



Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Tecnología  
Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

**“EL BIODIÉSEL: HACIA UNA  
PRODUCCIÓN MÁS EFICIENTE Y  
SOSTENIBLE”**

Grado en Ingeniería Química Industrial

Trabajo de fin de grado realizado por  
**Silvia Mercedes Armas Martín**

bajo la supervisión de las tutoras  
**Karina Elvira Rodríguez Espinoza**  
**Laura Díaz Rodríguez**

Julio 2023

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento a D<sup>a</sup> Karina Elvira Rodríguez Espinoza por aceptarme y guiar en este proyecto de fin de carrera. Su cariño, disponibilidad, paciencia y generosidad han sido invaluable durante todo el proceso.

También quiero agradecer a D<sup>a</sup> Laura Díaz Rodríguez por su excelente dirección y atención durante la realización del trabajo. Gracias a su orientación, he tenido la oportunidad de disfrutar de la experiencia en el laboratorio y aprender de manera significativa.

Estoy verdaderamente agradecida por todo lo que he aprendido y por el apoyo recibido de ambas tutoras. Han sido fundamentales en mi crecimiento académico y personal.

Agradecer a mis familiares, sobre todo a mi madre por estar siempre pendiente y apoyarme en toda mi vida académica. Su cariño y amor siempre ha sido un pilar fundamental en mi vida.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos los profesores que me han impartido conocimientos durante mi trayectoria universitaria. Han sido fundamentales en mi formación y desarrollo como persona crítica, objetiva, resolutiva y profesional. Agradezco especialmente a aquellos profesores que han demostrado paciencia y una verdadera pasión por la enseñanza.

Agradecer a mis compañeros que con su cariño han hecho que la vida estudiantil se más divertida. Sobre todo, a Isabel que desde el primer momento ha sido una maravillosa amiga.

Finalmente, quiero agradecer al proyecto “ACLIEMAC MAC2/3.5b/380” financiado con fondos FEDER (Programa INTERREG MAC 2014-2020) y a la “Fundación CajaCanarias” y “Fundación Bancaria "la Caixa"” a través de la “Convocatoria Proyectos Investigación 2019”.

---

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. RESUMEN / ABSTRACT .....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>10</b> |
| 2.1. Descripción del panorama energético actual .....  | 10        |
| 2.1.1. Panorama energético mundial .....   | 10        |
| 2.1.2. Panorama energético europeo y español .....   | 14        |
| 2.1.3. Panorama energético en Canarias y economía circular .....                               | 20        |
| 2.2. Aceites de frituras .....   | 24        |
| 2.3. Biocombustibles.....  | 26        |
| 2.4. Biodiésel .....   | 27        |
| 2.4.1. Aceite de fritura para la obtención de biodiesel .....                                  | 30        |
| 2.5. Reacciones para la obtención de biodiesel.....  | 30        |
| 2.5.1. Transesterificación.....  | 31        |
| 2.5.2. Esterificación .....  | 34        |
| 2.6. Adsorción.....  | 34        |
| 2.6.1. Adsorción alternativa a la reacción de esterificación. ....                             | 35        |
| 2.6.2. Cáscaras de cultivos energéticos como adsorbente .....                                  | 35        |
| <b>3. OBJETIVOS .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>4. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>   | <b>38</b> |
| 4.1. Materiales y métodos .....  | 38        |
| 4.1.1. Materia prima (aceite de fritura).....  | 38        |
| 4.1.2. Síntesis y caracterización del catalizador (Li/Pumita) .....                            | 40        |
| 4.1.3. Síntesis del adsorbente (carbón a partir de cáscaras de <i>Pongamia pinnata</i> ) ..... | 42        |
| 4.2. Estudios para la obtención de biodiésel .....   | 44        |
| 4.2.1. Reacción homogénea en una etapa (transesterificación).....                              | 46        |
| 4.2.2. Reacción heterogénea en una etapa (transesterificación) .....                           | 47        |

---

---

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.3. Reacción en dos etapas (esterificación + transesterificación) .....  | 48        |
| 4.2.4. Adsorción + reacción transesterificación .....   | 49        |
| 4.3. Método de análisis .....   | 50        |
| 4.3.1. Aceite Residual y Biodiesel.....   | 50        |
| 4.3.1.1. <u>Densidad</u> .....  | 50        |
| 4.3.1.2. <u>Viscosidad</u> .....  | 51        |
| 4.3.1.3. <u>Índice de acidez</u> .....  | 52        |
| 4.3.1.4. <u>Contenido en ésteres metílicos (FAMES). Cromatografía de Gases</u> ...  | 53        |
| <b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>56</b> |
| 5.1. Caracterización de la muestra de aceite de fritura .....   | 56        |
| 5.2. Caracterización de biodiésel .....   | 57        |
| 5.2.1. Efecto del contenido en ésteres metílicos (FAMES) .....  | 59        |
| 5.2.2. Efecto de la densidad .....  | 60        |
| 5.2.3. Efecto de la viscosidad cinemática.....  | 60        |
| 5.2.4. Efecto del índice de acidez .....  | 61        |
| 5.3. Rendimiento en peso y comparación de los experimentos. ....  | 62        |
| 5.4. Evaluación de aceite de fritura residual generado y su posible aprovechamiento para la producción de biodiésel en Canarias ..... | 64        |
| <b>6. CONCLUSIONES / CONCLUSIONS.....</b>   | <b>69</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>73</b> |

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. <i>Consumo de energía primaria en España en 2021 por tecnología renovable (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).....</i> | 19 |
| Tabla 2. <i>Parámetros de calidad del biodiésel establecidos por la norma UNE-EN 14214 .....</i>  | 28 |
| Tabla 3. <i>Condiciones de reacción de los experimentos realizados .....</i>  | 45 |
| Tabla 4. <i>Caracterización de los aceites de fritura residual .....</i>  | 56 |
| Tabla 5. <i>Caracterización biodiesel obtenido empleando el aceite A1 como materia prima y rangos de la norma UNE EN 14214 .....</i>                              | 58 |
| Tabla 6. <i>Caracterización biodiesel obtenido empleando el aceite A2 como materia prima y rango de la norma UNE EN 14214 .....</i>                               | 58 |
| Tabla 7. <i>Rendimiento en peso de las muestras de biodiésel obtenidas a partir de A1 .....</i>   | 63 |
| Tabla 8. <i>Rendimiento en peso de las muestras de biodiésel obtenidas a partir de A2 .....</i>   | 63 |
| Tabla 9. <i>Importaciones de aceites vegetales a Canarias entre los años 2012-2022 (Gobierno de Canarias, s. f.).....</i>   | 66 |
| Tabla 10. <i>Aceite importado y residuo de aceite generado en Canarias entre 2012 y 2022. ....</i>  | 67 |

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. <i>Evolución del consumo mundial de energía primaria entre 2000 y 2022 por tipo de combustible (Davenport &amp; Wayth, 2023)</i> .....                 | 11 |
| Figura 2. <i>Aportación para cada tipo de combustible en el consumo global de energía primaria (Davenport &amp; Wayth, 2023)</i> .....                           | 12 |
| Figura 3. <i>Participación de las energías en la generación mundial de energía eléctrica (Davenport &amp; Wayth, 2023)</i> .....                                 | 13 |
| Figura 4. <i>Patrón de consumición regional para el año 2022 (Davenport &amp; Wayth, 2023)</i> .....   | 13 |
| Figura 5. <i>Evolución en las emisiones de carbono por región y cambio anual en millones de toneladas de CO2 equivalente (Davenport &amp; Wayth, 2023)</i> ..... | 14 |
| Figura 6. <i>Evolución del consumo de energía final en la UE y España (Eurostat, 2023)</i> .....   | 15 |
| Figura 7. <i>Mapa europeo en consumo de energía primaria (Eurostat, 2023)</i> .....  | 16 |
| Figura 8. <i>Consumo de energía primaria en España (ktep) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)</i> .....                        | 17 |
| Figura 9. <i>Consumo de energía primaria en España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)</i> .....                               | 18 |
| Figura 10. <i>Desglose del consumo de energía primaria en España 2021 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)</i> .....            | 18 |
| Figura 11. <i>Evolución de algunas de las principales magnitudes energéticas en Canarias (Gobierno de Canarias, 2022)</i> .....                                  | 20 |
| Figura 12. <i>Distribución porcentual de la demanda de energía final, por tipo de energía, año 2021 (Gobierno de Canarias, 2022)</i> .....                       | 21 |
| Figura 13. <i>Distribución porcentual de la demanda de energía final en Canarias, por sectores, año 2021. (Gobierno de Canarias, 2022)</i> .....                 | 21 |
| Figura 14. <i>Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en Canarias, por categorías (Gobierno de Canarias, 2022)</i> .....                       | 22 |
| Figura 15. <i>Reacción de transesterificación (Díaz González, 2013)</i> .....  | 32 |
| Figura 16. <i>Reacción esterificación (Biodisol, s. f.)</i> .....  | 34 |
| Figura 17. <i>Semillas de la planta Pongamia pinnata</i> .....   | 36 |
| Figura 18. <i>Muestra de aceites de fritura residual recolectados</i> .....  | 39 |
| Figura 19. <i>Sistema de filtración a vacío</i> .....  | 39 |

---

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 20. <i>Material empleado para la síntesis del catalizador heterogéneo</i> .....                            | 41 |
| Figura 21. <i>Catalizador sintetizado Li/Pumita</i> .....   | 42 |
| Figura 22. <i>Equipo empleado para el proceso de pulverización (molino de bolas)</i><br>.....                     | 43 |
| Figura 23. <i>Las cascarás pulverizadas y el adsorbente obtenido después del<br/>proceso de calcinación</i> ..... | 44 |
| Figura 24. <i>Diagrama de flujo ensayo R.1</i> .....  | 44 |
| Figura 25. <i>Diagrama de flujo ensayo R.2</i> .....  | 44 |
| Figura 26. <i>Diagrama de flujo ensayo R.3</i> .....  | 44 |
| Figura 27. <i>Diagrama de flujo ensayo R.4</i> .....  | 45 |
| Figura 28. <i>Diagrama de flujo ensayo R.5</i> .....  | 45 |
| Figura 29. <i>Diagrama de flujo ensayo R.6</i> .....  | 45 |
| Figura 30. <i>Sistema de reacción empleado</i> .....  | 46 |
| Figura 31. <i>Productos obtenidos después de la reacción</i> .....  | 47 |
| Figura 32. <i>Filtración a vacío para separar el catalizador de los productos de<br/>reacción</i> .....           | 48 |
| Figura 33. <i>Equipo de medición de densidad modelo Mettler Toledo Densito 30PX</i><br>.....                      | 51 |
| Figura 34. <i>Viscosímetro VISCO STAR plus L</i> .....  | 52 |
| Figura 35. <i>Valoración ácido-base</i> .....   | 53 |
| Figura 36. <i>Cromatógrafo de gases modelo VARIAN 3900 GC</i> .....   | 55 |
| Figura 37. <i>Efecto del contenido en ésteres metílicos</i> .....   | 59 |
| Figura 38. <i>Efecto de la densidad</i> .....   | 60 |
| Figura 39. <i>Efecto de la viscosidad cinemática</i> .....  | 61 |
| Figura 40. <i>Efecto del índice de acidez</i> .....   | 62 |
| Figura 41. <i>Toneladas de aceite generado como residuo en Canarias entre 2012 y<br/>2022</i> .....               | 68 |

---

## 1. RESUMEN / ABSTRACT

El impacto ambiental de los combustibles fósiles impulsa la búsqueda de fuentes de energía más sostenibles. En Canarias, donde la dependencia del petróleo importado y el alto consumo de energía del sector transporte son importantes, el biodiésel se presenta como una alternativa atractiva. Por otra parte, con aproximadamente 30,000 toneladas de aceite de fritura generado, es crucial abordar la gestión ineficiente de este residuo. Ante estas problemáticas, se plantea la oportunidad de utilizar el aceite de fritura como materia prima para la producción de biodiésel, un combustible más limpio obtenido a partir de biomasa. Esta iniciativa permitiría a la región participar en la Estrategia Canaria de Economía Circular, enfocada en combatir el cambio climático.

El cumplimiento de los estándares de calidad es esencial para el biodiésel, de acuerdo con la norma UNE-EN 14214. Actualmente, la producción de biodiésel a nivel industrial se lleva a cabo a través de un proceso de transesterificación donde el aceite se mezcla con metanol y un catalizador homogéneo que puede ser hidróxido de sodio o potasio en un reactor, si la acidez del aceite es mayor de 1 mg KOH/g aceite, se realiza una esterificación del aceite con ácido sulfúrico para disminuir la cantidad de ácidos grasos libres (FFA), esto genera varios efluentes que son dañinos para el medio ambiente, además requiere de procesos posteriores para la separación y purificación del biodiesel.

En este trabajo se llevaron a cabo diferentes técnicas para la obtención de biodiésel a partir de aceite de fritura, para comparar la transesterificación homogénea convencional con la heterogénea. Empleando un catalizador sólido, como el Li/Pumita, más eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Además, se empleó la técnica de adsorción utilizando cáscaras de *Pongamia pinnata* como adsorbente de carbón sin activar. Esto ayuda a eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite de fritura sin generar efluentes. La adsorción se combina con la transesterificación para obtener biodiésel de alta calidad en un proceso más eficiente y sostenible.



The environmental impact of fossil fuels drives the search for more sustainable energy sources. In the Canary Islands, where dependence on imported oil and the high energy consumption of the transport sector are important, biodiesel is presented as an attractive alternative. Moreover, with approximately 30,000 tons of frying oil generated, it is crucial to address the inefficient management of this waste. Given these problems, the opportunity arises to use frying oil as a raw material to produce biodiesel, a cleaner fuel obtained from biomass. This initiative would allow the region to participate in the Canarian Circular Economy Strategy, focused on combating climate change.

Compliance with quality standards is essential for biodiesel, according to the UNE-EN 14214 standard. Currently, the production of biodiesel at an industrial level is carried out through a transesterification process where the oil is mixed with methanol and a homogeneous catalyst that can be sodium or potassium hydroxide in a reactor, if the acidity of the oil is greater than 1 mg KOH / g oil, an esterification of the oil with sulfuric acid is carried out to decrease the amount of free fatty acids (FFA). This generates several effluents that are harmful to the environment, also requires subsequent processes for the separation and purification of biodiesel.

In this work, different techniques were carried out to obtain biodiesel from frying oil, to compare conventional homogeneous transesterification with heterogeneous transesterification. Using a solid catalyst, such as Li/Pumita, more efficient and environmentally friendly. In addition, the adsorption technique was used using *Pongamia pinnata* shells as an adsorbent of inactivated carbon. This helps to remove the free fatty acids present in the frying oil without generating effluent. Adsorption is combined with transesterification to obtain high-quality biodiesel in a more efficient and sustainable process.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Descripción del panorama energético actual

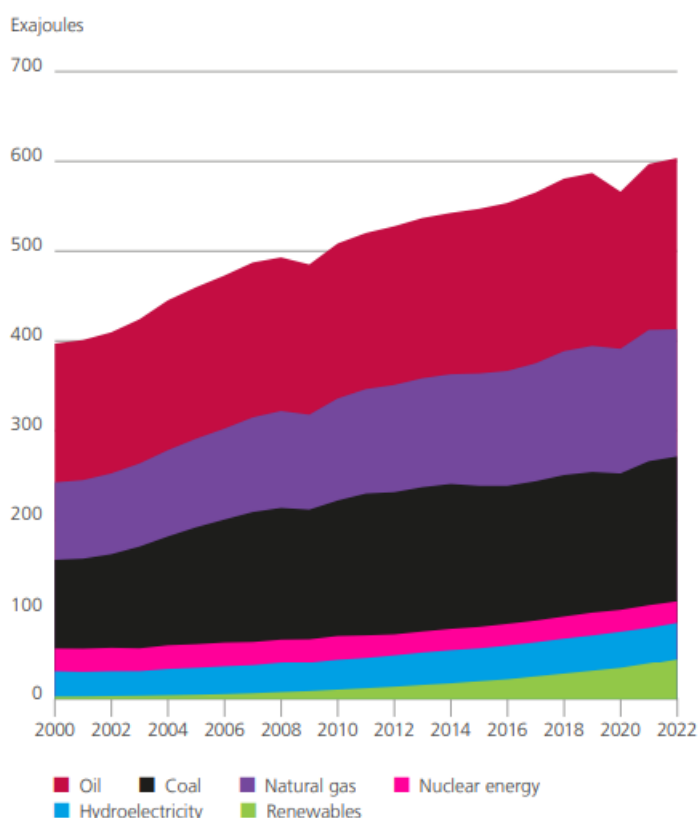
#### 2.1.1. *Panorama energético mundial*

La energía primaria es la forma básica de energía que se obtiene directamente de los recursos naturales, como el petróleo, el gas natural, el carbón, la energía hidroeléctrica, las energías renovables y la energía nuclear. Es el punto de partida para la generación de energía en diferentes sectores y desempeña un papel crucial en el desarrollo y funcionamiento de la sociedad moderna.

El aumento constante en el consumo de energía, el agotamiento de las reservas energéticas y la dependencia de los combustibles fósiles han generado dos preocupaciones principales: por un lado, los impactos ambientales asociados con el cambio climático; por otro lado, la limitación de las reservas y su eventual agotamiento en el futuro. Estas dos preocupaciones han sido un punto de inflexión en cuanto al uso de combustibles provenientes de recursos fósiles.

En la actualidad, el consumo de energía es un elemento integral de nuestro estilo de vida, y cuanto más avanzada está una sociedad, mayor es su demanda energética. Durante las últimas décadas, tal y como se observa en la Figura 1, el consumo de energía ha seguido aumentando constantemente, en 2022 se registró un aumento del 1% en el consumo total de energía primaria, lo que lo situó aproximadamente un 3% por encima del nivel previo a la COVID-19 en 2019.

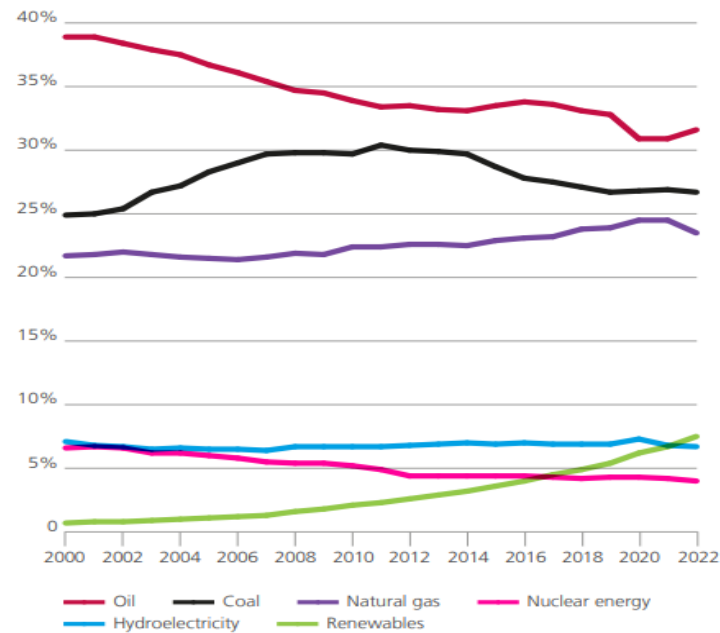
### World consumption



**Figura 1.** Evolución del consumo mundial de energía primaria entre 2000 y 2022 por tipo de combustible (Davenport & Wayth, 2023)

La proporción de energías renovables, excluyendo la hidroeléctrica, mostró un aumento de aproximadamente un 1% en el consumo de energía primaria en comparación con el año 2021, alcanzando un 7.5%. Por otro lado, el consumo de combustibles fósiles en relación con la energía primaria se mantuvo constante en un 32%, según se muestra en la Figura 2.

