

Implementación de la metodología de análisis de ciclo de vida en la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma (*Elaeis guineensis*) mediante gasificación supercrítica.

Diana Sofía González Delgado

Asesor

María Fernanda Domínguez Amorocho

Ángel Darío González Delgado

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería ambiental

2025

María Fernanda Domínguez Amorocho

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre quien me dio la perseverancia llegar hasta el final para conseguir mi titulación, a mi familia, mi padre quien siempre fue ese apoyo económico y emocional, a mi hermano por ser mi ejemplo a seguir, a Jairo que a pesar de las dificultades siempre estuvo ahí conmigo, y a mí porque sé que puedo seguir adelante a pesar de todo, espero que estas investigaciones sirvan para tener más opciones y perspectivas que permitan la utilización de energías renovables, y así poner mi granito de arena para disminuir nuestros impactos ambientales negativos.

Agradecimientos

Agradezco enormemente a la universidad UNAD quien, con su ayuda, docentes, y metodología de enseñanza me brindó las herramientas para lograr esta meta, a la Universidad de Cartagena quien mediante apoyo en capacitaciones y su laboratorio me brindó las herramientas y el software necesario para realizar este trabajo y a la UIS que a modo personal me brindó muchos conocimientos en mi paso por su alma mater y que, a pesar de no culminar allí, sus conocimientos marcaron mi carrera toda la vida.

Resumen

La presente investigación evalúa el impacto ambiental de la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma (*Elaeis guineensis*), mediante tecnología de gasificación supercrítica, utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) basada en las normas ISO 14040 y 14044. El estudio teórico considera un alcance "de la cuna a la puerta" para la producción de 1 kg de hidrógeno verde, analizando las categorías de impacto en salud humana, ecosistemas y recursos naturales. Se emplearon datos provenientes de la base Ecoinvent 3 y simulaciones realizadas en el software SimaPro 9.6.0.1. El método de evaluación de impacto ambiental seleccionado fue ReCiPe 2016 Endpoint (E/H).

Los resultados muestran que las principales categorías de impacto están relacionadas con el consumo de agua, que representa más del 95% del impacto en recursos, y la formación de material particulado, con una contribución del 99,8% atribuida al syngas enriquecido. Estas áreas críticas destacan la importancia de optimizar las tecnologías de purificación y control de emisiones para mitigar los impactos negativos.

A pesar de las limitaciones del modelo teórico, como la ausencia de datos experimentales, el estudio establece bases científicas relevantes para fomentar la transición hacia tecnologías más sostenibles. La valorización del raquis de palma, un residuo agroindustrial abundante, representa una alternativa viable para reducir la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo a una economía de bajas emisiones de carbono.

Esta investigación propone oportunidades de mejora en el proceso de producción de hidrógeno, como la optimización de recursos, la implementación de tecnologías más eficientes y la realización de estudios experimentales complementarios. Se resalta la importancia de fomentar

políticas públicas que promuevan la adopción de tecnologías limpias y la colaboración interinstitucional para avanzar hacia una producción energética más sostenible.

Palabras clave: Hidrógeno, Gasificación, Biomasa, Impacto ambiental, Sostenibilidad.

Abstract

This research evaluates the environmental impact of hydrogen production from oil palm rachis through supercritical gasification technology, using the life cycle assessment (LCA) methodology based on ISO 14040 and 14044 standards. The theoretical study adopts a "cradle-to-gate" approach for the production of 1 kg of green hydrogen, analyzing impact categories in human health, ecosystems, and natural resources. Data from the Ecoinvent 3 database and simulations performed in SimaPro 9.6.0.1 software were utilized. The selected environmental impact assessment method was ReCiPe 2016 Endpoint (E/H).

The results reveal that the main impact categories are related to water consumption, which accounts for more than 95% of resource impacts, and particulate matter formation, with 99.8% attributed to enriched syngas. These critical areas underscore the need to optimize purification technologies and emission control to mitigate negative impacts.

Despite the limitations of the theoretical model, such as the absence of experimental data, the study establishes relevant scientific foundations to promote the transition to more sustainable technologies. The valorization of palm rachis, an abundant agro-industrial residue, represents a viable alternative to reduce dependency on fossil fuels, contributing to a low-carbon economy.

This research proposes improvement opportunities in the hydrogen production process, such as resource optimization, implementation of more efficient technologies, and complementary experimental studies. It highlights the importance of promoting public policies that encourage the adoption of clean technologies and interinstitutional collaboration to advance sustainable energy production.

Keywords: Hydrogen, Gasification, Biomass, Environmental impact, Sustainability.

Contenido

Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Abstract	7
Introducción	14
Justificación	15
Objetivos	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos.....	16
Marco De Referencia	17
Estado Del Arte.....	17
Marco Contextual.....	19
Marco Teórico.....	21
Hidrógeno Verde Y Clasificación.....	21
Tecnología De Producción De Hidrógeno Mediante La Ruta 6 Según (Vargas-Mira, 2019)	23
Marco Conceptual.....	29
La Palma Africana:	29
Raquis de Palma.....	30
Caracterización de la Biomasa.....	31
Análisis Elemental	34
Conversión De La Biomasa	34

Monoethanolamine solvente usado.....	35
Software de análisis de impacto ambiental.....	36
Síntesis del método de evaluación de impacto ambiental.....	37
Explicación del metodo.....	38
Marco Normativo.....	44
Norma ISO 14040.....	44
Términos Y Definiciones.....	45
Metodología.....	46
Definición Del Objetivo Y Alcance Del Estudio.....	47
Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).....	48
De la Cuna, de la siembra al despulpe y obtención del raquis.....	49
Unidad de Gasificación Supercrítica (Reactor).....	53
Reactor de cambio de agua-gas (Water-Gas Shift, WGS).....	55
Unidad de Endulzamiento con Selexol (Absorción de CO ₂).....	56
Resultados.....	58
Graficas de resultados.....	69
Discusión de Resultados.....	77
Limitaciones Del Modelo Teórico.....	80
Conclusiones.....	81
Recomendaciones.....	84
Referencias Bibliográficas.....	85
Apéndices.....	89

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Fuentes consultadas</i>	26
Tabla 2 <i>Área, Producción y Rendimiento Nacional</i>	30
Tabla 3 <i>Composición de raquis de palma africana</i>	30
Tabla 4 <i>Tabla resumen de resultados</i>	67
Tabla 5 <i>Tabla de Caracterización por categoría de impacto</i>	70
Tabla 6 <i>Tabla de categoría de impacto</i>	89

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Clasificación del hidrogeno según su materia prima.....</i>	22
Figura 2 <i>Diagrama del proceso de producción de hidrógeno ruta 6.....</i>	24
Figura 3 <i>Metodología de análisis de ciclo de vida</i>	44
Figura 4 <i>Diagrama de flujo con las entradas y salidas.....</i>	49
Figura 5 <i>Árbol de puntuación única de los impactos ambientales.....</i>	58
Figura 6 <i>Árbol de evaluación del daño Área Salud Humana DALY</i>	62
Figura 7 <i>Árbol de evaluación impacto a ecosistemas</i>	64
Figura 8 <i>Árbol de evaluación del daño del área Recursos</i>	66
Figura 9 <i>Caracterización según categoría de Impacto</i>	69
Figura 10 <i>Grafica de barras de la evaluación del daño por categorías.....</i>	75

Lista de formulas

Formula 1 y 2 -----	42
Formula 3 -----	42
Fórmula 4 -----	56

Lista de Apéndices

Apéndice A Tabla de categoría de impacto	89
---	----

Introducción

El análisis de ciclo de vida es una herramienta metodológica basado en la norma ISO 14040 y 14044 en los cuales se estipula la forma correcta de realizarlo, este consiste en el seguimiento de las entradas, salidas y potenciales impactos ambientales de un producto o servicio en todo su ciclo de vida. En esta investigación se detectaron los posibles impactos ambientales generados por la producción teórica de una planta de gasificación de raquis de palma, mediante el método de arrastre por vapor en estado supercrítico.

Se realizó un análisis de impacto ambiental del proceso mediante la herramienta Simapro versión 9.6.0.1, generado de la cuna a la puerta. El Inventario de ciclo de vida ICV, se realizó con datos extraídos de la revisión bibliográfica que facilitan el análisis de los datos en el programa, para esto se realizó un diagrama de flujo con entradas y salidas, estos datos fueron introducidos en el simulador. El método de análisis utilizado fue ReCiPe 2016.

Este análisis tiene como propósito identificar los impactos más críticos dentro del proceso, proponer alternativas de mitigación y contribuir a la divulgación de información que facilite el cambio hacia la producción de energías a partir de fuentes renovables, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados para ser alcanzados en 2050. Además, se pretende que los resultados generados sirvan como una base técnica y científica para impulsar la transición hacia procesos más sostenibles, promoviendo la mitigación de los impactos ambientales asociados a las tecnologías actuales de producción energética.

Justificación

Se realizó un análisis del ciclo de vida (ACV) para evaluar el desempeño ambiental de la producción de hidrógeno utilizando tecnología supercrítica a partir del raquis de palma (*Elaeis guineensis*), con esto se pueden identificar los impactos ambientales que tiene el proceso desde la siembra y obtención de la materia prima hasta la producción del hidrógeno, de esta manera, se pueden identificar posibles mejoras de los componentes del proceso y reducir los impactos ambientales.

Esta investigación es importante ya que contribuye a varios ODS, como la producción y consumo responsables (ODS 12), la acción por el clima (ODS 13) y la energía asequible y no contaminante (ODS 7). La producción de hidrógeno a partir de recursos renovables y sostenibles, como el raquis de palma, es una alternativa viable y sostenible a la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático.

En Colombia, se considera que el hidrógeno proveniente de fuentes no convencionales de energía renovable, procede de fuentes como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el Impacto ambiental de la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma (*Elaeis guineensis*) mediante gasificación supercrítica, utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida evaluando sus impactos ambientales en áreas críticas, identificando oportunidades de mejora y fomentando la transición hacia tecnologías más sostenibles.

Objetivos Específicos

Establecer el propósito y el alcance del estudio teórico sobre la producción de 1 kg de hidrógeno verde a partir de raquis de palma, utilizando tecnología de gasificación por arrastre de vapor en estado supercrítico.

Elaborar un inventario detallado del método para la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma mediante gasificación supercrítica, analizando las entradas, salidas y emisiones del proceso mediante métodos de evaluación ambiental.

Determinar los impactos ambientales asociados a la producción de hidrógeno gaseoso a partir de raquis de palma, enfocándose en las áreas de Salud Humana, Ecosistemas y Recursos Naturales, con base en un análisis de ciclo de vida (ACV).

Analizar e interpretar los resultados gráficos obtenidos mediante métodos de evaluación ambiental, valorando el Punto Final en el escenario más crítico y destacando las categorías de impacto más relevantes.

Examinar los resultados de la evaluación de impacto ambiental en las áreas clave de Salud Humana, Ecosistemas y Recursos Naturales, y sugiriendo oportunidades de mejora para la optimización de la eficiencia del proceso de producción de hidrógeno a partir de raquis de palma como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles.

Marco De Referencia

Estado Del Arte

En este trabajo se tuvo en cuenta los siguientes antecedentes nacionales.

"Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en Colombia". Este artículo discute las problemáticas tecnológicas asociadas al uso de raquis de palma en calderas generadoras de vapor y electricidad en plantas de beneficio de aceite de palma. (Bayona Roa,2023)

"Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia " Este documento revisa las oportunidades que ofrece la biomasa para la generación de energía y producción de hidrógeno en Colombia, destacando el potencial energético de la biomasa residual en el país. (Castiblanco, 2020).

"Gasificación con aire de hojas y tallo de palma de aceite y determinación de su potencial para la generación de energía eléctrica" Este estudio analiza la producción de gas mediante la gasificación de biomasa de palma de aceite, obteniendo datos sobre el volumen de gas producido y su poder calorífico, lo cual es relevante para la generación de energía. (Orozco,2023)

"Estudio para la implementación de proyectos de producción de hidrógeno verde a partir de biomasa en Colombia" Este informe presenta análisis técnicos relacionados con la producción de hidrógeno verde a partir de biomasa, incluyendo una revisión de tecnologías actuales y estimaciones de eficiencia para diferentes tipos de biomasa disponibles en Colombia (FENOGE, 2024).

"Análisis termodinámico y cinética de reacción del proceso de gasificación del raquis de palma" Este trabajo se enfoca en la caracterización fisicoquímica del raquis de palma y su

potencial en procesos de gasificación para la producción de energía. (Bermúdez García, y Caicedo Bastidas, 2022)

"Alternativas ambientales para el aprovechamiento de la biomasa residual de palma africana" Este artículo discute opciones para el aprovechamiento de la biomasa residual lignocelulósica generada durante la extracción del aceite de palma, incluyendo los racimos de fruta vacía y fibras de mesocarpio. (Leonardo, 2019)

"Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana" Este estudio se centra en la obtención de biocombustibles mediante la pirólisis rápida de residuos de palma africana, explorando su potencial como fuente de energía renovable. (Arteaga V., et al. 2012).

Los antecedentes Internacionales investigados y citados son:

“Advanced biofuel production via gasification – lessons learned from 200 man-years of research activity with Chalmers’ research gasifier and the GoBiGas demonstration plant” El artículo trata de investigaciones en países como Suecia que han abordado la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual utilizando tecnologías avanzadas, como gasificación. Este enfoque incluye evaluaciones de ciclo de vida que analizan no sólo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino también aspectos como el uso de recursos hídricos y energéticos. Estos estudios han identificado que los sistemas basados en biomasa presentan menores impactos ambientales en comparación con las fuentes fósiles. (Thunman et Al., 2018).

“Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A parametric study” En China, se han llevado a cabo investigaciones sobre la gasificación supercrítica de residuos agrícolas, con un enfoque en la producción de hidrógeno limpio. Los resultados mostraron que esta tecnología tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de

GEI si se utiliza una fuente renovable como materia prima. Además, el ACV se implementó para evaluar los impactos ambientales, destacando la importancia de optimizar parámetros operativos, como la presión y temperatura. (Guo et al., 2017).

“An overview of hydrogen production technologies” El proyecto europeo HyGrid utilizó el ACV para evaluar procesos de producción de hidrógeno basados en tecnologías de gasificación. Países como Alemania y los Países Bajos destacaron la viabilidad de integrar residuos agrícolas en la cadena de producción de hidrógeno. Se identificaron beneficios ambientales significativos, como la reducción de residuos sólidos y el aprovechamiento de materias primas renovables. (Holladay et al., 2019)

La implementación del ACV en estudios internacionales se sustenta en las normas ISO 14040 y 14044, que establecen los principios y marcos para la evaluación del ciclo de vida. Estas normas han sido adoptadas ampliamente en proyectos relacionados con la producción de hidrógeno, lo que garantiza la comparabilidad y confiabilidad de los resultados.

Marco Contextual

En el panorama actual, existe una urgente necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles debido a sus efectos adversos sobre el cambio climático y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, el hidrógeno verde es una fuente de energía limpia y versátil que puede contribuir significativamente a la transición energética mundial.

En Colombia, el sector energético está explorando alternativas sostenibles para diversificar su matriz energética. La utilización de biomasa residual, como el raquis de palma, se alinea con los objetivos del país de promover tecnologías limpias y mejorar la gestión de residuos agrícolas. (Bayona Roa et Al, 2023)

La palma de aceite es uno de los cultivos agrícolas más importantes del país, lo que genera un gran volumen de residuos como el raquis. Sin embargo, estos residuos a menudo son subutilizados o gestionados de manera inadecuada, causando impactos ambientales como emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación del suelo. Este residuo contiene un alto contenido de lignocelulosa, lo que lo convierte en una biomasa adecuada para procesos termoquímicos como la gasificación. (Elbersen, 2013)

El estudio de Vargas-Mira, 2019 utiliza la tecnología de gasificación por arrastre de vapor en condiciones supercríticas, un enfoque avanzado que permite convertir la biomasa en gas de síntesis con alta proporción de hidrógeno. Este proceso opera a altas temperaturas y presiones, mejorando la eficiencia de conversión y reduciendo la formación de contaminantes. (Vargas-Mira, 2019). Este estudio analiza el proceso de purificación de hidrógeno utilizando tecnologías como Selexol y Pressure Swing Adsorption (PSA) a través de seis rutas diferentes. (Vargas-Mira, 2019).

