



PUBLICACIÓN:

*“TRANSFORMANDO ACEITES DE COCINA USADOS EN ENERGÍA
SOSTENIBLE: UN ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS CON
PERSPECTIVA DE CICLO DE VIDA.”*

CÁTEDRA FUNDACIÓN REPSOL DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA
EN LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO SOBRE ECONOMÍA
CIRCULAR

Autor: Crisbel Cárdenas, Estudiante del Aula de la Universidad del País Vasco

Autor: Estibaliz Sáez de Cámara, Profesor del Aula de la Universidad del País Vasco

Resumen de la Publicación:

Evaluando el potencial de los aceites de cocina usados para producir biocombustibles sostenibles mediante un análisis de ciclo de vida.

Introducción

Este trabajo estudia la valorización de aceites de cocina usados (UCO, *Used Cooking Oil*) como materia prima prioritaria para la producción de biocombustibles sostenibles. Se comparan dos tecnologías de conversión, por un lado, la obtención de biodiésel UCOME (*Used Cooking Oil Methyl Ester*) mediante transesterificación y, por otro lado, la obtención de biodiésel HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) por hidroprocesamiento. Con el objetivo de conocer los impactos ambientales derivados de ambas tecnologías, se ha aplicado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el programa OpenLCA, la base de datos Ecoinvent v3.10, y la metodología de impactos ReCiPe 2016. Los resultados evidencian que el UCOME presenta un mejor desempeño ambiental que el diésel fósil en la mayoría de las categorías ambientales. Mientras, el HVO muestra sus mejores resultados cuando se produce mediante hidrógeno verde, reduciendo de forma significativa el impacto asociado a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. El estudio confirma la importancia de aplicar el ACV como metodología para identificar las tecnologías más convenientes para la valorización de aceites de cocina usados y orientar la transición hacia modelos energéticos circulares y descarbonizados.

Transformando aceites de cocina usados en energía sostenible: un análisis comparativo de tecnologías con perspectiva de ciclo de vida

Resumen

Este trabajo estudia la valorización de aceites de cocina usados (UCO, *Used Cooking Oil*) como materia prima prioritaria para la producción de biocombustibles sostenibles. Se comparan dos tecnologías de conversión, por un lado, la obtención de biodiésel UCOME (*Used Cooking Oil Methyl Ester*) mediante transesterificación y, por otro lado, la obtención de biodiésel HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) por hidroprocesamiento. Con el objetivo de conocer los impactos ambientales derivados de ambas tecnologías, se ha aplicado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el programa OpenLCA, la base de datos Ecoinvent v3.10, y la metodología de impactos ReCiPe 2016. Los resultados evidencian que el UCOME presenta un mejor desempeño ambiental que el diésel fósil en la mayoría de las categorías ambientales. Mientras, el HVO muestra sus mejores resultados cuando se produce mediante hidrógeno verde, reduciendo de forma significativa el impacto asociado a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. El estudio confirma la importancia de aplicar el ACV como metodología para identificar las tecnologías más convenientes para la valorización de aceites de cocina usados y orientar la transición hacia modelos energéticos circulares y descarbonizados.

Transformando aceites de cocina usados en energía sostenible: un análisis comparativo de tecnologías con perspectiva de ciclo de vida

Contexto

El aprovechamiento de aceites de cocina usados (UCO) para producir biocombustibles representa una alternativa estratégica dentro de la economía circular y la transición hacia un modelo energético sostenible (IEA, 2025). En España, tanto el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), como la Directiva RED II (Renewable Energy Directive II) (Parlamento Europeo y Consejo, 2018) promueven la innovación en combustibles biodiésel como UCOME y HVO. De hecho, sitúan el aceite de cocina usado como alternativa prioritaria, al transformarse en energía sin competir con los cultivos para uso alimentario.

En este contexto, el aceite usado de cocina se ha consolidado como una de las fuentes más sostenibles para la producción de biocombustibles. En 2022, representó más del 35 % de las materias primas empleadas en Europa para la fabricación de biocombustible, reflejando su papel estratégico en la transición energética y la valorización de residuos (MITECO, 2025a).

La corporación Repsol ha asumido un rol importante en esta transición mediante la puesta en marcha de una planta en Cartagena en la que se produce biocombustible hidrotratado HVO a partir de UCO (Repsol, 2024). Este tipo de proyectos contribuyen a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y a valorizar un residuo de alta disponibilidad, cuya gestión inadecuada puede generar impactos negativos sobre el medio ambiente. Para ponerlo en perspectiva, se estima que un solo litro de aceite usado puede contaminar hasta 1000 litros de agua, afectando a la calidad del agua potable y multiplicando los costes de depuración (MITECO, 2025b). No obstante, la sostenibilidad de esta alternativa está estrechamente vinculada a la tecnología de producción empleada para la fabricación del biocombustible. Por esta razón, uno de los objetivos principales de este trabajo es evaluar la producción de biocombustible a partir de UCO desde una perspectiva ambiental.