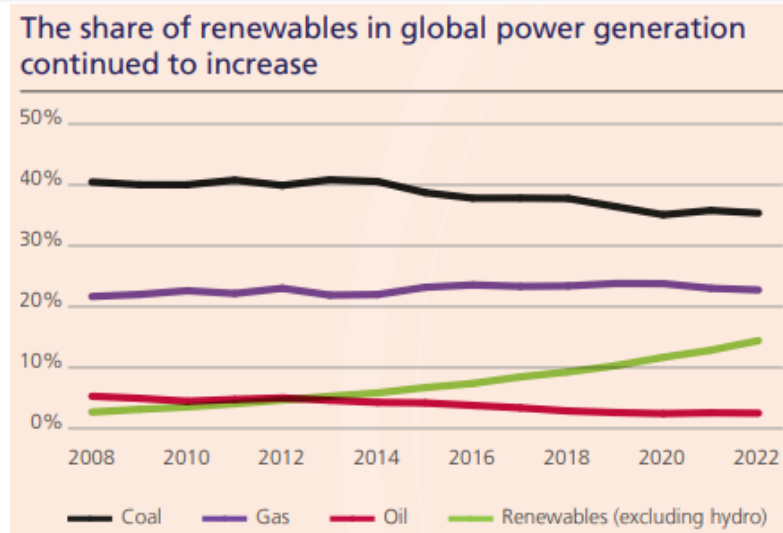
### Share of global primary energy



**Figura 2.** Aportación para cada tipo de combustible en el consumo global de energía primaria (Davenport & Wayth, 2023)

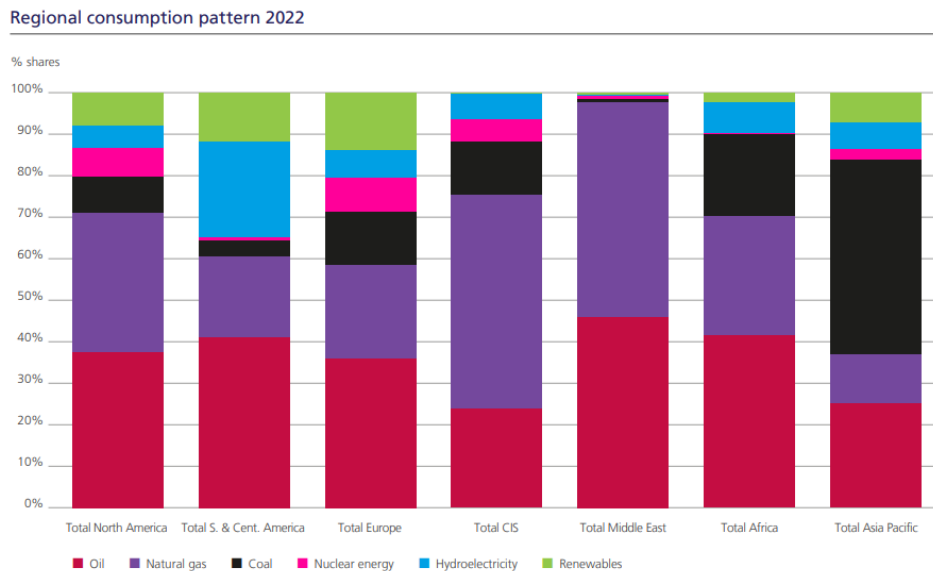
En la Figura 3, se observa que la proporción de energías renovables (excluyendo la hidroeléctrica) en la generación mundial de energía eléctrica continuó en aumento. Este crecimiento se atribuye a la construcción récord de nuevas instalaciones solares y eólicas. En 2022, la participación de las energías renovables en la producción total de electricidad a nivel global alcanzó el 14%, superando a la energía nuclear que representó el 9%.

Por otro lado, la proporción de generación eléctrica a partir del carbón se mantuvo en aproximadamente el 35%, mientras que la participación de la generación a partir del gas se mantuvo cerca de su promedio de los últimos 10 años, alcanzando el 23% en 2022. Estos datos reflejan la continua dependencia de los combustibles fósiles en el sector eléctrico, a pesar del crecimiento de las energías renovables.



**Figura 3.** Participación de las energías en la generación mundial de energía eléctrica (Davenport & Wayth, 2023)

En la Figura 4 se presenta el panorama de las fuentes de energía utilizadas por diferentes regiones para la producción de energía. En Oriente Medio, los países de la Comunidad de Estados Independientes (CIS), América del Norte y África, el uso de combustibles derivados del petróleo, como el gas natural y los combustibles fósiles, representan más del 70% de la contribución a la generación de energía. Esta alta dependencia de los combustibles fósiles es motivo de preocupación.



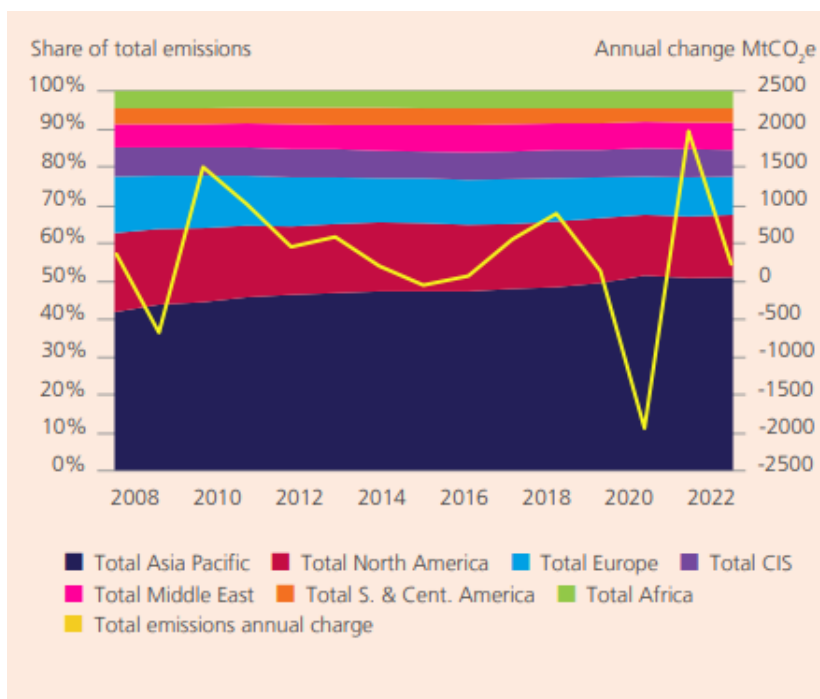
**Figura 4.** Patrón de consumo regional para el año 2022 (Davenport & Wayth, 2023)

La región de Asia Pacífico destaca por tener un elevado consumo de carbón como fuente de energía. Esto se refleja en la Figura 5, donde se muestra que las emisiones de

CO<sub>2</sub> generadas en esta región representan casi el 50% del total mundial. Estas emisiones contribuyen significativamente a la contaminación atmosférica en la región.

Por otro lado, es alentador observar en las regiones de Europa y América Latina que existe un porcentaje considerable de energía proveniente de fuentes hidroeléctricas y renovables, como se muestra en la Figura 4. Esto puede explicar los bajos niveles de emisiones al medio ambiente en estas regiones, como se indica en la Figura 5.

Recapitulando, la Figura 4 revela que algunas regiones dependen en gran medida de los combustibles fósiles para la generación de energía, lo que plantea preocupaciones sobre la sostenibilidad y el impacto ambiental. Sin embargo, las regiones con un mayor uso de fuentes de energía renovables muestran una tendencia más favorable en términos de emisiones al medio ambiente.

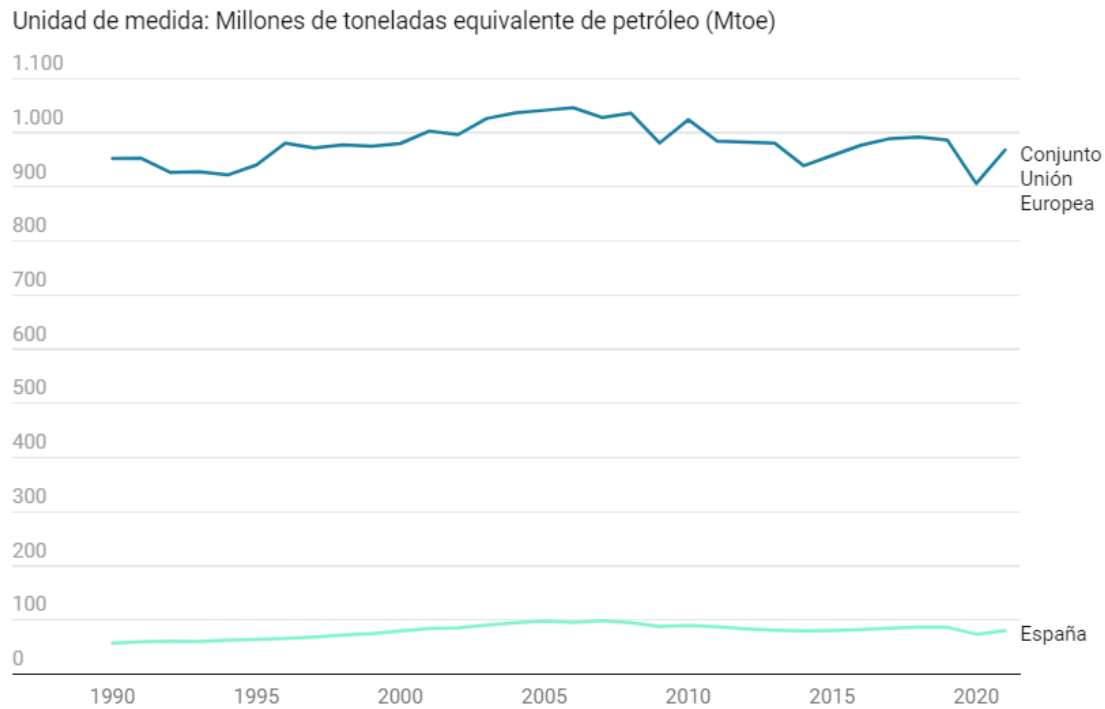


**Figura 5.** Evolución en las emisiones de carbono por región y cambio anual en millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Davenport & Wayth, 2023)

### 2.1.2. Panorama energético europeo y español

La Directiva sobre eficiencia energética aprobada en Europa establece metas para el consumo energético en la UE para el año 2030. Según esta directiva, el objetivo es no superar los 1.128 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) en el consumo energético total y no superar los 846 Mtoe en el consumo final de energía. Sin embargo, los datos disponibles muestran que el consumo energético en la Unión Europea (UE) en el año 2021 alcanzó los 1.309 Mtoe, superando el objetivo establecido para 2030.

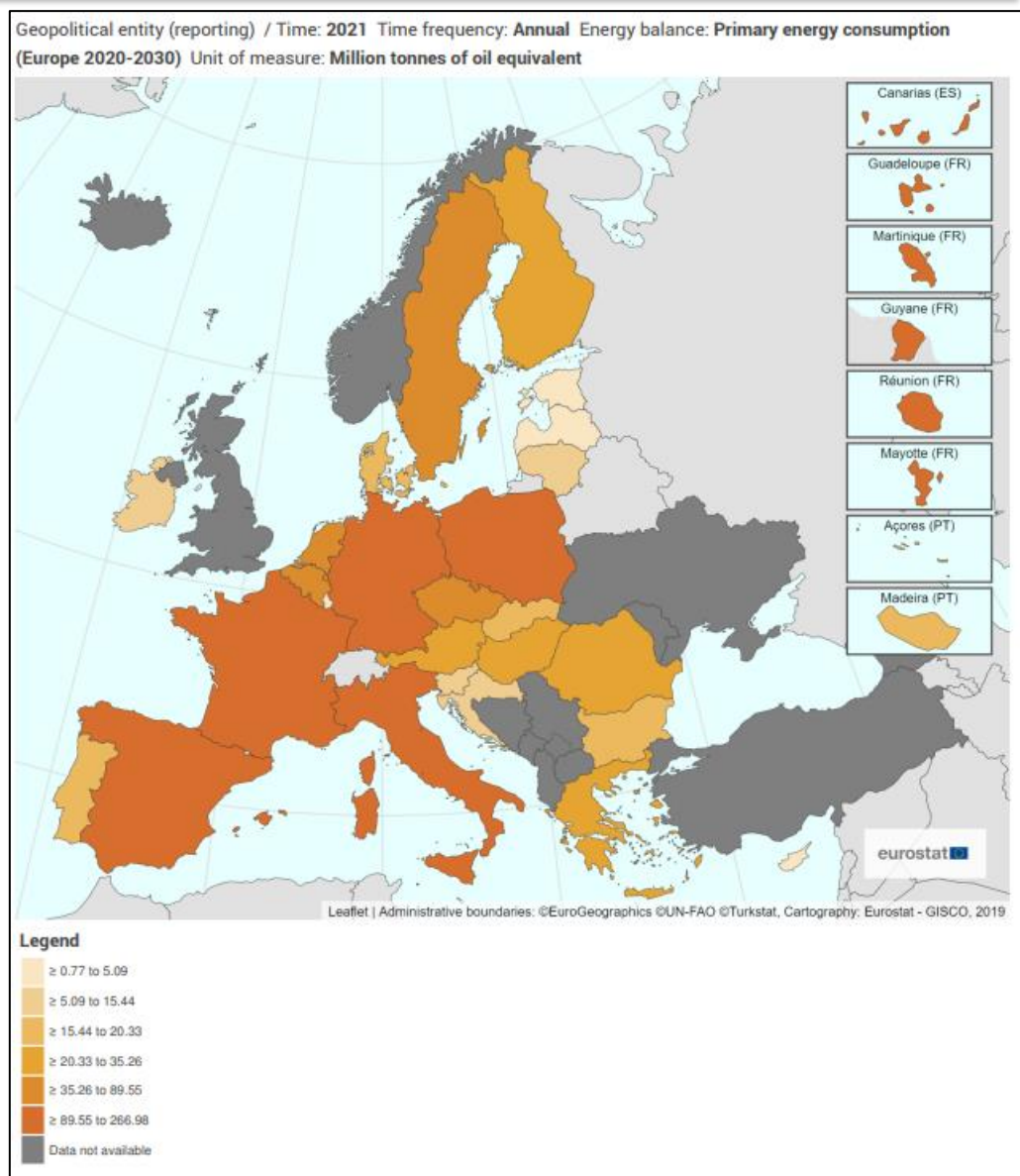
Asimismo, el consumo de energía final, como se puede ver en la Figura 6, alcanzó los 968 Mtoe, también superando el objetivo establecido por la UE (Eurostat, 2023).



**Figura 6.** Evolución del consumo de energía final en la UE y España (Eurostat, 2023)

En el mapa de consumo de energía primaria en los países europeos para el año 2021 (ver Figura 7), se destacan los siguientes países con sus respectivos consumos en millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe): Alemania con 266.98 Mtoe, Francia con 224.38 Mtoe, Italia con 145.31 Mtoe, España con 112.14 Mtoe y Polonia con 103.95 Mtoe, (Eurostat, 2023). Estos países representan una parte significativa del consumo total de energía primaria en la Unión Europea (UE).

Si se considera el consumo total de energía primaria de los 27 países miembros de la UE en 2021, este alcanzó los 1.309 Mtoe. En este contexto, Alemania representa aproximadamente el 20.4% del consumo total de energía primaria en la UE, Francia el 17.1%, Italia el 11.1%, España el 8.6% y Polonia el 7.9%.



**Figura 7.** Mapa europeo en consumo de energía primaria (Eurostat, 2023)

Durante el año 2021, el consumo de energía primaria en España fue de 117.526 kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep), como se muestra en la Figura 8. Este valor representa un aumento del 6,0% en comparación con el año anterior. Esta variación se debe principalmente a la recuperación económica tras la pandemia de Covid-19.



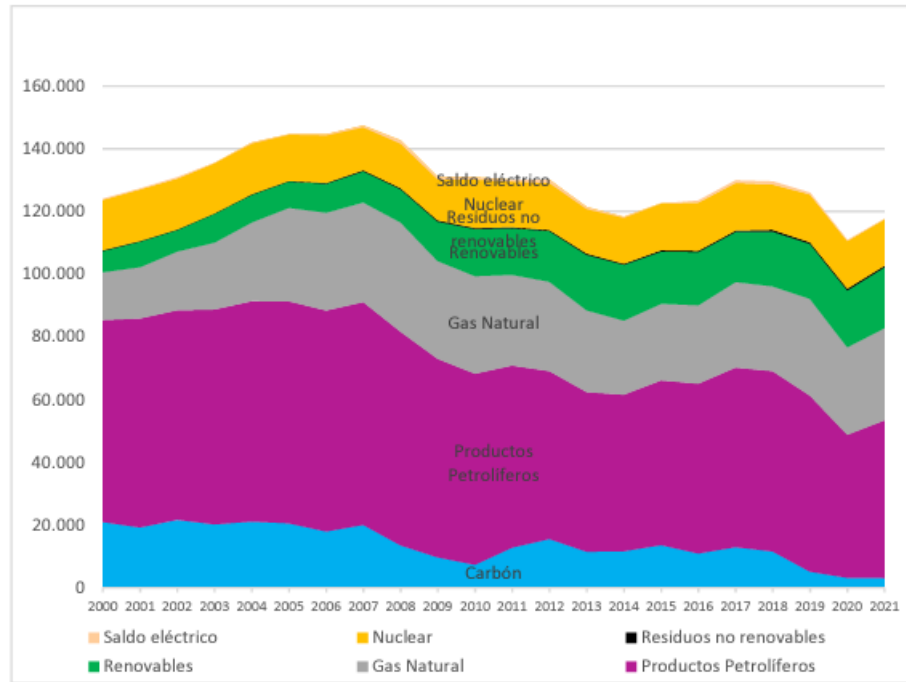
|      | E. Primaria Total |       | Carbón |       | Productos Petrolíferos |       | Gas Natural |       | Renovables |     | Residuos no renovables |       | Nuclear |      | Saldo eléctrico |   |
|------|-------------------|-------|--------|-------|------------------------|-------|-------------|-------|------------|-----|------------------------|-------|---------|------|-----------------|---|
|      | ktep              | %     | ktep   | %     | ktep                   | %     | ktep        | %     | ktep       | %   | ktep                   | %     | ktep    | %    | ktep            | % |
| 2001 | 127279            | 19172 | 15,1%  | 66684 | 52,4%                  | 16400 | 12,9%       | 8153  | 6,4%       | 139 | 0,1%                   | 16434 | 12,9%   | 297  | 0,2%            |   |
| 2002 | 130897            | 21602 | 16,5%  | 66841 | 51,1%                  | 18751 | 14,3%       | 6892  | 5,3%       | 97  | 0,1%                   | 16255 | 12,4%   | 458  | 0,4%            |   |
| 2003 | 135456            | 20133 | 14,9%  | 68595 | 50,6%                  | 21353 | 15,8%       | 9193  | 6,8%       | 114 | 0,1%                   | 15961 | 11,8%   | 109  | 0,1%            |   |
| 2004 | 141595            | 21053 | 14,9%  | 70291 | 49,6%                  | 25172 | 17,8%       | 8810  | 6,2%       | 122 | 0,1%                   | 16407 | 11,6%   | -260 | -0,2%           |   |
| 2005 | 144469            | 20517 | 14,2%  | 70800 | 49,0%                  | 29844 | 20,7%       | 8393  | 5,8%       | 189 | 0,1%                   | 14842 | 10,3%   | -115 | -0,1%           |   |
| 2006 | 144269            | 17911 | 12,4%  | 70488 | 48,9%                  | 31233 | 21,6%       | 9157  | 6,3%       | 252 | 0,2%                   | 15510 | 10,8%   | -282 | -0,2%           |   |
| 2007 | 146879            | 20040 | 13,6%  | 71026 | 48,4%                  | 31783 | 21,6%       | 10001 | 6,8%       | 309 | 0,2%                   | 14214 | 9,7%    | -494 | -0,3%           |   |
| 2008 | 141663            | 13507 | 9,5%   | 68110 | 48,1%                  | 34910 | 24,6%       | 10545 | 7,4%       | 328 | 0,2%                   | 15212 | 10,7%   | -949 | -0,7%           |   |
| 2009 | 130244            | 9665  | 7,4%   | 63276 | 48,6%                  | 31225 | 24,0%       | 12565 | 9,6%       | 426 | 0,3%                   | 13783 | 10,6%   | -697 | -0,5%           |   |
| 2010 | 130118            | 7281  | 5,6%   | 60922 | 46,8%                  | 31130 | 23,9%       | 15044 | 11,6%      | 322 | 0,2%                   | 16135 | 12,4%   | -717 | -0,6%           |   |
| 2011 | 129507            | 12716 | 9,8%   | 58145 | 44,9%                  | 28936 | 22,3%       | 14814 | 11,4%      | 374 | 0,3%                   | 15045 | 11,6%   | -524 | -0,4%           |   |
| 2012 | 129071            | 15519 | 12,0%  | 53481 | 41,4%                  | 28575 | 22,1%       | 16123 | 12,5%      | 345 | 0,3%                   | 15991 | 12,4%   | -963 | -0,7%           |   |
| 2013 | 120739            | 11448 | 9,5%   | 50855 | 42,1%                  | 26163 | 21,7%       | 17716 | 14,7%      | 353 | 0,3%                   | 14785 | 12,2%   | -580 | -0,5%           |   |
| 2014 | 117954            | 11568 | 9,8%   | 49957 | 42,4%                  | 23667 | 20,1%       | 17750 | 15,0%      | 374 | 0,3%                   | 14931 | 12,7%   | -293 | -0,2%           |   |
| 2015 | 122506            | 13583 | 11,1%  | 52478 | 42,8%                  | 24539 | 20,0%       | 16601 | 13,6%      | 414 | 0,3%                   | 14903 | 12,2%   | -11  | 0,0%            |   |
| 2016 | 123409            | 10836 | 8,8%   | 54180 | 43,9%                  | 25040 | 20,3%       | 16982 | 13,8%      | 439 | 0,4%                   | 15273 | 12,4%   | 659  | 0,5%            |   |
| 2017 | 129845            | 12908 | 9,9%   | 57300 | 44,1%                  | 27267 | 21,0%       | 15978 | 12,3%      | 472 | 0,4%                   | 15131 | 11,7%   | 788  | 0,6%            |   |
| 2018 | 129530            | 11522 | 8,9%   | 57512 | 44,4%                  | 27081 | 20,9%       | 17434 | 13,5%      | 547 | 0,4%                   | 14479 | 11,2%   | 955  | 0,7%            |   |
| 2019 | 125981            | 5072  | 4,0%   | 56162 | 44,6%                  | 30897 | 24,5%       | 17516 | 13,9%      | 526 | 0,4%                   | 15218 | 12,1%   | 590  | 0,5%            |   |
| 2020 | 110830            | 3100  | 2,8%   | 45690 | 41,2%                  | 27915 | 25,2%       | 18129 | 16,4%      | 540 | 0,5%                   | 15174 | 13,7%   | 282  | 0,3%            |   |
| 2021 | 117526            | 3097  | 2,6%   | 50271 | 42,8%                  | 29417 | 25,0%       | 19437 | 16,5%      | 517 | 0,4%                   | 14714 | 12,5%   | 73   | 0,1%            |   |