Para este proyecto teórico de ACV de producción de hidrógeno por gasificación con arrastre por vapor supercrítico, se utilizó el software SimaPro 9.6.0.1 para modelar el sistema completo de gasificación del raquis de palma. Se realizó un inventario detallado de masa y energía, integrando datos obtenidos de la base Ecoinvent 3. El análisis, basado en las normas ISO 14040 e ISO 14044, evalúa el desempeño ambiental del proceso bajo un enfoque "de la cuna a la puerta", considerando el impacto ambiental asociado a la producción de 1 kg de hidrógeno verde.

La investigación es llevada a cabo en colaboración de las instituciones de educación superior, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, y la Universidad de Cartagena. Este trabajo conjunto busca generar soluciones aplicables al contexto colombiano, teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas y ambientales locales.

El estudio de ACV anteriormente descrito, se enfoca teóricamente en dos regiones estratégicas de Colombia: Santander y Cartagena (Bolívar) en donde se implementó el software, el proyecto tiene como centro operativo la zona palmicultora del departamento de Santander por su potencial en la producción de biomasa, su importancia en el desarrollo industrial y su tipo de producción energética a base de fuentes hidroeléctricas.

Este trabajo aborda la necesidad de desarrollar procesos sostenibles que aprovechen residuos agrícolas en la producción de energía limpia. La metodología teórica y las simulaciones no solo permiten explorar el potencial del raquis de palma, sino también ofrecer herramientas para la implementación futura de tecnologías de hidrógeno verde en Colombia. Al centrarse en la evaluación ambiental, también contribuye a una mejor comprensión del impacto ecológico, en recursos y para la salud humana de estas tecnologías, proporcionando una base para la toma de decisiones en políticas energéticas y ambientales.

Marco Teórico

Para el desarrollo de esta investigación se analizaron los impactos generados por la tecnología de arrastre por vapor supercrítico para la producción de hidrógeno a partir de raquis de palma. Es indispensable conocer sobre la biomasa a utilizar, la tecnología a analizar, y la metodología de ACV tanto la norma como el software utilizado.

Hidrógeno Verde Y Clasificación

El hidrógeno verde se produce mediante electrólisis de hidrógeno a partir de energías renovables, el hidrógeno verde no contiene CO_2 . Green Hydrogen for Industry, indica que la demanda global de hidrógeno puro para el año 2020 fue de 39.9Mt de H_2 en refinería, siendo el mayor consumidor de este producto, 30.9 Mt en producción de Amonio, 12 Mt en Producción metano y 4.3 Mt en la industria del hierro, la producción de H_2 es responsable de más de 900 Mt

de emisiones de carbono. Superó por ejemplo a las emisiones de la aviación mundial, casi 800 Mt, o a las del estado de la UE más contaminante, Alemania, con 635Mt El hidrógeno verde se produce mediante electrólisis de hidrógeno a partir de energías renovables, el hidrógeno verde no contiene CO_2 . sin embargo, cuando hablamos de los colores del hidrógeno verde nos referimos de forma didáctica de acuerdo a la forma de producción. Pero, las emisiones GEI asociadas al ciclo de vida son lo relevante. (PtX Hub Berlín ,2023). En la figura 1 se puede observar la clasificación del hidrógeno según la fuente de producción.

Figura 1

Clasificación del hidrogeno según su materia prima



Fuente: Hidrógeno Verde: criterios de sostenibilidad desde PtX Hub Berlín Noviembre 2023 Catalyzing Sustainable Green Hydrogen Fuels and Feedstocks www.ptx-hub.org (PtX Hub Berlín, 2023).

Para producir 1 Kg Hidrógeno se requiere de 55 a 65 KWh aproximadamente de energía renovable, también para producir 1Kg Hidrógeno requiere 9 litros de agua aproximadamente.

Los electrolizadores no requieren mucho espacio, si se debe tener en cuenta el lugar para las energías renovables asociados a la producción de hidrógeno. En Colombia, se considera hidrógeno verde “a partir de fuentes no convencionales de energía renovable, tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros.” Ley 2099/2021. (PtX Hub Berlín, 2023).

Las industrias consumidoras de H_2 en Colombia son Yara con 136.000 T $NH_3/año$, Ecopetrol 90.000 T $H_2/año$ (Reficar), y Monomeros con 50.000 T $NH_3/año$, (PtX Hub Berlín, 2023).

Tecnología De Producción De Hidrógeno Mediante La Ruta 6 Según (Vargas-Mira, 2019)

En esta ruta se analiza la producción de hidrógeno mediante un flujo de producto de 2813.31 kg/h. El cual genera alta pureza del hidrógeno en un rango de 94% a 98% al aumentar la presión de la columna de absorción con Selexol de 40 a 60 bar. (Vargas-Mira, 2019).

La condición operativa utiliza gasificación supercrítica para procesar la biomasa. El Selexol se emplea como solvente en la unidad de purificación para capturar CO_2 . La presión en la columna de absorción tiene un impacto significativo en la pureza del hidrógeno. (Vargas-Mira, 2019).

En cuanto a los impactos ambientales del proceso presenta un Potencial de Impacto Ambiental (PEI), alto debido al elevado consumo energético necesario para alcanzar condiciones supercríticas. También genera mayores impactos tóxicos y atmosféricos comparado con otras rutas, especialmente en las categorías de Toxicidad humana por ingestión (HTPI), Calentamiento global (GWP) y acidificación (AP), debido al uso de combustibles fósiles para satisfacer los requerimientos energéticos. A pesar de esto, el proceso utiliza materias primas amigables con el medio ambiente, como los residuos de palma. (Vargas-Mira, 2019).

La imagen muestra el diagrama de flujo de procesos para la Ruta 6, destacando las principales etapas y unidades involucradas en la producción de hidrógeno mediante gasificación supercrítica de residuos de palma (EFB, Empty Fruit Bunches). (Vargas-Mira, 2019)

La Zona Verde representa la gasificación (GASF1 y GASF2), en esta los residuos de palma (EFB) son preparados en el molino (MLL) y transportados hacia los reactores de gasificación (GASF1 y GASF2) donde ocurre la conversión de biomasa en gas de síntesis (CO , H_2 , CO_2 , CH_4). Las entradas clave son Materia prima. (EFB). Vapor (SWG) Inyectado para favorecer las reacciones de reforma. Las salidas principales son Gas de síntesis (S4 y S5). Cenizas (ASH), separadas posteriormente en la unidad SEP. (Vargas-Mira, 2019)

La Zona Azul representa la reforma Catalítica y Reacciones Auxiliares en esta el gas de síntesis generado es sometido a una reforma catalítica (unidad REF) para aumentar el contenido de hidrógeno, utilizando Vapor adicional (STEAM). Un catalizador interno para convertir CO y CH_4 en H_2 y CO_2 . La Salida es gas enriquecido con hidrógeno (S11 y S12), dirigido a las etapas de separación. (Vargas-Mira, 2019)

La Zona Gris representa la purificación de hidrógeno, esta área incluye las etapas de purificación mediante Selexol (absorción química) la Unidad SEP3, elimina impurezas del gas enriquecido. La Unidad CTC, incrementa la pureza del hidrógeno producido. El producto final es hidrógeno de alta pureza (Hydrogen), listo para aplicaciones industriales, los subproductos son CO_2 y otros gases inertes, que pueden ser separados y reutilizados o emitidos, las corrientes involucradas (S14, S15, S16).

Algunas corrientes de gases (S19, S20, S21) son recirculadas dentro del sistema para maximizar la eficiencia del proceso. Las cenizas generadas (ASH) son gestionadas como desechos sólidos a través de SEP1. (Vargas-Mira, 2019)

En la investigación se realizó una revisión bibliográfica de fuentes, tomando en cuenta la búsqueda de conceptos pertinentes que permitieron evaluar y determinar los objetivos, el alcance, los límites del sistema, además de ser conceptos fundamentales para entender tanto la tecnología como la metodología del análisis, estos estudios ayudaron en el reconocimiento de la unidad funcional que se adecua a los objetivos de la investigación. Estas fuentes fueron desglosadas en un documento tipo tabla de Excel, en donde se colocan los datos de autor, título, año de publicación, descripción, objetivo, alcance, y unidad funcional si se presenta. Como primer parámetro de búsqueda se indagaron estudios de Análisis de ciclo de Vida de fuentes energéticas, entre los que se destaca el estudio llamado “Análisis del ciclo de vida para los procesos involucrados en la producción de biodiesel derivado de la palma de aceite” En la investigación que evalúa los impactos ambientales del ciclo de vida en la producción de biodiesel de palma africana, basado en estudios del CIAT y el uso del software SimaPro, siguiendo la norma ISO 14044. Y cuya unidad funcional fue recorrer 100 km en un bus articulado usando biodiesel derivado de aceite de palma. En este estudio se identificó la metodología y el software utilizados, lo que aclaró el análisis metodológico empleado. También se analizaron otras fuentes nombradas en la tabla 1 relevantes para la investigación. El siguiente criterio de búsqueda fue el empleo de la biomasa escogida en la producción de hidrogeno, en cuya búsqueda se destacó el congreso realizado en Alemania en el 2023 sobre el futuro del hidrogeno verde y cuya información ha sido utilizada en este documento en los marcos de referencia, se destacan estudios metodológicos de las tecnologías de gasificación realizados en Colombia los cuales también son nombrados en la tabla 1. La tabla 1 es más grande que media página y por lo tanto fue agregada en varias páginas para sí misma

Tabla 1*Fuentes consultadas*

Nombre del artículo	Breve Descripción	Objetivo	Alcance	Unidad Funcional
Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno como combustible del futuro	Revisión de la producción de hidrógeno con énfasis en el impacto ambiental y análisis cualitativo de dicha información. Se dividen los métodos de producción según las materias primas (combustible fósil, agua, biomasa) y el método químico (rutas químicas y bioquímicas). Se calculan las emisiones de GEI asociadas a la producción de biohidrógeno por fermentación oscura y se analizan las mejores posibilidades para considerar el hidrógeno como el combustible del futuro.	Evaluar el impacto ambiental de la producción de hidrógeno y analizar las mejores posibilidades para que el hidrógeno sea considerado como el combustible del futuro.	Revisión y análisis de los métodos de producción de hidrógeno y su impacto ambiental, calculando las emisiones de GEI asociadas a la producción de biohidrógeno por fermentación oscura. Análisis de la producción de hidrógeno usando fermentación oscura a partir de melazas obtenidas de la industria del azúcar. Se consideraron tres etapas: producción de materia prima, transformación y compresión del biohidrógeno.	1 MJ de energía producida
Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods	El artículo compara los diferentes métodos de producción de hidrógeno desde el punto de vista ambiental y económico, incluyendo fuentes convencionales (como la oxidación parcial de hidrocarburos y gasificación de carbón) y renovables. La oxidación parcial de hidrocarburos es un proceso exotérmico que emite CO y CO_2 , mientras que la gasificación de carbón utiliza una reacción similar, con CO_2 como principal subproducto. Para calcular la vida útil económica, se toma la tasa de interés, i , como 8% y la vida física (n) del sistema de producción de hidrógeno se considera de 20 años.	Evaluar los impactos ambientales y económicos de los diferentes métodos de producción de hidrógeno.	Comparación entre fuentes convencionales (oxidación parcial de hidrocarburos, gasificación de carbón) y renovables para la producción de hidrógeno.	1 Kg de Hidrógeno producido de diferentes métodos

Hidrógeno Verde: criterios de sostenibilidad desde PtX Hub	Se analiza el uso actual del hidrógeno y sus colores (verde, azul, gris, etc.), mercados potenciales y los criterios de sostenibilidad en la producción de hidrógeno verde en Colombia.	Establecer recomendaciones normativas y de certificación para el desarrollo sostenible del hidrógeno verde en Colombia.	Evaluación del mercado del hidrógeno verde y su viabilidad en Colombia, incluyendo aspectos energéticos y de competitividad.	Producción de hidrógeno verde mediante energías renovables.
Análisis del ciclo de vida para los procesos involucrados en la producción de biodiésel derivado de la palma de aceite	Investigación que evalúa los impactos ambientales del ciclo de vida en la producción de biodiésel de palma africana, basado en estudios del CIAT y el uso del software SimaPro, siguiendo la norma ISO 14044.	Calcular los impactos ambientales y proponer estrategias de mitigación.	Estudio de los procesos agrícolas e industriales involucrados en la producción de biodiésel derivado del aceite de palma, incluyendo refinación y transesterificación.	Recorrer 100 km en un bus articulado usando biodiésel derivado de aceite de palma.
Norma ISO 14040: Gestión Ambiental – ACV	La ISO 14040 establece los principios y el marco para realizar análisis de ciclo de vida, incluyendo definición de objetivos, alcance, evaluación e interpretación.	Proporcionar una metodología estandarizada para identificar impactos ambientales asociados al ciclo de vida de productos o servicios.	Aplicable a productos, servicios y sistemas para identificar y mitigar impactos ambientales.	Depende del estudio, generalmente un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida.
Norma ISO 14044: Gestión Ambiental - ACV - Requisitos y directrices	Define requisitos y directrices para la implementación del ACV, incluyendo detalles sobre análisis de inventario, evaluación de impacto, e interpretación de resultados.	Proporcionar directrices detalladas para realizar un ACV, enfocándose en la aplicación práctica y análisis de datos.	Aplicable a productos y servicios que buscan evaluar y minimizar impactos ambientales.	Producto o servicio en su ciclo de vida, con enfoque en reducción de impactos.
Análisis del Ciclo de Vida para los Procesos Involucrados en la Producción de Biodiésel Derivado de la Palma de Aceite para ser Usado en un Bus Articulado	Este estudio presenta un análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental en la producción de biodiésel a partir de palma de aceite, enfocado en su uso en buses articulados.	Desarrollar el análisis de ciclo de vida para determinar los impactos ambientales en la producción de biodiésel derivado de la palma de aceite, siguiendo la metodología de la norma ISO 14044.	Desde la adquisición de insumos para la producción del biodiésel hasta el proceso de refinación del aceite de palma, sin incluir el uso final del producto.	Recorrer 100 km en un bus articulado utilizando biodiésel (B10) derivado de aceite de palma.

<p>Biomasa: Gasificación</p>	<p>El documento "Biomasa: Gasificación" es una publicación técnica producida por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en colaboración con BESEL, S.A. El texto ofrece una visión detallada sobre los procesos de gasificación de biomasa, enfocándose en las tecnologías existentes, sus etapas, elementos clave y aplicaciones prácticas en plantas industriales. Está diseñado para promover el uso eficiente y sostenible de la biomasa como fuente de energía renovable en España.</p>	<p>Describir las etapas del proceso de gasificación de biomasa, los componentes involucrados, y las tecnologías disponibles, para fomentar su implementación en proyectos energéticos sostenibles.</p>	<p>El documento aborda: Las etapas y reacciones químicas involucradas en la gasificación. Los elementos principales del proceso, incluyendo agentes gasificantes, tipos de biomasa y catalizadores. Un análisis detallado de tecnologías específicas como las de lecho fluidizado, plantas Guascor, Inerco y Taim-TFG, describiendo sus características, funcionamiento, gestión de subproductos, y sistemas de control.</p>	<p>La unidad funcional del documento puede definirse como "la cantidad de biomasa gasificada para producir un volumen específico de gas sintético de calidad industrial."</p>
----------------------------------	--	--	--	---

Nota : esta tabla describe estudios de análisis de ciclo de vida que sirvieron como fuente primaria para la aplicación del método

Marco Conceptual

Los conceptos clave para comprender esta investigación son:

La Palma Africana:

Es una monocotiledónea diploide que pertenece a la familia Palmae, género *Elaeis* y especie *Elaeis guineensis*. Es una planta tropical propia de climas cálidos cuyo origen se ubica en la región occidental y central del continente africano, exactamente en el golfo de Guinea. La palma africana es una de las plantas de mayor uso industrial, esto se da por la generación del biodiesel a partir de la extracción del aceite de sus frutos. (Cantuca, 2001)

El desarrollo del cultivo de palma en Colombia se ha establecido en 4 sectores geográficos del país, zona central, oriental, sur occidental y zona norte, la producción del aceite de palma en Colombia está centrada en 55 núcleos productivos, los cuales están ubicados en

estas 4 zonas. En la tabla 2 se describe la producción de palma en los años comprendidos del 2015 a 2020 en Fedepalma para la zona norte. En este sentido se garantiza una fuente permanente de biomasa la cual se puede utilizar en tecnologías que permiten dar valor agregado a un residuo. (Zona Norte - Fedepalma.2024.).

