

double apce = vrffe * 0.2; // ton cpo/año, extractora

double rpe = vrffe * 0.22; // ton raquis/año, extractora

double cpe = rpe * 0.055; // ton cáscaras/año, extractora

double fpe = rpe * 0.135; // ton fibra/año, extractora

double ape = vrffe * 0.065; // ton almendra/año, extractora

double Impe = vrffe * 0.6775; // ton lodos molino/año, extractora

double cee = 20; // kWh/ton rff, extractora

double cete = cee * vrffe; // kWh/año, extractora

String titulo2[] = {"rff/año(ton)", "cpo(ton) ", "raquis(ton) ", "cáscara(ton)",
"fibra(ton) ",

    "almendra(ton)", "lodos(ton) ", "kWh "};

double valor2[] = {vrffe, apce, rpe, cpe, fpe, ape, Impe, cete};

for (int i = 0; i < titulo2.length; i++) {

    System.out.printf("%s %s", titulo2[i], "");

}

System.out.println();

```

```

for (int i = 0; i < valor2.length; i++) {
    System.out.printf("%.2e %4s", valor2[i], "");
}
System.out.println();

```

// raquis de palma como fertilizante

```

System.out.println("***raquis como fertilizante***");
double[] flow1 = {5.4, 0.4, 35.3, 2.3, 2.7}; // kg/ha*año de n, p, k, ca, mg
double[] flujo1 = new double[5];
for (int i = 0; i < flow1.length; i++) {
    flujo1[i] = flow1[i] * 1e-4 * ac * rel[i];
}
double uvn2or = flujo1[0] * 44.0217 / (2 * 14.0057); // kg N2O, raquis
for (int i = 0; i < titulo.length; i++) {
    System.out.printf("%s", titulo[i]);
}
System.out.println();
double valor3[] = {flujo1[0], flujo1[1], flujo1[2], flujo1[3], flujo1[4], uvn2or};
for (int i = 0; i < valor3.length; i++) {
    System.out.printf("%.2e ", valor3[i]);
}

```

```
}
```

```
System.out.println();
```

```
// cáscaras de palma como fertilizante
```

```
System.out.println("***cáscaras como fertilizante***");
```

```
double[] flow2 = {3., 0.1, 0.8, 0.2, 0.2}; // kg/ha*año de n, p, k, ca, mg
```

```
double[] flujo2 = new double[5];
```

```
for (int i = 0; i < flow2.length; i++) {
```

```
    flujo2[i] = flow2[i] * 1e-4 * ac * rel[i];
```

```
}
```

```
double uvn2os = flujo2[0] * 44.0217 / (2 * 14.0057); // kg N2O, cáscaras
```

```
for (int i = 0; i < titulo.length; i++) {
```

```
    System.out.printf("%s", titulo[i]);
```

```
}
```

```
System.out.println();
```

```
double valor4[] = {flujo2[0], flujo2[1], flujo2[2], flujo2[3], flujo2[4], uvn2os};
```

```
for (int i = 0; i < valor4.length; i++) {
```

```
    System.out.printf("%.2e ", valor4[i]);
```

```
}
```

```
System.out.println();
```

```

// fibras de palma como fertilizante

System.out.println("****fibras como fertilizante****");

double[] flow3 = {5.2, 1.3, 7.6, 1.8, 2.}; // kg/ha*año de n, p, k, ca, mg

double[] flujo3 = new double[5];

for (int i = 0; i < flow3.length; i++) {

    flujo3[i] = flow3[i] * 1e-4 * ac * rel[i];

}

double uvn2of = flujo3[0] * 44.0217 / (2 * 14.0057); // kg N2O, fibras

for (int i = 0; i < titulo.length; i++) {

    System.out.printf("%s", titulo[i]);

}

System.out.println();

double valor5[] = {flujo3[0], flujo3[1], flujo3[2], flujo3[3], flujo3[4], uvn2of};

for (int i = 0; i < valor5.length; i++) {

    System.out.printf("%.2e ", valor5[i]);

}

System.out.println();