Nota. Saldo eléctrico: Valor positivo: saldo importador; valor negativo: saldo exportador.

**Figura 8.** Consumo de energía primaria en España (ktep) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

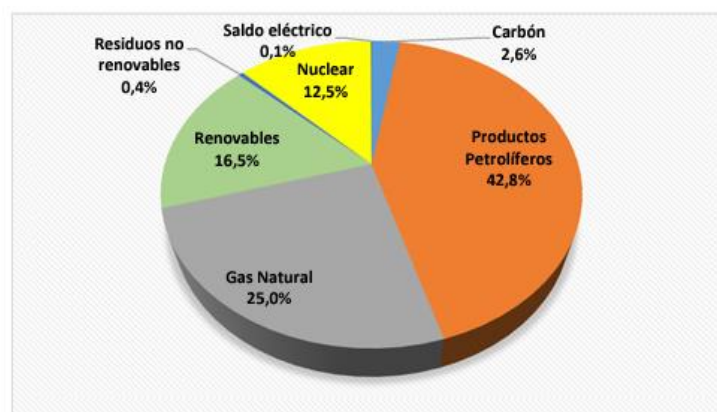
En la Figura 9, se pueden observar cambios significativos en el consumo primario de energía. Uno de los aspectos destacados es el aumento de la participación de los productos petrolíferos, que alcanzaron las 50.271 kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep), un incremento del 10,0% en comparación con el año anterior. Este aumento se debe a la eliminación de las restricciones de movilidad implementadas en 2020. Por otro lado, el consumo de gas natural también experimentó un crecimiento del 5,4%, alcanzando las 29.417 ktep. En cuanto al consumo de carbón, se mantuvo prácticamente sin cambios en comparación con 2020, debido a su utilización en la generación eléctrica durante el último cuatrimestre de 2021, en detrimento de las centrales que consumen gas natural, cuyo precio en el mercado aumentó significativamente a lo largo del año. A partir de septiembre de 2021, el 50% de la generación eléctrica total fue aportado por centrales de carbón.

En cuanto a las energías renovables, su consumo de energía primaria fue de 19.437 ktep, lo que representa un aumento del 7,2% en comparación con 2020. Este crecimiento fue liderado por la energía eólica (+10,0%) y la energía solar fotovoltaica (+39,9%).



**Figura 9.** Consumo de energía primaria en España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

En cuanto a la evolución de la estructura energética primaria, según se muestra en la Figura 10, las fuentes de energía renovable mantuvieron su participación en el mix energético en un 16,5% en el año 2021. Por otro lado, los productos petrolíferos aumentaron su contribución, pasando del 41,2% en 2020 al 42,8% en 2021. A pesar de este aumento, todavía se encuentran por debajo del 45% que representaban en 2019. En cuanto al saldo neto importador de energía eléctrica, se registró un valor de 852 gigavatios hora (GWh) en el año 2021.



**Figura 10.** Desglose del consumo de energía primaria en España 2021 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

En lo que respecta a la energía primaria renovable, pese al incremento de su valor agregado, cada fuente de energía renovable ha experimentado una evolución interanual diferente.

En relación con la energía primaria renovable, se observa una evolución interanual diversa en cada fuente de energía. Según se muestra en la Tabla 1, el año 2021 fue caracterizado por una mayor radiación solar, lo que llevó a un aumento del 3,6% en la energía solar termoeléctrica. La energía solar fotovoltaica experimentó un crecimiento significativo del 39,9% en 2021, no solo debido a la mayor radiación solar, sino también porque las plantas fotovoltaicas instaladas en 2020 estaban operativas al máximo rendimiento en 2021. Además, el aumento de la capacidad instalada a lo largo del año fue un factor favorable.

En contraste, la energía hidráulica experimentó una disminución del 2,9%, influenciada por un año de menor precipitación en comparación con 2020. Por otro lado, la energía eólica aumentó su contribución en el consumo primario de energía en un 10,0%, debido al incremento de la capacidad instalada.

Por último, es importante mencionar los aumentos en el consumo de energía primaria proveniente de biocombustibles líquidos para transporte (+0,2%), biogás (+0,8%) y biomasa (+4,5%), siendo este último principalmente atribuido a un incremento significativo en su uso para la generación eléctrica.

**Tabla 1.** Consumo de energía primaria en España en 2021 por tecnología renovable (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

| <b>Tecnología</b>  | <b>ktep</b> | <b>Δ 2021/2020 (%)</b> |
|--------------------|-------------|------------------------|
| Hidráulica         | 2.547       | -2,90%                 |
| Eólica             | 5.336       | 10,00%                 |
| Solar fotovoltaica | 1.885       | 39,90%                 |
| Solar térmica      | 2.370       | 3,60%                  |
| Energía del mar    | 1,6         | -29,60%                |
| Geotérmica         | 0,2         | 0,00%                  |
| Biomasa            | 5.278       | 4,50%                  |
| Bio ases           | 326         | 8%                     |
| RSU (renovables)   | 283         | 20,00%                 |
| Biocombustibles    | 1.409       | 0,20%                  |

### 2.1.3. Panorama energético en Canarias y economía circular

El panorama energético actual de Canarias se caracteriza por su dependencia de fuentes de energía externas, principalmente combustibles fósiles importados. A pesar de contar con un gran potencial en fuentes renovables, como la energía solar, eólica y geotérmica, el archipiélago aún tiene un alto porcentaje de generación de energía a partir de combustibles fósiles.

Durante el año 2021, se registró un aumento significativo en la demanda de energía primaria en Canarias. Se puede visualizar en la Figura 11, que esta demanda ascendió a 3.916 kTep, lo que representa un incremento del 10,6% en comparación con el año anterior. De manera similar, la demanda de energía final también experimentó un crecimiento significativo, alcanzando los 2.816,4 kTep, lo que supone un aumento del 12,4% respecto al año anterior.

| Año                                     | Producción interior <sup>(3)</sup> | Importaciones-exportaciones | Bunkers    | Variación Stocks | Energía Primaria | Energía Final    | Energía Final <sup>(1)</sup> |
|---|------------------------------------|-----------------------------|------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| 2011                                    | 57.914                             | 7.235.924                   | -2.538.437 | 118.114          | <b>4.873.515</b> | -                | <b>3.410.486</b>             |
| 2012                                    | 60.785                             | 6.982.391                   | -2.416.715 | 204.654          | <b>4.831.116</b> | -                | <b>3.349.622</b>             |
| 2013                                    | 63.959                             | 7.070.635                   | -2.354.418 | 50.882           | <b>4.831.059</b> | -                | <b>3.341.420</b>             |
| 2014                                    | 66.397                             | 6.395.707                   | -1.977.770 | 77.740           | <b>4.562.073</b> | -                | <b>3.366.465</b>             |
| 2015 <sup>(2)</sup>                     | 67.372                             | 7.080.974                   | -2.372.032 | -267.082         | <b>4.509.232</b> | <b>3.354.837</b> | <b>3.303.792</b>             |
| 2016 <sup>(2)</sup>                     | 68.189                             | 7.015.082                   | -2.452.172 | 97.837           | <b>4.728.936</b> | <b>3.551.557</b> | <b>3.504.302</b>             |
| 2017 <sup>(2)</sup>                     | 70.491                             | 7.321.567                   | -2.506.864 | 15.489           | <b>4.900.683</b> | <b>3.720.306</b> | <b>3.634.526</b>             |
| 2018 <sup>(2)</sup>                     | 100.563                            | 7.219.769                   | -2.474.164 | 46.854           | <b>4.893.022</b> | <b>3.746.861</b> | <b>3.697.980</b>             |
| 2019 <sup>(2)</sup>                     | 145.784                            | 6.978.513                   | -2.305.672 | 65.797           | <b>4.884.422</b> | <b>3.760.082</b> | <b>3.675.067</b>             |
| 2020 <sup>(2)</sup>                     | 141.973                            | 5.854.639                   | -2.157.148 | -297.609         | <b>3.541.855</b> | <b>2.583.194</b> | <b>2.504.547</b>             |
| 2021 <sup>(2)</sup>                     | 161.370                            | 5.444.894                   | -2.083.816 | 393.574          | <b>3.916.022</b> | <b>2.961.438</b> | <b>2.816.425</b>             |
| <b>Incremento anual acumulativo (%)</b> |                                    |                             |            |                  |                  |                  |                              |
| <b>21/20</b>                            | 13,66%                             | -7,00%                      | -3,40%     | -                | <b>10,56%</b>    | <b>14,64%</b>    | <b>12,45%</b>                |

(1) No incluye usos no energéticos.

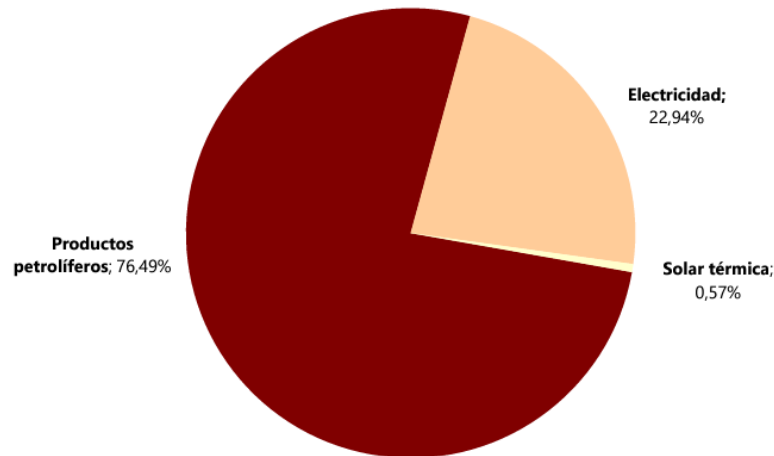
(2) Desde el 2015 se han considerado los factores energéticos de la Resolución de 30 de abril de 2015, de la Dirección General de Política Energética y Minas (BOE n°118 de 18/05/2015). Desde el 2015 se refleja la energía final considerando los usos no energéticos.

(3) Producción interior: desde el 2018 se ha considerado la aportación de la energía solar fotovoltaica generada para autoconsumo, la energía de la central hidroeléctrica destinada a bombeos y consumos propios de la central y la energía solar térmica producida por la superficie solar contemplada en la BDFER del I.D.A.E.

**Figura 11.** Evolución de algunas de las principales magnitudes energéticas en Canarias (Gobierno de Canarias, 2022)

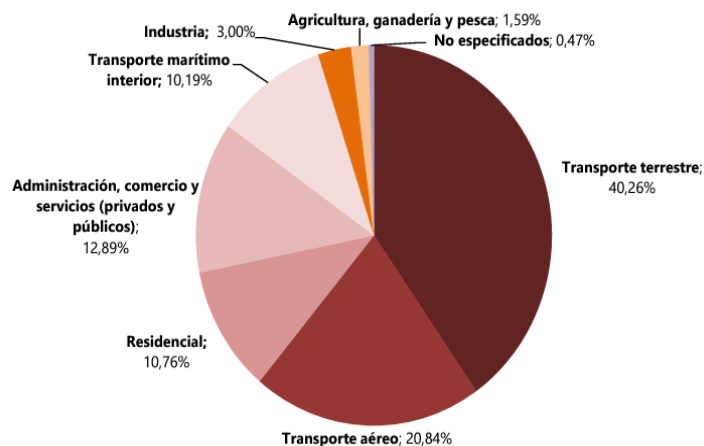
La gran mayoría de las necesidades energéticas, que incluyen transporte, generación de electricidad y calefacción, son satisfechas mediante el uso de productos derivados del petróleo. Estos productos, como el fueloil, gasoil, gasolina, queroseno y GLPs, representaron aproximadamente el 76,49% del total de la demanda final en el año

2017, tal y como se ilustra en la Figura 12. En contraste, el porcentaje restante de la demanda final de energía en las Islas Canarias se distribuye entre la electricidad, con un 22,94%, y la solar térmica, con un 0,57%.



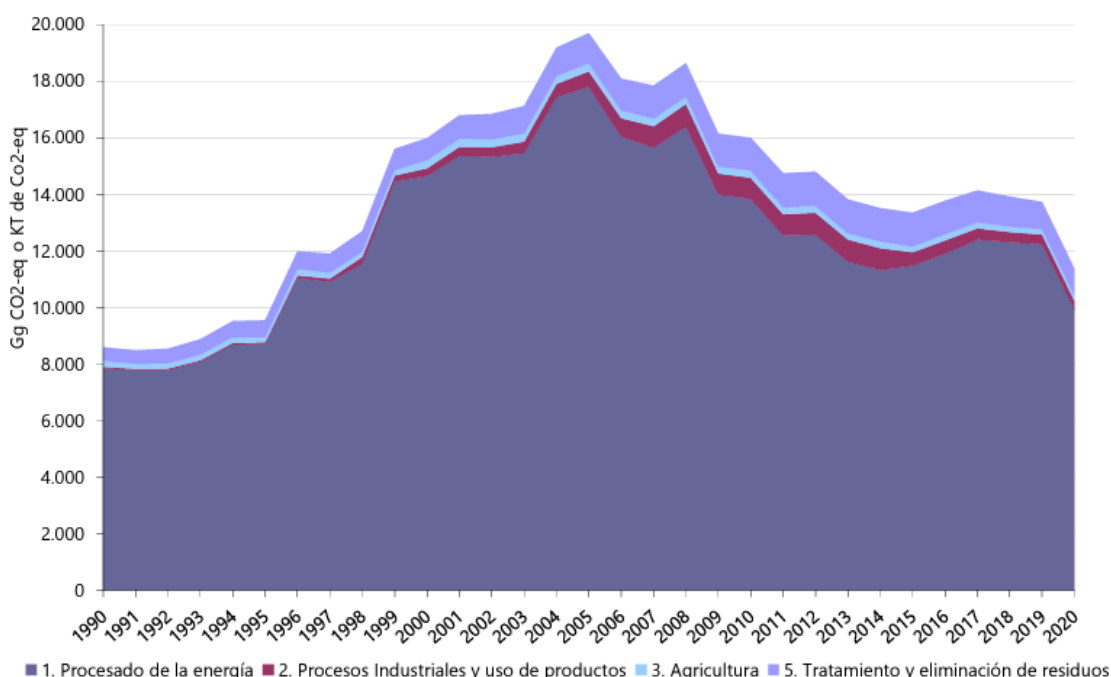
**Figura 12.** Distribución porcentual de la demanda de energía final, por tipo de energía, año 2021 (Gobierno de Canarias, 2022)

Al analizar los sectores de mayor consumo, se observa en la Figura 13 que el transporte terrestre fue el sector con mayor demanda, representando un 40,3% del consumo total. Le sigue el sector aéreo, con un 20,8% de participación en el consumo energético de la región. Además, el sector servicios, que incluye comercio, hostelería y Administraciones Públicas, también tuvo un papel destacado, representando un 12,9% del consumo total de energía en Canarias.



**Figura 13.** Distribución porcentual de la demanda de energía final en Canarias, por sectores, año 2021. (Gobierno de Canarias, 2022)

La evolución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Canarias (véase Figura 14) ha sido objeto de seguimiento y análisis en los últimos años. Según el inventario oficial más reciente, correspondiente al año 2020, se registraron emisiones totales de 11.366 Gg CO<sub>2</sub>eq/año en el archipiélago. Dentro de estas emisiones totales, el procesado de la energía fue responsable de 9.912 Gg CO<sub>2</sub>eq/año. De esta cifra, las industrias del sector energético contribuyeron con 4.728 Gg CO<sub>2</sub>eq/año. Estos datos reflejan la importancia de la generación y el consumo de energía en las emisiones de gases de efecto invernadero en Canarias (Gobierno de Canarias, 2022).



**Figura 14.** *Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en Canarias, por categorías (Gobierno de Canarias, 2022)*

En la actualidad, Canarias está trabajando en el desarrollo e implementación de estrategias y políticas energéticas para diversificar su matriz energética y aumentar la participación de las energías renovables. Se están realizando inversiones en parques eólicos y plantas solares fotovoltaicas, con el objetivo de aumentar la producción de energía limpia y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La Estrategia Canaria de Economía Circular 2021-2030, liderada por la Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial en colaboración con la Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo, tiene como objetivo principal impulsar la transición hacia un modelo productivo en Canarias que promueva la conservación del valor de los recursos durante el mayor tiempo



---

posible y reduzca la generación de residuos a través de un uso más inteligente y sostenible de los mismos.

Uno de los aspectos destacados de esta estrategia es la gestión circular de la energía y el agua, con un enfoque hacia la utilización de fuentes renovables. El objetivo es limitar la generación de externalidades negativas, aumentar la autosuficiencia energética y reducir la presión ambiental asociada a la gestión de estos recursos. Esto implica promover la generación y el consumo de energía renovable, así como la implementación de medidas de eficiencia energética y el fomento del uso responsable del agua (Gobierno de Canarias, 2021).

