

## Evaluación de la sostenibilidad y seguridad inherente de un proceso de producción de aceite de palma en el norte de Colombia\*

Evaluating the Sustainability and Inherent Safety of a Crude Palm Oil Production Process in North-Colombia

**CITACIÓN:** González-Delgado, A. D., Barajas-Solano, A. F. & León-Pulido, J. (2021). Evaluación de la sostenibilidad y la seguridad inherente de un proceso de producción de aceite de palma en el norte de Colombia (Traductor C. Arenas). *Palmas*, 42(4), 33-49.

**PALABRAS CLAVE:** SWROIM, ROI, Eficiencia exergética, Riesgos, Palma africana.

**KEYWORDS:** SWROIM, ROI, Exergy efficiency, Risks, African palm.

\* Traducido del original Evaluating the Sustainability and Inherent Safety of a Crude Palm Oil Production Process in North-Colombia. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1046. doi: 10.3390/app11031046

Nota del editor: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

Derechos de autor: © 2021 de los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este es un artículo de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**GONZÁLEZ-DELGADO ÁNGEL DARÍO**  
Grupo de Investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (NIPAC), departamento de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias 130015, Colombia.

Autor de correspondencia  
agonzalezd1@unicartagena.edu.co

**BARAJAS-SOLANO ANDRÉS F.**  
Grupo de Investigación en Medio Ambiente y Vida, departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta 540003, Colombia.

andresfernandobs@ufps.edu.co

**LEÓN-PULIDO JEFFREY**  
Programa de Ingeniería Química, U. EAN, Bogotá 110221, Colombia.  
jleonp@universidadean.edu.co

### Resumen

La palma africana es la principal fuente de aceite vegetal del mundo, ya que representa alrededor del 29,60 % de la producción global de aceites y grasas. La rápida expansión de este sector ha provocado varias preocupaciones relacionadas con aspectos ambientales y sociales

que han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. En este trabajo se realizó un análisis de seguridad inherente y se evaluó la sostenibilidad del proceso de producción de aceite de palma crudo utilizando el método del índice de seguridad inherente (ISI) y la métrica de rendimiento ponderado sostenible de la inversión (SWROIM por sus siglas en inglés), respectivamente. El proceso fue diseñado para una capacidad de procesamiento de 30 t/h de racimos de fruto de palma y bajo las condiciones del norte de Colombia. Se consideraron tres indicadores técnicos para evaluar la sostenibilidad del proceso, incluyendo la eficiencia exergética, el potencial de impacto ambiental (productos del PEI, por sus siglas en inglés) y el índice de seguridad inherente total ( $I_{TI}$ ). El factor económico se considera directamente, ya que el SWROIM es una extensión del retorno de la inversión (ROI) convencional. El  $I_{TI}$  de 11 resultante indicó un proceso intrínsecamente seguro, y se observó el mayor riesgo para el subíndice de seguridad de equipos del proceso. El SWROIM alcanzó un valor más alto (53 %) en comparación con el ROI convencional (43,99 %), lo que sugiere impactos positivos en la sostenibilidad. La novedad de este trabajo radica en detectar los riesgos inherentes y proporcionar un criterio de toma de decisiones para este proyecto, a través de una evaluación completa que relacione los criterios económicos, energéticos, ambientales y de seguridad.

## Summary

The African palm is the main source of vegetable oil worldwide, representing about 29.60% of the total oil and fat production around the world. The rapid expansion of this sector has faced several concerns related to environmental and social aspects that have driven the search for sustainable alternatives. In this work, the inherent safety analysis and sustainability evaluation for the crude palm oil production process was performed using the inherent safety index (ISI) method and the sustainable weighted return on investment metric (SWROIM), respectively. The process was designed for a processing capacity of 30 t/h of palm bunches and under North-Colombian conditions. Three technical indicators were considered to evaluate the process sustainability including exergy efficiency, potential environmental impacts output (PEI output), and the total inherent safety index ( $I_{TI}$ ). The economic factor is directly considered since the SWROIM is an extension of the conventional return on investment (ROI). The resulting  $I_{TI}$  at 11 indicated an inherently safe process, and the highest risk was observed for the process equipment safety subindex. The SWROIM reached a higher value (53%) compared to the conventional ROI (49.39%), which suggests positive impacts on sustainability. The novelty of this work lies in detecting the inherent risks and providing a decision making criteria for this project through a complete evaluation that relates economic, energy, environmental, and safety criteria.

## Introducción

La palma africana es la principal fuente de aceite vegetal del mundo, ya que representa alrededor del 29,60 % de la producción global de aceites y grasas [1]. En 2016, el consumo de aceite de palma crudo alcanzó los 60.096 millones de toneladas [2]. Esta tasa de consumo está relacionada con su versatilidad, alta productividad y menor costo de producción. Indonesia (10.830.000 ha) y Malasia (5.150.000 ha) son los principales productores, con aproximadamente el 78 %

de la superficie de producción mundial, mientras que Colombia es el quinto mayor productor de aceite de palma crudo del mundo y el primero de América Latina, con el 2,30 % de la superficie de producción mundial (465.000 ha) [3]. Estas plantaciones se encuentran en 4 zonas principales de Colombia: Norte, Central, Oriental y Suroccidental [4]; sin embargo, la mayor superficie sembrada se encuentra en el norte del país, con el 29 % de la superficie total [5]. La producción de aceite de palma crudo representa una actividad económica importante para el crecimien-

to socioeconómico del país [6]. Esta ha aumentado en los últimos años, impulsada por la demanda de países en desarrollo como China, India y Brasil [7]. También se prevé que en los próximos años la superficie sembrada con palma africana aumentará a 2 millones de hectáreas [8]. La rápida expansión de este sector ha causado varias preocupaciones ambientales y sociales, tales como la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos, la deforestación, la biodiversidad y la pérdida de la calidad del suelo y los cambios en el uso del suelo [9].

El desarrollo de alternativas sostenibles para la industria de la palma de aceite se ha convertido en una prioridad. Se han realizado varios trabajos para evaluar los aspectos económicos, energéticos, ambientales y sociales de estos sistemas de bioenergía e identificar oportunidades de mejora. Por ejemplo, González-Delgado y Peralta-Ruiz [10] realizaron un análisis ambiental utilizando el Algoritmo de

Reducción de Residuos (WAR por sus siglas en inglés) para cuantificar la tasa de emisión y generación de impactos ambientales en la producción de aceite de palma crudo. Martínez *et al.* [11] realizaron el análisis exergético para identificar los principales sumideros de energía e ineficiencias del proceso; mientras que González-Delgado y Peralta-Ruiz [12] desarrollaron la evaluación tecnoeconómica para determinar la rentabilidad del proceso. En la Tabla 1 se presentan otros estudios que evaluaron la producción de aceite de palma crudo.