Tecnologías analizadas

En el presente estudio se han comparado dos tecnologías de producción de biocombustibles a partir de UCO: la obtención de éster metílico de aceite usado de cocina (UCOME, *Used Cooking Oil Methyl Ester*) y FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) mediante transesterificación, y la obtención de aceite vegetal hidrotratado (HVO, *Hydrotreated Vegetable Oil* por hidroprocesamiento. Ambas tecnologías muestran ventajas y limitaciones en cuanto a eficiencia, impacto ambiental y calidad del producto final (Shahid et al., 2011 y Bezergianni et al., 2013). La tabla 1 presenta una comparación entre los procesos de transesterificación y de hidroprocesamiento aplicados a aceites de cocina usados. Se destacan sus condiciones operativas, la aplicabilidad de UCO como materia prima y los productos finales obtenidos.

Tabla 1: Comparación de procesos de producción de biocombustibles (elaboración propia a partir de: Shahid et al., 2011 y Bezergianni et al., 2013).

	Proceso	
	Transesterificación	Hidroprocesamiento
Descripción	Proceso químico de triglicéridos en biocombustible mediante reacción con un alcohol en presencia de un catalizador	Proceso químico con hidrógeno y catalizadores, para eliminar oxígeno, azufre y nitrógeno de los aceites y, transformando sus moléculas en hidrocarburos.
Aplicabilidad utilizando UCO como materia prima	Aplicable: es el método más común para producir biocombustible a partir de UCO.	Aplicable: es un proceso importante para producir HVO a partir de aceites y grasas residuales.
Condiciones de operación	Temperatura: 65-69 °C, presión hasta 29 psig, catalizador: hidróxido de sodio o potasio.	Temperatura: 330-380 °C, presión: hasta 1200 psig, catalizador: NiMo o CoMo.
Productos Finales	FAME, UCOME y glicerol	HVO con alto número de cetano.

En lo que respecta a los productos finales, en la Tabla 2 se comparan el UCOME, FAME y HVO considerando la materia prima, proceso de producción, compatibilidad con motores, costos e impacto ambiental. La diferencia principal entre el biocombustible UCOME y el FAME es que no emplean la misma materia prima: el FAME se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales vírgenes, mientras que el UCOME se obtiene de aceites de cocina usados previamente. La obtención de HVO destaca por su

alta calidad, estabilidad y versatilidad, aunque su costo de producción es mayor. La obtención de UCOME, en cambio, es una opción más económica y sostenible, siendo más adecuada para el reciclaje de aceites de cocina, aunque presenta limitaciones en estabilidad y compatibilidad. Por otro lado, la obtención de FAME ofrece un equilibrio entre calidad y costo, pero con desventajas en estabilidad y desempeño en climas fríos.

Tabla 2: Comparación de métodos de producción de biocombustibles para la obtención de diferentes biocombustibles: UCOME, FAME, HVO (Elaboración propia a partir de Asaga, 2025).

	Proceso		
Característica	UCOME	FAME	HVO
Materia prima	UCO	Grasas animales y aceites vegetales	Aceites vegetales, UCO y grasas animales
Proceso	Transesterificación	Transesterificación	Hidroprocesamiento
Propiedades	Calidad variable	Buena calidad, pero menos estabilidad química y se conserva menos tiempo sin perder propiedades que HVO	Alta calidad
Compatibilidad	Motores diésel (mezclas)	Motores diésel (mezclas)	Motores diésel (100% o mezclas)
Impacto ambiental	Bajo (residuo reciclado) 1,98E-05 kg CO ₂ -Eq	Bajo (materia prima renovable) 1,56E-05 kg CO ₂ -Eq	Bajo (residuo reciclado, pero mayor consumo de agua y uso suelos) 1,85E+00 CO ₂ -Eq
Clima frío	Menos eficiente	Varía según materia prima	Muy eficiente

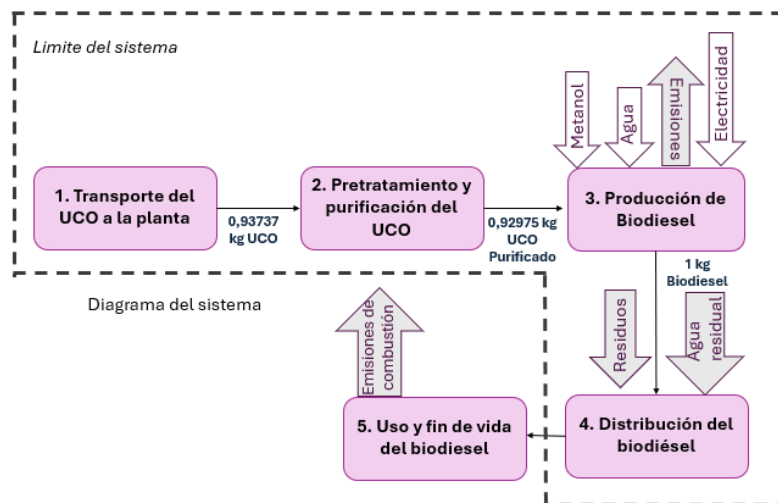
Metodología

El estudio se ha desarrollado aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida conforme a las normas UNE-EN ISO 14040 y 14044 (Asociación Española de Normalización, 2018 y 2021). El sistema modelizado comprende la valorización de aceite de cocina usado para la producción de biocombustibles mediante transesterificación,

cuyo producto final es el biodiésel UCOME, e hidroprocesamiento, que da lugar a HVO (UNE,2021;2018).