En cuanto al transporte, se están impulsando acciones para fomentar la movilidad sostenible, como la incorporación de vehículos eléctricos y la mejora de la infraestructura de recarga. También se está trabajando en la integración de biocombustibles en el transporte público y privado, como una alternativa más sostenible al uso de combustibles fósiles. Algunos de estos biocombustibles se obtienen a partir de aceites vegetales y grasas animales.

En Canarias, existen varias empresas dedicadas a la recogida, transporte y valorización de aceites de freír usados. A continuación, se mencionan algunas de ellas:

- Ataretaco: se trata de una fundación canaria dedicada a la formación integral e inserción sociolaboral. Entre sus actividades, se encarga de la recogida de aceite de fritura usado. Esta fundación defiende la importancia de la gestión adecuada de los aceites de cocina usados y destaca el papel de las empresas de inserción en la gestión de residuos. En noviembre de 2021, se firmó un contrato de colaboración y transferencia tecnológica entre el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), la empresa privada Ayagüeres Medioambiente y la empresa de economía social y solidaria del grupo Ataretaco, Ecatar Canarias, para la producción de biocombustible en Canarias a partir de aceite vegetal usado (*Ataretaco*, s. f.).
- Ekoatlantica de Recuperación: se encarga de la recogida de residuos en la isla de Gran Canaria y del transporte hasta su sede en Agüimes, donde son almacenados. Además, retiran los aceites usados de municipios como Tegüise y Yaiza (Lanzarote) y Tuineje y Betancuria (Fuerteventura) (*Ekoatlantica de Recuperación, S.L.*, s. f.)
- Recyoil: empresa dedicada a la valorización de aceite de fritura usado. Recogen estos desechos de empresas hosteleras, de catering, empresas de

---

restauración y ayuntamientos. Además, ofrecen información a los clientes sobre cómo separar y almacenar adecuadamente los aceites para su posterior uso como materia prima en la producción de biodiésel (recyoil energy, S.L., n.d.)

Estas empresas desempeñan un papel importante en la gestión y valorización de los aceites de fritura usados en Canarias, contribuyendo así a la promoción de prácticas sostenibles y a la producción de biocombustibles a partir de estos residuos.

## **2.2. Aceites de frituras**

Si se implementa una gestión sostenible de los aceites de fritura, es posible darles un nuevo uso al utilizarlos como materia prima para la producción de productos con valor social y económico. Sin embargo, durante el proceso de fritura, los aceites experimentan cambios en sus propiedades originales, lo que requiere que sean tratados adecuadamente para obtener un producto final de calidad.

Los aceites vegetales están compuestos principalmente por triglicéridos, que son una combinación de ácidos grasos y glicerol unidos por enlaces éster (Lázaro, 2018). Durante el proceso de fritura, se producen diversas reacciones químicas, como la oxidación, termooxidación, hidrólisis y polimerización. Estas reacciones hacen que el proceso sea complejo y dan lugar a la formación de compuestos tanto volátiles como no volátiles. Los compuestos volátiles tienden a evaporarse o ser absorbidos, mientras que los compuestos no volátiles son los responsables de los cambios físicos y químicos tanto en el aceite como en los alimentos fritos. En general, este proceso conlleva un deterioro en la calidad del aceite.

Las reacciones que se producen en el proceso de fritura se describen como:

- La oxidación es una reacción química en la que el oxígeno reacciona con los enlaces dobles de los lípidos, generando una variedad de productos químicos. Este fenómeno conlleva a una pérdida del valor nutricional de los alimentos y a la formación de aromas indeseados asociados a la rancidez. La oxidación de los ácidos grasos insaturados durante la fritura produce compuestos polares como aldehídos, cetonas, ácidos y peróxidos. Estos compuestos son activos en la superficie de los alimentos y alteran las condiciones del proceso de fritura, contribuyendo también a la formación del color del aceite.



- 
- La termooxidación ocurre en el proceso de fritura, donde los aceites vegetales experimentan una alteración térmica causada por exposición a temperaturas superiores a 180°C. Durante la fritura, la oxidación ocurre de manera más compleja y rápida, involucrando tanto reacciones de oxidación como reacciones térmicas. Las altas temperaturas promueven la rápida formación de nuevos compuestos, disminuyen la presión de oxígeno y desencadenan reacciones de iniciación, lo que resulta en una mayor concentración de radicales alquilo en comparación con los radicales alquilperoxilo. Además, la descomposición de los hidroperóxidos es más rápida que su formación, lo que conduce a la formación de radicales alquilo y alcoxi como los principales compuestos poliméricos.  
El cambio más notable durante la oxidación es la pérdida de insaturación debido al ataque del oxígeno y la formación de radicales. La oxidación térmica también induce la isomerización de los enlaces dobles, lo que resulta en la formación de enlaces dobles trans y sistemas de enlaces dobles conjugados. Es importante destacar que la oxidación contribuye a la rancidez, la producción de aromas deseables o indeseables, la polimerización y la formación de compuestos con actividad fisiológica.
  - La hidrólisis es un proceso en el cual el agua presente en los alimentos reacciona con el aceite, siendo esta la única reacción capaz de romper directamente las moléculas de triglicéridos. Durante esta reacción, se liberan ácidos grasos libres y ésteres parciales de glicerol. Los aceites que contienen ácidos grasos de cadenas cortas e insaturadas son más propensos a experimentar esta hidrólisis en comparación con aquellos que poseen ácidos grasos de cadenas más largas y saturadas, ya que los primeros son más solubles en agua. En comparación con otras reacciones, la calidad del aceite no tiene un impacto en la reacción de hidrólisis. Sin embargo, los ácidos grasos libres que se forman durante esta reacción contribuyen a generar un sabor indeseable que hace que el aceite sea inaceptable.
  - La polimerización es una reacción en la que el aceite se combina consigo mismo, formando moléculas más grandes a partir de moléculas de aceite relativamente pequeñas. Esta reacción puede ocurrir en los puntos de insaturación de las cadenas de ácidos grasos (previa a la oxidación) o en la unión entre el ácido graso y la molécula de glicerol. Para que se
-

---

considere una molécula polimerizada, su peso molecular debe ser cientos o miles de veces mayor que el de la molécula inicial. Los productos resultantes de esta descomposición suelen ser polares, no volátiles, como dímeros de triacilglicéridos y polímeros. Cuando el aceite experimenta una polimerización significativa y su viscosidad aumenta, el agua presente en los alimentos forma pequeñas burbujas durante el proceso de fritura, lo que da lugar a la formación de espuma.

### 2.3. Biocombustibles

En la actualidad, el petróleo es la materia prima más utilizada para la producción de la mayoría de los combustibles, debido a su amplio uso y alta demanda energética por parte de la población. Sin embargo, este recurso fósil plantea graves problemas para el planeta, como el calentamiento global causado por las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante el proceso de refinación y combustión, así como la contaminación de cuerpos de agua y extensas áreas de suelo en caso de derrames.

Además, el petróleo es un recurso limitado. Por esta razón, se busca un sustituto que pueda desempeñar la misma función de manera más sostenible. Surge así el concepto de "biocombustibles". Los biocombustibles son combustibles producidos a partir de biomasa, que incluye residuos agrícolas y forestales, así como residuos industriales y domésticos biodegradables. Entre los biocombustibles líquidos más destacados se encuentran el bioetanol y el biodiésel. Estos biocombustibles ofrecen una alternativa más amigable con el medio ambiente, ya que su producción y uso generan menos emisiones de gases de efecto invernadero y reducen la dependencia de los combustibles fósiles.

Según bibliografía, los biocombustibles se pueden clasificar en función de su generación y tecnología de producción, como se indica a continuación (Ganduglia, 2009):

- Biocombustibles de primera generación: Son los más comunes en la actualidad y se producen a partir de materias primas como maíz, caña de azúcar, remolacha azucarera y soja. La tecnología empleada implica procesos de fermentación para obtener bioetanol y transesterificación para obtener biodiésel.
- Biocombustibles de generación 1.5: Esta categoría incluye biocombustibles producidos utilizando tecnologías convencionales, pero empleando materias primas alternativas que no compiten con la producción de alimentos. Entre estas materias primas se encuentran especies arbóreas o arbustivas perennes y otras opciones adecuadas para zonas áridas, semiáridas o tierras marginales, como el ricino, la *jatropha* y el cardo.

- **Biocombustibles de segunda generación:** Representan un avance tecnológico al utilizar biomasa lignocelulósica, que incluye residuos agrícolas y forestales, hierbas perennes y árboles de crecimiento rápido. La conversión de esta biomasa requiere tecnologías más avanzadas que permiten reemplazar los componentes utilizados en la primera generación, como el azúcar, almidón y aceites.
- **Biocombustibles de tercera generación:** En esta generación, se utilizan cultivos energéticos especialmente adaptados o diseñados para obtener materias primas más eficientes en la producción de biocombustibles. Esto incluye cultivos con alto contenido de azúcar o aceite, cultivos tolerantes a condiciones adversas como sequías, y modificaciones genéticas en especies como eucaliptos y álamos para reducir la lignina.
- **Biocombustibles de cuarta generación:** Esta generación representa un avance revolucionario en la mitigación del cambio climático al incorporar el concepto de "bioenergía con balance negativo de carbono". En este caso, la producción y utilización del biocombustible resulta en una menor emisión de dióxido de carbono en comparación con la cantidad capturada o consumida durante el cultivo de la materia prima y la producción del biocombustible. Se combinan la producción de energía y biocombustibles con tecnologías de captura y almacenamiento de carbono a nivel de la materia prima y del proceso tecnológico.

#### **2.4. Biodiésel**

El biodiésel es un tipo de combustible renovable y biodegradable que se emplea como una alternativa al diésel convencional derivado del petróleo. Se produce utilizando fuentes renovables como aceites vegetales o grasas animales, a través de un proceso conocido como transesterificación. En este proceso, los triglicéridos presentes en los aceites y grasas se transforman en ésteres metílicos o etílicos, que constituyen los componentes principales del biodiésel.

El biodiésel, posee una estructura química de un mono alquil éster con largas cadenas de ácidos grasos, también llamados ésteres metílicos de ácidos grasos, también conocidos como FAMES por sus siglas en inglés (Fatty Acid Methyl Esters)(Leung et al., 2010).

Más del 95% de la materia prima de producción de biodiesel en los países desarrollados proviene de aceites vegetales comestibles. Sin embargo, esta práctica ha suscitado objeciones por parte de diversas organizaciones, alegando que el biodiesel compite por recursos con la industria alimentaria (Koh & Tinia, 2011).

El biodiésel se ha convertido en una opción ampliamente utilizada en la actualidad debido a su carácter sostenible y respetuoso con el medio ambiente en comparación con el diésel convencional. Sus aplicaciones abarcan diversos sectores, entre los que destacan:

- En el área del transporte, se emplea como combustible para vehículos diésel en el transporte de mercancías, el transporte público y los automóviles particulares. Puede utilizarse en forma pura (B100) o mezclado con diésel convencional en diferentes proporciones, como B20 (una mezcla compuesta por un 20% de biodiésel y un 80% de diésel).
- Para generación de energía, este combustible se utiliza en la generación de energía eléctrica. Puede emplearse en generadores diésel para producir electricidad en áreas remotas o como respaldo en sistemas de energía.
- En cuanto a la industria marítima, puede utilizarse como combustible en embarcaciones y barcos, contribuyendo así a reducir el impacto ambiental de esta industria. Algunas embarcaciones ya utilizan mezclas de biodiésel y diésel convencional para reducir sus emisiones contaminantes.
- Finalmente, en el ámbito de la agricultura el biodiésel encuentra aplicación en maquinaria agrícola y equipos de construcción que funcionan con motores diésel.

El biodiésel contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. Su utilización promueve la diversificación de la matriz energética y fomenta el desarrollo sostenible en distintos sectores de la economía.

El biodiésel debe cumplir con requisitos específicos establecidos en la norma UNE-EN 14214 para garantizar su calidad adecuada y prevenir problemas como la falta de estabilidad, corrosión o formación de depósitos en los sistemas de combustible. En la Tabla 2 se presentan los parámetros de calidad que debe cumplir el biodiésel para poder ser comercializado.

**Tabla 2.** *Parámetros de calidad del biodiésel establecidos por la norma UNE-EN 14214*

| Propiedad          | Unidad             | Mínimo | Máximo | Método de Ensayo                    |
|--------------------|--------------------|--------|--------|-------------------------------------|
| Contenido en FAME  | % (m/m)            | 96,5   | -      | UNE-EN 14103                        |
| Densidad a 15 °C   | kg/m <sup>3</sup>  | 860    | 900    | UNE-EN ISO 3675<br>UNE-EN ISO 12185 |
| Viscosidad a 40 °C | mm <sup>2</sup> /s | 3,50   | 5,00   | UNE-EN ISO 3104                     |

**Tabla 2 (cont).** *Parámetros de calidad del biodiésel establecidos por la norma UNE-EN 14214*

|  |               |         |       |  |
|--|---------------|---------|-------|--|
| Punto de inflamación   | ° C           | 101     | -     | UNE-EN ISO 2719<br>UNE-EN ISO 3679                       |
| Número de cetano   | -             | 51,0    | -     | UNE-EN ISO 5165<br>UNE-EN 16175                          |
| Corrosión de la lámina de cobre (3 h a 50 °C)                | Clasificación | Clase 1 |       | UNE-EN ISO 2160  |
| Estabilidad a la oxidación (a 110 ° C)                       | h             | 8,0     | -     | UNE-EN 14112   |
| Índice de acidez   | mg KOH/g      | -       | 0,50  | UNE-EN 14104   |
| Índice de yodo   | g yodo/100 g  | -       | 120   | UNE-EN 14111<br>UNE-EN 16300                             |
| Éster de metilo de ácido linolénico                          | % (m/m)       | -       | 12,00 | UNE-EN 14103   |
| Ésteres de metilo poliinsaturados ( $\geq 4$ enlaces dobles) | % (m/m)       | -       | 1,00  | UNE-EN 15779   |
| Contenido en metano  | % (m/m)       | -       | 0,20  | UNE-EN 14110   |
| Contenido en monoglicéridos                                  | % (m/m)       | -       | 0,70  | UNE-EN 14105   |
| Contenido en diglicéridos                                    | % (m/m)       | -       | 0,20  | UNE-EN 14105   |
| Contenido en triglicéridos                                   | % (m/m)       | -       | 0,20  | UNE-EN 14105   |
| Glicerol libre   | % (m/m)       | -       | 0,02  | UNE-EN 14105<br>UNE-EN 14106                             |
| Glicerol total   | % (m/m)       | -       | 0,25  | UNE-EN 14105   |
| Contaminación total  | mg/kg         | -       | 24    | UNE-EN12662  |
| Contenido en cenizas sulfatadas                              | % (m/m)       | -       | 0,02  | UNE-EN ISO 3987  |
| Metales del grupo II   | mg/kg         | -       | 5,00  | UNE-EN 14538   |
| Contenido en fósforo   | mg/kg         | -       | 4,00  | UNE-EN 14538   |
| Contenido en azufre  | mg/kg         | -       | 10,00 | UNE-EN ISO 20846<br>UNE-EN ISO 20884<br>UNE-EN ISO 13032 |

El biodiésel obtenido a partir de aceites residuales puede contribuir a la reducción del dióxido de carbono debido a la combustión completa o más completa de los ésteres metílicos de ácidos grasos, ya que estos contienen un 9 % más de oxígeno. Además, el

---

dióxido de carbono puede reducirse en el medio ambiente mediante su utilización natural por parte de las plantas de biomasa, conocido como ciclo cerrado del carbono. Además, el costo de producción del biodiésel también puede reducirse mediante la elección de tecnologías mejoradas para la síntesis del biodiésel. El costo de la materia prima de aceite representa el 75 % del costo total de síntesis del biodiésel. Por lo tanto, es necesario elegir una materia prima a bajo precio para minimizar los costos de producción del biodiésel (Nayab et al., 2022).

#### **2.4.1. *Aceite de fritura para la obtención de biodiesel***

Los aceites de fritura presentan un bajo nivel de reutilización, lo que los hace adecuados para su aprovechamiento como biocombustible sin experimentar grandes alteraciones. El empleo de aceites de fritura reciclados conlleva dificultades logísticas, tanto en su recogida como en su control y trazabilidad debido a su condición de residuo. En el caso de España, la promoción activa por parte de las autoridades para la recogida de aceites usados no ha sido contundente, a pesar de que la Ley 10/98 de Residuos prohíbe el vertido de aceites usados. Esta prohibición proporciona un incentivo adicional para su utilización en la producción de biodiésel.

Otros problemas asociados al uso de aceites reciclados incluyen altos niveles de material no saponificable, presencia de agua y ácidos grasos libres, lo cual requiere procesos de acondicionamiento del aceite. Además, el biodiésel producido a partir de estos aceites generalmente no cumple con las especificaciones de pureza establecidas en la norma UNE 14214, lo que implica la necesidad de añadir antioxidantes. Por último, la baja estabilidad a la oxidación del producto también requiere la destilación de este. Todos estos desafíos y procesos adicionales aumentan los costos de producción.

Con todo lo comentado anteriormente, los aceites reciclados se consideran una de las mejores alternativas en la producción de biodiésel debido a su utilización de una materia prima muy económica y a su capacidad para eliminar los costos asociados al tratamiento como residuo.

Por lo tanto, la elección de usar como materia prima aceites de frituras residuales para la generación de biodiésel resulta adecuada debido a su bajo coste de obtención y contribuye a la participación de aprovechamiento de residuos.

#### **2.5. *Reacciones para la obtención de biodiesel***

El biodiésel puede ser producido de varias maneras, pero entre los métodos más usados se tienen la reacción de esterificación que pretende acondicionar el aceite para luego ser sometido a la reacción de transesterificación donde el aceite se convierte en

---

---

biodiésel, esta última reacción puede ser realizada en conjunto con la reacción de esterificación o sin ella dando así el mismo producto.

La elevada viscosidad de los aceites vegetales, que es 10 veces superior a la del diésel, presenta varios desafíos en los motores de inyección por compresión, como la formación de depósitos de carbón en los inyectores, la durabilidad del motor y la contaminación del aceite lubricante. Para solucionar este problema, se han estudiado cuatro principales metodologías de producción de biodiesel: blending o dilución, micro-emulsión, pirólisis y transesterificación (Ma & Hanna, 1999)

En todas estas metodologías, los aceites vegetales son modificados para reducir su viscosidad y obtener un producto con las propiedades adecuadas para su uso como combustible. Estas son las principales técnicas utilizadas:

- **Blending o dilución:** Consiste en mezclar directamente los aceites vegetales con diesel para mejorar la viscosidad del combustible. En el corto plazo, se han logrado relaciones aceite/diesel entre 1:10 y 2:10. Sin embargo, el uso de mezclas de aceites vegetales no ha sido satisfactorio ni práctico para los motores diesel.
- **Micro-emulsificación:** Se refiere a la formación de una micro-emulsión, que es una dispersión coloidal espontánea de dos líquidos inmiscibles, generalmente con la ayuda de un tensioactivo. Las micro-emulsiones de aceites vegetales con butanol, hexanol y octanol cumplen con las limitaciones máximas de viscosidad para los motores diesel.
- **Pirólisis:** Es un proceso de conversión térmica en el cual se descompone una sustancia orgánica en presencia de calor y, en algunos casos, un catalizador, sin la presencia de aire u oxígeno. Los combustibles resultantes de la descomposición térmica del aceite vegetal y los combustibles diésel presentan propiedades muy similares (Abbaszaadeh et al., 2012).
- **Transesterificación:** Es una reacción química entre los triglicéridos, que son el componente principal del aceite vegetal, y el alcohol, para formar ésteres (biodiesel) y glicerol (subproducto), con o sin la presencia de un catalizador.