En este trabajo se realiza un análisis de seguridad inherente y una evaluación de sostenibilidad para un proceso de aceite de palma crudo bajo las condiciones del norte de Colombia. El primero nos permite evitar peligros reduciendo el material peligroso y el número de operaciones peligrosas en la planta [18], mientras que el segundo, el análisis completo del proceso incluyendo criterios económicos, ambien-

**Tabla 1.** Trabajos recientes sobre sistemas bioenergéticos en la industria de la palma de aceite.

Estudio de caso	Ubicación	Objetivo	Método	Resultados relevantes	Referencia
Cadena de suministro de la palma de aceite	Malasia	Análisis de la huella hídrica (WFP)	Contabilidad del agua y evaluación de la vulnerabilidad (WAVE)	33 % de reducción en la WFP cuando no hubo dilución en la planta de beneficio	Soly <i>et al.</i> [13]
Producción de aceite de palma crudo	Colombia	Determinar las emisiones de gases de efecto invernadero y la rentabilidad económica	Evaluación del ciclo de vida y análisis económico	Ganancia de energía neta = 12,5, 13,7 Tasa Interna de Retorno = 34 %, 43 %	Ramírez-Contreras <i>et al.</i> [9]
Producción de aceite de palma crudo	Colombia	Analizar los posibles peligros del proceso	Identificación y clasificación de peligros (HIRA)	Índice de daños por incendio y explosión = 400	Moreno-Sader <i>et al.</i> [14]
Producción de aceite de palma crudo y aceite de palmiste	Colombia	Cuantificar los posibles impactos ambientales (PEI)	Algoritmo de reducción de residuos (WAR)	Tasa de salida de PEI = $1,66 \times 10^{-4}$ PEI/h	Alvarez-Cordero <i>et al.</i> [15]
Cadena de suministro de la palma de aceite	Brasil	Evaluar la sostenibilidad del proceso	Evaluación del ciclo de vida y análisis económico	Huella hídrica renovable = 6,8/ l de aceite	Munasinghe <i>et al.</i> [16]
Producción de aceite de palma crudo	Brasil	Realizar un balance de gases de efecto invernadero (GEI)	Análisis del ciclo de vida	GHG = -208 kg CO <sub>2</sub> equiv./1.000 kg palma	Oliveira <i>et al.</i> [17]

tales, energéticos y de seguridad. Sanjuan *et al.* [19] analizaron la seguridad inherente de un proceso de producción de bioetanol, mientras que Meramo *et al.* [20] lo hicieron para un proceso de producción de ácido levulínico. En ambos casos, los procesos mostraron un buen rendimiento desde el punto de vista de seguridad. Meramo-Hurtado *et al.* utilizaron la métrica de rentabilidad ponderada sostenible de la inversión [21] para evaluar la sostenibilidad de un material lignocelulósico múltiple y comparar las vías de producción de biobutanol mediante la fermentación acetona-butanol-etanol. Los autores observaron un mayor rendimiento del proceso de este sistema utilizando la métrica SWROIM. La novedad de este trabajo radica en detectar los riesgos inherentes y proporcionar un criterio de toma de decisiones para este proyecto, a través de una evaluación completa que relacione los criterios económicos, energéticos, ambientales y de seguridad.

## 2. Materiales y métodos

La metodología utilizada en este estudio abarca el análisis de seguridad y la evaluación de sostenibilidad para un proceso de producción de aceite de palma crudo en las condiciones del norte de Colombia. El análisis de seguridad inherente se realizó utilizando la metodología del índice de seguridad inherente (ISI), mientras que se usó la métrica de rentabilidad ponderada sostenible (SWROIM, por sus siglas en inglés) como herramienta para evaluar la sostenibilidad. Para esto último, se consideraron criterios económicos, ambientales, energéticos y de seguridad. Los indicadores técnicos para evaluar la sostenibilidad del proceso incluyeron la eficiencia exergética, el potencial de impacto ambiental (producto del PEI) y el índice de seguridad inherente total ( $I_{TI}$ ). El factor económico se incluyó directamente en el SWROIM y se evaluó mediante el retorno de la inversión (ROI). El ROI, la eficiencia exergética y el producto del PEI se obtuvieron de la evaluación tecnoeconómica, el análisis exergético y el análisis ambiental previamente realizados por González-Delgado y Peralta-Ruiz [12], Martínez *et al.* [11] y González-Delgado y Peralta-Ruiz [10], respectivamente. A continuación, se describe el proceso y la metodología utilizados para las evaluaciones.

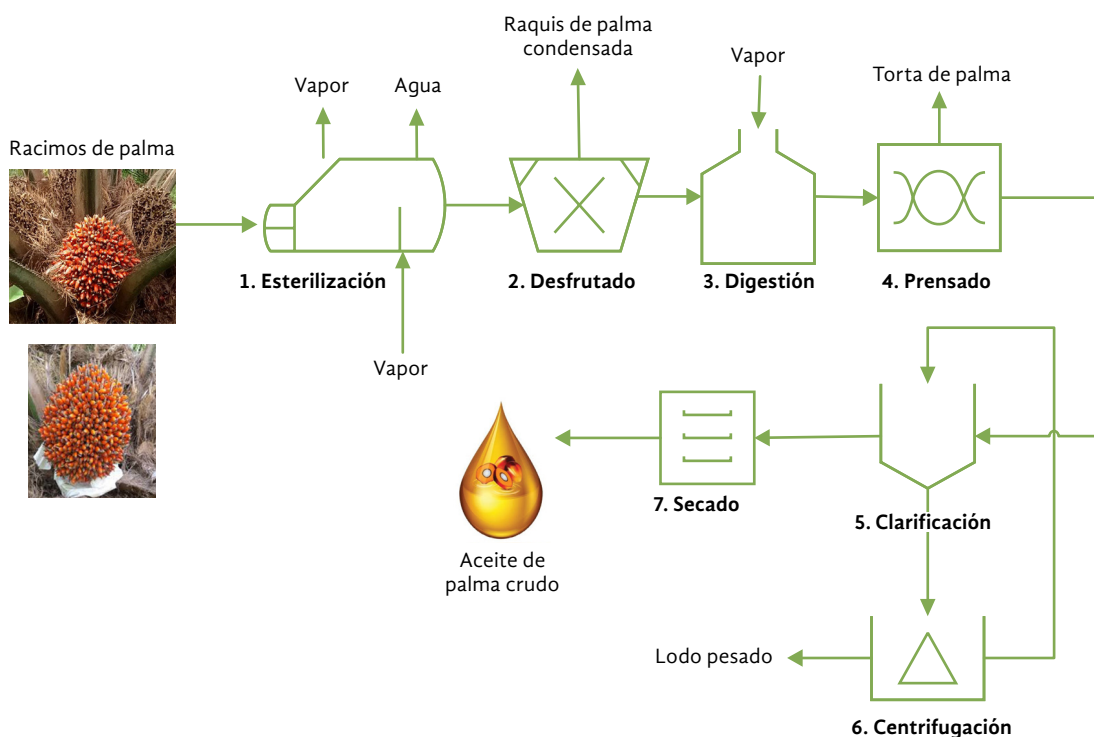
### 2.1 Descripción del proceso

El proceso fue modelado utilizando como referencia dos plantas de beneficio de aceite de palma crudo ubicadas en los departamentos de Bolívar y Cesar, en el norte de Colombia, y datos complementarios reportados en la literatura [22]. El procesamiento del fruto de la palma para extraer el aceite crudo implica cinco operaciones básicas: esterilización, desfrutado, digestión del fruto, extracción del aceite y purificación del aceite [23], como se muestra en la Figura 1. El racimo de palma africana (30 t/h) es esterilizado por la acción del vapor saturado para evitar el efecto de la enzima lipasa en los ácidos grasos libres e hidrolizar el raquis de la palma para suavizar los tejidos de la pulpa [15]. Después de la fase de esterilización, el racimo esterilizado, los condensados de esterilización y el vapor salen del sistema. Luego, los racimos esterilizados se envían a la etapa de desfrutado, donde los frutos se separan del raquis por medio de un tambor giratorio de 5 kW de potencia. El raquis se descarta mientras los frutos se recalientan en la etapa de digestión para facilitar la expulsión del aceite. El equipo de digestión tiene una potencia de 10,5 kW. Los frutos digeridos son prensados por una canasta horizontal perforada de forma cilíndrica, donde se extrae el licor de prensa con alto contenido de aceite. Posteriormente, se agrega agua al licor para facilitar la separación y purificación del mismo. En la fase de clarificación, hasta el 90 % del aceite se separa y se envía a un proceso de secado. El lodo pesado de la clarificación pasa a la fase de centrifugación, donde se recupera el 10 % del aceite. El agua y el lodo pesado de esta etapa abandonan el proceso, mientras que el aceite recuperado se recircula a la etapa de clarificación. En la fase de secado, el porcentaje de humedad e impurezas que aún contiene el aceite se reduce al mínimo. Debido a la alta temperatura a la que sale el aceite, este secado se realiza en condiciones de vacío; la presión del flujo se reduce y hace que el agua restante se evapore. La potencia del secador de vacío es de 15 kW. Por último, el aceite de palma seco se envía a su almacenamiento respectivo.