// cáscaras como fuente de energía

double pcse = 4950; // kcal/kg cáscaras base seca

double pcse1 = cpe * 1e3 * 0.93 * pcse; // kcal cáscaras

```

```
System.out.printf("energía aportada por cáscaras = %.2e kcal\n", pcse1);
```

```
double pcfe = 4420; // kcal/kg fibra base seca
```

```
double pcfe1 = fpe * 1e3 * 0.58 * pcfe; // kcal fibra
```

```
System.out.printf("energía aportada por fibra = %.2e kcal\n", pcfe1);
```

```
// efluentes del molino de palma como biogas y fertilizante
```

```
System.out.println("***lodos del molino de palma***");
```

```
double pcbe = 5300; // kcal/m3 biogas
```

```
double pcbe1 = vrffe * 20 * pcbe / 1200.; // kcal biogas
```

```
double cbioch4 = 0.65; // composición volumen ch4 en biogas
```

```
double cbioch41 = vrffe * cbioch4 * 700 / 60; // kg ch4 biogas
```

```
System.out.printf("cantidad metano = %.2e kg\n",cbioch41);
```

```
double cbioco2 = 0.35; // composición volumen co2 en biogas
```

```
double cbioco21 = vrffe * cbioco2 * 1900 / 60; // kg co2 biogas
```

```
System.out.printf("cantidad dióxido de carbono = %.2e kg\n",cbioco21);
```

```
double cbioh2s = 2000; // ppm H2S en biogas
```

```
double cbioh2s1 = cbioh2s * 20 * vrffe * 1.4 / (1200 * 1e6); // kg H2S
```

```
System.out.printf("cantidad H2S = %.2f kg\n", cbioh2s1);
```

```
System.out.printf("energía aportada por efluentes = %.2e kcal\n", pcbe1);
```

```
System.out.println("***efluentes como fertilizante***");
```

```

double[] flow4 = {4.4, 0.9, 20.7, 3.1, 3.9}; // kg/ha*año de n, p, k, ca, mg

double[] flujo4 = new double[5];

ac =1;

for (int i = 0; i < flow4.length; i++) {

    flujo4[i] = flow4[i] * 1e-4 * ac * rel[i];

}

double uvn2oem = flujo4[0] * 44.0217 / (2 * 14.0057); // kg N2O, efluente
molino

for (int i = 0; i < titulo.length; i++) {

    System.out.printf("%s", titulo[i]);

}

System.out.println();

double valor6[] = {flujo4[0], flujo4[1], flujo4[2], flujo4[3], flujo4[4], uvn2oem};

for (int i = 0; i < valor6.length; i++) {

    System.out.printf("%.2e ", valor6[i]);

}

System.out.println();

System.out.println();