La unidad funcional seleccionada ha sido 1 kg de biocombustible producido, lo que permite comparar los impactos de cada tecnología entre sí y frente al diésel de origen fósil. El análisis se ha realizado bajo un enfoque de la “cuna a la puerta” (*cradle-to-gate*), abarcando las etapas de transporte del UCO, su pretratamiento y purificación, el proceso de fabricación del biocombustible y su distribución. No se han incluido las fases de uso ni el fin de vida, al quedar fuera de los límites del sistema definidos en este estudio.

La modelización se ha realizado con el software OpenLCA, empleando la base de datos Ecoinvent v3.10 bajo el sistema de asignación *cut-off*, y aplicando el método ReCiPe 2016 (Midpoint H) para la evaluación de impactos en 18 categorías ambientales. Este método fue seleccionado por su amplia aplicación en estudios científicos y su capacidad de segmentar los impactos en múltiples categorías, lo que facilita la comparación entre tecnologías. Entre las categorías consideradas por este método destacan entre otros el



cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana carcinógena y eutrofización, uso de recursos fósiles, consumo de agua y uso de suelo (Brandão et al., 2022).

Ilustración 1: Diagrama de proceso fabricación de biocombustible (elaboración propia). Las cantidades indicadas corresponden a los insumos necesarios para la producción de 1 kg de biodiésel.

El diagrama de flujo del sistema evaluado se representa esquemáticamente en la ilustración 1, donde se muestran las etapas del proceso consideradas en los límites del ACV junto con los flujos de materia y energía: transporte del aceite usado, pretratamiento y purificación, producción de biodiésel, distribución y uso/fin de vida.

En la etapa de transporte del UCO a la planta, el principal *input* es el diésel consumido por los vehículos de recolección, generando emisiones asociadas de CO₂, NO_x y material particulado. En el pretratamiento y purificación del UCO se emplean principalmente electricidad y agua, con la consecuente producción de residuos y aguas residuales. Durante la producción de biodiésel, los *inputs* más relevantes son metanol, catalizadores alcalinos y electricidad, mientras que los *outputs* incluyen el biodiésel como producto principal, el glicerol como coproducto y corrientes de agua residual y emisiones atmosféricas. Finalmente, en la distribución del biodiésel el insumo dominante es el combustible de los vehículos de transporte, con emisiones derivadas de las operaciones de logística (Ecoinvent Association, 2024).

Resultados principales

Las tres alternativas comparadas en este trabajo incluyen: la producción de UCOME (alternativa 1), la producción de HVO con hidrógeno gris (alternativa 2) y un escenario de sensibilidad con hidrógeno verde y electricidad renovable (alternativa 3), todos frente al diésel fósil convencional (Escenario base). En la Figura 2 se detallan los impactos ambientales obtenidos en diferentes categorías de impacto. Los resultados del ACV indican que la etapa de producción del biocombustible es la que concentra la mayor parte de las cargas ambientales, aportando entre un 36 % y un 64 % del impacto total en categorías como cambio climático, uso de recursos fósiles, formación de material particulado y eutrofización. Si bien el transporte y la distribución presentan una contribución menor, pueden alcanzar hasta un 43 % en la formación de oxidantes fotoquímicos y un 52 % en ecotoxicidad terrestre, lo que evidencia la necesidad de considerar estas fases en las estrategias de mejora ambiental.

Entre las alternativas estudiadas, el UCOME muestra el mejor desempeño ambiental en la mayoría de las categorías. En formación de material particulado, se obtiene **4,03E-04 kg PM_{2.5}-eq** frente a **8,65E-04 kg PM_{2.5}-eq** del diésel fósil, lo que representa una reducción del **53 %**. En la formación de oxidantes fotoquímicos en ecosistemas terrestres, el impacto disminuye de **3,20E-03 a 7,69E-04 kg NO_x-eq**, equivalente a una mejora del **76 %**. Igualmente, en la categoría relativa a la formación de oxidantes fotoquímicos para la salud humana, los valores se reducen de **2,47E-03 a 6,98E-04 kg NO_x-eq**, lo que supone una reducción del **72 %**.

El HVO producido con hidrógeno gris, en cambio, presenta resultados menos favorables. En impacto sobre el cambio climático alcanza **1,85E+00 kg CO₂-eq** frente a **9,86E-01 kg CO₂-eq** del diésel fósil, lo que implica un aumento del **88 %**. Asimismo, en la categoría de uso del agua el consumo es de **4,94E-03 m³** frente a **6,94E-03 m³**, lo que supone un incremento superior al **150 %**, es decir, más del doble en comparación con el diésel fósil.

Finalmente, el HVO producido con hidrógeno verde presenta los resultados más prometedores. En cambio climático, sus emisiones alcanzan **2,37E-01 kg CO₂-eq** frente a **9,86E-01 kg CO₂-eq** del diésel fósil, lo que representa una reducción del **76 %**. En formación de material particulado, se pasa de **8,65E-04 a 2,74E-04 kg PM_{2.5}-eq**, con una reducción del **68 %**. En la formación de oxidantes fotoquímicos, la mejora es aún más destacada: en ecosistemas terrestres los impactos disminuyen un **84 %** y en salud humana un **81 %**. En cuanto a recursos energéticos fósiles, el consumo se reduce de **1,20E+00 a 8,49E-02 kg oil-eq**, lo que equivale a un **93 %** menos. No obstante, estas ventajas se ven compensadas por mayores cargas en otras categorías: el uso del agua aumenta de **1,58E-03 a 1,04E-01 m³** (unas 65 veces más) y el uso del suelo de **6,94E-03 a 8,09E-02 m²·a crop-eq** (más de 11 veces superior).