### 2.2. Análisis de seguridad inherente

En el análisis de seguridad para el proceso de producción de aceite de palma se desarrolló y se aplicó la

**Figura 1.** Diagrama del proceso para la producción de aceite de palma crudo.



metodología ISI basada en el cálculo del índice de seguridad inherente total ( $I_{TI}$ ). El  $I_{TI}$  se calculó utilizando la Ecuación 1 como la suma del índice de seguridad química ( $I_{CI}$ ) y el índice de seguridad inherente al proceso ( $I_{PI}$ ) [21]. Un valor de  $I_{TI}$  superior a 24 para un proceso indica que es intrínsecamente inseguro, mientras que valores inferiores indican que es intrínsecamente seguro [18]. Además, para determinar el índice de seguridad inherente total, se evalúa el peor escenario que puede darse.

**Ecuación 1** 
$$I_{TI} = I_{CI} + I_{PI}$$

El índice de seguridad química se determina como se muestra en la Ecuación 2 a partir de la estimación de los parámetros asociados a la naturaleza de los compuestos químicos que intervienen en el proceso, mientras que el índice de seguridad inherente al proceso incluye las variables del proceso calculadas mediante la Ecuación 3. La Tabla 2 presenta la información para el cálculo de cada subíndice.

**Ecuación 2**

$$ICI = I_{RM,m\acute{a}x} + I_{RS,m\acute{a}x} + I_{INT,m\acute{a}x} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{m\acute{a}x} + I_{COR,m\acute{a}x}$$

**Ecuación 3**

$$I_{PI} = II + I_{T,m\acute{a}x} + I_{P,m\acute{a}x} + I_{EQ,m\acute{a}x} + I_{ST,m\acute{a}x}$$

**2.3 Evaluación de sostenibilidad**

Para determinar el rendimiento sostenible del proceso de producción de aceite de palma crudo, el enfoque propuesto en este estudio incluye parámetros económicos, medioambientales, energéticos y de seguridad. La métrica del rendimiento sostenible ponderado de la inversión (SWROIM) se utiliza para determinar un valor único que muestra el rendimiento global de la sostenibilidad del proceso [24]. El cálculo de este parámetro sigue la expresión mostrada en las Ecuaciones 4 y 5.

**Tabla 2.** Símbolos y descripción de los subíndices de seguridad inherentes, adaptados de [18].

Subíndices de seguridad inherentes	Símbolo	Descripción	Puntaje
Reactividad química	$I_{RM,máx}$ $I_{RS,máx}$	Determinado como las liberaciones de calor de las reacciones que tienen lugar dentro del proceso (primario y lateral)	0-4
Interacción química	$I_{INT,máx}$	Se determina teniendo en cuenta las reacciones no deseadas que se producen entre las especies químicas y los materiales del equipo	0-4
Inflamabilidad	$I_{FL}$	Se determina en función del punto de inflamación de los productos químicos	0-4
Explosividad	$I_{EX}$	Se determina en función de los límites de explosividad de los productos químicos	0-4
Exposición tóxica	$I_{TOX}$	Se determina en función de la toxicidad de cada producto químico	0-6
Corrosividad	$I_{COR,máx}$	Se determina en función del material seleccionado para la construcción del equipo	0-2
Inventario	$I_I$	Se determina según la masa contenida en el equipo para un tiempo de retención de 1 h	0-5
Temperatura del proceso	$I_{T,máx}$	Se determina en función de la temperatura máxima registrada en el proceso	0-4
Temperatura del proceso	$I_{P,máx}$	Se determina en función de la temperatura máxima registrada en el proceso	0-4
Seguridad del equipo	$I_{EQ,máx}$	Se determina para evaluar el equipo en el proceso	0-3
Estructura de proceso segura	$I_{ST,máx}$	Se determina según la información relacionada con los accidentes presentados previamente en la planta	0-5

**Ecuación 4**  $SWROIM = \frac{ASP}{TCI}$

**Ecuación 5**

$$ASP = AEP \left[ 1 + \sum_{i=1}^{N_{indicadores}} w_i \left( \frac{Indicador_i}{Indicador_i^{meta}} \right) \right]$$

*TCI* es la inversión total de capital, *AEP* es el beneficio neto anual del proyecto,  $w_i$  son los factores de ponderación del indicador de sostenibilidad  $i$ ;  $Indicador_i$  e  $Indicador_i^{meta}$  son los valores actuales y los valores objetivo del indicador de sostenibilidad  $i$ ,

respectivamente. Los asignados a  $w_i$  dependen de la prioridad de los responsables de tomar decisiones [24]. Un valor  $w_i = 1$  para el factor de ponderación significa que el parámetro tiene la misma relevancia para el diseñador que el *AEP*; los inferiores a 1 están relacionados con una menor relevancia, mientras que los valores superiores a 1 implican una mayor. La sencillez para estimar las contribuciones de los indicadores al rendimiento económico del sistema es una de las ventajas de esta métrica; sin embargo, el factor de ponderación puede afectar a la objetividad de este enfoque. Los indicadores incluidos en la evaluación de la sostenibilidad del proceso de producción de aceite de palma se describen a continuación.

## 2.4. Indicadores económicos

La evaluación tecnoeconómica se utiliza como herramienta para determinar la rentabilidad de los proyectos. Los costos primarios se evalúan como la suma de la inversión total de capital (TCI por sus siglas en inglés) y los costos de operación (OC por sus siglas en inglés) [25]. La inversión total de capital se refiere al dinero necesario para la compra e instalación de la planta [26]; mientras que los costos de operación son lo que se necesita para mantener el funcionamiento de la planta. El retorno de la inversión es un indicador económico muy utilizado para evaluar la rentabilidad de los proyectos de ingeniería. Se define utilizando la Ecuación 6 como la relación entre las utilidades anuales (después de impuestos) y la inversión total de capital.

### Ecuación 6

$$\%ROI = \frac{\text{Utilidades anuales}}{TCI} \times 100$$

## 2.5. Indicadores exergéticos

La exergía se define como el máximo trabajo teórico que puede realizarse a partir de la interacción entre un sistema termodinámico y un entorno de referencia [27]. Esta indica la calidad de la energía [28] y, en cualquier proceso químico, es destruida por irreversibilidades. El análisis de esta permite cuantificar las irreversibilidades termodinámicas de un proceso [29]; por lo tanto, es una herramienta útil para diagnosticar las operaciones químicas, identificando las etapas críticas que más contribuyen a la destrucción exergética [30].

La eficiencia exergética ( $\eta_{\text{exergía}}$ ) es una medida del rendimiento del proceso en términos de flujo de exergía, como se indica en la Ecuación 7, donde  $Ex_{\text{total, in}}$  es el flujo total de exergía de entrada y  $Ex_{\text{destruida}}$  es la exergía total destruida. Las irreversibilidades o la exergía destruida se calculan como la diferencia del flujo de exergía total del producto de entrada y de salida. La eficiencia exergética puede calcularse para una sección o unidad de un proceso químico [31].