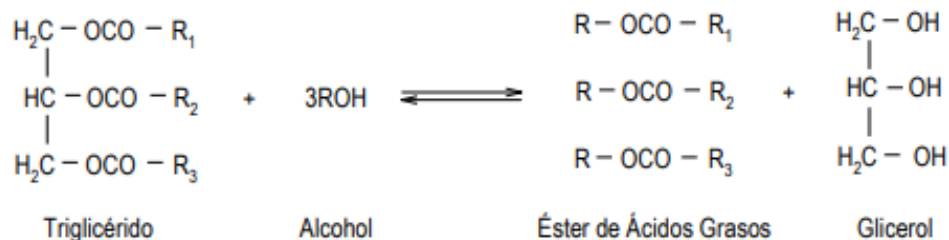
### **2.5.1. Transesterificación**

La transesterificación es la técnica más utilizada en la producción de biodiesel. Este proceso permite mejorar las propiedades del biodiesel en comparación con el diésel derivado del petróleo en términos de densidad, poder calorífico, viscosidad, punto de inflamación, punto de enturbiamiento y punto de fluidez (Koh & Tinia, 2011).

---

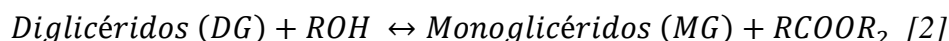
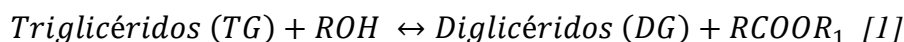


La transesterificación, también conocida como alcoholólisis, es una reacción química en la que los triglicéridos y el alcohol se combinan en presencia de un catalizador para formar ésteres y glicerol (véase Figura 15).



**Figura 15.** Reacción de transesterificación (Díaz González, 2013)

Esta reacción consta de tres etapas reversibles consecutivas: la conversión de triglicéridos a diglicéridos (1), seguida de la conversión de diglicéridos a monoglicéridos (2), y finalmente la conversión de los monoglicéridos en glicerol (3), obteniendo un éster en cada paso. En general, se emplea un catalizador para mejorar y acelerar la velocidad de reacción, lo que permite completar la reacción en un tiempo más corto.



Los alcoholes son compuestos orgánicos que contienen un grupo funcional hidroxilo unido a otros átomos de carbono o hidrógeno. Algunos ejemplos de alcoholes incluyen el metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico. El metanol y etanol son los alcoholes más comúnmente utilizados.

El metanol es el más preferible debido a su bajo costo y sus ventajas físicas y químicas como alcohol polar y de cadena corta. El metanol también puede reaccionar rápidamente con los triglicéridos y disolver fácilmente el catalizador alcalino. Sin embargo, existe un riesgo de explosión asociado con los vapores de metanol debido a su bajo punto de ebullición, por lo que debe manipularse con cuidado durante la producción de biodiésel (Koh & Tinia, 2011).

La transesterificación puede llevarse a cabo de dos formas: homogénea o heterogénea, dependiendo del tipo de catalizador utilizado. En la transesterificación homogénea, el catalizador se encuentra en la misma fase que la mezcla que va a reaccionar, es decir, en estado líquido. Se distingue entre catálisis homogénea ácida o básica, según el tipo de catalizador utilizado.



---

La transesterificación homogénea básica es la más común en la producción de biodiésel, ya que se realiza bajo condiciones de operación moderadas, como temperaturas bajas y presión atmosférica. Además, los catalizadores básicos son menos corrosivos que los ácidos (Chakrabarti & Prasad, 2012). Sin embargo, cuando la materia prima contiene un alto contenido de ácidos grasos libres (FFA, por sus siglas en inglés Free Fatty Acid), los catalizadores básicos pueden generar jabones, lo que reduce el rendimiento de la reacción al consumir parte del catalizador.

Al finalizar la transesterificación homogénea, el biodiésel crudo contiene impurezas como jabones, parte del catalizador, metales, alcohol y glicerol libre. Estas impurezas deben ser eliminadas en etapas posteriores de purificación. El proceso de purificación convencional implica lavar el biodiésel crudo para eliminar estas impurezas. Sin embargo, este proceso genera una gran cantidad de aguas residuales altamente contaminantes, lo que provoca impactos ambientales debido a la alta demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y elevados valores de pH (Atadashi et al., 2012).

En la transesterificación heterogénea, el catalizador se encuentra en fase sólida, lo cual ofrece diversas ventajas en comparación con la transesterificación homogénea. Los catalizadores sólidos permiten una fácil separación del producto de reacción sin necesidad de lavados con agua, lo que puede reducir los costes de producción. Además, tienen la capacidad de llevar a cabo la esterificación y transesterificación al mismo tiempo, lo cual agiliza el proceso (Leung et al., 2010).

En la búsqueda de mejoras en la producción de biodiésel, se han realizado estudios sobre nuevos catalizadores sólidos. Entre ellos destaca el uso de piedra pómez como soporte catalítico impregnada con metales como litio o potasio. Un ejemplo es el catalizador Li/Pumita, que consiste en modificar químicamente la pumita con litio, y se ha empleado con éxito para producir biodiésel a baja temperatura en un proceso continuo, sin necesidad de lavados del producto final. Al ser calcinado, el litio se fija al soporte de manera que puede ser reutilizado sin perder su actividad catalítica y, por lo tanto, sin disminuir el rendimiento de la reacción (Brito et al., 2022).

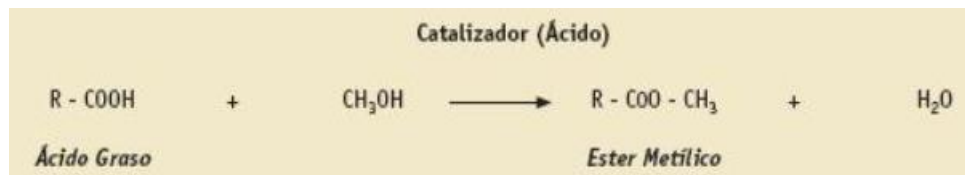
Este catalizador (Li/Pumita) destaca frente a otros desde el punto de vista ambiental y económico, ya que se basa en un material natural abundante y de bajo costo en comparación con otros materiales sintéticos utilizados como catalizadores en aplicaciones industriales. Para promover un modelo de producción sostenible, tanto la

transesterificación homogénea como la heterogénea se han desarrollado utilizando materias primas no comestibles, como aceites de fritura y cultivos energéticos.

### 2.5.2. Esterificación

El uso de aceite de fritura en la producción de biodiésel presenta un desafío principal debido a su alto contenido de ácidos grasos libres. Este contenido provoca la formación de jabones durante el proceso de transesterificación, ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador. Para superar este inconveniente, se emplea una reacción de esterificación.

En la reacción de esterificación (ver Figura 16), los ácidos grasos libres del aceite se combinan con un alcohol en presencia de un ácido fuerte como catalizador, por lo general, ácido sulfúrico. Esta reacción da como resultado la formación de ésteres metílicos y agua. Esta etapa es esencial para convertir los ácidos grasos libres en compuestos biodiesel compatibles y eliminar la formación de jabones no deseados.



**Figura 16.** Reacción esterificación (Biodisol, s. f.)

El uso de ácido sulfúrico como catalizador en la reacción de esterificación presenta varios inconvenientes. En primer lugar, genera un impacto ambiental significativo debido a su alta toxicidad y capacidad corrosiva. Además, su separación al finalizar la reacción aumenta los costos de producción. También puede causar daños en equipos y sistemas debido a su naturaleza altamente corrosiva.

Para superar estos problemas, ha surgido la idea de implementar el proceso de adsorción como una alternativa más sostenible. Este proceso permite reducir el alto contenido de ácidos grasos libres en los aceites de fritura usados de manera efectiva. En lugar de utilizar ácido sulfúrico, se emplea un adsorbente que tiene la capacidad de adsorber selectivamente los ácidos grasos libres del aceite (Díaz & Brito, 2022).

## 2.6. Adsorción

El fundamento de la adsorción consiste en la separación de una sustancia en una fase fluida y su acumulación en la superficie del adsorbente sólido. Se trata por tanto de un fenómeno interfacial entre un fluido y un sólido. Los adsorbentes sólidos necesitan áreas superficiales muy elevadas y una estructura porosa para que las moléculas de

---

adsorbato (componente que se desea eliminar) puedan acceder a los sitios activos (Vilarrasa, 2014).

### **2.6.1. Adsorción alternativa a la reacción de esterificación.**

La adsorción se presenta como un método alternativo adecuado para disminuir el contenido de ácidos grasos libres en el aceite utilizado en la producción de biodiésel. Este método es sencillo de llevar a cabo, se puede realizar a baja temperatura y no requiere el uso de catalizadores ácidos como el ácido sulfúrico utilizado en la reacción de esterificación. Además, no se necesitan reactivos adicionales como los alcoholes (como el metanol), lo que conlleva a que no sea necesaria una operación de lavado del producto y una reducción en los costos de las materias primas.

### **2.6.2. Cáscaras de cultivos energéticos como adsorbente**

Algunos autores han usado cáscaras de cultivos energéticos como base para la síntesis de carbón, que se utiliza como adsorbente en la eliminación de ácidos grasos libres (Díaz & Brito, 2022). El uso de cáscaras de cultivo energético para esta aplicación presenta varias ventajas. En primer lugar, estas cáscaras provienen de biomasa residual, lo que permite aplicar principios de economía circular al dar valor a un residuo generado dentro del propio proceso. Además, esta elección contribuye a reducir significativamente los costos de producción de biodiésel. En comparación con otros materiales utilizados como adsorbentes, la utilización de cáscaras de cultivos energéticos como base ofrece beneficios económicos y medioambientales.

La adsorción de ácidos grasos libres sobre carbón procedente de cáscaras de cultivos energéticos permite sustituir a la etapa de esterificación (reacción que emplea un ácido fuerte como catalizador, normalmente ácido sulfúrico) que se realiza previa a la reacción de transesterificación para producir biodiésel, con la ventaja que ello conlleva: trabajar a temperatura ambiente en lugar de a 60-70°C o no usar ácidos fuertes que corroen los equipos. Otra de las ventajas que tiene la adsorción de ácidos grasos libres sobre este tipo de carbón es que el aceite obtenido tras la adsorción no hay que tratarlo, se emplea directamente como materia prima en la reacción de transesterificación para la obtención del biodiésel. En el caso de la esterificación hay que eliminar el alcohol que no ha reaccionado, así como los restos del catalizador ácido.(Díaz & Brito, 2022).

En el estudio realizado se emplea como adsorbente un carbón sintetizado a partir de cáscaras de *Pongamia pinnata*.



**Figura 17.** *Semillas de la planta Pongamia pinnata*

### 3. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fin de grado es realizar un estudio sobre un proceso verde de producción de biodiésel a partir de aceite de fritura como vía hacia la transición ecológica.

Los objetivos específicos abordados en este estudio se pueden ordenar de la siguiente manera:

1. Obtención y determinación de las características de dos tipos de aceites de fritura residual.
2. Síntesis y aplicación de un adsorbente a base de cáscaras de *Pongamia pinnata* para la eliminación de ácidos grasos libres (FFA) presentes en aceites residuales de fritura. Este enfoque busca ofrecer una etapa alternativa a la reacción de esterificación.
3. Síntesis y uso de un catalizador heterogéneo (Li/Pumita) en la reacción de transesterificación.
4. Comparación de la producción de biodiésel convencional con la alternativa propuesta más eficiente y sostenible.
5. Evaluar la cantidad de aceite de fritura residual generado y el potencial para la producción de biodiésel a partir de este residuo en las Islas Canarias.

---

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presentan en detalle las materias primas, reactivos, materiales y equipos utilizados en el estudio. Además, se describe la metodología empleada para obtener el catalizador heterogéneo (Li/pumita), el adsorbente (carbón sintetizado) y el biodiésel. Seguidamente se nombra las características del adsorbente como un carbón sintetizado y del catalizador heterogéneo (Li/Pumita). Asimismo, se explican los procedimientos experimentales de las técnicas utilizadas para caracterizar tanto el aceite residual empleado como materia prima, como los biocombustibles obtenidos.

Cabe destacar que todos estos métodos se basan en los ensayos establecidos en la norma UNE-EN 14214, que define los requisitos de calidad del biodiésel. Para la preparación del adsorbente, el catalizador heterogéneo y las condiciones de reacción, se han tomado como referencia los estudios realizados por el Grupo de Investigación en Catálisis Heterogénea del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna.

### 4.1. Materiales y métodos

#### 4.1.1. *Materia prima (aceite de fritura)*

Para la producción de biodiésel se emplea como materia prima un aceite de fritura residual. Para este estudio se recolectaron dos aceites de distintos lugares. El primero, llamado “A1”, ha sido recolectado de un restaurante de Santa Cruz de Tenerife. Este aceite se puede visualizar en la Figura 18 (izquierda), y principalmente procede de aceite de oliva y aceite de girasol. El segundo aceite denominado “A2” se obtuvo en la cafetería de la facultad de farmacia de la Universidad de La Laguna, donde se empleaba mayormente aceite de girasol. Observando la Figura 18, se trata del aceite de la derecha.



**Figura 18.** *Muestra de aceites de fritura residual recolectados*

Previo a la reacción, se realiza varias filtraciones a vacío de los aceites para eliminar aquellos sólidos suspendidos. En la Figura 19, se puede visualizar el sistema de filtración. Después de la filtración se procede a caracterizar el aceite para conocer sus propiedades por diferentes técnicas.



**Figura 19.** *Sistema de filtración a vacío*



---

La caracterización de los aceites de fritura residual viene determinada por los siguientes parámetros:

- Índice de acidez
- Densidad a 15 °C
- Viscosidad dinámica a 40 °C
- Viscosidad cinemática a 40 °C

Las técnicas experimentales utilizadas para determinar los parámetros de caracterización del aceite se llevan a cabo siguiendo los métodos de ensayo establecidos en la norma UNE-EN 14214 para el biodiésel. Estos métodos se describirán detalladamente en apartados posteriores.

#### **4.1.2. Síntesis y caracterización del catalizador (Li/Pumita)**

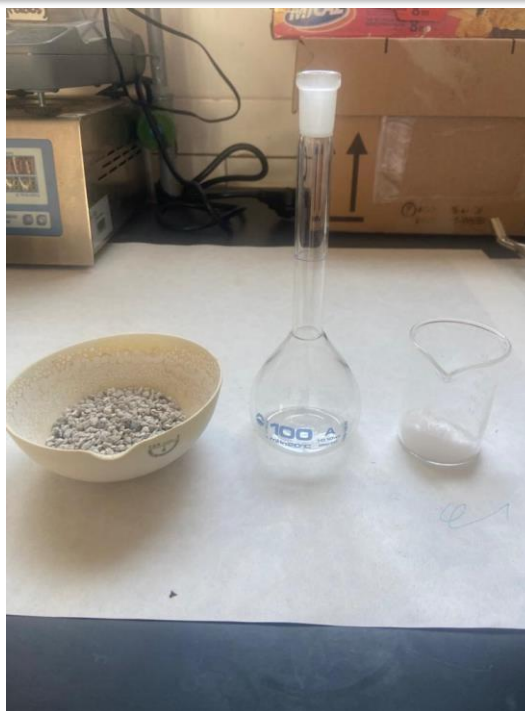
En este estudio, se utiliza un catalizador heterogéneo en la producción de biodiésel como alternativa al catalizador homogéneo comúnmente utilizado a nivel industrial. El catalizador heterogéneo utilizado en este estudio se preparó siguiendo el modelo de utilidad ES 1 279 745 U. Según la bibliografía (Brito et al., 2022), este catalizador se caracteriza por las siguientes propiedades:

1. Catalizador heterogéneo para la obtención de biodiesel que comprende un aluminosilicato (pumita) de granulometría entre 2-5 mm impregnado con un metal alcalino obtenido a partir de un precursor de  $\text{LiNO}_3$ .
2. Catalizador heterogéneo con porcentaje de litio impregnado de entre 0,5-10% en peso.
3. Catalizador heterogéneo presenta una porosidad entre el 30-60% y un diámetro de poro de al menos 2 nm.
4. Catalizador heterogéneo que contiene fases cristalinas de disilicato y metasilicato de litio.
5. Catalizador heterogéneo adecuado para su uso en reacciones de transesterificación de aceites vegetales limpios, aceites usados de fritura y aceites procedentes de cultivos energéticos no comestibles.
6. Catalizador heterogéneo adecuado para su uso tanto en reactores tipo tanque agitado para producción de forma discontinua como en reactores de lecho fijo para producción en continuo, usando como materia prima cualquiera de los aceites mencionados anteriormente.

Para la síntesis del catalizador de Li/Pumita se utiliza la pumita como soporte y el antes de ser tratada y el  $\text{LiNO}_3$  como precursor de litio, como se observa en la figura 20.

---





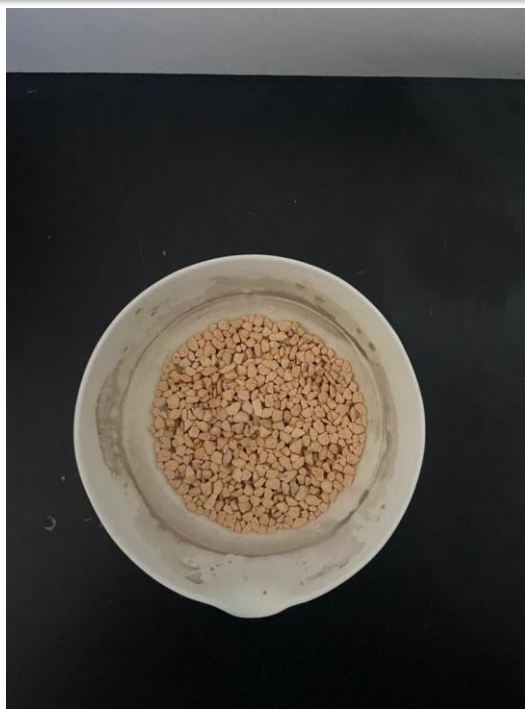
**Figura 20.** *Material empleado para la síntesis del catalizador heterogéneo*

La utilidad de la pumita viene definida como soporte catalítico en la síntesis del catalizador. En primer lugar, la pumita se seca en una estufa a 120 °C durante 2 horas para eliminar cualquier agua adsorbida en la superficie del sólido. Luego, se pesan 17,5 g de pumita en una cápsula de cerámica. La pumita empleada posee un tamaño de partícula en el rango de 1,4-3,0 mm.

A continuación, se lleva a cabo el proceso de impregnación de la pumita utilizando una disolución de  $\text{LiNO}_3$  en agua. Para preparar la disolución, se pesan 8,69 g de  $\text{LiNO}_3$  en un vaso de precipitados y se agregan entre 40-60 mL de agua destilada. De esta manera, el  $\text{LiNO}_3$  se diluye gradualmente en el agua. La mezcla se transfiere luego a un matraz de 100 mL y se completa el volumen necesario. Se agita el matraz para asegurar una distribución uniforme y se vierte todo el contenido en la cápsula de porcelana que contiene la muestra del soporte de pumita.

Posteriormente, la cápsula se coloca en una estufa durante 24 horas a 100 °C con el fin de evaporar el agua. Una vez transcurrido este tiempo, se procede a la calcinación de la pumita impregnada para lograr la eliminación de los nitratos. Para ello, se coloca el material en una mufla a 650 °C durante 5 horas.

En la Figura 21 se muestra una imagen del catalizador sintetizado Li/Pumita.



**Figura 21.** *Catalizador sintetizado Li/Pumita*

#### **4.1.3. Síntesis del adsorbente (carbón a partir de cáscaras de *Pongamia pinnata*)**

En este estudio, se utiliza carbón sin activar como adsorbente, el cual se sintetiza a partir de las cáscaras de *Pongamia pinnata*, un cultivo energético. El objetivo de este proceso es reducir el contenido de ácidos grasos libres presentes en el aceite de fritura, como paso previo a la reacción de transesterificación. La elección de estas cáscaras como base para la síntesis del carbón se debe a su ventaja significativa en comparación con otros materiales. Al aprovechar un residuo y aplicar el concepto de economía circular, se logra una reducción en los costes de producción.