En síntesis, los resultados muestran que, mientras el UCOME se perfila como la alternativa con mejor desempeño ambiental frente al diésel fósil, el HVO con hidrógeno verde alcanza reducciones aún mayores en categorías críticas como cambio climático y recursos fósiles, aunque con un coste ambiental elevado sobre el agua y el suelo. El HVO con hidrógeno gris, por el contrario, muestra los mayores impactos y refuerza la necesidad de utilizar hidrógeno verde para que esta tecnología pueda considerarse ambientalmente competitiva.

La Figura 3 muestra la comparación de los impactos ambientales del HVO según el origen del hidrógeno utilizado. Los resultados corroboran que mediante el uso de hidrógeno verde se reducen de forma notable las emisiones de GEI y su impacto en el cambio climático, pasando de **1,85 a 0,24 kg CO₂-eq/kg** (disminución del **87 %**).

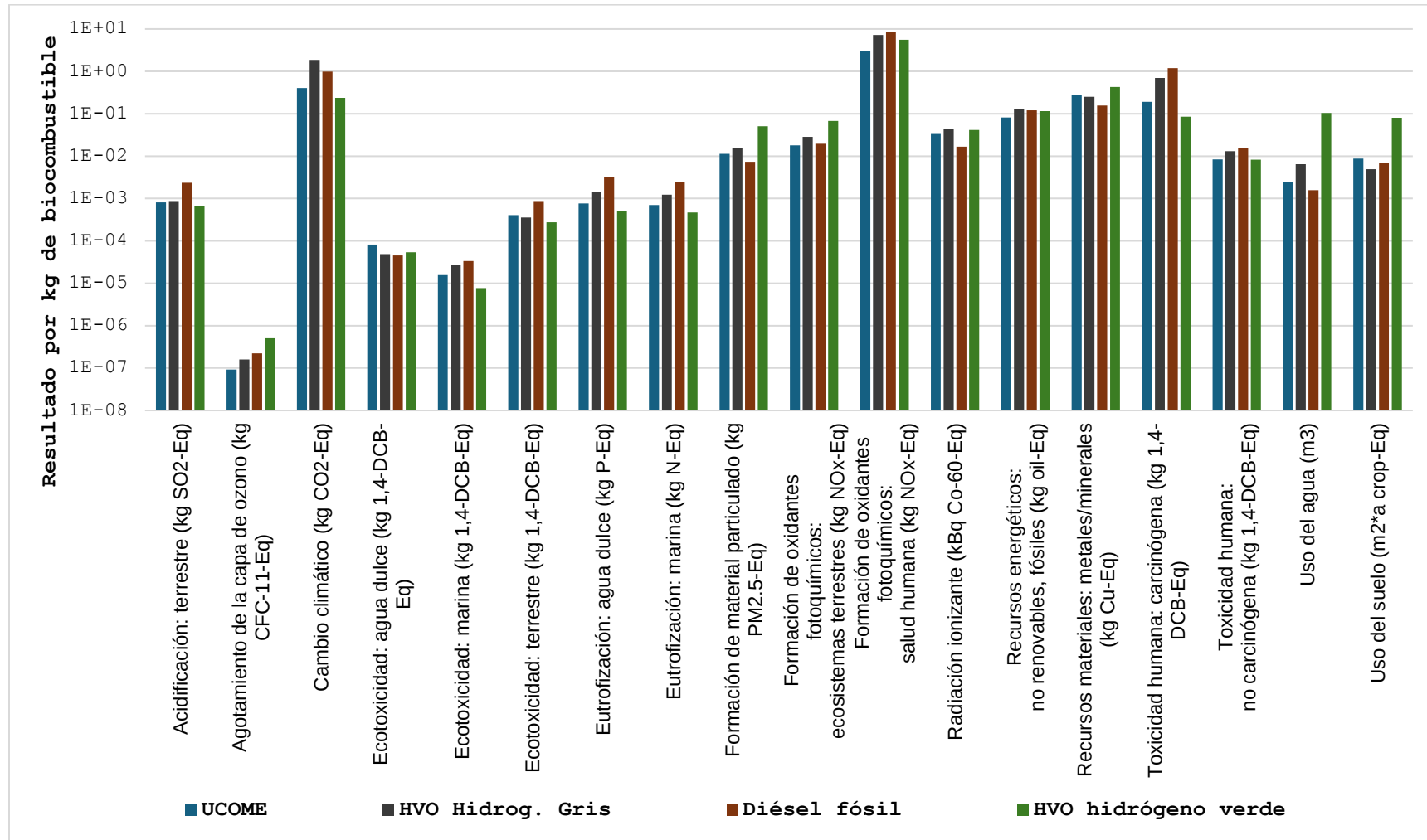


Ilustración 2: Resultados del ACV para procesos de obtención de UCOME, HVO y diésel fósil (escala logarítmica, metodología ReCiPe Midpoint).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023), la combustión de un galón de gasolina libera aproximadamente **8.887 g de CO₂**, lo que equivale a **2,35 kg CO₂/L** o alrededor de **3,17 kg CO₂-eq/kg** de combustible. A nivel de proceso productivo (*Well-to-Tank*) incluyendo la extracción del recurso, transporte, procesado, y distribución del combustible, estudios de ciclo de vida reportan emisiones de aproximadamente **0,52 kg CO₂/L** para gasolina y **0,54 kg CO₂/L** para diésel, equivalentes a **0,70 y 0,64 kg CO₂-eq/kg** de combustible, respectivamente (Buberger, Ajanovic & Haas, 2022).