}

```

Anexo C. Escenario de subproductos planta extractora

Los siguientes escenarios corresponden a si se hiciera un manejo apropiado de residuos en el cultivo de palma de aceite

Escenario: Raquis de palma como fertilizante

Proceso unitario: raquis de palma como fertilizante

Función principal: nutrir el cultivo con la producción de un año de RFF

Unidad funcional: $6.36 \cdot 10^4$ ton raquis por viaje

| Sustancia | Raquis 4.417 ton/ha*año |
|-----------|-------------------------|
| Nitrógeno | 5.4 kg N |
| Fosforo | 0.4 kg P |
| Potasio | 35.3 kg K |
| Calcio | 2.3 kg Ca |
| Magnesio | 2.7 kg Mg |

Tomado de la pg. 37 del documento Palm oil. Para 1 año, tenemos que para cualquier sustancia

$$j \text{ kg sustancia} = \frac{i \text{ kg sustancia}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10^4 \text{ m}^2} * \text{área cultivo (m}^2) * \text{relación estequiométrica}$$

$$N = 7.78 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$P_2O_5 = 1.32 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$K_2O = 6.12 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

$$\text{Cal dolomita} = 1.52 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

$$MgSO_4 = 1.93 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

Transporte raquis hasta cultivo

Proceso unitario: transporte de tusas de la planta de beneficio hasta el cultivo por un año

Función principal: alimentar a la palma con nutrientes orgánicos

Unidad funcional: 1 viaje

| Distancia de referencia | Fuente de información |
|----------------------------|-----------------------|
| 45.2 km extractora-cultivo | Google maps |

Escenario: Cáscaras de palma como fertilizantes

Proceso unitario: cáscaras de palma como fertilizante

Función principal: nutrir el cultivo para la producción de un año de RFF

Unidad funcional: $3.50 \cdot 10^3$ ton de cáscaras por viaje

| Sustancia | Cáscaras 1.104 ton/ha*año |
|-----------|---------------------------|
| Nitrógeno | 3 kg N |
| Fosforo | 0.1 kg P |
| Potasio | 0.8 kg K |
| Calcio | 0.2 kg Ca |
| Magnesio | 0.2 kg Mg |

Tomado de la pg. 37 del documento Palm oil

Igual que con el Raquis, entonces

$$j \text{ kg sustancia} = \frac{i \text{ kg sustancia}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10^4 \text{ m}^2} * \text{área cultivo (m}^2) * \text{relación estequiométrica}$$

$$N = 4.32 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$P_2O_5 = 3.3 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$K_2O = 1.39 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$\text{Cal dolomita} = 1.33 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$MgSO_4 = 1.43 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

Escenario: Fibra del fruto de palma como fertilizantes

Proceso unitario: fibra de palma como fertilizante

Función principal: nutrir el cultivo por un año

Unidad funcional: $8.59 \cdot 10^3$ ton fibra por viaje

| Sustancia | Fibra 2.7108 ton/ha*año |
|-----------|-------------------------|
| Nitrógeno | 5.2 kg N |
| Fosforo | 1.3 kg P |
| Potasio | 7.6 kg K |
| Calcio | 1.8 kg Ca |
| Magnesio | 2.0 kg Mg |

Tomado de la pg. 37 del documento Palm oil. Igual que el anterior