### Ecuación 7

$$\eta_{\text{exergía}} = 1 - \left( \frac{Ex_{\text{destruida}}}{Ex_{\text{total, in}}} \right)$$

## 2.6. Indicadores ambientales

La evaluación ambiental permite analizar los procesos químicos para determinar los posibles impactos ambientales y proponer soluciones para el desarrollo sostenible [32]. El algoritmo de reducción de residuos (WAR por sus siglas en inglés) es una herramienta para evaluar el rendimiento ambiental de los procesos químicos [33]. La suma ponderada de todos los impactos permite calcular un valor final que mide el Impacto Ambiental Potencial (PEI) [34]. Este índice se considera desde dos puntos de vista, la producción de PEI y el PEI generado. El resultado del PEI mide los efectos ambientales que emite el proceso y su uso principal es mejorar la capacidad del proceso para obtener productos finales con una descarga mínima de potencial impacto ambiental [35]. La Ecuación 8 muestra la expresión para calcular la tasa de salida total de PEI sobre la base de la masa del producto.

$$I_{\text{salida}}^{(a)} = \frac{I_{\text{entrada}}^{(cp)} + I_{\text{gen}}^{(cp)}}{\sum_a K_k} = \frac{\sum_a \alpha_i \sum_j^{cp} M_j^{salida} \sum_a^{cp} X_a \Psi_a + \sum_j^{cp-g} M_j^{(salida)} \sum_a^{cp-g} X_a \Psi_a}{\sum_a K_k}$$

donde  $i_{\text{salida}}^{(cp)}$  es la velocidad de salida de PEI para el proceso químico;  $i_{\text{entrada}}^{(cp)}$  e  $i_{\text{gen}}^{(cp)}$  son la tasa de entrada total de PEI y la generación total de PEI, respectivamente.  $M_j$  es el caudal de masa del flujo  $j$ ;  $X_a$  es la fracción de masa de un componente en el flujo  $j$ ;  $\Psi_k$  es el impacto ambiental potencial global de la sustancia  $a$ .

Además, para determinar el grado de mejora en el rendimiento ambiental o reducción porcentual en los impactos ambientales entre un caso o proceso base y el proceso mejorado ambientalmente, se sigue la Ecuación 9.

$$\%R_{PEI \text{ producido}} = \left( \frac{(PEI_{\text{producido}})_{\text{máx}} - (PEI_{\text{producido}})_i}{(PEI_{\text{producido}})_{\text{máx}}} \right) \times 100\%$$

donde  $(PEI)_{\text{máx}}$  es la salida PEI para el proceso base y  $(PEI_{\text{producido}})_i$  es la salida PEI para el proceso ambientalmente mejorado.

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de seguridad inherente

##### 3.1.1 Índice de seguridad inherente de los productos químicos

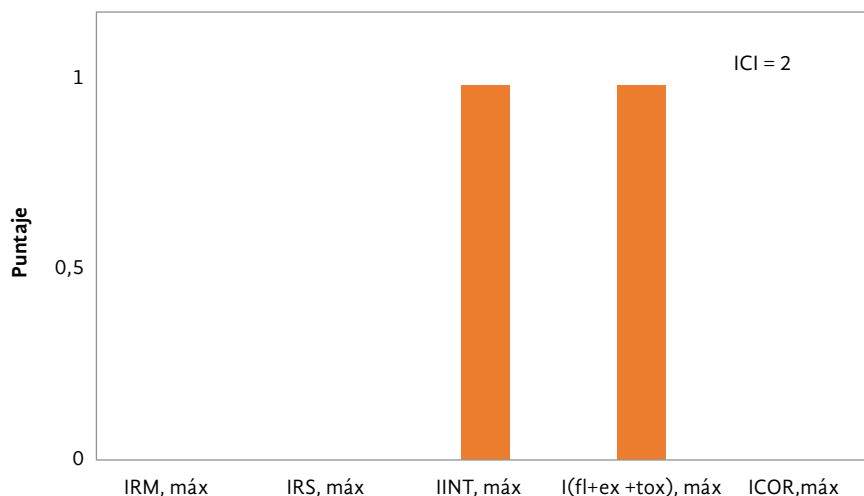
La Figura 2 muestra los resultados del índice de seguridad química ( $I_{Cp}$ ). En el proceso de extracción de aceite de palma crudo no se produjo ninguna reacción, por lo que el subíndice de reactividad química fue nulo. Los subíndices de sustancia química peligrosa ( $I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX,máx}$ ) e interacción química ( $I_{INT,máx}$ ) se calcularon con información de la ficha de datos de seguridad de los componentes. El subíndice de sustancia química peligrosa se estimó en 1 según los ácidos grasos del aceite de palma que solo

son combustibles (punto de inflamación  $> 55^{\circ}\text{C}$ ). La interacción química más peligrosa está representada por la formación de vapores no inflamables, por lo que se asignó una puntuación de 1. Además, las sustancias presentes en el proceso no son corrosivas; por lo tanto, no se requiere ningún material especial para la construcción del equipo y se asigna una puntuación igual a 0 para el subíndice de corrosión. El índice de seguridad inherente de los productos químicos se estimó en 2.

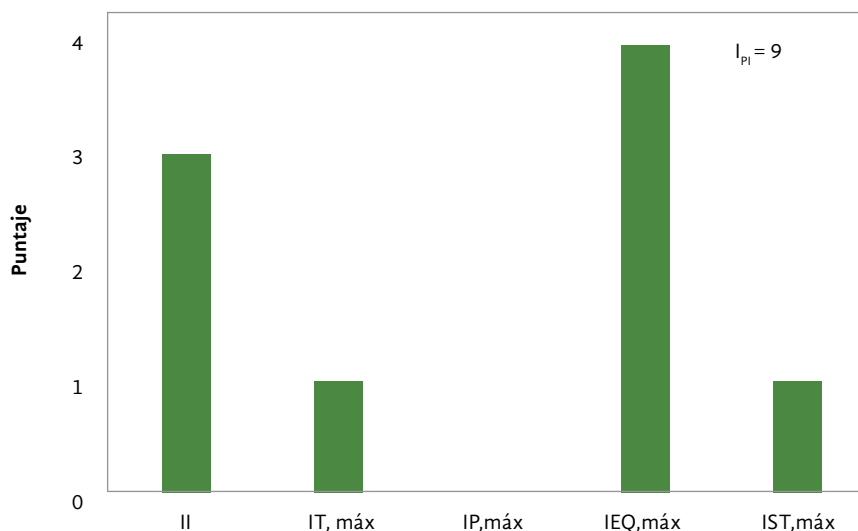
##### 3.1.2 Índice de seguridad inherente del proceso

La Figura 3 muestra los resultados del índice de seguridad del proceso ( $I_{P}$ ). Para calcularlo se evaluó el riesgo asociado con las condiciones de funcionamiento, el tipo de equipo, las estructuras y el inven-

**Figura 2.** Subíndices calculados para el índice de seguridad inherente de productos químicos y la puntuación total



**Figura 3.** Subíndices calculados para el índice de seguridad inherente del proceso y puntuación total





tario. La materia prima para el proceso de extracción de aceite de palma crudo se estimó en aproximadamente 134 t/h; por lo tanto, la puntuación asignada para el subíndice de inventario fue de 3. Los subíndices de temperatura y presión se determinaron según la temperatura y presión máximas registradas en los procesos. La temperatura máxima se registró en la fase de digestión (95 °C), por lo que se asignó una puntuación de 1. Las presiones más críticas se encontraron en el secador de aceite que funciona en condiciones de vacío y en los flujos de vapor que entran en las etapas de esterilización y digestión a una presión de 440 kPa. Sin embargo, se consideró que las presiones no representaban ningún riesgo; por lo tanto, el valor del subíndice de presión fue cero.