Estos resultados permiten dimensionar que los biocombustibles analizados, en particular UCOME y HVO con hidrógeno verde, ofrecen ventajas ambientales no solo frente al diésel fósil en términos de reducción de GEI, sino también en comparación con otros combustibles convencionales como la gasolina. No obstante, el uso de hidrógeno verde implica incrementos significativos en otras categorías de impacto como el agotamiento de la capa de ozono aumenta de $1,60 \cdot 10^{-7}$ a $5,06 \cdot 10^{-7}$ kg CFC-11-eq (**+216 %**), el uso del agua de **0,0065 a 0,1044 m³** (+1506 %) y el uso del suelo de **0,0049 a 0,0809 m²·a crop-eq** (+1550 %). En conjunto, este estudio demuestra que el empleo de hidrógeno verde mejora notablemente el desempeño del HVO en categorías críticas como cambio climático y dependencia de combustibles fósiles, pero que su producción conlleva mayores requerimientos de agua y suelo.

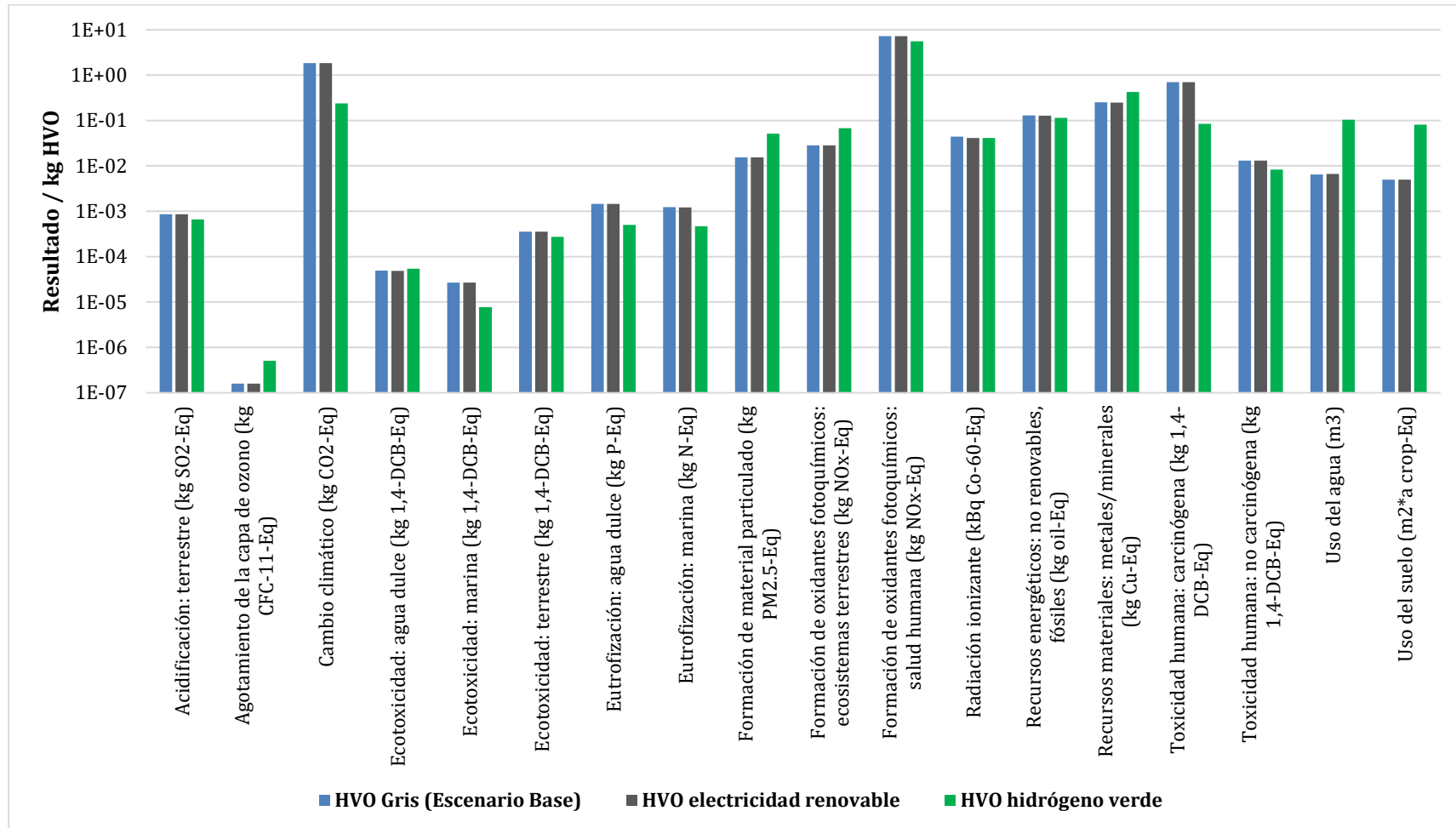


Ilustración 3: Resultados del ACV para la obtención de HVO según tipo de insumo energético (escala logarítmica, metodología ReCiPe Midpoint).