Tabla 2

Área, Producción y Rendimiento Nacional

	2015	2016	2017	2018	2019*	2020*
Área (Ha)	499.244	512.076	516.960	540.688	546.094	551.554
Producción (Ton)	1.274.833	1.146.211	1.627.552	1.630.413	1.530.667	1.632.000
Rendimiento (Ton/Ha)	3,38	2.87	3,78	3,77	2,91	2,93

Nota. Se relaciona el rendimiento de la producción de aceite de palma con el área sembrada en el país y la producción de aceite de palma por tonelada, (Zona Norte - Fedepalma.2024.).

Raquis de Palma

La Tusa o raquis de palma, es un subproducto o desecho derivado del proceso de extracción del aceite de palma, que se da en la etapa de esterilización y desfrutado, el cual corresponde a un 25% del total de racimo de fruto fresco (Dalimin, 2007). En la tabla 3 se mencionan las propiedades de composición del Raquis de palma, en porcentajes de humedad, materias volátiles, carbón fijo, cenizas, el análisis de composición atómica y su poder calórico en MJ/kg. (Esteban, 2022)

Tabla 3

Composición de raquis de palma africana.

Propiedades	Raquis de Palma
-------------	-----------------

análisis proximo	%
Humedad (base seca)	5,18 - 7,95
Materias volátiles	82,58 – 79,67
Carbón Fijo	8,68 – 12,6
Cenizas	3,1 - 5,36
Análisis último	%
C	46,62 – 53,78
H	4,37 – 6,45
N	0 – 0,01
O	38,28 – 45,66
S	0 – 0,035
Poder Calórico (MJ/kg)	17,2 – 18,96

Nota. Datos aproximados en porcentaje de la composición de raquis de palma africana, Esta caracterización varía dependiendo de la zona de producción. Fuente: (Esteban, 2022)

Caracterización de la Biomasa.

La ruta de conversión depende de las características de la biomasa, es por ello que la caracterización es fundamental para comprender las propiedades fisicoquímicas las cuales determinarán la idoneidad del material para la conversión, estas propiedades son claves para la utilización eficiente de la biomasa en el proceso de bioconversión. Estas características dependen en gran medida de los componentes orgánicos primarios (celulosa, hemicelulosa, y lignina) que varían según la fuente de biomasa, especies y condiciones climáticas. En una búsqueda bibliográfica se realiza una comparación de las caracterizaciones de raquis de palma en diversas fuentes:

Los subproductos de la palma de aceite, como los cuercos de palma (Palm Kernel Shells, PKS) y la torta de palmiste (Palm Kernel Cake, PKC), los PKS son los endocarpos duros que

rodean las semillas de palma, obtenidos después del proceso de extracción mecánica de los núcleos. Estos residuos son considerados biocombustibles sólidos de alta calidad, con un poder calorífico de aproximadamente 22.14 MJ/kg, un bajo contenido de azufre (0.09% en peso seco) y un contenido de cenizas del 3% en peso seco, lo que los hace adecuados para su uso en plantas de energía y calderas. (Lee y Ofori-Boateng, 2013),

Análisis Próximo: implica la determinación de la humedad del raquis, la materia volátil, el carbono fijo, el contenido de cenizas en la materia prima. El análisis próximo da información del comportamiento del combustible durante el calentamiento, es decir, cuánto del carbono permanece fijo, sin reaccionar, y cuánto se transforma en materiales volátiles.

Humedad: hace referencia a la cantidad de agua que contiene la biomasa, el cual es expresado en un porcentaje de peso de material. Este peso puede ser referido en base húmeda, en base seca, y en base seca y libre de cenizas. Si el contenido de humedad se determina en base "húmeda", el peso del agua se expresa como un porcentaje de la suma del peso del agua, de las cenizas y de la materia seca y libre de cenizas. Del mismo modo, cuando se calcula el contenido de humedad sobre una base "seca" (por muy contraproducente que pueda parecer), el peso del agua se expresa como un porcentaje del peso de la ceniza y de la materia seca y sin ceniza. (Bermudez, 2022)

Cenizas: este elemento inorgánico puede expresarse igual que el contenido de humedad, con base húmeda, seca o seca y sin cenizas. Generalmente el contenido total de cenizas y su estructura química son relevantes. (Bermudez, 2022)

Material Volátil: La materia volátil tiene relación con el fragmento de la biomasa que se relaja una vez que se calienta la biomasa (hasta 400 a 500°C). La biomasa frecuente tener un

elevado contenido de materia volátil (hasta el 80%), mientras que el carbón tiene un bajo contenido de materia volátil (menos del 20%). (Bermudez, 2022)

Carbono Fijo: este material se determina de forma teórica, y se debe a la diferencia numérica entre el material volátil y las cenizas cuando ya han sido determinadas, es decir que es el material no volátil de la muestra de biomasa.

Poder Calorífico: La energía ligada químicamente al combustible viene dada por el poder calorífico del combustible en energía por proporción de materia (kg). Esta energía no puede medirse de manera directa, sino solamente en relación con un estado de alusión. Para el poder calorífico inferior, por sus siglas en inglés (LHV), el estado de alusión del agua es su estado gaseoso; para el poder calorífico superior por sus siglas en inglés, (HHV), el estado de alusión del agua es su estado líquido. (Bermudez, 2022).

Según Heidi-Teran et al. (2023), el raquis de palma (EFB) presenta un bajo contenido de cenizas (2.2%) y un alto valor calorífico (19.3 MJ/kg), lo que lo hace adecuado para procesos termoquímicos como la gasificación. Además, su bajo contenido de azufre (0.09%) y nitrógeno (0.68%) reduce las emisiones de SO₂ y NO_x, lo que lo convierte en una alternativa sostenible para la producción de hidrógeno verde. (Heidi-Teran et al., 2024)

El raquis de palma, representa aproximadamente el 25% del racimo de fruto fresco (Dalimin, 2007). Según Esteban, su composición proximal incluye un contenido de humedad del 5.18-7.95%, materia volátil del 79.67-82.58%, carbono fijo del 8.68-12.6%, y cenizas del 3.1-5.36%. En cuanto a su composición elemental, el raquis de palma contiene 46.62-53.78% de carbono, 4.37-6.45% de hidrógeno, 38.28-45.66% de oxígeno, y trazas de nitrógeno y azufre (0-0.01% y 0-0.035%, respectivamente) (Esteban 2022). Su poder calorífico oscila entre 17.2 y 18.96 MJ/kg, lo que lo convierte en un material adecuado para procesos termoquímicos como la

gasificación. En comparación, los cuescos de palma (PKS) presentan un poder calorífico superior (22.14 MJ/kg), un menor contenido de cenizas (3%) y un bajo contenido de azufre (0.09%), lo que los hace ideales para su uso en plantas de energía y calderas (Lee y Ofori-Boateng, 2013). Estas diferencias en la composición y propiedades fisicoquímicas resaltan la versatilidad de los subproductos de la palma de aceite, siendo el raquis de palma especialmente adecuado para la producción de hidrógeno verde mediante gasificación, gracias a su bajo contenido de cenizas y emisiones reducidas de SO_2 y NO_x (Heidi-Teran et al., 2024).

Análisis Elemental

Este análisis elemental o final implica la determinación de *C, H, N, S* y *O* en la materia prima. El carbono en la materia prima contiene el carbono presente como carbono orgánico y cualquier carbono presente como carbonato mineral. El hidrógeno incluye el hidrógeno presente en los componentes orgánicos, así como el hidrógeno en toda el agua asociada a la materia prima. Se supone que el nitrógeno está presente en la matriz orgánica del carbón o de la biomasa.

El Hidrógeno es un gas diatómico de aspecto incoloro, inodoro, insípido, perteneciente al grupo de los no metales y altamente inflamable. Con fórmula molecular H_2 , es ampliamente usado en procesos de refinación de petróleo, reformado y procesos de desulfuración de la gasolina y el diésel. También se ha empleado en celdas de combustibles para generar electricidad. (Vargas-Mira, 2019).

Conversión De La Biomasa

Los Procesos termoquímicos tienen el objetivo de convertir la biomasa en gas o líquido combustible, el cual será el mismo para un proceso alterno, como generación de energía eléctrica, calor y obtención de productos químicos. Dentro de estos procesos se puede encontrar

las siguientes vías de conversión: combustión directa, la pirolisis, gasificación y licuefacción (Bermudez, 2022).

La gasificación es un proceso altamente dependiente de la temperatura en el cual se dan reacciones químicas mediante las cuales una materia prima, por ejemplo: biomasa o carbón, o cualquier otra fuente origen orgánico, es transformada de estado sólido en un gas combustible en presencia de catalizadores a temperaturas cercanas a los 700 °C (Ogi et al. 2010). El resultado de la reacción se conoce como syngas, gas de madera o gas de gasógeno. Este producto que se obtiene está compuesto principalmente de CO (monóxido de carbono), H_2 (hidrógeno), CH_4 (metano), CO_2 (dióxido de carbono), y trazas de vapor de agua. (Vargas-Mira, 2019)

La Gasificación mediante agua supercrítica es un proceso emergente para la gasificación de la biomasa con alto contenido de humedad para obtener productos ricos en hidrógeno y Syngas (Azadi et al. 2012).

Monoethanolamine solvente usado

El Monoethanolamine (MEA) es un compuesto ampliamente utilizado en diversas industrias gracias a su versatilidad y propiedades químicas que combinan características de amina y alcohol. Este solvente es clave en procesos como el endulzamiento de gas (gas sweetening), donde actúa como agente absorbente para la eliminación de gases ácidos, como dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), en sistemas de tratamiento de gases. La producción de MEA se realiza a partir de reacciones químicas específicas que combinan amoníaco y óxido de etileno, generando un solvente con múltiples aplicaciones en detergentes, productos de cuidado personal, químicos agrícolas, y catalizadores para espumas de poliuretano. Su disponibilidad global y eficiencia hacen que el MEA sea una opción común en procesos industriales relacionados con la purificación y la captura de carbono. (Dow Chemical, 2024).

Software de análisis de impacto ambiental

El software que se utiliza para realizar los análisis del ciclo de vida es SimaPro el cual es creado por la empresa PRé Sustainability SimaPro, es un software de análisis de ciclo de vida (LCA) utilizado para evaluar el impacto ambiental de productos y servicios. En 1989, PRé Consultants fue fundada en los Países Bajos por Mark Goedkoop. La empresa se dedicó a proporcionar herramientas y servicios para la sostenibilidad ambiental y la evaluación del ciclo de vida. En 1990, el desarrollo de SimaPro comenzó como una herramienta para ayudar a los profesionales a realizar análisis de ciclo de vida de manera más eficiente y precisa. La idea era proporcionar una herramienta que pudiera manejar grandes conjuntos de datos y realizar cálculos complejos necesarios para el LCA. (PRé Sustainability, 2024).

Entre 1990 y 1994, las primeras versiones de SimaPro se desarrollaron y lanzaron al mercado. Estas versiones iniciales se centraron en proporcionar una interfaz de usuario amigable y en mejorar la precisión de los cálculos del ciclo de vida. Entre 1995 y el 2005, SimaPro experimentó numerosas actualizaciones y mejoras. Se añadieron nuevas bases de datos y metodologías, lo que permitió a los usuarios realizar análisis más detallados y específicos. La integración de datos y la capacidad de modelado se expandieron significativamente. Entre 2006 y 2015, SimaPro se convirtió en uno de los software de LCA más utilizados a nivel mundial. PRé Consultants trabajó en colaboración con universidades, institutos de investigación y empresas para mejorar continuamente el software. Se añadieron funciones avanzadas de simulación y herramientas de reporte, facilitando la comunicación de los resultados del LCA.

Del 2016 en adelante, con el auge de la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental en la industria, SimaPro continuó evolucionando para satisfacer las necesidades cambiantes de los usuarios. Se integraron capacidades de análisis más avanzadas, como la evaluación de impacto

social y la economía circular. La interfaz de usuario se modernizó para mejorar la accesibilidad y la facilidad de uso.

Síntesis del método de evaluación de impacto ambiental

El método ReCiPe 2016 es una herramienta avanzada de evaluación del impacto ambiental en análisis de ciclo de vida (ACV), la cual, permite analizar impactos a nivel midpoint (categorías de impacto como cambio climático, acidificación, entre otros) y endpoint (daños a la salud humana, calidad de ecosistemas y recursos). Dentro de sus tres perspectivas (Egalitaria, Individualista y Jerarquista), la perspectiva Egalitaria es la más conservadora y considera un horizonte de tiempo extendido, integrando incertidumbres y priorizando impactos a largo plazo.

La elección del método ReCiPe 2016 v1.1 con perspectiva Egalitaria está plenamente justificada debido a que tiene consistencia con el enfoque de sostenibilidad ya que este proyecto busca evaluar y optimizar el impacto ambiental de la producción de hidrógeno como un combustible verde. El método ReCiPe 2016 permite identificar las áreas de mayor impacto ambiental dentro del proceso y priorizar mejoras para fomentar una tecnología sostenible.

La integración del método en el software SimaPro 9.6.0.1 facilita la modelación detallada de las rutas del proceso y la evaluación precisa de entradas y salidas, incluyendo factores de regionalización y normalización actualizados. Las actualizaciones del método (v1.09, abril de 2024) aseguran la incorporación de factores de caracterización para nuevas geografías y flujos, lo que permite un análisis más completo y representativo, el método ReCiPe 2016 v1.1, con su perspectiva Egalitaria y evaluación endpoint, es una herramienta sólida y adecuada para el análisis del ciclo de vida del proceso de producción de hidrógeno mediante gasificación

supercrítica del raquis de palma, contribuyendo a desarrollar soluciones tecnológicas más sostenibles y ambientalmente responsables.

Explicación del metodo

El método ReCiPe 2016 ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios científicos para evaluar el impacto ambiental de diferentes sistemas y procesos. Los factores de caracterización a nivel de punto final típicamente reflejan daños en una de tres áreas de protección que son la salud humana, la calidad del ecosistema y la escasez de recursos. (Huijbregts, M. A. J. et al. 2017).

La unidad para el daño a la salud humana, DALY (años de vida ajustados por discapacidad por su siglas en inglés), representa los años que se pierden o que una persona queda discapacitada debido a una enfermedad o accidente. (Huijbregts, M. A. J. et al. 2017).

La unidad para la calidad de los ecosistemas es la pérdida relativa local de especies en los ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos, respectivamente, integrada en el espacio y el tiempo

Formula 1 y 2

$$UCE = \text{fracción de especies potencialmente desaparecidas} * m^2 * \text{año}$$

$$UCE = \text{fracción de especies potencialmente desaparecidas} * m^3 * \text{año}$$

Donde *UCE* es unidad para la calidad de los ecosistemas.

Para agregar los impactos de los ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos en una sola unidad (*especie. año*), incluimos las densidades de especies para estos tres tipos de ecosistemas de la misma manera que propusieron (Goedkoop et al. 2009).