$$j \text{ kg sustancia} = \frac{i \text{ kg sustancia}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10^4 \text{ m}^2} * \text{área cultivo (m}^2) * \text{relación estequiométrica}$$

$$N = 7.49 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$P_2O_5 = 4.29 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$$K_2O = 1.32 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

$$\text{Cal dolomita} = 1.19 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

$$MgSO_4 = 1.43 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

Escenario: Cáscaras de palma como fuente de energía

Proceso unitario: manejo de cáscaras de palma

Función principal: fuente de energía en forma de calor

Unidad funcional: $3.5 \cdot 10^3$ ton cáscaras (7% humedad)

$\frac{4950 \text{ kcal}}{1 \text{ kg cáscaras en base seca}}$, Tomado de la pg. 39 del documento Palm oil

$$3.5 \cdot 10^6 \text{ kg cáscaras} * \frac{0.93 \text{ kg cáscaras base seca}}{\text{kg cáscara}} * \frac{4950 \text{ kcal}}{1 \text{ kg cáscaras en base seca}} = 1.61 \cdot 10^{10} \text{ kcal}$$

Escenario: Fibra del fruto de palma como fuente de energía

Proceso unitario: manejo de fibra de palma

Función principal: fuente de energía en forma de calor

Unidad funcional: $8.59 \cdot 10^3$ ton fibra (42% humedad)

$\frac{4420 \text{ kcal}}{1 \text{ kg fibra en base seca}}$, Tomado de la pg. 39 del documento Palm oil

$$8.59 \cdot 10^6 \text{ kg fibra} * \frac{0.58 \text{ kg fibra base seca}}{\text{kg fibra}} * \frac{4420 \text{ kcal}}{1 \text{ kg fibra en base seca}} = 2.20 \cdot 10^{10} \text{ kcal}$$

Escenario: Efluentes de la extractora de aceite

Proceso unitario: manejo de efluentes del proceso

Función principal: producir biogás y fertilizantes a partir de los efluentes

Unidad funcional: $1.96 \cdot 10^5$ ton lodos

| Información de flujos | Fuente | Suposición |
|--|--|------------|
| Biogas =65% CH₄ + 35% CO₂ + 2000 ppm H₂S | Pg. 35 del documento Palm oil http://www.textoscientificos.com/energia/biogas | |
| 5300 kcal/m³ biogas | Pg. 35 del documento Palm oil | |
| 1 ppm H₂S = 1.4 mg/m³ | http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0337.html | |
| N = 4.4 kg | Pg. 37 del documento Palm oil | |
| P = 0.9 kg | Pg. 37 del documento Palm oil | |
| K = 20.7 kg | Pg. 37 del documento Palm oil | |
| Ca = 3.1 kg | Pg. 37 del documento Palm oil | |
| Mg = 3.9 kg | Pg. 37 del documento Palm oil | |

Cálculos:

$$\frac{60 \text{ ton RFF}}{\text{h}} * \frac{20 \text{ h}}{\text{día}} = 20 \text{ m}^3 \text{ biogas}, \text{ Pg 35 del documento Palm oil. Es decir, para 1 día}$$

$$\frac{1200 \text{ ton RFF}}{20 \text{ m}^3 \text{ biogas}}, \text{ en el digester anaerobio}$$

En nuestro caso, la planta debe procesar $2.89 \cdot 10^5$ ton RFF/año, equivalentes a

$$2.89 \cdot 10^5 \text{ ton RFF} * \frac{20 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{1200 \text{ ton RFF}} * \frac{5300 \text{ kcal}}{\text{m}^3 \text{ biogas}} = 2.55 \cdot 10^7 \text{ kcal, combustión de metano}$$