Ejercicio de escalado a nivel nacional

En la ilustración 4 se muestra un esquema del sistema de producción de biocombustible a partir de UCO para el contexto español, tomando como referencia una entrada anual estimada de 138.000 toneladas de UCO procesado. Esta cantidad representa una estimación realista basada en datos de generación nacional, según Eurostat (2025). Durante la etapa de pretratamiento y purificación, se produce una pérdida aproximada del 0,82 %, según lo indicado en el *dataset "treatment of used vegetable cooking oil, purification"* de la base de datos Ecoinvent v3.10, el cual establece que por cada 1,0082 kg de UCO tratado se obtienen 1 kg de UCO purificado (Ver anexos I y II).

Posteriormente, en la fase de transformación a biocombustible, se observa un incremento de masa del 7,56 %, derivado de la incorporación de metanol y otros aditivos químicos necesarios en la reacción de transesterificación. Esta información se obtuvo del *dataset "treatment of used vegetable cooking oil, purified, esterification"*, también perteneciente a Ecoinvent 3.10, que indica que se requieren 0,92975 kg de UCO purificado para generar 1 kg de biocombustible (Ver anexo III).

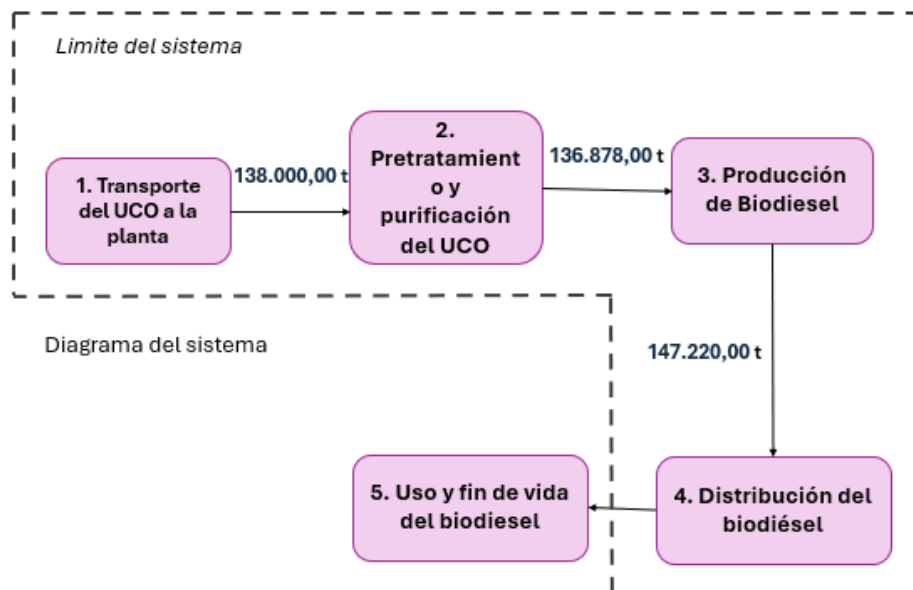


Ilustración 4: Diagrama de proceso fabricación de biocombustible desde UCO (138.000 t/año) (elaboración propia).

Con el fin de dimensionar el potencial ambiental de la valorización del aceite de cocina usado en España, se realizó un ejercicio de escalado considerando una disponibilidad anual de 138.000 t de UCO, lo que permite obtener aproximadamente 147.220 t de biodiésel (UCOME). La Tabla 3 presenta los resultados del impacto ambiental por categoría, integrando todas las etapas del proceso, desde el transporte del UCO hasta la distribución del biodiésel, tanto en términos unitarios (por kg de biocombustible) como extrapolados a la producción nacional.

Los valores muestran que, a escala país, la producción de biodiésel a partir de UCO implicaría **$1,02 \times 10^8$ kg CO₂-eq anuales** en la categoría de cambio climático, un consumo de **$4,42 \times 10^7$ kg oil-eq** en recursos fósiles, y contribuciones relevantes en ecotoxicidad marina **$4,59 \times 10^6$ kg 1,4-DCB-eq** y uso de suelo **$2,35 \times 10^6$ m²·a crop-eq**, entre otros.

Al extrapolar los factores de emisiones de fabricar incluyendo la recolección, purificación, transporte hasta la distribución de la gasolina **$0,70$ kg CO₂-eq/kg** a la misma producción anual de biocombustible en España 147.220 t/año, se obtiene un valor de **$1,03 \times 10^8$ kg CO₂-eq/año**. Este resultado es del mismo orden de magnitud que el estimado para el UCOME **$1,02 \times 10^8$ kg CO₂-eq/año**, lo que evidencia que la producción de combustibles convencionales como la gasolina también conlleva cargas ambientales relevantes en la fase de fabricación.

En conjunto, este análisis de escalado permite visualizar la magnitud de los impactos potenciales si se aprovechara la totalidad del aceite de cocina usado disponible en España, aportando un marco más realista para la toma de decisiones en políticas de transición energética y circularidad.

Tabla 3: Resultados del impacto ambiental por categoría y etapa del proceso de producción de biocombustible (UCOME). (Elaboración Propia).