El adsorbente empleado en este estudio se preparó siguiendo la patente ES 2 857 448 B2. Según la bibliografía (Díaz & Brito, 2022), este adsorbente se caracteriza por las siguientes propiedades:

1. Carbón sin activar de semillas *Pongamia pinnata* con un tamaño de partícula inferior a 0,250 mm, una superficie BET de entre 2 y 50 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> y un diámetro medio de poro en el rango de los mesoporos (2-50 nm).
2. Procedimiento de obtención del carbón consiste en las etapas de triturado de cáscaras de *Pongamia pinnata*, calcinación a una temperatura de al menos 500°C y posterior tamizado alcanzando un tamaño de partícula inferior a 0,250 mm.
3. Uso del carbón como adsorbente para reducir los ácidos grasos libres presentes en aceites.

4. Procedimiento de adsorción de ácidos grasos libres que comprende el uso del carbón como etapa alternativa a la reacción de esterificación para la obtención de biodiésel.

Para iniciar la síntesis del carbón, las cáscaras de *Pongamia pinnata* son sometidas a un proceso de secado en una estufa a una temperatura de 100 °C durante 24 horas, con el objetivo de eliminar la humedad presente en las cáscaras. Una vez que las cáscaras están completamente secas, se procede a triturarlas en una trituradora de alimentos para reducir su tamaño. El material resultante de la trituración se somete a un proceso de pulverización con el fin de obtener una textura en polvo más fina y homogénea. Para ello, se utiliza un molino de bolas (véase Figura 22) a una velocidad de 420 rpm durante 4 minutos. Este proceso de pulverización se repite hasta alcanzar el grado de pulverización deseado.



**Figura 22.** Equipo empleado para el proceso de pulverización (molino de bolas)

Por último, el polvo resultante de las semillas se somete a una calcinación a una temperatura de 500 °C durante 10 horas. Este proceso de calcinación permite transformar el polvo en carbón, que se utilizará como adsorbente en el proceso de eliminación de ácidos grasos libres. La Figura 23 muestra el aspecto del carbón obtenido después del proceso de calcinación.

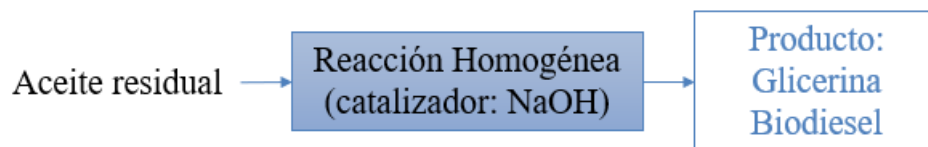


**Figura 23.** Las cascarás pulverizadas y el adsorbente obtenido después del proceso de calcinación

#### 4.2. Estudios para la obtención de biodiésel

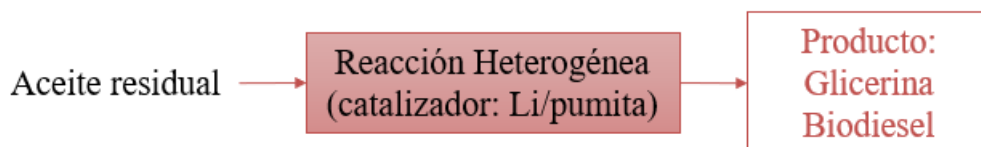
A continuación, se presentan los experimentos llevados a cabo en este trabajo de investigación, junto con sus respectivos diagramas de flujo (véase figura 24-29):

##### ❖ R.1 Reacción homogénea en una etapa (transesterificación)



**Figura 24.** Diagrama de flujo ensayo R.1

##### ❖ R.2 Reacción heterogénea en una etapa (transesterificación)



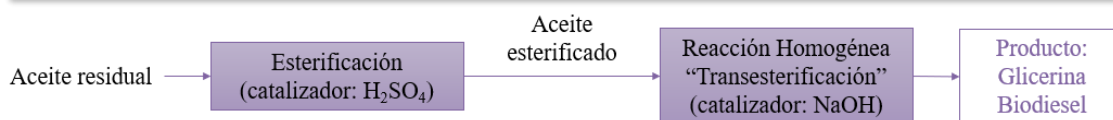
**Figura 25.** Diagrama de flujo ensayo R.2

##### ❖ R.3 Esterificación homogénea y transesterificación heterogénea



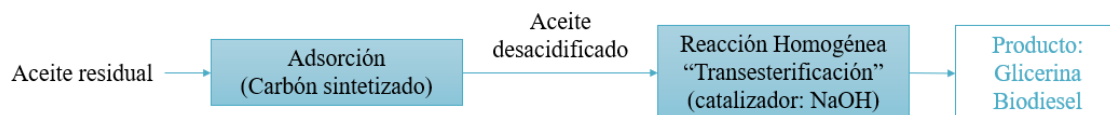
**Figura 26.** Diagrama de flujo ensayo R.3

##### ❖ R.4 Reacción homogénea en dos etapas (esterificación + transesterificación)



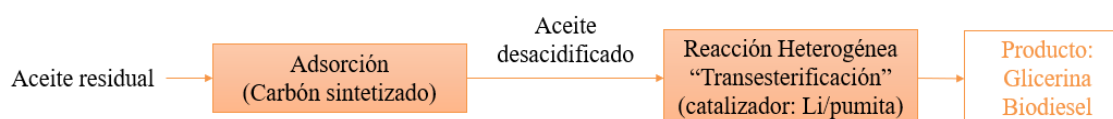
**Figura 27.** Diagrama de flujo ensayo R.4

❖ **R.5 Adsorción + reacción homogénea**



**Figura 28.** Diagrama de flujo ensayo R.5

❖ **R.6 Adsorción + reacción heterogénea**



**Figura 29.** Diagrama de flujo ensayo R.6

Para los distintos experimentos se establecieron ciertas condiciones de operación, que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones de reacción de los experimentos realizados

| <b><u>PRIMERA ETAPA</u></b> |        |            |                           |                    |                                |     |
|-----------------------------|--------|------------|---------------------------|--------------------|--------------------------------|-----|
| N.º                         | T (°C) | tiempo (h) | CH <sub>3</sub> OH/Aceite | % peso catalizador | tipo de catalizador            | rpm |
| R.1                         | 60     | 2          | 6:1                       | 0.5 %              | NaOH                           | 400 |
| R.2                         | 60     | 2          | 20:1                      | 35%                | Li/Pumita                      | 400 |
| R.3                         | 60     | 1,5        | 7:1                       | 1%                 | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 400 |
| R.4                         | 60     | 1,5        | 7:1                       | 1%                 | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 400 |
| R.5                         | 60     | 1,5        | -                         | -                  | -                              | 200 |
| R.6                         | 60     | 1,5        | -                         | -                  | -                              | 200 |
| <b><u>SEGUNDA ETAPA</u></b> |        |            |                           |                    |                                |     |
| R.1                         | -      | -          | -                         | -                  | -                              | -   |
| R.2                         | -      | -          | -                         | -                  | -                              | -   |
| R.3                         | 60     | 2          | 6:1                       | 0.5 %              | NaOH                           | 400 |
| R.4                         | 60     | 2          | 20:1                      | 35%                | Li/Pumita                      | 400 |
| R.5                         | 60     | 2          | 6:1                       | 0.5 %              | NaOH                           | 400 |
| R.6                         | 60     | 2          | 20:1                      | 35%                | Li/Pumita                      | 400 |

Seguidamente, se describe como se ha llevado a cabo cada uno del experimento nombrados anteriormente.



#### 4.2.1. *Reacción homogénea en una etapa (transesterificación)*

Los experimentos que se desarrollan mediante estos procedimientos son R.1 y la segunda etapa del R.4 y R.5.

Para iniciar el proceso, se enciende el baño termostático y se ajusta la temperatura de reacción a 60°C. Mientras tanto, se realiza la preparación de los aceites filtrados previamente, pesando 50,0 g y colocándolos en la base del reactor. Se asegura la hermeticidad del reactor cubriendo los bordes con grasa de vacío. Una vez colocada la tapa, se instalan los soportes y tapones correspondientes, junto con un agitador y un sistema de refrigeración que utiliza agua como refrigerante. Se conecta un motor VWR a través de la varilla del agitador en la parte superior del reactor.

Seguidamente en un vaso de precipitado, se pesan 10,96 g de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y se añaden 0,25 g de NaOH. Se disuelve la mezcla utilizando una varilla de vidrio hasta obtener una completa disolución del NaOH en el metanol. Una vez que se alcanza la temperatura deseada y se establece una velocidad de agitación de 400 rpm, se introduce la solución anterior en el reactor a través del orificio utilizando un embudo. Finalmente, se coloca la tapa en el reactor. El sistema de reacción empleado para el experimento puede visualizarse en la Figura 30.



**Figura 30.** *Sistema de reacción empleado*

Una vez finalizado el tiempo de reacción, se procede a desmontar el sistema y se transfieren los productos de reacción a un embudo, donde se dejan decantar durante al

menos 24 horas. Tras este periodo, se observa una clara separación de dos fases debido a su diferencia de densidad (véase Figura 31). La capa inferior, compuesta por glicerina, se separa y se registra su peso. El componente restante en el embudo, que corresponde al biocombustible, se lava primero con una disolución acuosa de  $H_3PO_4$  al 3 % en peso, realizando un total de 5 lavados. A continuación, se repite el proceso de lavado con agua destilada en 5 ocasiones. Por último, se separa y se pesa el biodiésel resultante. Posteriormente, se introduce en una estufa a  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para eliminar los residuos de metanol y agua. Es importante destacar que en todo el procedimiento se realiza un seguimiento preciso del peso de las muestras y los productos obtenidos, ya que estos datos son necesarios para calcular el rendimiento del experimento.



**Figura 31.** *Productos obtenidos después de la reacción*

#### **4.2.2. *Reacción heterogénea en una etapa (transesterificación)***

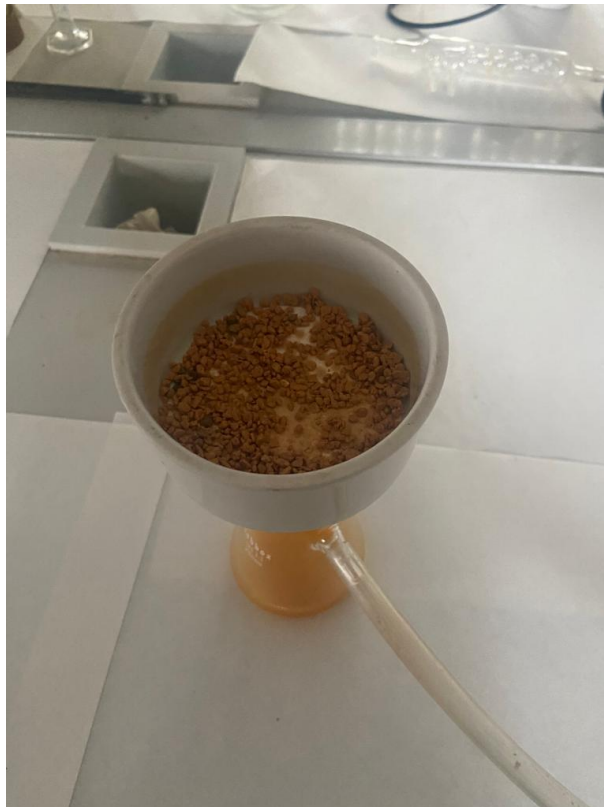
El proceso de reacción sigue una dinámica similar a los casos anteriores. Después de montar el sistema de reacción, se mide con precisión una cantidad de 50,00 g de aceite en un vaso de precipitado. A continuación, se pesan 36,53 g de metanol y se añaden ambos reactivos al reactor. Una vez alcanzada la temperatura de reacción deseada, se introduce

---

17,5 g de pumita previamente sintetizada como catalizador (Li/Pumita), así comenzando la reacción con una duración de 2 horas.

Después del tiempo de reacción, se realiza una filtración al vacío para separar el catalizador sólido (véase Figura 32), seguida de un proceso de centrifugado para eliminar cualquier sólido suspendido en la muestra. Luego, los productos de reacción se colocan en un embudo durante 24 horas para facilitar la decantación. Una vez que se observa la separación de fases debido a la diferencia de densidad, se extraen ambas fases y se registran sus pesos respectivos. A continuación, el biocombustible, que corresponde a la fase superior de la muestra, se seca en una estufa a 65°C durante 24 horas para eliminar los residuos de metanol, para luego pesarlo con la finalidad de calcular el rendimiento en peso.

Los experimentos que se desarrollan mediante el procedimiento explicado con anterioridad son R.2 y la segunda etapa del R.3 y R.6.



**Figura 32.** *Filtración a vacío para separar el catalizador de los productos de reacción.*

#### **4.2.3. Reacción en dos etapas (esterificación + transesterificación)**

En este apartado se describe el procedimiento experimental utilizado para llevar a cabo la reacción en dos etapas: la etapa de esterificación en condiciones homogéneas y



---

la etapa de transesterificación en condiciones homogéneas y heterogéneas según sea el caso.

Tanto en el experimento R.3 como en el R.4, el procedimiento para la reacción de esterificación es el mismo. Siguiendo los pasos anteriores, se enciende el baño termostático y se espera a que la temperatura de reacción alcance los 60 °C. Durante este tiempo, se pesan 60,00 g de aceite en un vaso de precipitado y se añaden al reactor. El sistema de reacción se monta de acuerdo con los pasos descritos anteriormente (apartados 4.2.1 y 4.2.2), utilizando un agitador, un sistema de refrigeración y un motor VWR.

Mediante el uso de un vaso de precipitado, se pesan con precisión 15,34 g de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y 0,6 g de catalizador ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), y se mezclan cuidadosamente. Una vez que se alcanza la temperatura deseada, se selecciona una velocidad de agitación de 400 rpm, se vierte la mezcla en el reactor utilizando un embudo y se pone el tapón. Después de un tiempo de reacción de aproximadamente 90 minutos, se desmonta el sistema y se transfieren los productos de reacción a un embudo de decantación, donde se dejan decantar durante 24 horas como mínimo. Durante este periodo, se observa la formación de dos fases separadas por diferencia de densidad. La fase superior corresponde a la mezcla de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), mientras que la fase inferior corresponde al aceite esterificado. Estas fases se separan cuidadosamente y se registran los pesos correspondientes a cada una de ellas.

A continuación, se realizan las reacciones de transesterificación. En el caso del experimento R.3, se trata de una transesterificación heterogénea, y el procedimiento sigue una dinámica similar a lo descrito en la sección 4.2.2. Por otro lado, en el experimento R.4 se lleva a cabo una transesterificación homogénea, y el procedimiento es similar al explicado en el apartado 4.2.1.

#### **4.2.4. Adsorción + reacción transesterificación**

En los experimentos (R.5 y R.6) descritos en los apartados anteriores, se lleva a cabo la etapa de adsorción. En esta etapa, no se produce una reacción química, por lo que no es necesario utilizar un condensador. En lugar de utilizar metanol como reactivo, solo se emplea el aceite de fritura junto con el adsorbente. Cabe destacar que en los experimentos R.5 y R.6, se realizaron con el aceite denominado A2.

Se pesan 60,00 g de la muestra de aceite residual en el recipiente empleado para realizar el proceso y en un vaso de precipitado aparte se pesan 6,00 g del adsorbente previamente sintetizado. Luego, se agregan los 6,00 g del adsorbente al recipiente con el

---

aceite. La mezcla se agita a una velocidad de agitación de 200 rpm durante 90 minutos para que se lleve a cabo el proceso de adsorción.

Una vez transcurrido el tiempo de adsorción, se retira la muestra del vaso y se somete a un proceso de centrifugación durante 15 minutos. De esta manera, se separan los componentes y se obtiene el aceite desacidificado. Posteriormente, se caracteriza el aceite para determinar su valor de índice de acidez. El aceite desacidificado obtenido se utilizará como base inicial en las siguientes etapas de transesterificación.

- ❖ Transesterificación homogénea: La forma de realizar la reacción es de manera similar a lo dicho en el apartado 4.2.1, respetando las condiciones correspondientes al experimento R.5 expuestas en la Tabla 3.
- ❖ Transesterificación heterogénea: El procedimiento de la reacción se lleva a cabo de manera similar a lo descrito en el apartado 4.2.2, siguiendo las condiciones establecidas para el experimento R.6 según se detalla en la Tabla 3.

### **4.3. Método de análisis**

#### **4.3.1. Aceite Residual y Biodiesel**

Es fundamental llevar a cabo un riguroso control de los parámetros que definen la calidad del biodiésel, conforme a la norma UNE-EN 14214. Esto garantiza la eficiencia de los procesos, previene problemas de corrosión y desgaste en los equipos, y asegura la viabilidad comercial del biodiésel.

Todas las propiedades mencionadas a continuación se analizan tanto en las muestras de aceite de fritura como en las muestras de biodiésel obtenidas de cada reacción, excepto el contenido de ésteres metílicos (FAMES), que solo se determina en las muestras de biodiésel.

##### **4.3.1.1. Densidad**

La densidad es una característica crucial para determinar la calidad de los biocombustibles, y está influenciada por la temperatura. Para medir la densidad, se emplea un densímetro portátil Mettler Toledo modelo Densito 30PX (véase Figura 33). Tanto el aceite de fritura residual como los biocombustibles obtenidos se someten a esta medición de densidad.

Primeramente, se coloca la muestra en un refrigerador durante un tiempo determinado para que alcance la temperatura de medición (15 °C). Luego, se retira la muestra del refrigerador y se toma una pequeña porción que se coloca en un vaso de precipitado. El densímetro se sumerge en el vaso y la muestra asciende por el tubo de

---

muestreo. Se espera a que la pantalla del dispositivo refleje la temperatura de medición y se registra el valor de densidad correspondiente. Se emplea etanol para limpiar el equipo entre las mediciones para las distintas muestras, con ello se busca que el equipo se encuentre en las mejores condiciones para realizar las mediciones adecuadamente.



**Figura 33.** *Equipo de medición de densidad modelo Mettler Toledo Densito 30PX*

Posteriormente, se determina la densidad de las muestras a una temperatura de 40 °C empleando la ecuación [4] con la finalidad de calcular la viscosidad dinámica a 40°C a partir de su viscosidad cinemática.

$$\rho_{15\text{ }^{\circ}\text{C}} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \rho_{40\text{ }^{\circ}\text{C}} + 0,723(40 - 15) \quad [4]$$

#### 4.3.1.2. Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia interna al flujo o deformación bajo la influencia de fuerzas externas. En otras palabras, es la propiedad que determina la “fluidez” o la facilidad con la que un fluido puede fluir. Desempeña un papel crucial en la formación de mezclas de combustible y en los procesos de combustión. La viscosidad tiende a aumentar con la longitud de la cadena y a disminuir con el grado de insaturación. Para determinar la viscosidad, se utiliza un viscosímetro rotacional VISCO STAR plus L (véase Figura 34) que está conectado a un baño calefactor. El procedimiento

de medición se realiza de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma UNE-EN 14104 y se lleva a cabo a una temperatura de 40 °C.

Para iniciar la medición, se activa el suministro de agua, que circula desde el baño calefactor hasta llegar a la camisa calefactora del viscosímetro. Luego, se fija el recipiente al viscosímetro utilizando los tornillos. Una vez que se alcanza la temperatura deseada para la medición, se añaden 8 mL de muestra en el recipiente cilíndrico y se introduce el husillo, en este caso de tipo TL5.

Finalmente asegurándose que de que el mecanismo esté totalmente fijado, se procede a encender el viscosímetro y se elige el husillo adecuado en el panel del equipo. La velocidad de rotación del husillo depende de la viscosidad de la muestra, siendo de 100 rpm para la muestra de aceite residual y de 200 rpm para la muestra de biodiésel. Una vez que el sistema se ha estabilizado, se registra el valor de la viscosidad dinámica ( $\mu$ ), que posteriormente se utiliza para calcular la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) mediante la ecuación [5].

$$\vartheta_{40^{\circ}C}(cSt) = \frac{\vartheta_{40^{\circ}C}(cp)}{\rho_{40^{\circ}C} \left( \frac{g}{cm^3} \right)} \quad [5]$$



**Figura 34.** Viscosímetro VISCO STAR plus L

#### 4.3.1.3. Índice de acidez

El índice de acidez se determina siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 14104 mediante una valoración ácido-base. En un matraz de 250 mL se agregan 20,00 g de aceite. Luego, en una campana de extracción, se llena una bureta con una disolución

de KOH en etanol 0,1 N, que actúa como valorante. Utilizando una probeta, se toman 100 mL de disolvente preparado de dietiléter en etanol (50:50 v/v) y se añaden al matraz.