Otro factor importante en la seguridad del proceso está asociado con la fiabilidad del equipo. Al índice de seguridad del equipo se le asignó una puntuación de 4, ya que los más inseguros eran la caldera y el secador. Finalmente, el subíndice de estructura segura se refiere a la seguridad del proceso desde el punto de vista de la ingeniería. La producción de aceite de palma crudo es un proceso ya implementado y se considera como una “práctica común en ingeniería”; por lo tanto, se le asignó una puntuación de 1. El índice de seguridad del proceso se estimó en 9.

### 3.1.3 Índice total de seguridad inherente

El índice total de seguridad inherente para la producción de aceite de palma crudo se estimó en 11, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Índice total de seguridad inherente.

Índice	Puntaje
$I_{CI}$	2
$I_{PI}$	9
$I_{TI}$	11

## 3.2. Evaluación de sostenibilidad

El indicador económico (ROI) para este proceso se obtuvo a partir del análisis tecnoeconómico realiza-

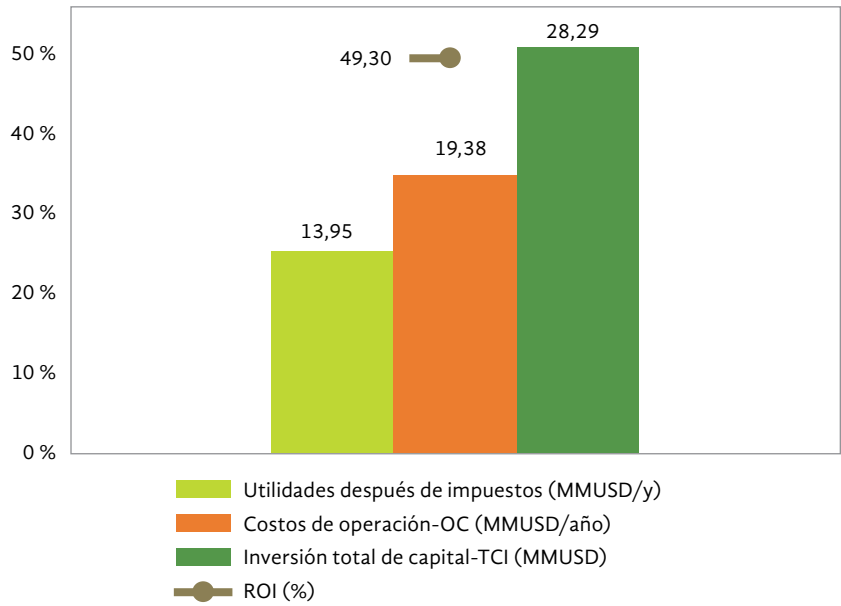
do por González Delgado [12]. La evaluación tecno-económica se hizo utilizando la misma capacidad de procesamiento presentada en este estudio (30 t/año) para una producción anual de 54.056 toneladas de aceite de palma crudo. Se consideró el 10 % de la inversión de capital fijo como un valor de salvamento, 2 años para la construcción de la planta, tasa de impuesto igual al 39 %, una tasa de descuento del 9 %, una vida útil de la planta de 15 años, arcilla blanda como tipo de suelo, 13 trabajadores por turno con salarios de 30 USD/h, y un porcentaje de contingencia del 20 %, según el contexto de la economía en Colombia. Los principales resultados se muestran en la Figura 4. El ROI del 49,30 % indicó que el proyecto es económicamente atractivo.

El indicador de eficiencia exergética se tomó del análisis exergético realizado por Martínez *et al.* [11]. Los principales resultados se muestran en la Figura 5.

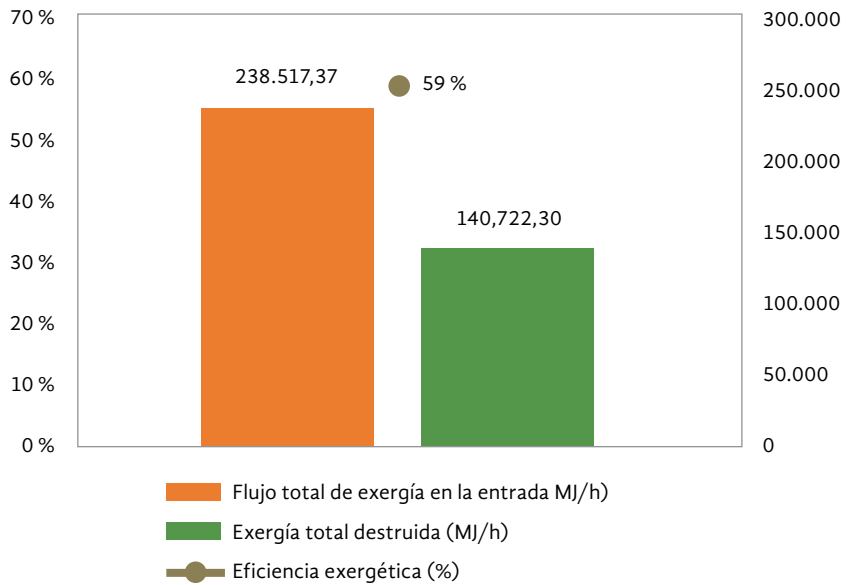
La producción total de PEI se obtuvo a partir del análisis ambiental realizado por González-Delgado y Peralta-Ruiz [10]. Las consideraciones para la evaluación incluyeron la evaluación de cuatro casos: caso 1, sin tener en cuenta las contribuciones a la energía y al flujo de productos; y casos 2, 3, y 4, considerando el flujo de productos, la energía del proceso y la cantidad de energía y el flujo de productos, respectivamente. Los principales resultados se muestran en la Figura 6.

El valor asignado para el factor de ponderación del parámetro de seguridad ( $w_i = 1$ ) se estableció considerando que los riesgos asociados con el proceso pueden poner en peligro la producción, las instalaciones, la integridad del personal que trabaja en la planta y el bienestar de las comunidades vecinas [21]. Por lo tanto, el aspecto de seguridad del proceso debe ser el mayor e igualmente relevante al factor económico. Un proyecto peligroso afecta este aspecto y su sostenibilidad, por lo tanto, en el cálculo de SWROIM se estableció un indicador de seguridad negativo. El factor de ponderación para el indicador de energía ( $w_i = 1$ ) se estableció considerando la importancia del consumo de energía en la sostenibilidad de los procesos. Finalmente, en cuanto al daño que los mismos pueden producir al ambiente y a los compromisos adquiridos por Colombia en términos de conservación y protección ambiental, se estable-

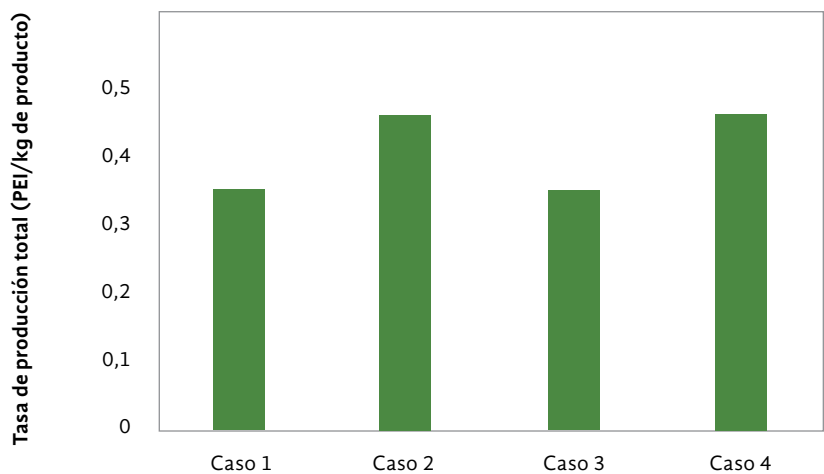
**Figura 4.** Resumen de los resultados de la evaluación económica del proceso de producción de aceite de palma crudo, adaptado de [12].