Categoría de Impacto	Unidades de Referencia	Suma total Impacto por kg de biocombustible	Impacto anual del procesamiento de biocombustible en España / 147220 t de biocombustible
Agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq	1,68E-07	2,47E+01
Cambio climático	kg CO ₂ -Eq	6,90E-01	1,02E+08
Formación de oxidantes fotoquímicos: ecosistemas terrestres	kg NO _x -Eq	1,62E-03	2,38E+05
Formación de oxidantes fotoquímicos: salud humana	kg NO _x -Eq	1,49E-03	2,20E+05
Formación de partículas	kg PM _{2.5} -Eq	6,29E-04	9,26E+04
Ecotoxicidad: marina	kg 1,4-DCB-Eq	3,12E-02	4,59E+06
Recursos energéticos: no renovables, fósiles	kg oil-Eq	3,00E-01	4,42E+07
Uso del agua	m ³	3,31E-03	4,88E+05
Uso del suelo	m ² *a crop-Eq	1,60E-02	2,35E+06

Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el impacto ambiental de tres alternativas de valorización de aceites de cocina usados: la producción de UCOME mediante transesterificación, la producción de HVO con hidrógeno gris y la producción de HVO con hidrógeno verde. Se han comparado entre sí, y frente al diésel fósil convencional.

El análisis de ciclo de vida realizado demuestra que la valorización de aceites de cocina usados para la producción de biocombustible representa una alternativa ambientalmente más favorable que el uso de combustibles fósiles, aunque no está exenta de impactos. La etapa de producción del biocombustible es la que concentra la mayor parte de las cargas ambientales, superando el 50 % en la mayoría de las categorías debido al uso de insumos químicos, energía y generación de residuos. El pretratamiento del aceite y las fases de transporte aportan impactos ambientales intermedios, mientras que la distribución del biodiésel presenta la menor contribución relativa al impacto ambiental total.

A escala nacional, considerando una capacidad de procesamiento anual de 138.000 t de UCO en España, se estima una producción de 147.220 t de biocombustible. El análisis de escalado muestra que este volumen implicaría alrededor de **1,02E+08 kg CO₂-eq anuales** en la categoría de cambio climático, además de consumos relevantes en recursos fósiles **4,42E+07 kg oil-eq** y en otras categorías como ecotoxicidad marina o uso de suelo. Comparativamente, al extrapolar los valores de fabricación de la gasolina **0,70 kg CO₂-eq/kg**, se obtienen valores de **1,03E+08 kg CO₂-eq/año** para un volumen equivalente, lo que evidencia que la producción de combustibles convencionales también conlleva cargas ambientales significativas.

El análisis comparativo confirma que el HVO elaborado con hidrógeno verde ofrece el perfil ambiental más favorable. No obstante, esta alternativa presenta un fuerte incremento en el uso de agua y suelo, lo que obliga a una evaluación equilibrada de sus beneficios y limitaciones.

Finalmente, este trabajo subraya la importancia de aplicar el Análisis de Ciclo de Vida a la evaluación de tecnologías para la obtención de los biocombustibles, ya que permite determinar con precisión qué tecnología resulta más ventajosa en función de cada

categoría de impacto ambiental, aportando una base técnica sólida para la toma de decisiones en la transición energética y circularidad.

Referencias

- Asaga. (05 de Ene de 2025). <https://asaga.org.ar/>. Obtenido de <https://asaga.org.ar/>: <https://asaga.org.ar/que-es-el-hvo-y-por-que-podria-ser-el-combustible-del-futuro/>
- Asociación Española de Normalización (UNE). (2018). UNE-EN ISO 14044:2006/A1. Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1 (ISO 14044:2006/Amd 1:2017).
- Asociación Española de Normalización (UNE). (2021). UNE-EN ISO 14040:2006/A1. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1 (ISO 14040:2006/Amd 1:2020) (Versión corregida, enero 2022).
- Bezergianni, S., Dimitriadis, A., & Chrysikou, L. P. (2013). Quality and sustainability comparison of one- vs. two-step catalytic hydroprocessing of waste cooking oil. *Fuel*, 118, 300. doi:10.1016/j.fuel.2013.10.078
- Brandão, M., Ekvall, T., Poulíkidou, S., Johansson, K., Nilsson, J., Nojpanya, P., Wikström, A., & Rydberg, T. (2022). RED, PEF, and EPD: Conflicting rules for determining the carbon footprint of biofuels send mixed signals to fuel producers and consumers. *Frontiers in Climate*, 4, 988769. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.988769>
- Buberger, J., Ajanovic, A., & Haas, R. (2022). Economic and environmental prospects for battery electric- and fuel cell vehicles with special focus on European conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112152>
- Ecoinvent Association. (2024). ecoinvent database. Disponible en <https://ecoinvent.org/database>
- Eurostat (2025). Glossary: Biofuels. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Biofuels>
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2023). Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle. <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
- International Energy Agency. (IEA). (2025). Hidrógeno. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MITECO. (2025a). Estadísticas de biocarburantes. Recuperado el 6 de febrero de 2025, de <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/biocarburantes/estadisticas.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MITECO. (2025b). Obtenido de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/aceites-cocina.html>
- Parlamento Europeo y Consejo. (2018). Directiva (UE) 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>

Repsol. (2024). Repsol ha comenzado la producción a gran escala de combustibles renovables en Cartagena, la primera planta de la Península Ibérica. Complejo Industrial de Repsol en Cartagena. Disponible en: <https://cartagena.repsol.es/content/dam/repsol-complejos-industriales/cartagena/sala-de-prensa/2024/np03042024-repsol-ha-comenzado-produccion-gran-escala-combustibles-renovables-cartagena-primera-planta-peninsula-iberica.pdf>

Shahid, E. M., & Jamal, Y. (2011). Production of biodiesel: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(9), 4732–4745. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.079>

Anexos

ANEXO I: Entradas de la data set de tratamiento de aceite vegetal usado purificado en OPEN LCA.