$$CH_4 = 2.89 * 10^5 \text{ ton RFF} * \frac{20 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{1200 \text{ ton RFF}} * \frac{0.65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{m}^3 \text{ biogas}} * \frac{700 \text{ kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} = 2.19 * 10^6 \text{ kg}$$

$$CO_2 = 2.89 * 10^5 \text{ ton RFF} * \frac{20 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{1200 \text{ ton RFF}} * \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CO}_2}{\text{m}^3 \text{ biogas}} * \frac{1900 \text{ kg CO}_2}{\text{m}^3 \text{ CO}_2} = 3.21 * 10^6 \text{ kg}$$

$$H_2S = \frac{2000 \text{ ppm H}_2\text{S}}{\text{m}^3 \text{ biogas}} * \frac{20 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{1200 \text{ ton RFF}} * 2.98 * 10^5 \text{ ton RFF} * \frac{1.4 \text{ mg H}_2\text{S}}{1 \text{ ppm H}_2\text{S}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 * 10^6 \text{ mg}} = 13.5 \text{ kg}$$

La descarga del digestor también tiene nutrientes que son aprovechables para los cultivos relativos a los fertilizantes manejados en el programa de fertilización

$$j \text{ kg sustancia} = \frac{i \text{ kg sustancia}}{\text{ha}} * \frac{1 \text{ ha}}{10^4 \text{ m}^2} * \text{área cultivo (m}^2) * \text{relación estequiométrica}$$

$$N = 6.34 * 10^4 \text{ kg}$$

$$P_2O_5 = 2.97 * 10^4 \text{ kg}$$

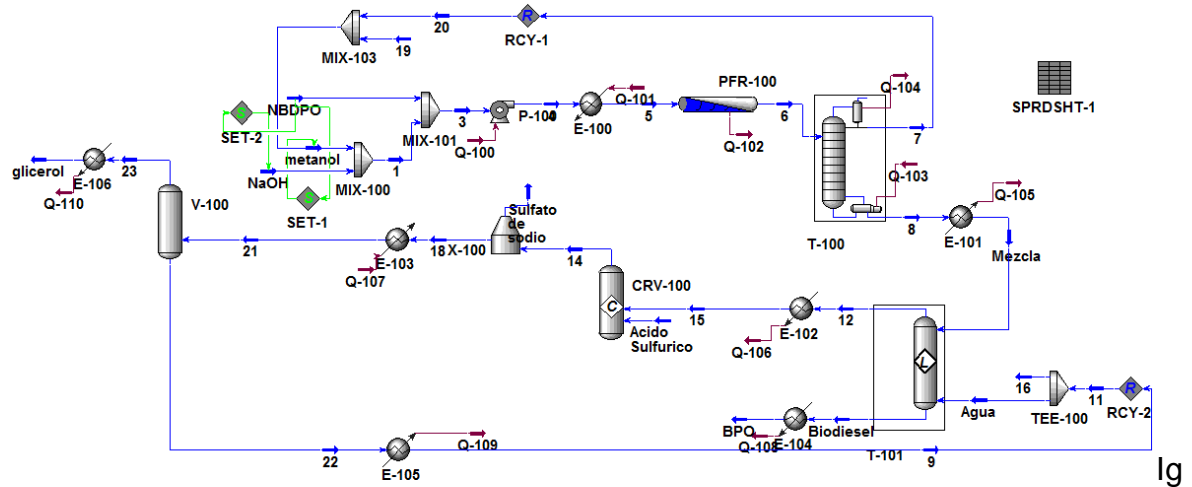
$$K_2O = 3.59 * 10^5 \text{ kg}$$

$$\text{Cal dolomita} = 2.05 * 10^5 \text{ kg}$$

$$MgSO_4 = 2.78 * 10^5 \text{ kg}$$

Anexo D. Transesterificación homogénea básica de aceite de palma pre-tratado con esterificación de ácidos grasos

Características de la planta con esterificación de ácidos grasos libres



ual para la lista de componentes hipotéticos y la corriente NBDPO del Anexo D, además de crear el sólido sulfato de sodio con propiedades físicas de acuerdo a la ficha técnica Proquimsa msds # p-23. Mezclando las corrientes NBDPO con metanol inicialmente puro y ajustado a la proporción 102:1 molar alcohol- aceite e hidróxido de sodio puro con flujo másico del 1% al flujo de aceite esterificado, bombeando y precalentando hasta las condiciones de reacción en el PFR-100 (5 m³, 3 m de largo y 509 tubos de 5 mm de espesor). La torre de destilación T-100 opera con 6 platos teóricos ingresando el alimento en el plato 3, a 1 atm; separando metanol y trazas de agua con fin de recircularse al proceso. La corriente mezcla fue enfriada hasta 35°C y puesta en contracorriente con agua en la torre de extracción líquido, donde se obtiene biodiésel con trazas de metanol; y otra corriente en su mayor proporción de agua que se le retira calor para reaccionar con ácido sulfúrico para producir sulfato de sodio sólido, que es removido totalmente con el equipo X-100. La corriente líquida que sale del separador de sólidos simple se vaporiza parcialmente para separar el agua del glicerol entre otros.

Información recopilada para el software SimaPro7.1

Transporte de insumos

Proceso unitario: transporte de insumos

Función principal: insumos para operar la planta extractora de aceite de palma

Unidad funcional: 1 viaje

| Distancia de referencia | Fuente de información |
|--|---|
| 682 km Cali- Barrancabermeja (metanol) | http://www.silquin.com/metanol.html |