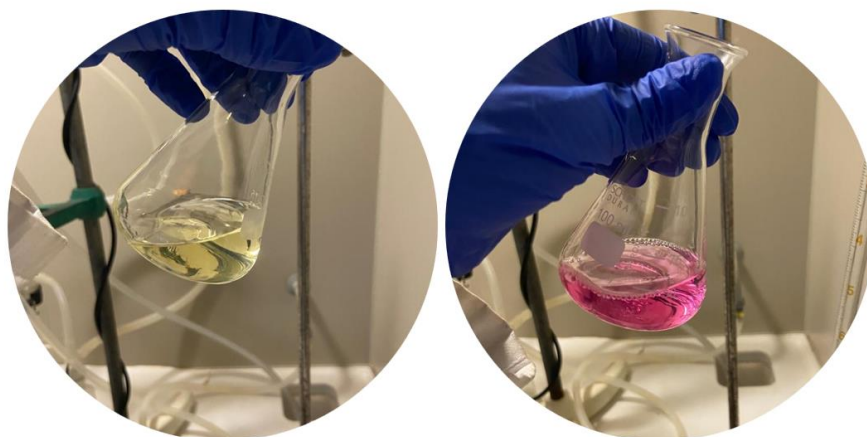
La proporción entre la muestra y el disolvente varía para la muestra de aceite residual y el biodiésel obtenido, ya que se utiliza un peso específico de muestra en función del índice de acidez esperado. Para las muestras de biodiésel, el procedimiento se lleva a cabo de manera similar al descrito anteriormente, pero utilizando 5,00 g de muestra y 25 mL de disolvente.

La disolución se mezcla y se añaden unas gotas de fenolftaleína como indicador. Se agita vigorosamente para asegurar una buena integración del indicador. A continuación, se realiza la valoración y se registra el volumen gastado cuando el contenido del matraz cambia de color, donde se puede visualizar este cambio en la Figura 35.

El índice de acidez se calcula a partir de la siguiente ecuación [6].

$$IA \left( \frac{mg \text{ KOH}}{g \text{ muestra}} \right) = \frac{56,1 \cdot V_{KOHgastado} (mL) \cdot M}{masa \text{ muestra} (g)} \quad [6]$$

Donde M se corresponde a la concentración de la disolución valorante, 0,1 M de KOH en etanol.



**Figura 35.** Valoración ácido-base.

#### 4.3.1.4. Contenido en ésteres metílicos (FAMEs). Cromatografía de Gases

Para analizar el contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMEs) presentes en el biodiésel obtenido mediante transesterificación, se utiliza la técnica de cromatografía de gases. La determinación de FAMEs sigue las directrices establecidas en la norma UNE EN 14103.

Es importante ajustar las condiciones cromatográficas, como la cantidad de muestra inyectada, la temperatura del horno, la presión del gas portador y la velocidad de flujo de inyección discriminada, para garantizar una correcta visualización de los picos en el cromatograma.

Para llevar a cabo el análisis, se utiliza un cromatógrafo de gases VARIAN 3900 GC (véase Figura 36), especializado en la medición de FAMES. Este cromatógrafo está equipado con un inyector split-splitless modelo CP-7488, una columna capilar CP-SIL 88 de 50 m de longitud, 0,25 mm de diámetro interno y 0,2  $\mu\text{m}$  de espesor de película. Se utiliza un detector de ionización de llama (Flame Ionization Detector, FID) para detectar los componentes en la muestra. El cromatógrafo está conectado a un ordenador que utiliza el software Star Workstation 6.0 para el procesamiento de los datos obtenidos.

La muestra líquida se inyecta automáticamente mediante una microjeringa a través de un septum de goma de silicona, y se dirige hacia una cámara de vaporización instantánea ubicada en la cabeza de la columna. El vapor generado se arrastra a través de la columna mediante un gas portador, en este caso, helio. La columna se encuentra dentro de un horno termostatzado para mantener una temperatura constante de trabajo.

Los gases que salen de la columna llegan al detector de ionización de llama (FID). En el FID, una llama formada por una mezcla de  $\text{H}_2$  y aire quema los compuestos de carbono presentes en la muestra, lo que provoca una alteración en la conductividad eléctrica de la llama durante la reacción de combustión. La respuesta del detector se visualiza en la pantalla del ordenador en forma de un cromatograma, que muestra la separación y la concentración de los componentes presentes en la muestra.





**Figura 36.** *Cromatógrafo de gases modelo VARIAN 3900 GC*

❖ Proceso de la toma de medida:

Primero, se realiza la preparación del patrón interno y las muestras que serán analizadas en el cromatógrafo. Para la disolución patrón, se pesan con precisión 100 mg de heptadecanoato metílico (C17:0) en una balanza de precisión. A continuación, se disuelve en un matraz aforado de 10 mL utilizando heptano como disolvente.

Seguidamente, se acondicionan las muestras a analizar lo cual se pesan con precisión 50 mg de biodiésel en un vial de cromatografía, y se registra el peso medido. Posteriormente, utilizando una micropipeta, se añaden 1000  $\mu\text{L}$  de la disolución patrón al vial. La mezcla en el vial se agita adecuadamente para asegurar una buena homogeneización. Para finalizar, las muestras preparadas se colocan en el carrusel del cromatógrafo, y se carga el método apropiado para el análisis específico que se va a realizar.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación y se realiza un análisis y discusión detallada de los mismos. Se comienza mostrando los resultados del análisis de las propiedades de la muestra de aceite de fritura, estableciendo comparaciones con otros tipos de aceite. A continuación, se procede a examinar y discutir los resultados obtenidos en la caracterización de las diferentes muestras de biodiésel obtenidas durante los experimentos llevados a cabo.

Adicionalmente, se lleva a cabo una cuantificación del volumen de aceite de fritura generado en la región de Canarias y se estima la cantidad de este residuo que puede ser aprovechado para la producción de biocombustible, teniendo en cuenta la técnica experimental que ha demostrado mejores resultados en la calidad del biodiésel.

La evaluación y discusión de los resultados obtenidos determina la viabilidad y eficiencia de la producción de biodiésel a partir del aceite de fritura, así como identificar aspectos relevantes relacionados con las propiedades y características del biocombustible obtenido.

### 5.1. Caracterización de la muestra de aceite de fritura

Se llevó a cabo la caracterización de los aceites utilizados para determinar su idoneidad como materia prima en la producción de biodiésel. Se evaluaron la densidad, viscosidad y el índice de acidez para conocer la calidad de los aceites residuales. Los métodos empleados para la determinación de estos parámetros fueron los descritos anteriormente en el apartado 4.3. En la Tabla 4 se presentan los resultados de los parámetros analizados que permiten determinar la calidad de los aceites residuales.

| <b>Tabla 4. Caracterización de los aceites de fritura residual</b> |           |           |
|--|-----------|-----------|
| <b>Propiedades</b>   | <b>A1</b> | <b>A2</b> |
| <b>Índice de acidez (IA)<br/>(mg KOH/g muestra)</b>                | 4,03      | 3,02      |
| <b><math>\mu</math> 40°C (cp)</b>                                  | 33,5      | 25,1      |
| <b>v 40°C (cSt)</b>  | 36,9      | 27,7      |
| <b><math>\rho</math> 15°C (g/cm<sup>3</sup>)</b>                   | 0,9       | 0,9       |

Primeramente, los aceites de fritura A1 y A2 presentaron un índice de acidez de 4,03 y 3,02 mg KOH/g de muestra, respectivamente. Estos valores muestran una considerable diferencia entre ellos. Ambos valores son bastante altos, lo que podría



generar problemas de corrosión en motores debido a su contenido elevado de ácidos grasos libres. Asimismo, los aceites con altos niveles de ácidos grasos libres no pueden ser convertidos directamente en biodiésel mediante la reacción de transesterificación homogénea tradicional, ya que se forman jabones.

En cuanto a la viscosidad cinemática, se encontró que los aceites A1 y A2 presentan valores de 36,9 y 27,7 cSt, respectivamente. Ambos valores son notablemente altos. Según la norma UNE EN 14214, el biodiésel debe tener una viscosidad cinemática comprendida entre 3,5 y 5,0 cSt. Esto indica que es necesario llevar a cabo una reacción que reduzca significativamente este parámetro para cumplir con los estándares establecidos.

La viscosidad cinemática es una propiedad crucial de los biocombustibles, ya que una alta viscosidad puede dar lugar a la formación de depósitos debido a una atomización insuficiente del combustible. Sin embargo, se ha observado que esta propiedad disminuye considerablemente mediante el proceso de transesterificación (Silitonga et al., 2013). Esto demuestra la importancia de llevar a cabo dicho proceso para lograr un biocombustible con una viscosidad adecuada y prevenir posibles problemas asociados a la atomización y formación de depósitos.

Por último, en cuanto al parámetro de densidad ambos aceites residuales, A1 y A2, poseen una densidad muy similar 0,924 y 0,923 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. Este parámetro tiene un impacto en la atomización del combustible en los sistemas de combustión, ya que una alta densidad puede resultar en una vaporización deficiente y una combustión incompleta del combustible inyectado (Silitonga et al., 2013).

## **5.2. Caracterización de biodiésel**

A continuación, se presentan las características de los biodiesel obtenidos en todos los experimentos realizados, los cuales se detallan en la Tabla 5 para los experimentos realizados mediante el empleo del aceite A1 como materia prima y en la Tabla 6 para los experimentos realizados con el aceite A2.

**Tabla 5.** Caracterización biodiésel obtenido empleando el aceite A1 como materia prima y rangos de la norma UNE EN 14214

| Experimento        | Contenido de éster | Densidad a 15°C   | Viscosidad a 40°C  | Índice de acidez |             |
|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|
|                    | % (w/w)            | g/cm <sup>3</sup> | mm <sup>2</sup> /s | mg KOH/g muestra |             |
| R.1                | 76,44              | 0,887             | 4,8                | 0,56             |             |
| R.2                | 92,5               | 0,888             | 4,0                | 0,39             |             |
| R.3                | 21,38              | 0,916             | 18,4               | 1,68             |             |
| R.4                | 95,77              | 0,886             | 4,1                | 0,95             |             |
| Norma UNE EN 14214 | Mínimo             | <b>96,50</b>      | <b>0,86</b>        | <b>3,5</b>       | -           |
|                    | Máximo             | -                 | <b>0,90</b>        | <b>5,0</b>       | <b>0,50</b> |

**Tabla 6.** Caracterización biodiésel obtenido empleando el aceite A2 como materia prima y rango de la norma UNE EN 14214

| Experimento        | Contenido de éster | Densidad a 15°C   | Viscosidad a 40°C  | Índice de acidez |             |
|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|
|                    | % (w/w)            | g/cm <sup>3</sup> | mm <sup>2</sup> /s | mg KOH/g muestra |             |
| R.1                | 90,72              | 0,889             | 4,0                | 0,34             |             |
| R.2                | 95,49              | 0,887             | 3,8                | 0,39             |             |
| R.3                | 92,38              | 0,889             | 4,1                | 0,56             |             |
| R.4                | 98,785             | 0,888             | 3,9                | 0,67             |             |
| R.5                | 99,93              | 0,889             | 4,1                | 0,67             |             |
| R.6                | 99,87              | 0,887             | 3,8                | 0,28             |             |
| Norma UNE EN 14214 | Mínimo             | <b>96,50</b>      | <b>0,86</b>        | <b>3,5</b>       | -           |
|                    | Máximo             | -                 | <b>0,90</b>        | <b>5,0</b>       | <b>0,50</b> |

Se debe destacar que los resultados de los parámetros del biodiésel obtenido en el experimento R.3, utilizando el aceite de partida A1 y A2, no se tendrán en cuenta.

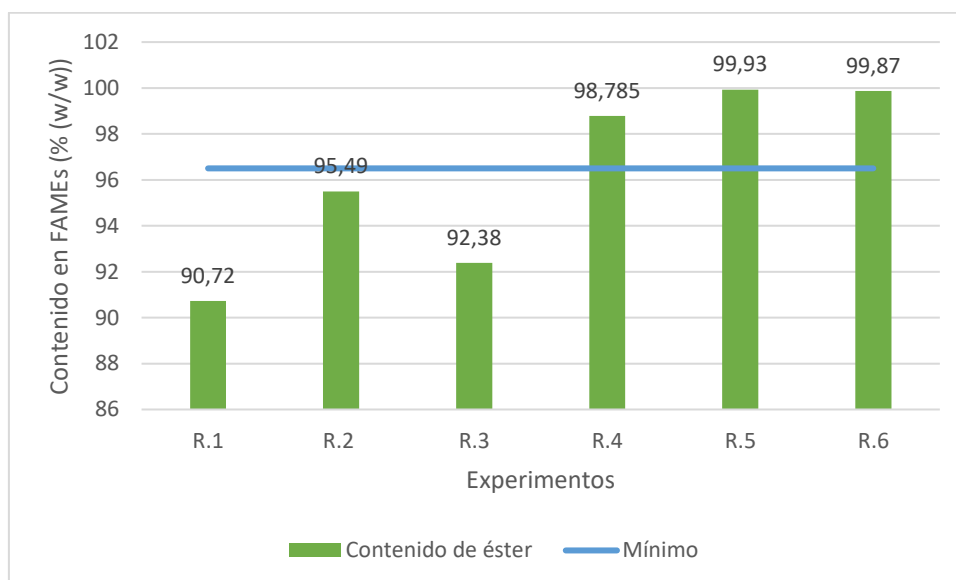
Siguiendo con lo expuesto, los valores obtenidos de los diferentes tipos de biodiésel pueden estar influenciados por las características del aceite de fritura utilizado como materia prima. Se observa que los productos de transesterificación provenientes del aceite de fritura A1 presentan una calidad inferior en comparación con los obtenidos a partir del aceite de fritura A2. Esto se debe a que el aceite de fritura A1 tiene un mayor índice de acidez, además los biocombustibles obtenidos a partir de este aceite de fritura no cumplen con el contenido de ésteres metílicos que exige la norma UNE-EN 14214. En

excepción del biocombustible del experimento R4, ya que debido a las condiciones de reacción este parámetro se encuentra próximo a la exigencia. Por lo tanto, se dará prioridad a los experimentos realizados con el aceite A2.

Se procede a examinar en detalle el efecto de los diferentes parámetros analizados en cada uno de los experimentos realizados. Se busca comprender cómo cada variable influye en los resultados obtenidos y su relevancia en el contexto del estudio.

### 5.2.1. Efecto del contenido en ésteres metílicos (FAMEs)

De acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 14124, el biodiésel debe cumplir con un valor mínimo de 96,5 % en peso de ésteres metílicos para poder ser comercializado. En la Figura 37 se presentan y comparan los valores de contenido de FAMEs obtenidos de los biocombustibles en los diferentes experimentos realizados.



**Figura 37.** Efecto del contenido en ésteres metílicos

Como se mencionó previamente, el contenido de ésteres es un parámetro crítico para evaluar la eficiencia de las reacciones, ya que un valor bajo indica una reacción incompleta. La medición del contenido de ésteres metílicos (FAMEs) es un indicador del avance de la reacción, en otras palabras, de la conversión de los triglicéridos del aceite residual en metil ésteres. Este análisis proporciona información clave sobre la calidad y la efectividad de los procesos de transesterificación realizados.

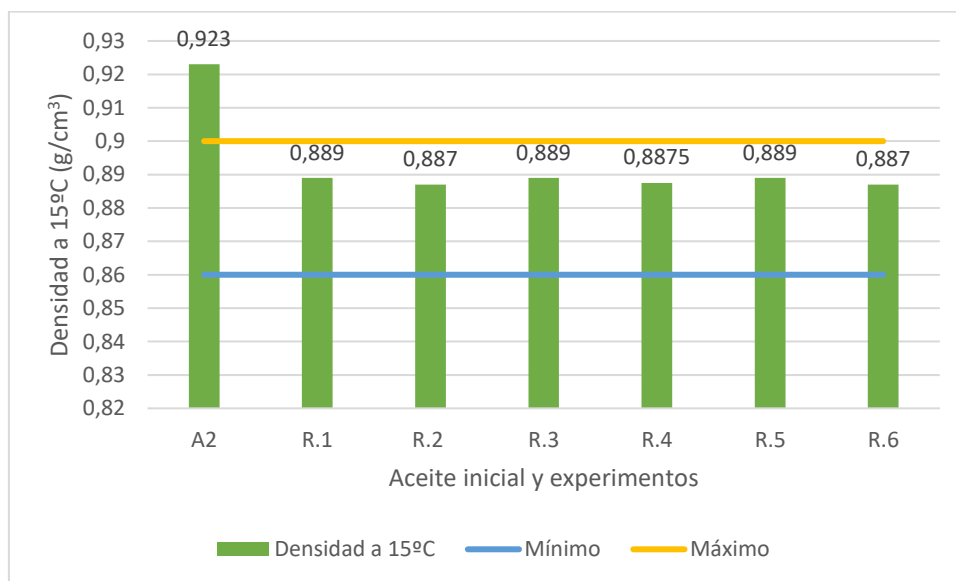
Los resultados obtenidos revelan que los biocombustibles adecuados para su comercialización son los siguientes: el biodiésel obtenido a partir de la reacción homogénea en dos etapas R.4 (98,79%), y los obtenidos en los experimentos de adsorción + transesterificación R.5 (99,93%) y R.6 (99,87%); ya que presentan contenidos de

ésteres metílicos (FAMEs) superiores a los requeridos por la norma UNE-EN 14124. Es importante destacar que la combinación de la adsorción con la transesterificación heterogénea (R.6) proporciona uno de los mejores resultados (98,26%). Además, esta técnica produce un biodiésel con un bajo índice de acidez (IA) de 0,28 g KOH/g muestra. Este efecto puede atribuirse al hecho de que los biocombustibles con baja acidez presentan conversiones más altas de metil ésteres (Díaz González, 2013).

### 5.2.2. Efecto de la densidad

Todos los productos biodiésel obtenidos cumplen con el rango de densidad establecido por la norma UNE-EN 14214, que va desde 860 a 900 kg/m<sup>3</sup>. En la Figura 38 se pueden observar los valores de densidad de cada uno de los productos biodiésel obtenidos, y se comparan con la densidad del aceite utilizado como materia prima.

Aunque la densidad de los productos biodiésel no varía significativamente entre los diferentes métodos utilizados, sí difiere de la densidad inicial del aceite, que era de 0,923 g/cm<sup>3</sup>. Es importante destacar que todos los combustibles biodiésel, ya sean producidos a partir de aceites vegetales o grasas, presentan mayor densidad y menor compresibilidad que el combustible diésel convencional (Silitonga et al., 2013).