La unidad para la escasez de recursos es el dólar (\$), que representa los costos adicionales involucrados en la futura extracción de recursos minerales y fósiles. Los factores de caracterización de punto final (CFe) se derivan de los factores de caracterización de punto medio (CFm) con un factor constante de punto medio a punto final por categoría de impacto

Formula 3

$$CF_{ex,a} = CF_{mx} * FM \rightarrow; E;$$

Factores de caracterización de punto final (CFe) .

Factores de caracterización de punto medio (CFm).

Constante de punto medio a punto final (FM).

Se denota el área de protección, es decir, la salud humana, los ecosistemas (terrestres, de agua dulce y marinos) o la escasez de recursos.

Sx denota el factor de estrés de preocupación

Estos factores de punto medio a punto final son constantes por categoría de impacto, porque se considera que los mecanismos ambientales son idénticos para cada factor de estrés después de la ubicación del impacto de punto medio en la ruta de causa-efecto.

Factores De Punto Medio A Punto Final. Las vías de daño consideradas para ir desde el punto medio al punto final en ReCiPe 2016, ordenadas por problema ambiental, se explican brevemente a continuación.

Cambio Climático. El primer paso en el modelo de punto medio a punto final cuantifica el vínculo entre el forzamiento radiativo integrado en el tiempo y el aumento de temperatura integrado en el tiempo para el CO_2 (Joos et al. 2013). Con respecto al daño a la salud humana, se utilizó la siguiente fuente (Schryver et al. 2009) para cuantificar el aumento del riesgo de enfermedades (desnutrición, malaria y diarrea) y el aumento del riesgo de inundaciones. Para los ecosistemas terrestres, el aumento en la fracción potencialmente desaparecida de especies (PDF) debido a un aumento en la temperatura global se derivó de la revisión de Urban (2015). Finalmente, la influencia del aumento de la temperatura global en la descarga de los ríos y los cambios esperados posteriores en la aparición de especies de peces se tomó de Hanafiah et al. (2011).

Agotamiento Del Ozono Estratosférico. El efecto sobre la salud humana de una disminución en la concentración de ozono estratosférico, como se modeló en el cálculo del punto medio al punto final, se derivó en dos pasos consecutivos, siguiendo a Hayashi et al. (2006). El primer paso relaciona un cambio en el agotamiento del ozono con un aumento en la radiación UVB y el segundo paso vincula este aumento en la radiación UVB con un aumento en la carga de enfermedad. Para calcular el daño a la salud humana, se incluyeron el aumento de la incidencia y la pérdida relacionada de DALY de tres tipos de cánceres de piel (melanoma maligno, carcinoma de células basales y carcinoma de células escamosas) y cataratas debido a la exposición a la radiación UVB.

Radiación ionizante. En los cálculos de punto medio a punto final, se evaluó el efecto sobre la salud humana de la dosis colectiva sobre la incidencia de diferentes tipos de cáncer tomando primero la incidencia de cáncer fatal y no fatal por tipo de cáncer de Frischknecht et al. (2000). Esta información se combinó con el peso de la discapacidad por tipo de cáncer (Frischknecht et al. 2000; DeSchryver et al. 2011).

Formación de partículas finas Material Particulado MP. Partiendo de la fracción de ingesta, Van Zelm et al. (2016) determinaron el efecto humano y el daño debido a la mortalidad por cáncer cardiopulmonar y de pulmón de las partículas finas.

Formación De Ozono Fotoquímico. Partiendo de la fracción de ingesta, Van Zelm et al. (2016) determinaron los factores de efecto y daño de la mortalidad respiratoria debido a la exposición al ozono. Para el daño a los ecosistemas terrestres, el factor de efecto describe el cambio en la PDF de las especies de bosques y pastizales debido al cambio en la exposición al ozono a nivel del suelo sobre el área de bosques y pastizales (Van Goethem et al. 2013a, b).

Acidificación Terrestre. Se agregó un factor de efecto a los cálculos del punto final, que describe la ausencia de especies debido a la acidez de los suelos (Roy et al. 2014). El factor de efecto cuantifica el cambio en la PDF de las especies de plantas vasculares debido a un cambio en la concentración de H^+ y se derivó para biomas específicos, como el bosque templado de hoja ancha mixto, la tundra y el bosque húmedo de hoja ancha (sub)tropical (Azevedo et al. 2013a).

Eutrofización De Agua Dulce. El factor de efecto, agregado a los cálculos del punto medio, describe la ausencia de especies debido a las concentraciones de fósforo en agua dulce (Azevedo et al. 2013b, c). Refleja el cambio en la PDF de las especies debido a un cambio en la

concentración total de P y depende del tipo de agua dulce (ríos o lagos), grupo de especies (heterótrofos y autótrofos) y tipo de clima (cálido, templado, xérico o frío).

Toxicidad. Los factores de daño ecotoxicológico, agregados a los cálculos del punto medio, se consideraron iguales a uno, ya que los efectos estimados con datos de toxicidad aguda pueden aproximarse a los efectos tóxicos en condiciones de campo (Posthuma y De Zwart 2006). Para la salud humana, se incluyeron factores de daño para efectos cancerígenos o no cancerígenos (Huijbregts et al. 2005).

Uso Del Agua. Los impactos del consumo de agua en la salud humana se refieren a los AVAD debidos a la desnutrición, causada por la escasez de agua en países de bajo desarrollo (Pfister et al. 2009). Los impactos del consumo de agua en los ecosistemas terrestres se tomaron de Pfister et al. (2009), quienes los cuantificaron en función del daño a las especies de plantas vasculares utilizando la productividad primaria neta (PPN) como proxy. Los impactos del consumo de agua en los ecosistemas de agua dulce se tomaron de Hanafiah et al. (2011), quienes los cuantificaron como el cambio en las especies de peces perdidas asociadas con una disminución en la descarga.

Uso De La Tierra. El modelado de punto medio a punto final para el uso de la tierra no agrega pasos adicionales a la ruta de causa-impacto, ya que los factores de caracterización de punto medio ya se refieren a la pérdida de especies locales.

Escasez De Recursos Minerales. El factor de punto medio a punto final para la escasez de recursos minerales se refiere a la conversión de mineral excedente a costos excedentes. Las relaciones de tonelaje acumulativo para costos excedentes de 12 metales, según lo desarrollado por Vieira et al. (2016b), se utilizaron como entrada en los cálculos.

Escasez De Recursos Fósiles. Los factores de caracterización de punto final para la extracción de petróleo crudo, gas natural y carbón duro, expresados como potencial de costo excedente (SCP), se basaron en relaciones acumulativas de costo-tonelaje para estos tres recursos fósiles (Vieira et al. 2016c).

La explicación de nombres del método se encuentran en el Apéndice A Tabla de categoría de impacto.

La bibliografía consultada para la comprensión del método de punto medio a final fue:

ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, en este artículo se proporciona una descripción detallada del método ReCiPe 2016 y su aplicación en la evaluación de impactos ambientales a niveles de punto medio y punto final. (Huijbregts, M. A. J. et al. 2017).

Análisis del ciclo de vida de un sistema de producción de arroz en la Albufera de Valencia. Este estudio emplea el método ReCiPe 2016 para evaluar los impactos ambientales asociados con la producción de arroz, considerando todas las etapas desde la cuna hasta la puerta de la explotación agraria. (Soler, L., & Marín, C., 2018)

Comparación del impacto ambiental de alternativas de vivienda provisoria mediante el análisis de ciclo de vida. En esta investigación, se utilizó el método ReCiPe 2016 para comparar el impacto ambiental de diferentes modelos de vivienda temporal de emergencia, incorporando el aspecto medioambiental en la toma de decisiones post-desastres naturales. (Carrasco, M., & Rodríguez, G., 2021)

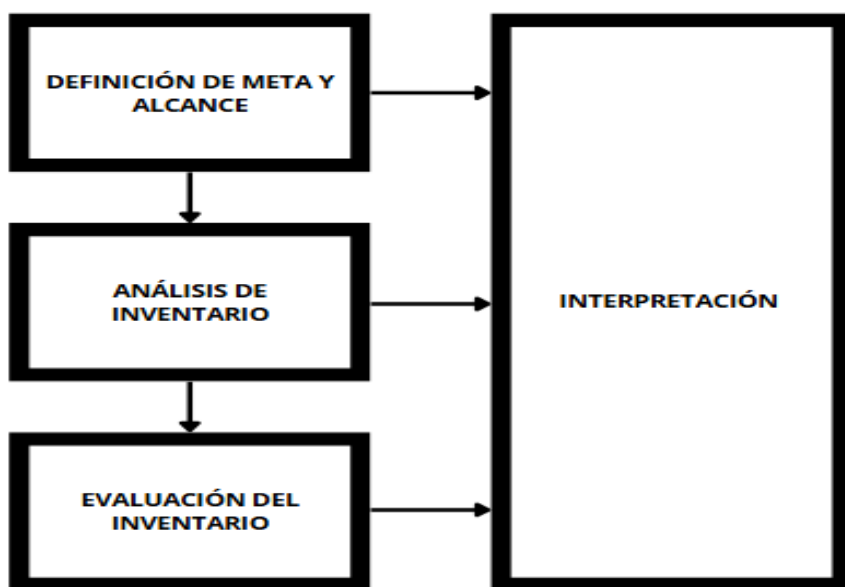
El impacto ambiental del análisis del ciclo de vida en la industria. Este documento examina la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en diversas industrias, utilizando el método ReCiPe 2016 para evaluar y reducir los impactos ambientales de sistemas, procesos, productos y servicios. (Torres, F., & Gómez, P. 2021)

Marco Normativo

La Norma ISO 14044 establece los fundamentos como marco metodológico, donde explica brevemente cada una de las fases para la elaboración del análisis de ciclo de vida. (ISO 14044,2006) la figura 3 que se encuentra en la siguiente página representa las etapas de la norma y su relación.

Figura 3

Metodología de análisis de ciclo de vida



Fuente: Norma ISO 10040

Norma ISO 14040

Esta Norma Internacional describe los principios y el marco de referencia para el análisis del ciclo de vida (ACV) incluyendo

- La definición del objetivo y el alcance del ACV.
- La fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).
- La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).
- La fase de interpretación del ciclo de vida, e) el informe y la revisión crítica del ACV, O las limitaciones del ACV.
- La relación entre las fases del ACV.
- Las condiciones de utilización de juicios de valor y de elementos opcionales.

Términos Y Definiciones

Para los fines de este documento se aplican los términos y definiciones dadas en la norma ISO 14040 y aplicados a la norma 14044 :

Ciclo de vida: Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final

Análisis del ciclo de vida (ACV): 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.

Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV): Fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas para un sistema del producto a través de su ciclo de vida.

Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV): Fase del análisis del ciclo de vida dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de todo el ciclo de vida del producto.

Interpretación del ciclo de vida: Fase del análisis del ciclo de vida en la que los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, se evalúan en relación con el objetivo y el alcance definidos para llegar a conclusiones y recomendaciones

Aseveración comparativa: Declaración ambiental en relación con la superioridad o la equivalencia de un producto con respecto a un producto competidor que realiza la misma función.

Transparencia: Presentación de información de forma abierta, exhaustiva y comprensible

Aspecto ambiental: Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente

Producto: Cualquier bien o servicio

Tipos y fuentes de datos: Los datos seleccionados para un ACV dependen del objetivo y el alcance del estudio. Estos datos se pueden recopilar de los sitios de producción asociados con los procesos unitarios dentro de los límites del sistema o se pueden obtener o calcular de otras fuentes. En la práctica, todos los datos pueden incluir una mezcla de datos medidos, calculados o estimados. Las entradas pueden incluir, pero no están limitadas al uso de recursos minerales (por ejemplo, los metales que provienen de yacimientos o de reciclaje, los servicios de transporte o suministro de energía y el uso de materiales auxiliares como lubricantes o fertilizantes).

Metodología

La metodología propuesta para la implementación del análisis del ciclo de vida (ACV) de la producción de hidrógeno utilizando tecnología supercrítica a partir del raquis de palma se basa en la norma ISO 14040 y 14044 de 2006. La metodología consta de las siguientes etapas:

Definición Del Objetivo Y Alcance Del Estudio

Se define el objetivo y alcance del estudio en el marco de la investigación del análisis del ciclo de vida (ACV) de la producción de hidrógeno utilizando tecnología supercrítica a partir del raquis de palma en la cual se analiza el sistema de producción de Hidrógeno verde mediante la utilización del método de arrastre por vapor en estado supercrítico, esta investigación se realiza de manera conjunta en las ciudades de Bucaramanga (Santander) y Cartagena (Bolívar), ambas ciudades de Colombia, en las cuales se realizarán análisis y cálculos teóricos de la producción de 1 kg de hidrógeno, que permitió realizar un diagnóstico de impactos ambientales asociados a daños a salud humana, daño a ecosistemas y gastos en recursos naturales. Al ser una investigación teórica los límites del sistema son de la cuna a la puerta complementados con datos obtenidos en bibliografía y las bases de SimaPro versión 9.6.0.1 proporcionado por la Universidad de Cartagena y el Grupo de investigación NIPAC, identificando el sistema que se va a analizar, se utilizó bases de datos Ecoinven 3 allocation Cutoff Sistem, principalmente para el análisis de datos, para la entrada de materia prima se tienen en cuenta que la biomasa utilizada en este caso Raquis de Palma, es un subproducto de otro proceso el cual es la producción de aceite de palma, por lo cual su extracción viene asociado con impactos ambientales generados el cultivo de palma. Se reutilizó material que de otra forma no generaría un valor agregado significativo o su disposición final es ser utilizado como combustible para calderas y produciendo mayor impacto a las emisiones, por lo que el alcance a tomar es de la cuna a la puerta. El objetivo es evaluar el desempeño ambiental de la producción de hidrógeno a partir del cultivo de la palma, y la extracción del raquis de palma mediante gasificación supercrítica, y limpieza del gas con la unidad de selexol, utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida

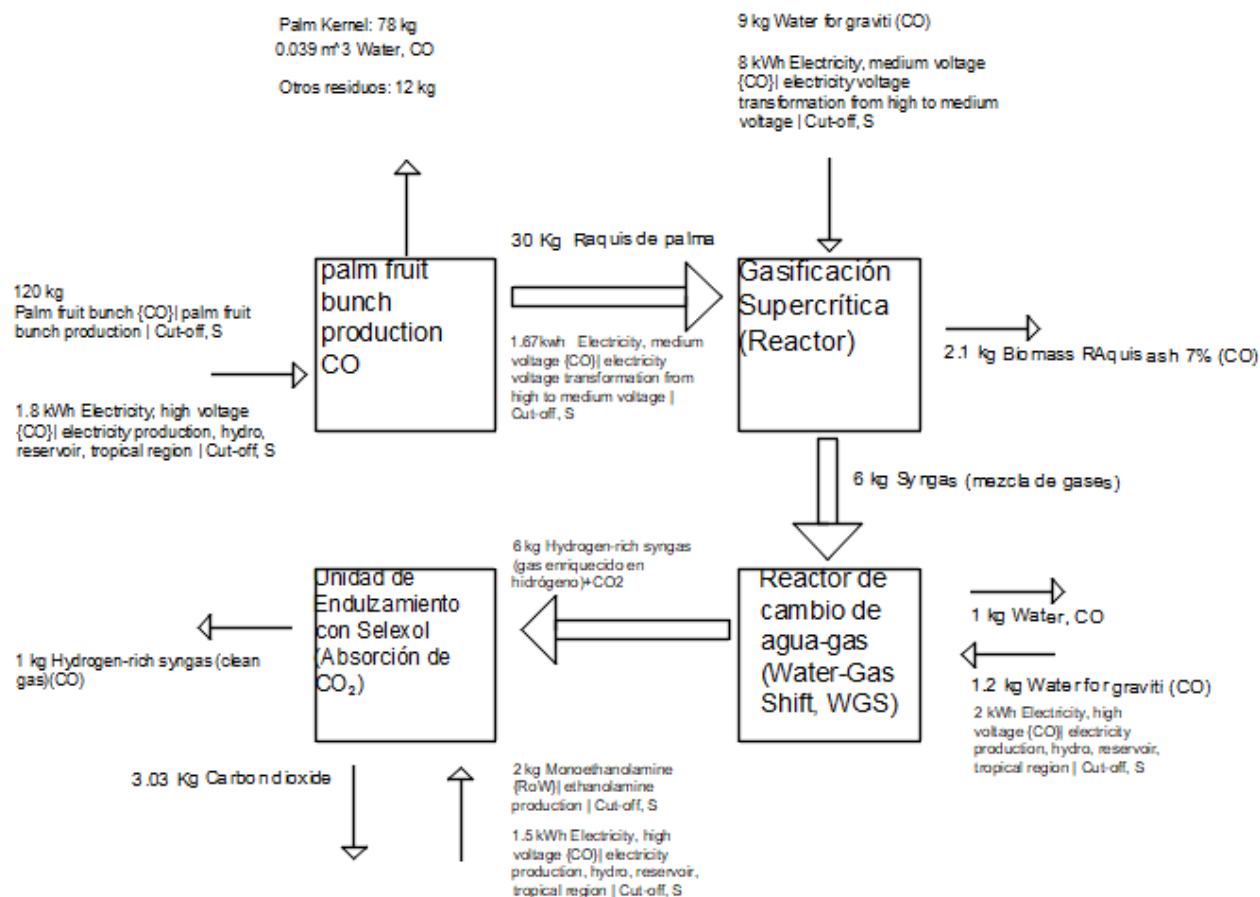
para identificar oportunidades de mejora y fomentar la transición hacia tecnologías más sostenibles.

Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

El diagrama de la figura 4 presenta un desglose detallado de los recursos utilizados y los subproductos generados en proceso industrial o de producción de hidrógeno a partir de raquis de palma mediante la tecnología de gasificación supercrítica. Este proceso de inventario del ciclo de vida, involucra la gestión de materiales como agua, gases (incluyendo monóxido de carbono e hidrógeno), y electricidad proveniente de fuentes hidroeléctricas en regiones tropicales. Además, se destacan las cantidades específicas de residuos y emisiones, como el dióxido de carbono, que son resultado de las operaciones. El objetivo de este diagrama es proporcionar una visión clara de las entradas y salidas del proceso, facilitando la comprensión de la eficiencia y el impacto ambiental del mismo. A continuación, se detallan los componentes clave y sus respectivas cantidades, lo que permite un análisis más profundo de la sostenibilidad y la optimización de recursos en este contexto. La figura 4 se encuentra en la siguiente pagina

. Figura 4

Diagrama de flujo con las entradas y salidas



Fuente: Autor creación en AutoCAD.

De la Cuna, de la siembra al despulpe y obtención del raquis

El primer proceso fue la extracción el raquis de palma para lo cual se utilizaron como entrada Palm fruit bunch {CO} | palm fruit bunch production | Cut-off, S de la Base de datos de Ecoinvent 3 - allocation; cut - off by classification – system. Este conjunto de datos representa la producción de 1 kg de dátiles de palma (materia fresca). El rendimiento es de 7281 kg/ha. El promedio de palmeras por hectárea es de 100 (por lo tanto, S cuenta con 72,81 kg de dátiles de palma por árbol). La vida útil de una palmera se estima en 80 años, durante los cuales los

primeros 5 años la palmera crece, pero no produce frutos. Estos datos tienen en cuenta estos 5 primeros años. La producción orgánica de dátiles de palma excluye el uso de pesticidas y fungicidas. La producción de dátiles de palma es principalmente manual y no requiere maquinarias.

De este producto se utilizó una cantidad de 120 kg de masa como referencia para la producción de 30 kg de raquis de palma útil para el proceso de producción de hidrógeno mediante la gasificación supercrítica del raquis.

Al calcular los 120 kg de *Palm fresh fruit bunches* (nombre en la base de datos) necesarios para producir los subproductos especificados, se utilizó una regla de proporción considerando las salidas del sistema descrito en los datos de referencia (Pineda-Ayala, et al., 2019):

Según los datos del proceso, por cada 120 kg de *Palm fresh fruit bunches* (entrada), se obtienen:

Palm Bunch Residue: 30 kg de (Raquis de Palma).

Palm Kernel: 78 kg

Otros residuos: 12 kg

Debido a que se considera al raquis de palma como el producto de interés, la almendra o palm kernel es considerada coproducto y por la cual se le atribuye carga ambiental, por el método de asignación ambiental según la masa.

Raquis: 25% de la carga ambiental.

Palm Kernel: 65% de la carga ambiental.

Otros: 10% de la carga ambiental.

Estas pérdidas no se contabilizan como producto útil pero sí influyen en el balance de masa y refleja los datos de rendimiento descritos en el proceso base. En el ingreso de dato a Simapro se le otorga % de 75 al Palm Kernel teniendo en cuenta que no afecta la obtención de mediciones de impacto ambiental del producto final.

La siguiente entrada fue Electricity, high voltage {CO}| electricity production, hydro, reservoir, tropical region | Cut-off, S referente a la electricidad de entrada del proceso de despulpado para la extracción del raquis. Esta energía fue escogida de la base de datos de Ecoinvent 3 que describe la fuente de producción energética mediante hidroeléctricas, lo que ocurre en gran parte de la zona palmicultora del departamento de Santander

Un motor de 1 HP equivale a 746 watts (W), es decir, 0.746 kW.

Según el tipo de despulpadora, procesar 120 kg de fruta fresca puede tomar aproximadamente 2.4 horas (suponiendo un rendimiento promedio de 50 kg/h).

Fórmula 4

$$\text{Consumo (kWh)} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Tiempo (h)}$$

$$(kWh) = 0.746 \text{ kW} \times 2.4 \text{ h} = 1.79 \text{ kWh}$$

El consumo eléctrico estimado para despulpar 120 kg de fruta fresca es de 1.8 kWh, coincidiendo con los valores mencionados. Esto se basa en el tiempo estimado de operación y la potencia del motor especificada en las características de la despulpadora.

El producto de estas entradas es 30 kg Palm Bunch Residue [CO] de la Base de datos del proyecto, representa el raquis de palma obtenido después del procesamiento de racimos de fruto fresco (FFB) de palma de aceite. Se modela como un subproducto del procesamiento de FFB con un rendimiento asumido del 25% en base a masa húmeda. Los datos se basan en prácticas de producción de palma en Colombia, alineadas con los conjuntos de datos de Ecoinvent.

Como coproductor y con una carga ambiental del 67% se tiene un 78 kg de Palm Kernel (almendra de palma) es el núcleo duro contenido dentro de los frutos de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*). Este subproducto se obtiene tras separar la cáscara externa (endocarpio) del fruto durante el procesamiento y al hacer parte de otro proceso productivo se excluye de la carga total ambiental del ciclo de vida. La materia prima utilizada corresponde a racimos frescos de palma de aceite cultivados en Colombia, país reconocido por su importante industria palmicultora.

Las salidas fueron “Agua residual generada como subproducto del proceso de extracción del raquis de palma. Este flujo incluye restos orgánicos y residuos de humedad del material procesado. Representa una pequeña fracción del agua utilizada inicialmente en el sistema.” que se estima en $0.039 m^3$ que van al agua residual.

Teniendo nuestro producto Palm Bunch Residue [CO] se introduce según nuestro inventario los 30kg de Palm Bunch Residue [CO] a la unidad de gasificación.

Unidad de Gasificación Supercrítica (Reactor)

El proceso de gasificación es un proceso termoquímico en el que la biomasa (raquis de palma en este caso) se convierte en un gas combustible, denominado gas de síntesis, bajo condiciones controladas de alta temperatura (entre 700°C y 1000°C) y un ambiente con cantidades limitadas de oxígeno o aire. Este proceso descompone la biomasa en moléculas más simples, principalmente monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y metano (CH_4), gases de interés para procesos continuos, en nuestro caso en la unidad de la unidad shift y la unidad de selexol

Las entradas del proceso fueron 30 *kg* de Raquis de palma (Palm Bunch Residue [CO]) como Agente gasificante se incorpora Vapor de agua Aproximadamente 9 *kg* (30% del peso del raquis). Este proceso facilita las reacciones químicas que generan H_2 y CO ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$).

El consumo de electricidad (Electricity, high voltage {CO}) se calculó en 8 kWh (requiere gasificar los 30 kg de raquis) este es un promedio de consumo de gasificadores industriales y se utiliza para mantener las temperaturas de operación (800–1200°C) y acciona equipos como ventiladores, transportadores y controladores del proceso.

Agua para enfriamiento (Cooling water): 15–20 kg. los cuales son reutilizados en el sistema, el enfriamiento húmedo se usa para reducir la temperatura del syngas antes de su posterior procesamiento.

El producto principal es Syngas sin enriquecer según lo asumido anteriormente, se producen 6 kg de syngas. El syngas (gas de síntesis) generado en este proceso proviene de la

gasificación de biomasa, en particular del raquis de palma, mediante condiciones controladas de temperatura y presión en un gasificador. El syngas es una mezcla de gases combustibles, principalmente hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y pequeñas cantidades de otros compuestos. Este gas se utiliza como materia prima para la producción de hidrógeno verde mediante etapas de purificación, como el Shift de gases y la unidad de selexol. El flujo considera una producción de 6 *kg* de syngas por *kg* de hidrógeno, de acuerdo con el inventario de gasificación planteado. La eficiencia de la gasificación y el tratamiento del syngas impactan directamente en la calidad y la pureza del hidrógeno

Las cenizas representan 2.1 *kg*, lo que equivale al 7% del peso seco del raquis. Este porcentaje está dentro del rango esperado para biomasa lignocelulósica como el raquis de palma. La diferencia de masa, que incluye gases secundarios (como H_2O y CO_2), carbón no convertido (char), y pérdidas térmicas, es:

$$30 \text{ kg (entrada de raquis)} - 6 \text{ kg (syngas)} - 2.1 \text{ kg (cenizas)} = 21.9 \text{ kg.}$$

Este valor representa un 73% del peso seco inicial y corresponde principalmente a:

- Gases secundarios generados por reacciones de volatilización y gasificación (como CO_2 y H_2O).
- Pérdidas de carbono en forma de char residual o carbono no convertido.
- Pérdidas por generación de calor durante el proceso.

Para los 30 *kg* de Palm Bunch Residue [CO], el consumo eléctrico total del Gasification Unit [RAQUIS] es de 8 kWh/kg H_2 producido. Este consumo energético incluye el mantenimiento de altas temperaturas en los reactores y el accionamiento de sistemas auxiliares.

Reactor de cambio de agua-gas (Water-Gas Shift, WGS)

Se realizó un modelo teórico de la unidad Shift, diseñado para enriquecer el syngas en hidrógeno mediante la reacción de monóxido de carbono (CO) y agua (H_2O). Se considera que el impacto ambiental del syngas proviene de las etapas previas (gasificación), y se ha modelado como parte de un proceso para la producción de hidrógeno verde. Los datos son aproximados, basados en literatura técnica, y están sujetos a ajustes en función del comportamiento real de los reactores industriales

Como resultado se genera el enriquecimiento de los 6 kg de Syngas dando como resultado Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno) + CO_2 , la Composición del syngas enriquecido es H_2 : 3.0 kg; CO_2 : 1.8 kg; CO : 0.6 kg; y CH_4, N_2, H_2O restante: 0.6 kg. estos datos son proporcionales a la reacción y dispuesto para el ejercicio de simulación. En el syngas enriquecido en hidrógeno producido tras la reacción, la proporción de H_2 aumenta significativamente, mientras que parte del CO se convierte en CO_2 haciendo más fácil su captura mediante la unidad de selexol.

Las entradas fueron como ya se mencionaron 6kg de syngas que provienen del gasificador, además de una entrada de 1.2 kh de Water for gravity (CO) la cual es adicionada a la unidad para reaccionar el CO . También tenemos 2 kWh de Electricity, high voltage {CO}| electricity production, hydro, reservoir, tropical region | Cut-off, S, energía requerida para mantener la temperatura operativa de la reacción (200-450 °C). Esta energía incluye el calor necesario para compensar las pérdidas en el sistema.

Como salida se tiene 1 kg de Water, CO la cual es el agua residual generada en la unidad shift, derivada del agua de entrada utilizada en la reacción de desplazamiento (shift). Este flujo residual contiene pequeñas cantidades de impurezas, considerando que el proceso es teórico y las composiciones no incluye contaminantes específicos. Se asume que el agua residual será tratada en una planta de tratamiento convencional fuera del alcance del sistema modelado en este ejercicio.

Unidad de Endulzamiento con Selexol (Absorción de CO₂)

En practicidad con el ejercicio y utilizando la base de datos disponibles en el software, el selexol fue cambiado por un solvente de dióxido de carbono el cual se encuentra como Monoethanolamine {RoW}| ethanolamine production | Cut-off, S, se utilizan 2 kg que son recuperables al final del proceso sin embargo no se pueden ignorar los impactos ambientales de la producción del mismo. El Selexol es un solvente polietérico formulado, cuya función principal es la captura de CO_2 y H_2S en procesos de tratamiento de gases, al igual que la monoethanolamina. Si bien el flujo seleccionado modela etanolaminas, estas sustancias también se utilizan ampliamente en la purificación de gases y tienen propiedades comparables en términos de captura de CO_2 y uso industrial.

Este enfoque es una aproximación teórica, ya que el flujo utilizado no representa exactamente el Selexol, pero se considera adecuado debido a la naturaleza similar de los procesos de producción y uso. Se asume una eficiencia y regeneración comparables al Selexol.

La entrada principal es 6 kg de Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno) + CO_2 proveniente de la unidad Shift. otra entrada es 1.5 kWh de Electricity, high voltage {CO}|

electricity production, hydro, reservoir, tropical region | Cut-off, S, que representa la electricidad de la unidad de limpieza del syngas.

Como salida se tiene Carbon dioxide 3.03 kg extraídos del syngas. El dióxido de carbono (CO_2) generado durante el proceso de endulzamiento del syngas con Selexol no es capturado ni aprovechado en esta simulación, en lugar de ser comprimido o almacenado, se considera como una emisión directa al medio ambiente. Esta decisión se alinea con el enfoque del presente ejercicio teórico, que prioriza la producción de hidrógeno verde a partir del syngas enriquecido. La falta de captura de CO_2 se debe a la exclusión de una infraestructura adicional, como sistemas de almacenamiento o transporte de CO_2 , en el modelo.

Las emisiones de CO_2 asociadas se incluyen en el balance ambiental del sistema, reflejando un escenario sin tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Este supuesto afecta la huella de carbono

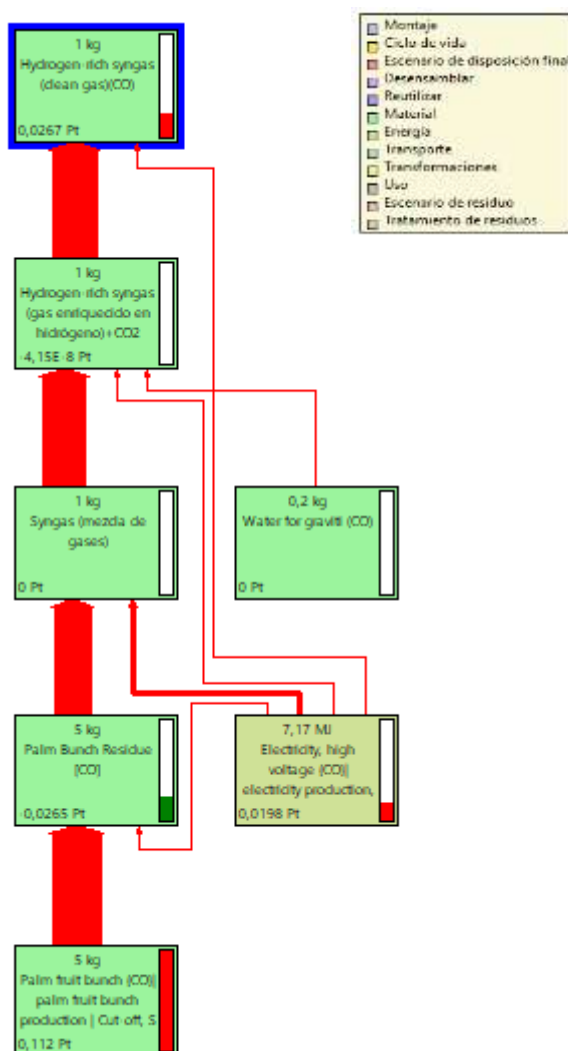
Resultados

Al correr datos del inventario en el programa SimaPro se generan 4 redes, uno de puntuación única y uno por cada una de las áreas de protección, tres áreas de daño clave (salud humana, calidad de los ecosistemas y recursos).