**Figura 5.** Eficiencia exergética del proceso de producción de aceite crudo. Adaptado de [11]



**Figura 6.** Producción total de PEI para el proceso de producción de aceite de palma crudo, adaptado de [10]



ció el factor de ponderación ambiental ( $w_i = 1$ ) de máxima relevancia. En resumen, para este proyecto se consideraron los parámetros de seguridad, energía y ambiente con la misma relevancia que el factor económico dentro del concepto de sostenibilidad.

La aplicación del SWROIM requiere definir indicadores objetivo (*indicador objetivo*) para cada parámetro técnico. Además, que las cantidades correspondientes de estos parámetros muestren el desempeño actual del proceso (*indicador*). El objetivo del parámetro de seguridad se estableció igual al rendimiento actual, según la consideración que un proceso es seguro en términos de riesgos inherentes cuando el  $I_{TI}$  es inferior a 24. En este caso, el proceso tiene un rendimiento seguro, por lo tanto, no es necesario establecer un valor objetivo. Para el parámetro de energía, se estableció como meta la eficiencia exergetica del 100 %. Los objetivos ambientales se instituyen de acuerdo con la recomendación hecha por El-Halwagi [36], que sugiere que las técnicas de proceso comparativo permiten establecer los objetivos de indicadores de sostenibilidad, teniendo en cuenta los mejores resultados. Por lo tanto, el indicador objetivo se toma considerando la reducción máxima en los impactos ambientales potenciales de la producción. Para este trabajo, se consideró como indicador objetivo una reducción del 50 % del PEI de la producción. Los valores de los factores de ponderación, indicadores e indicadores objetivo se resumen en la Tabla 4.

La evaluación de sostenibilidad del proceso de producción de aceite de palma crudo mostró un rendimiento del 53 %, que es superior al valor obtenido para el retorno de la inversión (49,30 %). Además, se realizó un análisis de sensibilidad para el SWROIM, cambiando el valor considerado para el factor de ponderación del parámetro técnico para analizar la importancia de cada factor en la métrica de rentabilidad ponderada de la sostenibilidad en la inversión. Se

consideraron 3 estudios de caso: el primer caso, en el que los aspectos económicos y energéticos tenían la misma relevancia ( $w_i = 1$ ), mientras que el valor del parámetro ambiental y de seguridad fue de 0,5. Un segundo caso, en el que el factor ambiental tenía la misma relevancia que el parámetro económico ( $w_i = 1$ ), y un tercer caso, en el que el factor técnico de seguridad tenía la misma relevancia que el factor económico ( $w_i = 1$ ). Los principales resultados se muestran en la Figura 7.

#### 4. Discusión

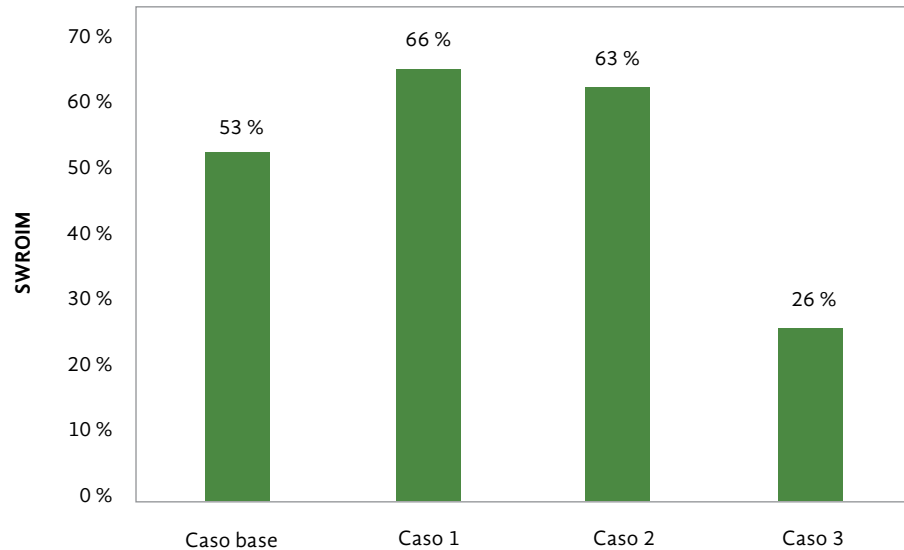
El índice de seguridad inherente de las sustancias químicas igual a 2 sugiere que no se manipulan sustancias altamente peligrosas en el proceso en términos de toxicidad, explosividad e inflamabilidad. Este hallazgo se comparó con los resultados del análisis de seguridad inherente que se reporta en la literatura para procesos basados en la palma de aceite. Sanjuan *et al.* [19] reportaron un ICI de 18 para la producción de bioetanol a partir de raquis de palma, que se atribuyó al alto valor del índice de calor de las reacciones, seguido por el indicador de inflamabilidad. La extracción del aceite de palma crudo alcanzó un CSI más bajo debido a la naturaleza de las sustancias manipuladas (que eran menos inflamables) y a la ausencia de reacciones.

El índice de seguridad del proceso que se muestra en la Figura 3 alcanzó un valor de 9, superior al registrado para el bioetanol producido a partir del raquis (5). Las condiciones que más afectan a la seguridad del proceso son el alto inventario y la seguridad del equipo. En particular, el funcionamiento de equipos inseguros, como la caldera y el secador, respalda este hallazgo. Moreno-Sader *et al.* [14] también se señalaron riesgos potenciales de incendio y explosión en la caldera de los sistemas de extracción del APC, que

**Tabla 4.** Parámetros, indicadores y factor de ponderación correspondientes a cada criterio técnico.

Aspecto	Índice	indicador <sup>i</sup>	Indicador <sup>objetivo</sup>	$w_i$
Seguridad	Índice total de seguridad inherente ( $I_{TI}$ )	11	11	1
Energía	Eficiencia exergetica	59 %	100 %	1
Ambiental	(% R $PEI_{producción}$ )	24 %	50 %	1

**Figura 7.** Análisis de sensibilidad SWROIM



podrían ocurrir debido a fallas por ruptura, bajos niveles de agua, presión excesiva, entre otros. El resultado revela que la extracción de aceite de palma crudo es un proceso intrínsecamente seguro. El índice de seguridad del proceso es superior al índice de seguridad química, lo que muestra que las condiciones de funcionamiento son más críticas. Una comparación del índice de seguridad total inherente alcanzado en un proceso similar muestra que la producción de aceite de palma tiene un mejor rendimiento desde el punto de vista de la seguridad. La producción de bioetanol a partir del raquis de la palma mostro un  $I_{TI} = 23$  [19]; mientras que un proceso para la producción de ácido levulínico alcanzó un  $I_{TI} = 24$  [20]. Estos últimos procesos tienen reacciones químicas exotérmicas y disolventes inflamables que contribuyen al mayor índice total de seguridad inherente en comparación con la extracción del APC. En general, los resultados del análisis de seguridad inherente sugieren que es necesario vigilar el funcionamiento del horno de secado de aceite y la caldera, para evitar condiciones anormales.