Inputs/Outputs - treatment of used vegetable cooking oil, purification | used vegetable cooking oil, purified | Cutoff, U - FR

Inputs

+ - 1.23

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncerta...	Avoide...	Provider
⚙ electricity, medium voltage	D:Electricity, gas, s...	0.05080	⚡ kWh	0.00508...	lognor...		🔗 market for electricity, ...
⚙ glycerine	C:Manufacturing/...	0.10560	⚡ kg	0.08364...	lognor...		🔗 treatment of used veg...
⚙ heat, district or industrial, natural gas	D:Electricity, gas, s...	0.77304	⚡ MJ	0.00819...	lognor...		🔗 market for heat, distri...
⚙ methanol	C:Manufacturing/...	0.02690	⚡ kg	0.00592...	lognor...		🔗 market for methanol ...
⚙ sulfuric acid	C:Manufacturing/...	0.00210	⚡ kg	0.00013...	lognor...		🔗 market for sulfuric aci...
⚙ tap water	E:Water supply; se...	0.14028	⚡ kg	5.56921...	lognor...		🔗 market for tap water ...
⚙ used vegetable cooking oil	Recycled content c...	1.00820	⚡ kg		none		🔗 market for used veget...
⚙ vegetable oil esterification facility	F:Construction/42:...	9.09090...	⚡ lte...	0.00075...	lognor...		🔗 market for vegetable ...
🌿 Carbon dioxide, in air	../Resource/in air	2.84350	⚡ kg		lognor...		

ANEXO II

▼ Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider
 used vegetable cookin...	Recycled content cut-off	1.00000	 kg	0.36200 EUR	none		
 wastewater, average	E:Water supply; sewerage, ...	0.00012	 m3		lognormal: ...		 market f...
 BOD5, Biological Oxygen...	../Emission to water/surfac...	0.00350	 kg		lognormal: ...		
 Carbon dioxide, non-fossil	../Emission to air/high pop...	0.16659	 kg		lognormal: ...		
 COD, Chemical Oxygen ...	../Emission to water/surfac...	0.00350	 kg		lognormal: ...		
 DOC, Dissolved Organic ...	../Emission to water/surfac...	0.00043	 kg		lognormal: ...		
 Oils, non-fossil	../Emission to soil/industrial	0.00050	 kg		lognormal: ...		
 TOC, Total Organic Carb...	../Emission to water/surfac...	0.00043	 kg		lognormal: ...		
 Water	../Emission to air/unspecifi...	2.10424E-5	 m3		lognormal: ...		

Salidas de la data set del tratamiento de aceite vegetal usado purificado en OPEN LCA.

ANEXO III

Entradas y salidas del proceso de producción del biocombustible UCOME

Inputs/Outputs - treatment of used vegetable cooking oil, purified, esterification | fatty acid methyl ester | (

▼ Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider
⚙ electricity, high voltage, ...	D:Electricity, gas, steam an...	0.03825	 kWh		none		⚙ market f...
⚙ electricity, medium volta...	D:Electricity, gas, steam an...	0.03825	 kWh	0.00383 EUR	lognormal: ...		⚙ market f...
⚙ heat, district or industrial...	D:Electricity, gas, steam an...	0.83544	 MJ	0.00886 EUR	lognormal: ...		⚙ market f...
⚙ methanol	C:Manufacturing/19:Manu...	0.10274	 kg	0.02260 EUR	lognormal: ...		⚙ market f...
⚙ phosphoric acid, industri...	C:Manufacturing/20:Manu...	0.00416	 kg	0.00375 EUR	lognormal: ...		⚙ market f...
⚙ potassium hydroxide	C:Manufacturing/20:Manu...	0.01027	 kg	0.01335 EUR	lognormal: ...		⚙ market f...
⚙ tap water	E:Water supply; sewerage, ...	0.01512	 kg	6.00147E-6 ...	lognormal: ...		⚙ market f...
⚙ used vegetable cooking ...	Recycled content cut-off	0.92975	 kg	0.33657 EUR	none		⚙ market f...
⚙ vegetable oil esterificatio...	F:Construction/42:Civil en...	8.45230E-10	 Item(s)	0.00070 EUR	lognormal: ...		⚙ market f...
✓ Carbon dioxide, in air	../Resource/in air	0.12606	 kg		lognormal: ...		
✓ Water, cooling, unspecifi...	../Resource/in water	0.00029	 m3		lognormal: ...		

▼ Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider
⚙ fatty acid methyl ester	E:Water supply; sewerage...	1.00000	 kg	0.81700 EUR	none		
🗑 wastewater, average	E:Water supply; sewerage, ...	5.65514E-5	 m3		lognormal: ...		⚙ market f...
✓ Carbon dioxide, non-fossil	../Emission to air/high pop...	0.20036	 kg		lognormal: ...		
✓ Water	../Emission to air/unspe...	0.00011	 m3		lognormal: ...		
✓ Water	../Emission to water/unspe...	0.00019	 m3		lognormal: ...		