El primer árbol de proceso que se analiza es Salud Humana (DALY), representado en la figura 5, representa la evaluación de daño de cada uno de estos procesos, se evidencia que solo existen flujos de impacto negativos dependiente de procesos en la extracción del raquis de palma y en la unidad de Selexol para extraer el CO_2 (unidad de monoetanolamina).

Figura 5

Árbol de puntuación única de los impactos ambientales



Fuente: Autor, creado en SimaPro

El árbol de evaluación de impacto ambiental, generado mediante el método ReCiPe 2016 Endpoint (E) / World E/H, evalúa la producción de 1 kg de gas limpio rico en hidrógeno a partir de raquis de palma mediante gasificación supercrítica. Este método integra tres áreas de daño clave (salud humana, calidad de los ecosistemas y recursos), proporcionando un análisis robusto de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida del sistema.

El Impacto total del sistema es de 0.0267 Pt. Este puntaje refleja un impacto moderado, demostrando la viabilidad ambiental del uso de un material compostable como el raquis de palma, un residuo lignocelulósico de la industria del aceite de palma, para la producción de un producto de alto valor agregado como el hidrógeno.

La producción de racimos de palma tiene un impacto de 0.112 Pt. Representa la mayor fuente de impacto ambiental, debido a las prácticas agrícolas utilizadas en la producción de la materia prima base (racimos de palma). Este resultado enfatiza la importancia de implementar estrategias sostenibles en la producción agrícola, como la reducción del uso de insumos químicos y el manejo eficiente del suelo.

Residuos de racimos de palma (raquis) presenta impacto de 0.0255 Pt. Aunque menor que el impacto de la producción de biomasa, esta etapa aún genera una contribución significativa, ya que los residuos actúan como el material de entrada clave para el proceso de gasificación.

En cuanto la electricidad, su impacto es de 0.0198 Pt. La electricidad consumida en el sistema es la segunda mayor fuente de impacto ambiental. Esto subraya la necesidad de utilizar fuentes de energía más sostenibles o renovables para reducir los impactos asociados con el suministro eléctrico, tales como la energía solar fotovoltaica, eólica entre otras, es de tener en cuenta que las hidroeléctricas de donde provendría el suministro eléctrico ya están creadas y sus impactos ecosistémicos, aporte al calentamiento global, se sigue produciendo a pesar de no utilizar dicha fuente.

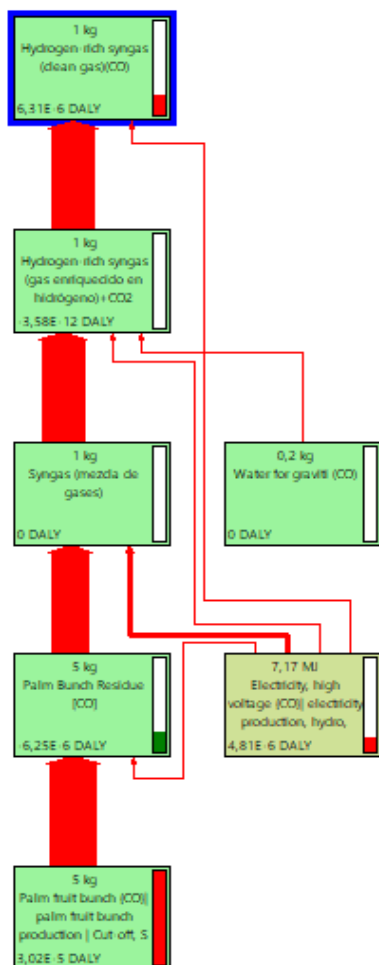
La Gasificación (mezcla de gases) y el Agua para gasificación tienen impacto de 0 Pt. Este resultado destaca que el proceso de conversión en sí no genera impactos ambientales

directos. Los principales daños están asociados a los insumos previos y las condiciones de operación. El agua es un insumo necesario en el proceso, su contribución al impacto ambiental es insignificante dentro del sistema analizado.

El árbol de evaluación de impacto en el área de salud humana, expresado en Años de Vida Ajustados por Discapacidad (DALY) representado en la Figura 6, permite analizar cómo cada etapa del ciclo de vida contribuye al daño potencial a la salud humana. La producción de racimos de palma (Palm fruit bunch production) genera un impacto de $8,0265E-5$ DALY. Este resultado evidencia que la etapa agrícola inicial es la principal contribuyente al daño en el área de salud humana. Esto se asocia con el uso de agroquímicos, la emisión de contaminantes al aire, y los posibles impactos en las comunidades cercanas a las áreas de cultivo de palma.

Figura 6

Árbol de evaluación del daño Área Salud Humana DALY



Fuente: Autor

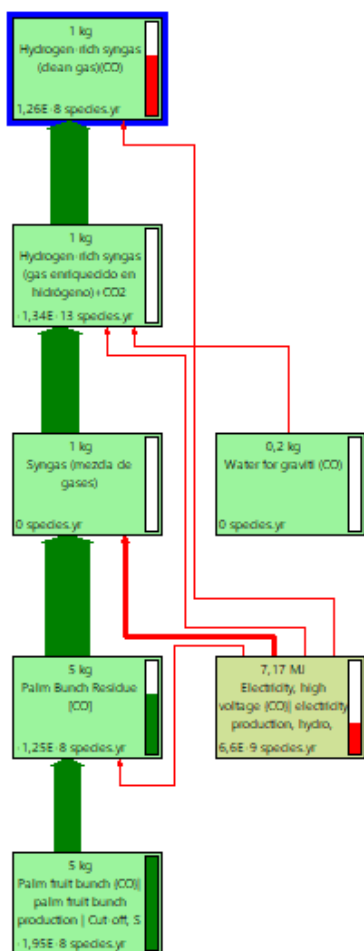
Los residuos de racimos de palma (Palm bunch residue) presentan un impacto: 5,325E-6 DALY. Representa un impacto menor en comparación con la producción de biomasa base, pero destaca la necesidad de manejar adecuadamente los residuos agrícolas para evitar emisiones contaminantes que puedan afectar la salud humana.

La electricidad tiene un impacto: $4,818E-6$ DALY. La electricidad consumida en el sistema tiene un impacto significativo en el área de salud humana. Esto se debe principalmente a las emisiones asociadas con la generación de electricidad, en este caso, mediante fuentes hidroeléctricas. Aunque la energía hidroeléctrica tiene una menor huella ambiental en comparación con otras fuentes, su impacto no es nulo.

El Gas rico en hidrógeno con CO_2 tiene un impacto: $3,588E-6$ DALY. Este impacto se deriva de la etapa de enriquecimiento de hidrógeno, indicando la relevancia de optimizar esta fase para reducir los daños potenciales a la salud humana.

El Gas limpio rico en hidrógeno (producto final) tiene un Impacto total de $6,311E-6$ DALY. Es calculado mediante el impacto acumulado del sistema para la producción de 1 kg de gas limpio refleja el efecto combinado de todas las etapas anteriores.

El análisis del daño en el área de Ecosistema, Figura 7 se expresa en términos de pérdida de especies por año ($species \cdot yr$), mostrando cómo cada etapa del ciclo de vida contribuye a la afectación de la biodiversidad. La producción de racimos de palma (Palm fruit bunch production) tiene un impacto de $1.985E-5$ $species \cdot yr$. Es la etapa con mayor daño en el área de ecosistemas, reflejando los impactos asociados con la expansión agrícola, como la deforestación, pérdida de hábitats, y el uso de fertilizantes y pesticidas que afectan los ecosistemas locales.

Figura 7*Árbol de evaluación impacto a ecosistemas**Fuente:* Autor

Los Residuos de racimos de palma (Palm bunch residue) presenta un impacto de $1,258E-5$ especies·yr. Aunque menor que la producción de la biomasa base, el uso de residuos todavía genera un impacto significativo. La electricidad presenta Impacto de $5,6E-6$ especies·yr. Debido a la fuente de electricidad utilizada. Aunque en este caso se emplea electricidad hidroeléctrica, su

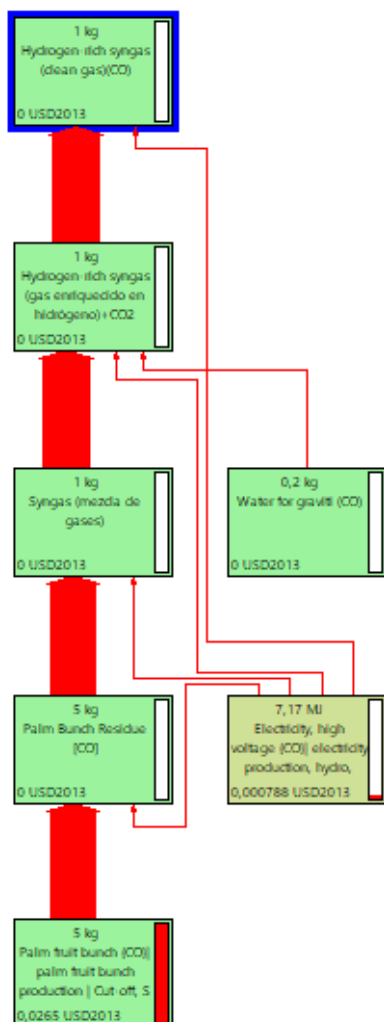
generación puede tener consecuencias en los ecosistemas, como la alteración de ríos y afectación de especies acuáticas.

El Gas rico en hidrógeno con CO_2 tiene un impacto: $1.134E-6$ species·yr. Este resultado refleja los daños acumulados asociados a las etapas previas en el ciclo de vida, dado que el proceso de conversión en sí tiene un impacto directo insignificante en el ecosistema. El gas limpio rico en hidrógeno (producto final) presenta un impacto total: $1.268E-5$ species·yr. Este valor total consolida los impactos de todas las etapas, destacando los efectos significativos en las primeras etapas de la cadena.

El análisis del área de Recursos evalúa los costos relacionados con la extracción y el agotamiento de recursos materiales y energéticos, figura 8 en la siguiente página, son expresados en USD 2013 por kilogramo de hidrógeno producido. La producción de racimos de palma (Palm fruit bunch production) tiene un Costo de 0.0265 USD 2013. La mayor contribución al área de recursos proviene de esta etapa inicial, lo que refleja el uso de insumos agrícolas como fertilizantes, agua y energía en la producción de la biomasa primaria.

Figura 8

Árbol de evaluación del daño del área Recursos



Fuente: Autor

La electricidad tiene un Costo de 0.00788 USD 2013. La generación de electricidad, principalmente a partir de fuentes hidroeléctricas, contribuye significativamente debido a los costos energéticos asociados con la operación de las unidades del proceso. El Gas limpio rico en hidrógeno (producto final) tiene un Costo total de 0.0265 USD 2013. El costo del producto final

no aumenta significativamente en comparación con las etapas previas, ya que el enfoque en el aprovechamiento de residuos minimiza los costos relacionados con el área de recursos.

A continuación, se presenta la tabla que resume los resultados y el impacto obtenido en cada una de las áreas de protección (salud humana, calidad de los ecosistemas y recursos) y en la puntuación única, para facilitar la identificación de los impactos más significativos en la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma mediante gasificación supercrítica.

Tabla 4

Tabla resumen de resultados

Área de Protección	Etapas/Proceso	Resultado (Unidad)	Impacto Obtenido	Interpretación
Puntuación Única	Impacto total del sistema	0.0267 Pt	Impacto moderado	Refleja la viabilidad ambiental del uso del raquis de palma para producir hidrógeno.
	Producción de racimos de palma	0.112 Pt	Mayor fuente de impacto	Destaca la necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles.
	Residuos de racimos de palma (raquis)	0.0255 Pt	Contribución significativa	Los residuos son clave para el proceso de gasificación.
	Electricidad	0.0198 Pt	Segunda mayor fuente de impacto	Subraya la importancia de usar energías renovables.
	Gasificación (mezcla de gases) y agua	0 Pt	Impacto insignificante	El proceso de conversión no genera impactos directos.
Salud Humana (DALY)	Producción de racimos de palma	8.0265E-5 DALY	Mayor contribuyente al daño en salud humana	Asociado con agroquímicos y emisiones contaminantes.
	Residuos de racimos de palma	5.325E-6 DALY	Impacto menor	Destaca la necesidad de manejo adecuado de residuos.
	Electricidad	4.818E-6 DALY	Impacto significativo	Relacionado con emisiones de la generación eléctrica.

Área de Protección	Etapas/Proceso	Resultado (Unidad)	Impacto Obtenido	Interpretación
Calidad de los Ecosistemas (species·yr)	Gas rico en hidrógeno con CO ₂	3.588E-6 DALY	Impacto relevante	Indica la necesidad de optimizar esta etapa.
	Gas limpio rico en hidrógeno (producto)	6.311E-6 DALY	Impacto acumulado	Refleja el efecto combinado de todas las etapas.
	Producción de racimos de palma	1.985E-5 species·yr	Mayor daño en ecosistemas	Relacionado con deforestación, pérdida de hábitats y uso de agroquímicos.
	Residuos de racimos de palma	1.258E-5 species·yr	Impacto significativo	Aunque menor, sigue siendo relevante.
	Electricidad	5.6E-6 species·yr	Impacto moderado	Asociado con alteraciones de ecosistemas acuáticos.
	Gas rico en hidrógeno con CO ₂	1.134E-6 species·yr	Impacto menor	Daños acumulados de etapas previas.
Recursos (USD 2013)	Gas limpio rico en hidrógeno (producto)	1.268E-5 species·yr	Impacto total	Consolidación de impactos en todas las etapas.
	Producción de racimos de palma	0.0265 USD 2013	Mayor contribución al área de recursos	Refleja el uso de insumos agrícolas.
	Electricidad	0.00788 USD 2013	Contribución significativa	Costos energéticos asociados a la generación eléctrica.
Categorías de Impacto	Gas limpio rico en hidrógeno (producto)	0.0265 USD 2013	Costo total	El aprovechamiento de residuos minimiza costos adicionales.
	Syngas enriquecido (CO ₂)	Varios (ver descripción)	(ver Impactos negativos significativos en calentamiento global, ozono, toxicidad, etc.)	Dominado por emisiones de gases de efecto invernadero y compuestos que afectan la capa de ozono.
	Syngas limpio (CO)	Varios (ver descripción)	(ver Aportes positivos en calentamiento global y otras categorías)	No presenta emisiones significativas de gases de efecto invernadero.
	Electricidad hidroeléctrica	Varios (ver descripción)	(ver Contribución mínima en la mayoría de las categorías)	Aunque es una fuente más limpia, no está libre de impactos.