En cuanto al desempeño de sostenibilidad del sistema bioenergético a partir del aceite de palma, la dimensión económica con  $ROI = 49,30\%$  reveló una rentabilidad prometedora en comparación con otros procesos con menor retorno de inversión. El sistema de extracción de APC es superior al valor umbral mínimo del  $10\%$  que algunas empresas consideran

como referencia [24]. Xuan Do *et al.* [37] reportaron valores de ROI menores que el  $4,59-21,69\%$  para tres vías de conversión de energía de racimos de fruto vacíos que incluyeron la producción de bioetanol, la gasificación y la pirólisis rápida.

La eficiencia exergética general del  $59\%$  indica que el proceso es eficiente desde el punto de vista energético. Para este sistema se observa una menor destrucción de exergía en comparación con otros procesos bioenergéticos, como la producción de biopetróleo a partir de microalgas y materias primas lignocelulósicas. Por ejemplo, Moreno-Sader *et al.* [38] evaluaron el rendimiento exergético del aceite crudo de microalgas *Chlorella* sp. y encontraron una eficiencia del  $24\%$ . Gozmen Sanl *et al.* [39] lograron eficiencias exergéticas que oscilan entre el  $32,50\%$  y el  $33,64\%$  para un motor diésel que usa biodiésel de palma y amapola.

La producción total de PEI para la producción de aceite de palma crudo fue mayor en los casos 2 y 4 ( $4,61 \times 10^{-1}$  y  $4,61 \times 10^{-1}$ , respectivamente) en comparación con los casos 1 y 3 ( $3,50 \times 10^{-1}$  y  $3,50 \times 10^{-1}$ , respectivamente). Los hallazgos revelan que en los 4 casos el proceso no emite un gran número de impactos ambientales y, por lo tanto, tiene un buen desempeño ambiental. Este desempeño logró una mejora del  $24\%$  sin considerar la contribución de la corriente de productos a la emisión de impac-

tos ambientales potenciales. Álvarez-Cordero *et al.* [15] informaron de impactos ambientales de  $1,66 \times 10^4$  PEI/h para la doble producción de APC y aceite de palmiste. Moreno-Sader *et al.* [38] encontraron valores superiores a  $3,00 \times 10^4$  PEI/h para la producción de bioaceite lignocelulósico.

Los resultados mostrados en la Figura 7 revelan que el parámetro técnico energético es el más determinante en el resultado de SWROIM. Considerando el factor económico y energético de igual relevancia, se obtiene el valor más alto para el SWROIM (66 %). Por lo tanto, se deben incluir las estrategias de optimización para reducir las pérdidas de exergía. Por otra parte, el indicador de seguridad operacional demostró ser el determinante más débil de SWROIM, dado que las condiciones actuales ya son seguras. Para estudios futuros, se pueden considerar otros parámetros esenciales relativos a las características del proceso y los objetivos del modelo para permitir un análisis más amplio de la sostenibilidad. Este resultado podría significar que los parámetros técnicos evaluados tuvieron efectos positivos que favorecen el rendimiento económico de la planta. En particular, hay una contribución positiva asociada con la reducción de la producción total de PEI y el aumento de la eficiencia exergética. Además, este resultado comparado con el SWROIM reportó una biorrefinería lignocelulósica de varias materias primas donde se evalúan los mismos parámetros técnicos (27,29 %); en [21], se revela que la planta de producción de aceite de palma crudo tiene un desempeño más sostenible.

## 5. Conclusiones

En este estudio se realizó el análisis de seguridad inherente y la evaluación de sostenibilidad para el proceso de producción de aceite de palma crudo en un escenario del norte de Colombia. De los resultados obtenidos, se puede concluir que el proceso es intrínsecamente seguro. El mayor riesgo se encontró en la etapa de secado, por lo tanto, se recomienda controlar el funcionamiento del secador. Además, se determinó que el riesgo asociado con los productos químicos involucrados en el proceso era insignificante. El proceso es sostenible. Según el SWROIM, mostró un rendimiento del 53 %, lo que revela que los parámetros técnicos evaluados tienen un efecto positivo en

el retorno de la inversión del proceso. El parámetro de energía fue el más determinante en este resultado, con contribuciones positivas asociadas al aumento de la eficiencia exergética. Para estudios futuros, se pueden considerar otros parámetros esenciales relativos a las características del proceso y los objetivos del modelo para permitir un análisis más amplio de la sostenibilidad. Además, la aplicación de técnicas de intensificación de procesos podría contribuir positivamente al desarrollo continuo de este sector.

**Aportes de los autores:** Conceptualización, A. D. G.-D.; metodología, A.F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; *software*, A. D. G.-D.; validación, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; análisis formal, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; investigación, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; investigación, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; recursos, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; conservación de datos, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; redacción-preparación del borrador original, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; redacción-revisión y edición, A. F. B.-S., J. L.-P. y A. D. G.-D.; visualización, A. D. G.-D.; supervisión, A. D. G.-D. y J. L.-P.; administración del proyecto, A. D. G.-D.; obtención de fondos, A. D. G.-D. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

**Financiación:** Esta investigación no recibió financiación externa.

**Declaración de la Junta de Revisión Institucional:** no aplica.

**Declaración de consentimiento informado:** no aplica.

**Declaración de disponibilidad de datos:** Los datos presentados en este estudio están disponibles en González-Delgado y Peralta-Ruiz [12], Martínez *et al.* [11] y González-Delgado y Peralta-Ruiz [10].

## Reconocimientos

Los autores expresan su gratitud a la Universidad de Cartagena, a la Universidad Francisco de Paula Santander y a la Universidad EAN por proveer equipo y *software* para concluir esta investigación.

**Conflicto de intereses:** los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

---

## Referencias

1. Rivera-Méndez, Y. D.; Rodríguez, D. T.; Romero, H. M. Carbon footprint of the production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fresh fruit bunches in Colombia. *J. Clean. Prod.* **2017**, *149*, 743-750. [CrossRef]
2. Fedepalma. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) Statistical Yearbook. 2015. En *The oil palm agroindustry in Colombia and the world 2011-2015*; Área de Economía-UPSDS: Bogotá, Colombia, 2016.
3. Fedepalma. La palma de aceite en Colombia. 2019. Recuperado de <https://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos> (consultado el 15 de septiembre de 2020).
4. Ocampo-Peñuela, N.; García-Ulloa, J.; Ghazoul, J.; Etter, A. Quantifying impacts of oil palm expansion on Colombia's threatened biodiversity. *Biol. Conserv.* **2018**, *224*, 117-121. [CrossRef]
5. Castiblanco, C.; Etter, A.; Ramírez, A. Impacts of oil palm expansion in Colombia: What do socioeconomic indicators show? *Land Use Policy* **2015**, *44*, 31-43. [CrossRef]
6. Rincón, L. E.; Moncada, J.; Cardona, C. A. Analysis of potential technological schemes for the development of oil palm industry in Colombia: A biorefinery point of view. *Ind. Crop. Prod.* **2014**, *52*, 457-465. [CrossRef]
7. Umar, M. S.; Urmee, T.; Jennings, P. A policy framework and industry roadmap model for sustainable oil palm biomass electricity generation in Malaysia. *Renew. Energy* **2018**, *128*, 275-284. [CrossRef]
8. Montoya, M. I.; Quintero, J. A.; Sánchez, Ó. J.; Cardona, C. A. Evaluación del impacto ambiental del proceso de obtención de alcohol carburante utilizando el algoritmo de reducción de residuos. Environmental impact assessment for ethanol production process using the waste reduction algorithm. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioq.* **2006**, *36*, 85-95.
9. Ramírez-Contreras, N. E.; Munar-Flórez, D. A.; García-Núñez, J. A.; Mosquera-Montoya, M.; Faaij, A. P. C. The GHG emissions and economic performance of the Colombian palm oil sector; current status and long-term perspectives. *J. Clean. Prod.* **2020**, *258*, 120757. [CrossRef]
10. González-Delgado, A. D.; Peralta-Ruíz, Y. Environmental assessment of a crude palm oil production process under northcolombian conditions using war algorithm. *Int. J. ChemTech Res.* **2016**, *9*, 833-843.
11. Martínez, D.; Puerta, A.; Mestre, R.; Peralta-Ruiz, Y.; González-Delgado, A. D. Exergy-based evaluation of crude palm oil production in northcolombia. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* **2016**, *10*, 1-8.