| 407 km Medellín- Barrancabermeja (soda cáustica) | http://www.quimirod.com/productos.php |
| 465 km Caldas- Barrancabermeja (ácido sulfúrico) | http://industriasbasicasdecaldass.en.infocomercial.com/ |
| 11 km (transporte NBDPO a planta Biodiesel) | Supuesto |

*Las distancias fueron halladas con la aplicación de Google maps

Entradas y salidas del proceso

Proceso unitario: flujos de la planta productora de biodiesel

Función principal: cuantificar flujos

Unidad funcional: producción de un año

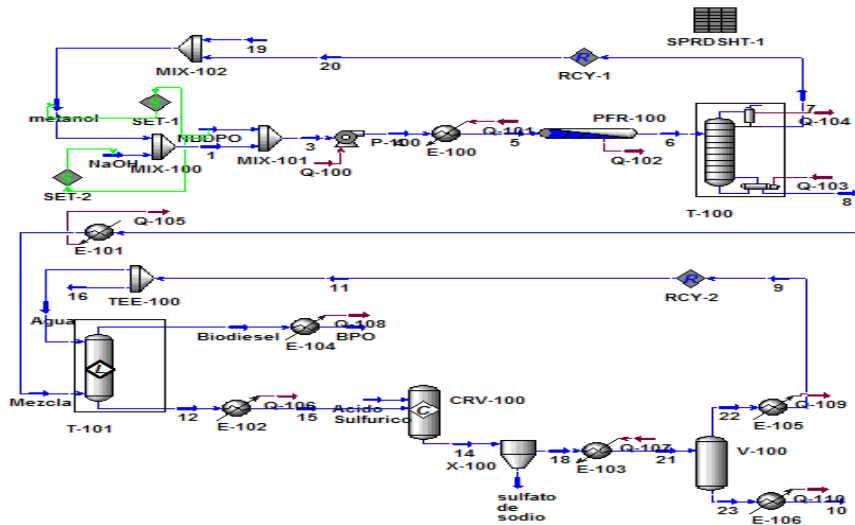
| Flujo de referencia | Toneladas/ año |
|--------------------------------|---------------------------|
| Metanol | 5771 |
| NaOH | 576.2 |
| NBDPO | 5.762×10^4 |
| H ₂ SO ₄ | 644.7 |
| Agua sale | 129.3 |
| Energía | 1.617×10^{11} kJ |
| Biodiesel: | 5.746×10^4 |
| Glicerol con 95.9% pureza | 6238 |
| Sulfato de sodio | 934.2 |

Composición másica del Biodiesel: 0.06% metanol, 0.13% agua, 37.07% oleato de metilo, 11.58% linoleato de metilo, 50.97 % palmitato de metilo, 0.19% ácido palmítico. Composición másica del Glicerol con 95.91% pureza: 0.03% metanol,

0.87% NaOH, 97.67% glicerol, 1.42% agua. Composición másica de sulfato de sodio: 99.95% sulfato de sodio, 0.01% glicerol, 0.04% agua

Anexo E. Transesterificación homogénea básica de aceite de palma pre-tratado con neutralización de ácidos grasos

Características de la planta con neutralización de ácidos grasos libres



El diseño de la planta es el mismo que el expuesto en el Anexo D, solo que cambian valores de flujo para algunos flujos.

Información recopilada para el software SimaPro7.1

Transporte de insumos

Proceso unitario: transporte de insumos

Función principal: insumos para operar la planta extractora de aceite de palma

Unidad funcional: 1 viaje

| Distancia de referencia | Fuente de información |
|--|---|
| 682 km Cali- Barrancabermeja (metanol) | http://www.silquin.com/metanol.html |
| 407 km Medellín- Barrancabermeja (soda cáustica) | http://www.quimirod.com/productos.php |
| 465 km Caldas- Barrancabermeja | http://industriasbasicasdecaldas.en.infocomercial.com/ |

| | |
|---|----------|
| (ácido sulfúrico) | |
| 11 km (transporte NBDPO a planta Biodiesel) | Supuesto |

*Las distancias fueron halladas con la aplicación de Google maps

Entradas y salidas del proceso

Proceso unitario: flujos de la planta productora de biodiesel

Función principal: cuantificar flujos

Unidad funcional: producción de un año

| Flujo de referencia | Toneladas/ año |
|--------------------------------|---------------------------|
| Metanol | 6330 |
| NaOH | 556.1 |
| Agua sale | 242.4 |
| H ₂ SO ₄ | 644.7 |
| Energía | 1.181*10 ¹² kJ |
| Biodiesel: | 5.595*10 ⁴ |
| Glicerol con 97.1% pureza | 6247 |
| Sulfato de sodio | 869.4 |

Composición másica del Biodiesel: 0.13% agua, 38.94% oleato de metilo, 11.98% linoleato de metilo, 48.95% palmitato de metilo

Composición másica del Glicerol con 98.43% pureza: 98.43% glicerol, 0.49% NaOH, 1.06% sulfato de sodio, 0.01% palmitato de metilo

Composición másica de sulfato de sodio: 99.9% sulfato de sodio, 0.02% glicerol, 0.08% agua.