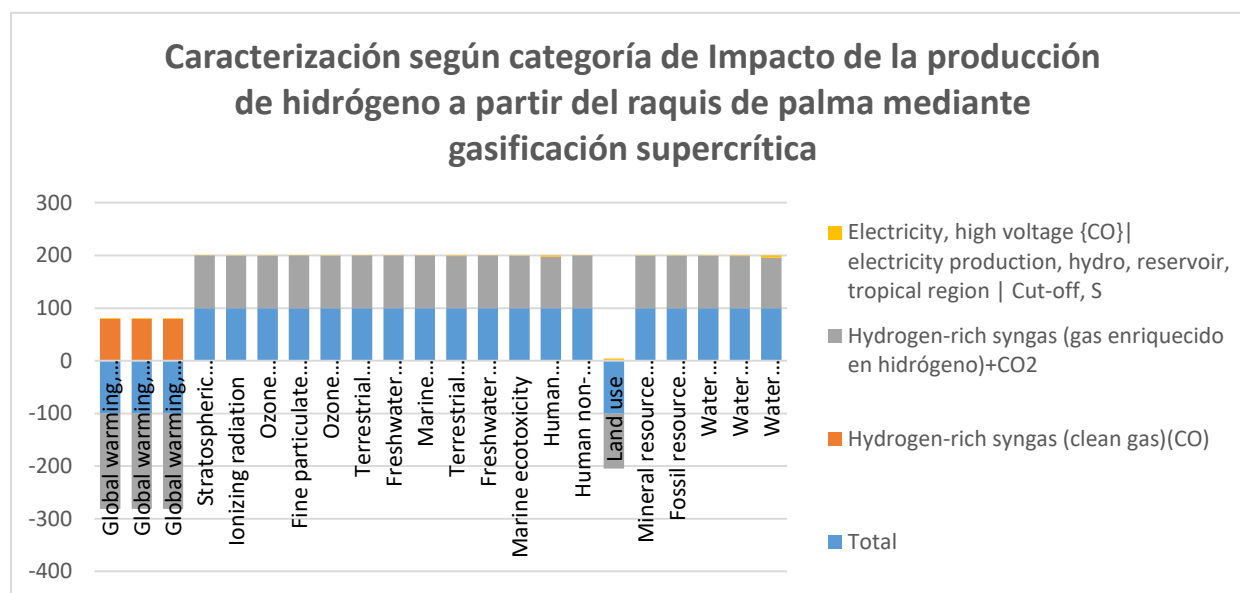
Graficas de resultados

La Figura 9 presenta la caracterización de los impactos ambientales asociados a la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma mediante gasificación supercrítica, desglosada en diversas categorías de impacto. Este análisis tiene como objetivo identificar los procesos clave y las áreas críticas que contribuyen significativamente a los impactos ambientales, con el fin de proponer posibles intervenciones para mejorar la sostenibilidad del sistema.

Las unidades de impacto están normalizadas al 100% o -100%, donde los valores positivos indican contribuciones beneficiosas y los negativos representan impactos adversos.

Figura 9

Caracterización según categoría de Impacto



Fuente. Autor

En la Tabla 5 se detalla la caracterización por categoría de impacto, desglosando las contribuciones de tres procesos principales:

- Hydrogen-rich syngas (clean gas) (CO): Representa el gas rico en hidrógeno sin emisiones significativas de CO₂.
- Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno + CO₂): Incluye el gas rico en hidrógeno con emisiones de CO₂ asociadas.
- Electricidad hidroeléctrica de alta tensión: Corresponde a la energía utilizada en el proceso, generada a partir de fuentes hidroeléctricas.

Cada categoría de impacto se expresa en unidades específicas, como DALY (Años de Vida Ajustados por Discapacidad) para salud humana, especies·yr (pérdida de especies por año) para ecosistemas, y USD 2013 para recursos. Estas unidades permiten cuantificar y comparar los impactos de manera precisa. Además, se presenta una evaluación del daño por área de interés (salud humana, ecosistemas y recursos), que consolida los impactos totales de cada proceso. Esta información es fundamental para identificar las áreas críticas donde se deben implementar mejoras, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el manejo adecuado de residuos y la optimización del uso de recurso

Tabla 5

Tabla de Caracterización por categoría de impacto.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Hydrogen-rich syngas (clean gas)(CO)	Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno)+CO ₂	Electricity, high voltage {CO} electricity production, hydro,
----------------------	--------	-------	--------------------------------------	---	---

		reservoir, tropical region Cut-off, S			
Global warming, Human health	DALY	-7,9266E-06	6,3125E-06	-1,4357E-05	1,1793E-07
Stratospheric ozone depletion	DALY	4,0228E-09	0	4,0218E-09	9,8676E-13
Ionizing radiation	DALY	1,6621E-10	0	1,6497E-10	1,2453E-12
Ozone formation, Human health	DALY	7,97E-10	0	7,9226E-10	4,7376E-12
Fine particulate matter formation	DALY	8,0509E-07	0	8,0348E-07	1,6069E-09
Human carcinogenic toxicity	DALY	1,9892E-05	0	1,947E-05	4,2228E-07
Human non-carcinogenic toxicity	DALY	2,2299E-05	0	2,2236E-05	6,2525E-08
Water consumption, Human health	DALY	1,1916E-08	0	1,1872E-08	4,4156E-11
Global warming, Terrestrial ecosystems	species.yr	-1,5854E-08	1,2625E-08	-2,8714E-08	2,3585E-10
Global warming, Freshwater ecosystems	species.yr	-4,3246E-13	3,4441E-13	-7,833E-13	6,4348E-15
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	species.yr	1,1754E-10	0	1,1685E-10	6,9135E-13
Terrestrial acidification	species.yr	1,5748E-09	0	1,574E-09	8,8867E-13
Freshwater eutrophication	species.yr	6,7587E-10	0	6,7558E-10	2,9208E-13
Marine eutrophication	species.yr	1,0937E-12	0	1,0936E-12	6,2272E-17
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	5,5431E-11	0	5,4724E-11	7,0722E-13
Freshwater ecotoxicity	species.yr	3,4526E-11	0	3,4472E-11	5,3539E-14

Marine ecotoxicity	species.yr		1,254E-08	0	1,2493E-08	4,6441E-11
Land use	species.yr		-1,1988E-08	0	-1,253E-08	5,4235E-10
Water consumption, Terrestrial ecosystem	species.yr		8,6571E-11	0	8,5632E-11	9,3901E-13
Water consumption, Aquatic ecosystems	species.yr		3,2697E-14	0	3,1227E-14	1,4697E-15
Mineral resource scarcity	USD2013		0,00084461	0	0,00083911	5,5009E-06
Fossil resource scarcity	USD2013		0,02646753	0	0,02637414	9,3385E-05

Daño de categoría	Unidad	Total	Hydrogen-rich syngas (clean gas)(CO)	Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno)+CO2	Electricity, high voltage {CO} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, S
Human health	DALY	3,5087E-05	6,3125E-06	2,817E-05	6,0439E-07
Ecosystems	species.yr	-1,2756E-08	1,2625E-08	-2,621E-08	8,2823E-10
Resources	USD2013	0,02731214	0	0,02721326	9,8886E-05

Nota: esta tabla presenta los valores generados por el programa SimaPro al aplicar el método ReCiPe 2016 Endpoint a los valores del inventario generado en el diagrama de flujo.

Se destaca los principales impactos ambientales, identificando los procesos clave y áreas críticas para posibles intervenciones. La gráfica presenta los impactos ambientales en diversas categorías de impacto y desglosa las contribuciones específicas de tres procesos clave, Hydrogen-rich syngas (clean gas)(CO), Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno +

CO₂), Electricidad hidroeléctrica de alta tensión (Electricity, high voltage {CO}| electricity production, hydro, reservoir, tropical region), Las unidades están normalizadas al 100% o -100%, representando impactos positivos o negativos, respectivamente.

En la categoría de calentamiento Global, Human health, Terrestrial ecosystems, y Freshwater ecosystems, El syngas enriquecido tiene impactos negativos significativos (aproximadamente -181% en todas las categorías). El syngas limpio tiene un aporte positivo considerable (cerca de 79,6%). La electricidad hidroeléctrica tiene una contribución muy baja (1,4%). El impacto negativo del syngas enriquecido se debe a las emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción, como se describe en la metodología, mientras que el syngas limpio no presenta este tipo de emisiones.

En la categoría de degradación de la capa de ozono (Stratospheric ozone depletion), el impacto es dominado por el syngas enriquecido, con una contribución del 99,97%, mientras que la electricidad contribuye de forma mínima (0,02%). La etapa de enriquecimiento tiene un impacto crítico en esta categoría relacionado con la liberación de compuestos que afectan la capa de ozono.

En la categoría de radiación Ionizante y Formación de Ozono, la Ionizing radiation, el syngas enriquecido contribuye con un 99,25%, y la electricidad apenas 0,75%. En la Ozone formation (Human health y Terrestrial ecosystems), el impacto del syngas enriquecido es también predominante (cerca de 99,4%). Estos impactos están asociados con emisiones que afectan directamente la calidad del aire y la radiación.

En la categoría de Formación de Material Particulado (Fine particulate matter formation), el syngas enriquecido domina con un impacto del 99,8%, mientras que la electricidad tiene una

contribución insignificante (0,2%), este impacto refleja la importancia de controlar las emisiones de partículas finas durante la producción de syngas enriquecido.

En la categoría de ecotoxicidad y Toxicidad Humana, Terrestrial ecotoxicity, el impacto principal proviene del syngas enriquecido (98,72%). En Freshwater ecotoxicity la Contribución del syngas enriquecido (99,84%). En Marine ecotoxicity es de similar comportamiento (99,63%). En Human carcinogenic toxicity el impacto predominante del syngas enriquecido (97,88%). Estos datos destacan que las emisiones de contaminantes y residuos químicos afectan de manera desproporcionada los ecosistemas y la salud humana.

En la categoría de uso del Suelo (Land use), el syngas enriquecido tiene un impacto negativo significativo (-104,52%), mientras que la electricidad muestra un aporte positivo (4,52%). El impacto negativo del syngas enriquecido refleja la alta demanda de biomasa y posiblemente el cambio de uso del suelo para producir la materia prima.

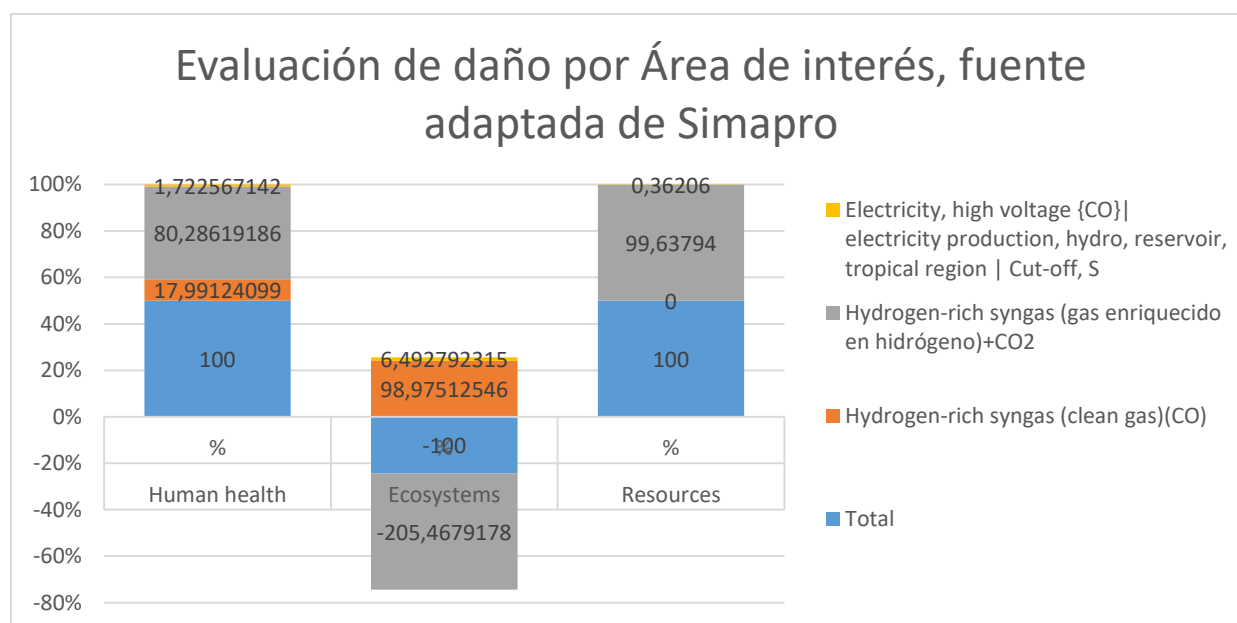
En la categoría de Escasez de Recursos Minerales y Fósiles, en Mineral resource scarcity y Fossil resource scarcity, ambos impactos son dominados por el syngas enriquecido (cerca de 99,6%). El uso intensivo de recursos fósiles y minerales en la producción de syngas enriquecido es evidente y plantea un desafío para su sostenibilidad.

En la categoría de consumo de Agua, en Water consumption (Human health, Terrestrial ecosystems, Aquatic ecosystems), el syngas enriquecido domina (entre 95,5% y 99,6%), con la electricidad contribuyendo de manera mínima. El impacto en el consumo de agua se debe a los requerimientos elevados de agua en las etapas de purificación y procesamiento.

En la figura 10 se describe los impactos ambientales en tres áreas de daño, Salud Humana, Ecosistemas y Recursos, expresados en porcentajes, cada categoría de daño está asociada a las contribuciones de tres procesos clave en la producción de hidrógeno a partir de raquis de palma, estas son, Hydrogen-rich syngas (clean gas)(CO), Hydrogen-rich syngas (gas enriquecido en hidrógeno) + CO_2 , y Electricidad hidroeléctrica de alta tensión en región tropical (Electricity, high voltage {CO}| electricity production, hydro, reservoir, tropical region).

Figura 10

Grafica de barras de la evaluación del daño por categorías



Fuente: Autor

En el área de Salud Humana la fase de Hydrogen-rich syngas (clean gas) contribuye con el 17,99% del impacto total. Hydrogen-rich syngas (enriquecido en hidrógeno + CO_2), es el principal contribuyente, con un impacto del 80,29%. La electricidad hidroeléctrica tiene un impacto mínimo, representando solo el 1,72% del total. La mayor parte del impacto en salud

humana proviene del syngas enriquecido, debido a emisiones indirectas durante las etapas de purificación y enriquecimiento del hidrógeno, como gases contaminantes (CO_2 , NO_x). La electricidad hidroeléctrica tiene un impacto bajo, indicando que su contribución al daño en salud es menor.

En el área de ecosistemas la etapa de Hydrogen-rich syngas (clean gas) contribuye de manera positiva al impacto ambiental (98,98%). Hydrogen-rich syngas (enriquecido en hidrógeno + CO_2) genera un impacto negativo significativo (-205,47%), probablemente asociado a la degradación de ecosistemas debido a la producción de biomasa y emisiones indirectas. La Electricidad hidroeléctrica, contribuye con un impacto moderado (6,49%). El syngas enriquecido en hidrógeno tiene un impacto negativo marcado en los ecosistemas, reflejando posiblemente problemas como el cambio de uso de suelo y la pérdida de biodiversidad por la producción de biomasa. La electricidad hidroeléctrica tiene un impacto positivo moderado en esta categoría, aunque puede estar relacionada con alteraciones en los ecosistemas acuáticos. La electricidad hidroeléctrica tiene un impacto mínimo, lo que indica un uso eficiente de los recursos.

En el área Recursos el Hydrogen-rich syngas (clean gas) no genera impacto en esta categoría (0%). El Hydrogen-rich syngas (enriquecido en hidrógeno + CO_2) representa casi todo el impacto en recursos (99,64%). La electricidad hidroeléctrica contribuye mínimamente con solo 0,36%. El syngas enriquecido en hidrógeno tiene un impacto significativo en los recursos, debido al consumo intensivo de insumos como agua y energía en el proceso de enriquecimiento.

Discusión de Resultados

La presente investigación evaluó el impacto ambiental del proceso de producción de hidrógeno mediante gasificación de raquis de palma a través de diversas categorías de impacto ambiental aplicado mediante SimaPro versión 9.6.0.1. Los resultados revelaron información relevante sobre las etapas críticas del proceso y las áreas prioritarias para la mejora.