12. González-Delgado, Á.; Peralta-Ruiz, Y. A hierarchical techno-economic sensitivity approach for evaluation of agroindustrial production chains. *Int. J. ChemTech Res.* 2017, *10*, 921-929.
13. Subramaniam, V.; Hashim, Z.; Loh, S. K.; Astimar, A. A. Assessing water footprint for the oil palm supply chain-a cradle to gate study. *Agric. Water Manag.* 2020, *237*, 106184. [CrossRef]
14. Moreno-Sader, K.; Alarcón-Suesca, C.; González-Delgado, Á.-D. Application of environmental and hazard assessment methodologies towards the sustainable production of crude palm oil in North-Colombia. *Sustain. Chem. Pharm.* 2020, *15*, 1-10. [CrossRef]
15. Álvarez-Cordero, A.; De Ávila-Alvis, Y.; Ortiz-Rincón, M.; González-Delgado, A.; Peralta-Ruiz, Y. Environmental assessment of dual crude palm and kernel oil production in north-Colombia using WAR algorithm. *J. Eng. Appl. Sci.* 2017, *12*, 7265-7271.
16. Munasinghe, M.; Jayasinghe, P.; Deraniyagala, Y.; Matlaba, V. J.; dos Santos, J. F.; Maneschy, M. C.; Mota, J. A. Value-Supply Chain Analysis (VSCA) of crude palm oil production in Brazil, focusing on economic, environmental and social sustainability. *Sustain. Prod. Consum.* 2019, *17*, 161-175. [CrossRef]
17. Oliveira-Rodrigues, T.; Caldeira-Pires, A.; Luz, S.; Albuquerque-Frate, C. GHG balance of crude palm oil for biodiesel production in the northern region of Brazil. *Renew. Energy* 2014, *62*, 516-521. [CrossRef]
18. Heikkilä, A. Inherent safety in process plant design. *VTT Publ.* 1999, *384*, 1-132.
19. Sanjuan, M.; Tobon, K.; Meramo-Hurtado, S.; Ojeda, K.; González, Á. Bioethanol production process from palm rachis using the computer-assisted intrinsic safety index method. *Int. J. Acad. Eng. Res.* 2018, *2*, 8-11.
20. Meramo-Hurtado, S. I.; Ojeda, K. A.; Sánchez-Tuiran, E. Environmental and safety assessments of industrial production of levulinic acid via acid-catalyzed dehydration. *ACS Omega*. 2019, *4*, 22302-22312. [CrossRef]
21. Meramo-Hurtado, S. I.; Sánchez-Tuiran, E.; Ponce-Ortega, J. M.; El-Halwagi, M. M.; Ojeda-Delgado, K. A. Synthesis and sustainability evaluation of a lignocellulosic multifeedstock biorefinery considering technical performance indicators. *ACS Omega* 2020, *5*, 9259-9275. [CrossRef]
22. Denny, K. S.; Wendy, P. Q.; Mei, F.; David, L. Waste recovery and regeneration (regen) system for palm oil industry. *Chem. Eng. Trans.* 2015, *45*, 1315-1320.
23. Owolarafe, O. K.; Faborode, M. O. Micro-structural characterization of palm fruit at sterilisation and digestion stages in relation to oil expression. *J. Food Eng.* 2008, *85*, 598-605. [CrossRef]

24. Guillen-Cuevas, K.; Ortiz-Espinoza, A. P.; Ozinan, E.; Jiménez-Gutiérrez, A.; Kazantzis, N. K.; El-Halwagi, M. M. Incorporation of safety and sustainability in conceptual design via a return on investment metric. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018, 6, 1411-1416. [CrossRef]
25. El-Halwagi, M. Chapter 2-Overview of process economics. En *sustainable design through process integration*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2012; p. 1561.
26. Herrera-Rodríguez, T.; Parejo-Palacio, V.; González-Delgado, Á. D. Technoeconomic sensibility analysis of industrial agar production from red algae. *Chem. Eng. Trans.* 2018, 70, 2029-2034.
27. Peralta-Ruiz, Y.; Saavedra, D.; González-Delgado, A. Exergy based evaluation of large-scale hydrogen production from African palm rachis. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 2016, 10, 168-175.
28. Abusoglu, A.; Kanoglu, M. Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1-Formulations. *Appl. Therm. Eng.* 2009, 29, 234-241. [CrossRef]
29. Restrepo-serna, D. L.; Anderson, J.; Cardona-Alzate, C. A. Energy efficiency of biorefinery schemes using sugarcane bagasse as raw material. *Energies* 2018, 11, 3474. [CrossRef]
30. Meramo-Hurtado, S.; Urbina-Suárez, N.; González-Delgado, Á. Computer-aided environmental and exergy analyses of a large-scale production of chitosan microbeads modified with TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *J. Clean. Prod.* 2019, 273, 117804. [CrossRef]
31. Meramo-Hurtado, S. I.; González-Delgado, A. D.; Rehmann, L.; Quiñones, E.; Mehrvar, M. Comparison of biobutanol production pathways via acetone-butanol-ethanol fermentation using a sustainability exergy-based metric. *ACS Omega* 2020, in press. [CrossRef]
32. Cárdenas, Y.; Orozco, I.; González, A.; Kafarov, V. Environmental assessment of microalgae biosiesel production in Colombia: comparison of three oil extraction systems. *Latinoam. J. Oil Gas Altern. Energy* 2013, 5, 85-100.
33. Meramo-Hurtado, S.; Alarcón-Suesca, C.; González-Delgado, Á. D. Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *J. Clean. Prod.* 2020, 248, 119285. [CrossRef]
34. Carvajal, J. C.; Gómez, A.; Cardona, C. A. Comparison of lignin extraction processes: Economic and environmental assessment. *Bioresour. Technol.* 2016, 214, 468-476. [CrossRef] [PubMed]
35. Meramo, S. I.; Bonfante, H.; De Ávila-Montiel, G.; Herrera-Barros, A. Environmental assessment of a large-scale production of TiO<sub>2</sub> nanoparticles via green chemistry. *Chem. Eng. Trans.* 2018, 70, 1063-1068.



36. El-Halwagi, M. M. *Sustainable design through process integration: fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2012; ISBN 9781856177443.
37. Do, T. X.; Lim, Y. Techno-economic comparison of three energy conversion pathways from empty fruit bunches. *Renew. Energy* 2016, 90, 307-318. [CrossRef]
38. Moreno-Sader, K.; Meramo-Hurtado, S. I.; González-Delgado, A. D. Computer-aided environmental and exergy analysis as decision-making tools for selecting bio-oil feedstocks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 112, 42-57. [CrossRef]
39. Gozmen S., anli, B.; Uludamar, E.; Özcanli, M. Evaluation of energetic-exergetic and sustainability parameters of biodiesel fuels produced from palm oil and opium poppy oil as alternative fuels in diesel engines. *Fuel* 2019, 258, 116116. [CrossRef]