El análisis muestra que el syngas enriquecido en hidrógeno es el principal contribuyente negativo en la mayoría de las categorías de impacto ambiental, incluyendo calentamiento global, degradación de la capa de ozono, formación de material particulado, ecotoxicidad terrestre y acuática, y consumo de recursos hídricos y fósiles. En la simulación se tiene en cuenta que el CO_2 producido es liberado para no ampliar el proceso de producción. Esto refleja la naturaleza intensiva en recursos y la generación de subproductos contaminantes durante su producción. En particular, la contribución del syngas enriquecido al calentamiento global, tanto en términos de salud humana como de ecosistemas terrestres y acuáticos, es crítica (-181% en todas las subcategorías). Este impacto negativo está relacionado con las emisiones generadas en etapas como la gasificación y la purificación de gases, especialmente la liberación de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. Según Useros Fernández (2013), el aumento de los gases de efecto invernadero, producto de actividades humanas como la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales, constituye el principal factor detrás del cambio climático y sus efectos devastadores sobre diversos ecosistemas. Por otro lado, el impacto en la degradación de la capa de ozono (99,97% del impacto total) y en la formación de ozono troposférico es notable. Esto sugiere que el proceso de enriquecimiento genera compuestos

volátiles con alto potencial de daño ambiental, debido al uso de reactores de alta presión y temperaturas elevadas.

En contraste, el syngas limpio (gas enriquecido sin CO_2) presenta un comportamiento ambiental más favorable. Su contribución positiva al calentamiento global (79,6%) indica que este subproducto tiene un menor impacto en comparación con el syngas enriquecido. Este resultado resalta la importancia de optimizar las condiciones del proceso para maximizar la producción de syngas limpio, reduciendo simultáneamente los impactos negativos asociados con el enriquecimiento. el proceso de limpieza o purificación del syngas incluye la eliminación de impurezas como amoníaco, cianuro de hidrógeno, cloruros y derivados de azufre, los cuales pueden causar corrosión, emisiones perjudiciales y problemas en procesos posteriores debido a su naturaleza contaminante (Acuña Ramírez, 2021). Estas etapas de limpieza son cruciales para cumplir con los requisitos de calidad y normativa medioambiental, especialmente en aplicaciones avanzadas como la producción de productos químicos o combustibles sintéticos, que exigen una calidad de syngas más estricta.

La electricidad hidroeléctrica de alta tensión utilizada en las etapas del proceso mostró una contribución mínima en todas las categorías de impacto ambiental, generalmente inferior al 1,5%. Si bien su aporte es bajo, es importante considerar que este tipo de energía también presenta impactos negativos moderados en categorías como la ecotoxicidad acuática y terrestre, vinculados principalmente a las alteraciones en los ecosistemas locales generadas por los embalses. Los principales riesgos asociados a las centrales hidroeléctricas incluyen la reducción del oxígeno en el agua, cambios en la temperatura, estratificación de los sedimentos y una mayor proliferación de algas, lo que puede afectar significativamente la biodiversidad acuática (Oviedo-

Ocaña, E. R., 2018) Además, la construcción de embalses provoca la disminución de especies nativas y promover la diseminación de especies exóticas más adaptadas a las nuevas condiciones, afectando la población diversa de fauna (Oviedo-Ocaña, E. R., 2018)

El impacto negativo en la categoría de uso del suelo (-104,52%) se debe al suministro de biomasa (raquis de palma) para el proceso de gasificación. Este impacto se relaciona con el uso intensivo de tierras agrícolas y las alteraciones en el ecosistema local debido a la producción de la materia prima. Además, las categorías de escasez de recursos minerales y fósiles confirman la naturaleza demandante de insumos de este tipo, destacando la necesidad de implementar estrategias de gestión más sostenibles. el cultivo y procesamiento de palma aceitera genera una importante cantidad de residuos sólidos y líquidos, como el raquis, que pueden ocasionar impactos ambientales negativos si no son gestionados adecuadamente (Leyva Ricardo et al. 2019). La gasificación del raquis de palma surge como prácticas sostenibles para generar un valor agregado a la biomasa y reducir los efectos adversos en el medio ambiente.

El consumo de agua se identificó como otra categoría crítica, con una contribución superior al 95% atribuida al syngas enriquecido. Este impacto refleja los altos requerimientos hídricos del proceso de gasificación y purificación, particularmente en la etapa de captura y separación de gases. Asimismo, la formación de material particulado mostró un impacto significativo (99,8% causado por el syngas enriquecido), lo cual resalta la importancia de implementar tecnologías de control de emisiones durante la conversión de la biomasa. En este contexto, es fundamental considerar que la extracción de aceite de palma genera residuos sólidos y líquidos que también pueden causar un impacto ambiental negativo, como se menciona en

estudios previos sobre el manejo del raquis generado en las extractoras de palma aceitera para la elaboración de compost (Leyva Ricardo et al., 2019).

Limitaciones Del Modelo Teórico

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la ausencia de datos experimentales que respalden los valores simulados en el software SimaPro 9.6.0.1. puede no capturar completamente la variabilidad operativa y las posibles mejoras técnicas. Sin embargo, este tipo de estudios generan bases científicas para la implementación de nuevas tecnologías energéticas diferentes a los combustibles fósiles

Conclusiones

El análisis de ciclo de vida permitió identificar que la producción de hidrógeno a partir del raquis de palma mediante gasificación supercrítica genera impactos ambientales significativos, particularmente en las categorías de consumo de agua y generación de material particulado. Estos resultados resaltan la necesidad de optimizar tanto el proceso de gasificación como las tecnologías de purificación asociadas para mitigar estos impactos. Además, se evidenció que el uso intensivo de agua y las emisiones de partículas finas ($PM_{2.5}$) representan los mayores desafíos ambientales, con más del 95% y 99.8% del impacto atribuido al syngas enriquecido, respectivamente. Las $PM_{2.5}$, al ser partículas menores a 2.5 micrómetros, tienen la capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio y el torrente sanguíneo, lo que las convierte en un factor crítico para la salud humana y la calidad del aire. Estos hallazgos son fundamentales para implementar mejoras en el sistema y promover su viabilidad ambiental

El estudio se enfocó en evaluar la producción de 1 kg de hidrógeno verde a partir del raquis de palma, un residuo agroindustrial abundante y de bajo valor económico. Se definió un alcance teórico que incluyó todas las etapas del ciclo de vida, desde la producción de la materia prima hasta la obtención del hidrógeno gaseoso. Este enfoque permitió identificar las etapas más críticas, como la producción de racimos de palma y la generación de syngas enriquecido, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos.

Se desarrolló un inventario detallado que incluyó las entradas (como agua, energía y raquis de palma), las salidas (hidrógeno gaseoso y emisiones) y los procesos intermedios (gasificación y purificación). Este inventario permitió cuantificar los flujos de materiales y energía, así como las emisiones asociadas, proporcionando una base robusta para el análisis de

impacto ambiental. La metodología utilizada, basada en el software SimaPro 9.6.0.1 y el método ReCiPe 2016, aseguró una evaluación integral y estandarizada de los impactos.

El análisis reveló que las áreas de daño clave (salud humana, ecosistemas y recursos naturales) están influenciadas principalmente por el consumo de agua y la formación de material particulado. En salud humana, el syngas enriquecido contribuyó significativamente a la toxicidad y la formación de partículas finas. En ecosistemas, la producción de racimos de palma mostró el mayor impacto debido a la deforestación y el uso de agroquímicos. En recursos naturales, el uso intensivo de agua y energía destacó como un desafío crítico. Estos resultados subrayan la importancia de implementar tecnologías de captura de emisiones y optimizar el uso de recursos, tales como la optimización del consumo de agua, con la recirculación de agua, tecnologías de tratamiento de agua y captación de agua de lluvia. En el caso de la reducción de emisiones de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), se puede aplicar Filtros de alta eficiencia tecnologías de captura de carbono.

La interpretación de los resultados gráficos permitió identificar que las categorías de impacto más relevantes son calentamiento global, degradación de la capa de ozono, formación de material particulado y toxicidad humana y ecotoxicológica. El syngas enriquecido dominó los impactos negativos en estas categorías, mientras que el syngas limpio mostró contribuciones positivas. Estos hallazgos resaltan la necesidad de optimizar la etapa de enriquecimiento para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y compuestos tóxicos.

El estudio sugiere varias oportunidades de mejora, como la implementación de tecnologías de captura de emisiones en la etapa de enriquecimiento, el uso de fuentes de energía renovable para reducir el impacto de la electricidad, y la optimización del consumo de agua en las etapas de purificación. A pesar de sus limitaciones, el proceso de gasificación supercrítica del

raquis de palma ofrece una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, promoviendo el uso eficiente de residuos agroindustriales y contribuyendo a la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono.

Este estudio establece una base teórica sólida para el desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas, como la producción de hidrógeno verde, promoviendo el uso eficiente de los residuos agroindustriales en favor de la sostenibilidad ambiental y económica. Sin embargo, la ausencia de datos experimentales y el uso exclusivo de simulaciones pueden limitar la precisión de los resultados, lo que destaca la necesidad de realizar estudios experimentales complementarios para validar y mejorar la confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

Recomendaciones

Incorporar mejoras en las etapas de captura y separación de gases para reducir el consumo de agua y mitigar la formación de partículas. Esto podría incluir la implementación de tecnologías avanzadas de control de emisiones y recuperación de agua en los procesos.

Complementar los resultados obtenidos mediante simulaciones con datos experimentales para validar los impactos ambientales y evaluar la viabilidad técnica del proceso a mayor escala. Esto permitirá identificar con mayor precisión las áreas críticas de mejora.

Realizar estudios adicionales que evalúen el impacto económico y social de la implementación de esta tecnología en regiones productoras de palma, como Bucaramanga y Cartagena, para considerar su escalabilidad y aceptación en comunidades locales.

Compartir los resultados del proyecto con comunidades académicas y profesionales, fomentando el intercambio de conocimiento sobre la producción sostenible de hidrógeno. Además, este tipo de proyectos contribuyen significativamente al fortalecimiento del perfil profesional de ingenieros ambientales, como es el caso de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Actions PtX Hub Colombia. (2023). Hidrógeno Verde: criterios de sostenibilidad desde PtX Hub Berlín Noviembre 2023 Catalyzing Sustainable Green Hydrogen Fuels and Feedstocks. <https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/TercerSimposio-Presentacion-3-2023.pdf>
- Alamu, O. J., Ojolo, S. J., & Oke, S. A. (2013). Oil palm biomass as feedstock for biofuel production. In *Green Energy and Technology* (Vol. 138, pp. 77–106). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-4451-70-3_3
- Azadi, P., & Farnood, R. (2012). Screening of nickel catalysts for selective hydrogen production using supercritical water gasification of glucose. *Green Chem*, 1766-1777.
- Bayona Roa, C. A., García Navarro, J. G., Jeisson, G., & Ricaurte, H. (2023). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. *Palmas*, 44(1), 51–64. <https://doi.org/10.56866/01212923.13806>
- Bermúdez García, R. E., & Caicedo Bastidas, A. M. (2022). Análisis termodinámico y cinética de reacción del proceso de gasificación de raquis de palma para la cogeneración de energía eléctrica y calor. Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8857/1/4171221-2022-1-IM.pdf>
- Budzianowski, W. M. (2016). Life cycle assessment of hydrogen production technologies based on fossil fuels: Comparative analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(43), 19405-19426. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.141

- Cantuca, S., Quevedo, E., R., E. A. P., & Coral, O. C. (2001). Reconocimiento taxonómico de plantas asociadas con la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en plantaciones de la Zona de Tumaco. *Palmas*, 22(1), 27–37. <https://doi.org/10.56866/ISSN.0121-2923>
- Carrasco, M., & Rodríguez, G. (2021). Comparación del impacto ambiental de alternativas de vivienda provisoria mediante el análisis de ciclo de vida. *Revista Internacional de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 8(3), 201–219. <https://repositorio.pucp.edu.pe/items/e97f04d8-badf-41d1-b05d-5110966dd9ba>
- Castiblanco, O., & Cárdenas, D. J. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 299–311. <https://doi.org/10.15446/GA.V23N2.86466>
- Dalimin, M. (2007). Renewable energy update: Malaysia. *Renewable Energy*, 435-439.
- Esteban, R., & García, B. (2022). ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y CINÉTICA DE REACCIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE RAQUIS DE PALMA PARA LA COGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y CALOR. https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8857/1/4171221-2022-1-IM.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE). (2024.). Informe final de consultoría. Recuperado de https://fenoge.gov.co/documentos-pdf/convocatorias/h2col-higrogeno/3Informe_final_consultoria.pdf
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators...

- Gómez-Garza, R. J. (2016). Análisis del ciclo de vida de la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual del sector agroindustrial. (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México. Recuperado de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/16167/1/Tesis%20ACV%20-%20Rodrigo%20Javier%20Gomez%20Garza.pdf>
- Gonzalez, A., & Peralta, Y. (2016). Realistic Simulation of a Biotechnological Process for Hydrogen Production from Empty Palm Fruit Bunches. *AIDIC*, 1396-1402.
- Guo, L., Jin, H., & Lu, Y. (2017). Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 1193-1202. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.08.011>
- Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., & Wang, Y. (2019). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139(4), 244-260. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.08.039>
- Heidi-Teran, Diana-Giraldo, Gabriel-Chiappo, Maria del Pilar-Noriega, & Farid-Chejne Janna. (2024). Characterization of oil palm biomass, derived materials, and applications. Repositorio Universidad de los Andes. <https://doi.org/10.51573/Andes.PPS39.SS.BBB.7>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>

ISO. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/37456.html>

Leonardo, A., & Escudero, V. (2019). Alternativas ambientales para el aprovechamiento de la biomasa residual de palma aceitera (*elaeis guineensis*) en procesos industriales y agrícolas. *Publicaciones e Investigación*, 13(2), 77–92.

<https://doi.org/10.22490/25394088.3467>

Vargas-Mira, A., Zuluaga-García, C., & Gonzalez-Delgado, A. D. (2019). A Technical and Environmental Evaluation of

Six Routes for Industrial Hydrogen Production from Empty Palm Fruit Bunches. *ACS Omega*, 4(13), 15457–15470. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01860>

Apéndices

Apéndice A *Tabla de categoría de impacto*

Tabla 6

Tabla de descripción de categorías de impacto evaluadas en el método ReCiPe 2016 Endpoint (E)

Categoría	Descripción
Global Warming, Human Health	Potencial de calentamiento global relacionado con impactos en la salud humana debido a gases de efecto invernadero.
Global Warming, Terrestrial	Impacto del calentamiento global en ecosistemas terrestres.
Global Warming, Freshwater	Consecuencias del calentamiento global en ecosistemas de agua dulce.
Stratospheric Ozone Depletion	Agotamiento de la capa de ozono estratosférico, lo que incrementa la radiación ultravioleta.
Ionizing Radiation	Exposición a radiación ionizante que puede afectar a la salud humana y el medio ambiente.
Ozone Formation, Human Health	Formación de ozono troposférico que impacta negativamente la salud respiratoria humana.
Fine Particulate Matter Formation	Formación de material particulado fino, responsable de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
Ozone Formation, Terrestrial	Efectos del ozono troposférico sobre ecosistemas terrestres.
Terrestrial Acidification	Acidificación de suelos terrestres, lo que afecta la vegetación y organismos del suelo.
Freshwater Eutrophication	Enriquecimiento excesivo de nutrientes en sistemas de agua dulce, causando proliferación de algas.

Marine Eutrophication	Proceso similar al de eutrofización, pero en ambientes marinos.
Terrestrial Ecotoxicity	Toxicidad ambiental en sistemas terrestres debido a contaminantes.
Freshwater Ecotoxicity	Toxicidad ambiental en ecosistemas de agua dulce por productos químicos tóxicos.
Marine Ecotoxicity	Toxicidad ambiental en sistemas marinos causada por contaminantes.
Human Carcinogenicity	Impacto relacionado con sustancias cancerígenas para los humanos.
Human Non-Carcinogenicity	Impacto de sustancias tóxicas no cancerígenas en la salud humana.
Land Use	Cambios en el uso de la tierra que afectan biodiversidad y servicios ecosistémicos.
Mineral Resource Scarcity	Escasez de recursos minerales debido a la explotación intensiva.
Fossil Resource Scarcity	Escasez de recursos fósiles causada por su sobreexplotación.
Water Consumption	Uso del agua dulce que afecta su disponibilidad para otras actividades o ecosistemas.