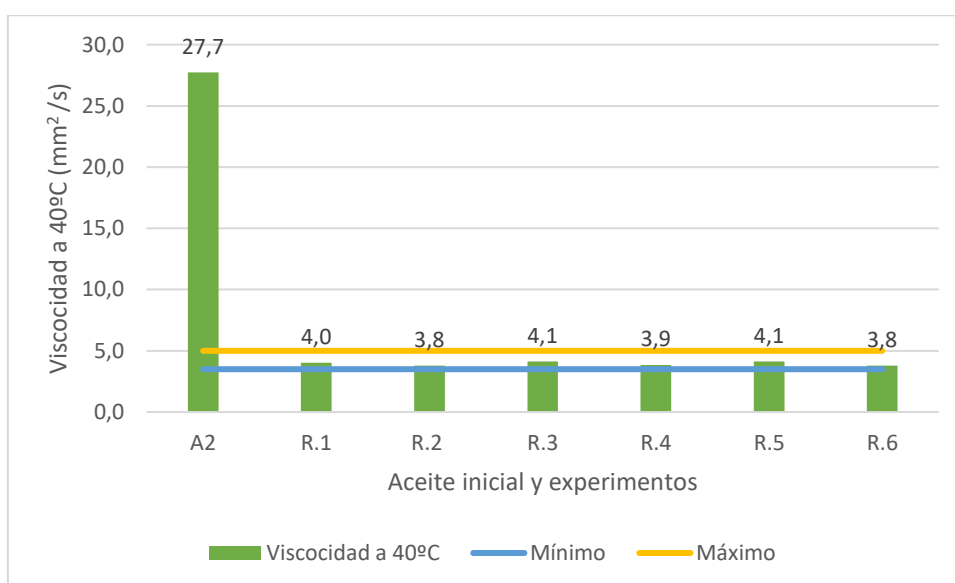
**Figura 38.** Efecto de la densidad

Los experimentos con los resultados más bajos se tratan de R.2 y R.6 ambos con un valor de densidad 0,887 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.2.3. Efecto de la viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es un parámetro que debe ser controlado dentro de un rango óptimo, tanto en términos de valor mínimo como de valor máximo, para evitar pérdidas de potencia y problemas de atomización insuficiente.

La viscosidad cinemática de las muestras de biodiésel obtenidas se encuentra dentro del rango establecido por la norma UNE-EN 14214, que es de 3,50 a 5,00 mm<sup>2</sup>/s. Los valores registrados oscilan entre 3,8 y 4,1 mm<sup>2</sup>/s. Es importante destacar que, independientemente del método de producción utilizado, se observa una drástica disminución en la viscosidad cinemática en comparación con la del aceite de fritura A2, que fue de 27,7 mm<sup>2</sup>/s. Esta reducción se puede apreciar en la Figura 39. Asimismo, se observa que los productos de biodiésel obtenidos mediante la transesterificación heterogénea (R.2) con 3,8 mm<sup>2</sup>/s y la adsorción + transesterificación heterogénea (R.6) con 3,8 mm<sup>2</sup>/s presentan los valores más bajos de viscosidad cinemática.



**Figura 39.** Efecto de la viscosidad cinemática

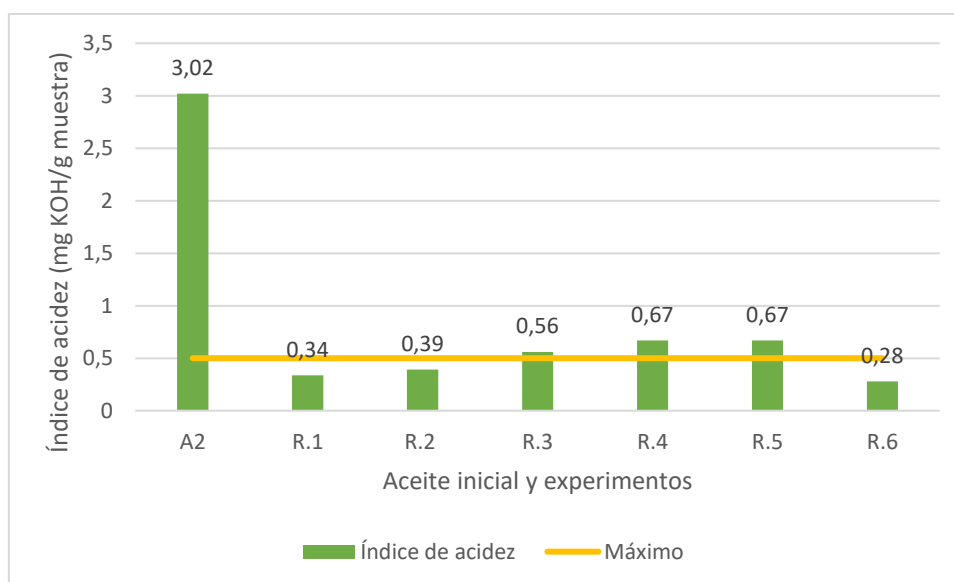
#### 5.2.4. Efecto del índice de acidez

La presencia de un alto índice de acidez en el biodiésel puede ocasionar problemas de corrosión en los sistemas de suministro de los equipos que utilizan este combustible. Por lo tanto, es de vital importancia prestar atención a este parámetro, ya que indica el grado de degradación del biocombustible durante el almacenamiento.

En los experimentos realizados, se ha observado una notable reducción del índice de acidez del biodiésel en comparación con el aceite de partida. Los valores han disminuido desde 3,02 mg KOH/g de aceite a un rango entre 0,28-0,67 mg KOH/g de biodiésel (consultar Figura 40). Específicamente, la combinación de la técnica de adsorción con la transesterificación heterogénea (R.6) ha demostrado ser la más eficiente en la reducción del índice de acidez, obteniendo un valor de 0,28 mg KOH/g de muestra. En comparación con el experimento R.3 donde en la primera etapa se realiza una

esterificación empleando catalizadores ácidos homogéneos ( $H_2SO_4$ ), tiene un inconveniente debido a que presentan desafíos significativos en términos de contaminación, ya que al finalizar la reacción es necesario separar el catalizador, lo que aumenta los costos de producción del biodiésel. Además, los ácidos comúnmente utilizados como catalizadores pueden causar corrosión en los equipos utilizados en el proceso. El proceso de adsorción se destaca por su simplicidad y bajo costo, ya que el adsorbente utilizado se obtiene a partir de residuos, como las cáscaras de semillas. Además, la síntesis del carbón utilizado como adsorbente es un proceso sencillo que no requiere activación química ni física adicional (Díaz & Brito, 2022).

Las muestras de biodiésel que cumplen con el rango establecido por la norma UNE-EN 14214 (menor a 0,5 mg KOH/g muestra) en términos de índice de acidez son exclusivamente las obtenidas en los experimentos R.1 (0,34 mg KOH/g muestra), R.2 (0,39 mg KOH/g muestra) y R.6 (0,28 mg KOH/g muestra).



**Figura 40.** Efecto del índice de acidez

### 5.3. Rendimiento en peso y comparación de los experimentos.

El rendimiento en peso del biodiésel obtenido es un indicador que establece la proporción de biodiésel que se obtiene con relación a la materia prima utilizada. Se calcula dividiendo la masa del biodiésel purificado generado en cada experimento por la masa del aceite empleado como materia prima. La fórmula que se emplea para el cálculo de este parámetro es la ecuación [7].

$$\text{Rendimiento del proceso (\%)} = \frac{\text{Biodiésel purificado (g)}}{\text{Aceite inicial (g)}} \cdot 100 \quad [7]$$

En este estudio, se realizó el cálculo del rendimiento en peso de la reacción en los experimentos que se definían en dos etapas, el cual se determina dividiendo la masa del producto obtenido antes de la segunda etapa por la masa del aceite utilizado como materia prima. La fórmula utilizada para este cálculo es la siguiente [8].

$$\text{Rendimiento transesterificación (\%)} = \frac{\text{Biodiésel purificado (g)}}{\text{Aceite antes de la segunda etapa (g)}} \cdot 100 \quad [8]$$

Estos parámetros son importantes para evaluar la eficiencia de la reacción y la cantidad de producto obtenido en relación con la cantidad de materia prima utilizada.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados. La Tabla 7 muestra los resultados de los experimentos realizados a partir de la muestra de aceite de fritura A1, mientras que la Tabla 8 muestra los resultados de los experimentos realizados a partir de la muestra de aceite de fritura A2.

**Tabla 7.** Rendimiento en peso de las muestras de biodiésel obtenidas a partir de A1

| Experimento | Aceite inicial (g) | Aceite antes de la segunda etapa (g) | Biodiésel purificado (g) | Rendimiento de la transesterificación (%) | Rendimiento del proceso (%) |
|-------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| R.1         | 50                 | -                                    | 46,78                    | 93,56                                     | 93,56                       |
| R.2         | 50                 | -                                    | 41,87                    | 83,64                                     | 83,64                       |
| R.3         | 60                 | 50                                   | 49,70                    | 99,400                                    | 82,83                       |
| R.4         | 60                 | 50                                   | 44,665                   | 89,312                                    | 74,44                       |

**Tabla 8.** Rendimiento en peso de las muestras de biodiésel obtenidas a partir de A2

| Experimento | Aceite inicial (g) | Aceite antes de la segunda etapa (g) | Biodiésel purificado (g) | Rendimiento de la transesterificación (%) | Rendimiento del proceso (%) |
|-------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| R.1         | 50                 | -                                    | 45,49                    | 90,98                                     | 90,98                       |
| R.2         | 50                 | -                                    | 46,61                    | 93,22                                     | 93,22                       |
| R.3         | 60                 | 50                                   | 44,77                    | 89,54                                     | 74,62                       |
| R.4         | 60                 | 50                                   | 44,66                    | 89,21                                     | 74,43                       |
| R.5         | 60                 | 40,06                                | 34,03                    | 84,95                                     | 56,72                       |
| R.6         | 60                 | 39,44                                | 32,49                    | 82,38                                     | 54,15                       |

En general, se observa que los experimentos con una sola etapa de proceso (R.1 y R.2) presentan un mayor rendimiento. Sin embargo, es importante destacar que esto no implica que sean adecuados en términos de cumplir con los requisitos de la norma UNE-

EN 14124. En particular, tanto los experimentos R.1 como R.2, no cumplen con el requerimiento mínimo de contenido de ésteres metílicos (valor mínimo del 96,5%). Esto indica que los resultados de estos experimentos no son satisfactorios en términos de calidad del biodiésel producido.

Los experimentos R.5 y R.6 han mostrado los mejores resultados en términos de contenido de ésteres metílicos (FAMEs), aunque al ser procedimientos de dos etapas, es comprensible que tengan rendimientos ligeramente más bajos en comparación con los experimentos de una sola etapa. Sin embargo, en cuanto al rendimiento de transesterificación, los experimentos R.5 (84,95%) y R.6 (82,38%) presentan valores similares a los demás experimentos.

Esto indica que, a pesar de tener un proceso más complejo en dos etapas, los experimentos R.5 y R.6 logran una eficiencia similar en la conversión de los triglicéridos en ésteres metílicos. Estos resultados demuestran la viabilidad de los procedimientos de dos etapas para obtener biodiésel de calidad.

En términos generales, se puede concluir que el método más viable es el utilizado en el experimento R.6. Este experimento cumple con todos los requisitos establecidos por la norma UNE-EN 14124, lo que indica que el biodiésel producido es de alta calidad. Además, el experimento R.6 se caracteriza por realizar una transesterificación empleando catalizador heterogéneo (Li/Pumita). Este catalizador sólido ofrece la ventaja de permitir la producción de biodiésel sin generar jabones y a baja temperatura, lo cual resulta beneficioso desde el punto de vista energético. Además, al tratarse de un material catalítico sólido, evita la necesidad de lavados posteriores del producto final una vez finalizada la reacción. Otra ventaja significativa es su capacidad de ser reutilizado sin requerir ningún tipo de tratamiento adicional, lo que garantiza la durabilidad del catalizador y no disminuye el rendimiento en la obtención del biodiésel.

#### **5.4. Evaluación de aceite de fritura residual generado y su posible aprovechamiento para la producción de biodiésel en Canarias**

Para realizar la cuantificación del aceite de fritura generado en Canarias, se utilizó como base la cantidad total de aceites vegetales importados al archipiélago. Los datos de importación de estos aceites entre los años 2012 y 2022, desglosados por tipo de aceite, se presentan en la Tabla 9. Estos datos fueron proporcionados por el ISTAC (Instituto Canario de Estadística), utilizando la información recopilada por la Agencia Tributaria.

Estos datos son fundamentales para comprender el volumen de aceite de fritura que se genera en la región de Canarias, ya que las importaciones de aceites vegetales son



la principal fuente de materia prima para la producción de alimentos y, posteriormente, para la generación de residuos de aceite de fritura.

El proceso de fritura del aceite se caracteriza por consumir aproximadamente el 25% del producto, mientras que el 75% restante se convierte en residuo (Castelo Mato, 2019). Teniendo en cuenta esta información, es posible realizar una estimación del volumen de residuo de aceite vegetal a partir de los datos de importación de aceites (véase tabla X).

La Tabla 9 muestra los datos de importación de diferentes tipos de aceites vegetales en un rango de años determinado. A partir de estos datos, es posible realizar una aproximación del volumen de residuo de aceite vegetal generado en Canarias considerando que el 75% del aceite importado se convierte en residuo.

**Tabla 9.** Importaciones de aceites vegetales a Canarias entre los años 2012-2022 (Gobierno de Canarias, s. f.)

|                 | 2022            | 2021            | 2020            | 2019            | 2018            | 2017            | 2016            | 2015            | 2014            | 2013            | 2012  | Descripción del aceite |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---|------------------------|
| 1.799,0         | 2.187,0         | 2.152,3         | 2.109,2         | 1.946,1         | 1.929,9         | 1.635,6         | 1.592,6         | 1.521,6         | 2.631,8         | 2.293,9         | Aceite de soja (soya) y sus fracciones, incluso refinado, pero sin modificar químicamente   |                        |
| 1,75            | 0,09            | 0,59            | 0,11            | 2,70            | 0,93            | 0,40            | 0,71            | 0,11            | 0,32            | 0,02            | Aceite de cacahuete (cacahuete, maní) y sus fracciones, incluso refinado, pero sin modificar químicamente                         |                        |
| 15.640,7        | 17.004,5        | 16.792,0        | 16.575,4        | 16.172,0        | 15.361,4        | 17.175,1        | 16.595,8        | 17.647,7        | 18.066,5        | 17.816,0        | Aceite de oliva y sus fracciones, incluso refinado, pero sin modificar químicamente   |                        |
| 546,9           | 455,4           | 623,7           | 938,6           | 639,1           | 888,3           | 782,6           | 644,2           | 611,0           | 635,2           | 505,7           | Los demás aceites y sus fracciones obtenidos exclusivamente de la aceituna, incluso refinado, pero sin modificar químicamente     |                        |
| 1.289,0         | 849,2           | 860,8           | 1.686,5         | 1.814,4         | 2.248,6         | 2.663,4         | 2.257,6         | 2.096,0         | 1.879,5         | 1.910,8         | Aceite de palma y sus fracciones, incluso refinado, pero sin modificar químicamente   |                        |
| 19.593,7        | 19.079,7        | 17.665,9        | 22.380,8        | 22.730,7        | 20.174,5        | 15.692,0        | 15.260,2        | 16.259,8        | 15.485,8<br>0   | 13.933,8<br>3   | Aceites de girasol, cártamo o algodón, y sus fracciones, incluso refinados, pero sin modificar químicamente                       |                        |
| 78,0            | 70,2            | 84,8            | 112,8           | 67,3            | 29,6            | 4,2             | 5,8             | 116,8           | 246,3           | 1,9             | Aceites de coco (de copra), de almendra de palma o de babasú, y sus fracciones, incluso refinado, pero sin modificar químicamente |                        |
| 379,3           | 251,9           | 350,6           | 427,3           | 422,5           | 452,6           | 433,4           | 512,6           | 538,2           | 616,2           | 619,2           | Aceites de nabo (de nabina), colza o mostaza, y sus fracciones, incluso refinados, pero sin modificar químicamente                |                        |
| <b>39.328,2</b> | <b>39.898,0</b> | <b>38.530,6</b> | <b>44.230,5</b> | <b>43.794,8</b> | <b>41.085,8</b> | <b>38.386,7</b> | <b>36.869,6</b> | <b>38.791,2</b> | <b>39.561,6</b> | <b>37.081,4</b> | <b>Total</b>  |                        |

En la tabla proporcionada, se puede apreciar que los aceites de girasol y oliva son los de mayor consumo en Canarias. Estos datos brindan una perspectiva importante sobre las características del residuo de aceite de fritura que se utiliza como materia prima en la región.

El hecho de que el aceite de girasol y el aceite de oliva sean los más consumidos sugiere que el residuo de aceite de fritura generado en Canarias probablemente esté compuesto en gran medida por estos tipos de aceite. Es importante tener en cuenta esta información al diseñar una planta de procesamiento de residuos de aceite de fritura, ya que las propiedades y composición del residuo pueden influir en los procesos de tratamiento y aprovechamiento.

Según bibliografía, el proceso de fritura del aceite se caracteriza por consumir aproximadamente el 25% del producto y que el 75% restante se convierte en residuo (Castelo Mato, 2019), es posible realizar una estimación del volumen de residuo de aceite vegetal a partir de los datos de importación de aceites (véase Tabla 10).

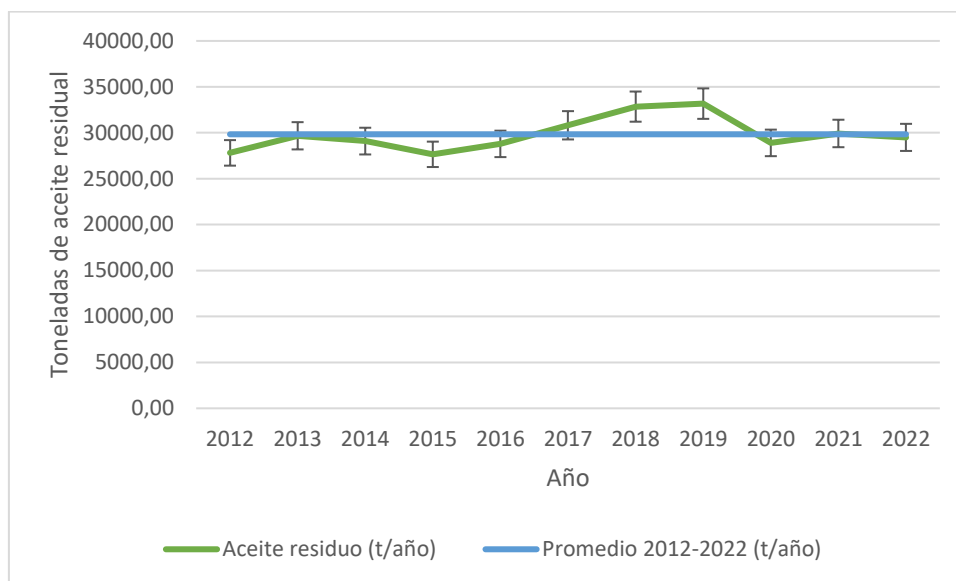
**Tabla 10.** *Aceite importado y residuo de aceite generado en Canarias entre 2012 y 2022.*

| <b>Año</b> | <b>Aceite importado (toneladas/año)</b> | <b>Aceite residuo (toneladas/año)</b> |
|------------|---|---------------------------------------|
| 2012       | 37081,35                                | 27811,01                              |
| 2013       | 39561,58                                | 29671,18                              |
| 2014       | 38791,15                                | 29093,36                              |
| 2015       | 36869,59                                | 27652,19                              |
| 2016       | 38386,70                                | 28790,03                              |
| 2017       | 41085,78                                | 30814,33                              |
| 2018       | 43794,81                                | 32846,11                              |
| 2019       | 44230,56                                | 33172,92                              |
| 2020       | 38530,62                                | 28897,96                              |
| 2021       | 39898,02                                | 29923,51                              |
| 2022       | 39328,28                                | 29496,21                              |

Debido a la variabilidad en la cantidad de aceite importado y, por ende, en el residuo generado, no es posible identificar una tendencia clara que se ajuste a un valor específico. Por lo tanto, se ha optado por calcular un promedio de la cantidad de aceite generada de los datos recopilados durante el período comprendido entre los años 2012 y 2022.

Visualizando la Figura 41, se muestra un gráfico que representa el promedio anual, el cual arroja una cifra de 29.833,53 toneladas de residuo de aceite. Se ha estimado

que el error porcentual asociado a esta cantidad es del 5%, que se representa mediante las líneas verticales en el gráfico.



**Figura 41.** Toneladas de aceite generado como residuo en Canarias entre 2012 y 2022

Una vez calculado el total anual de residuo de aceite generado, se tomará una aproximación conservadora y se considerará que solo se podrá recoger el 80% de dicho residuo, lo que equivaldría a 23,867 toneladas anuales. Teniendo en cuenta que el experimento R.6 es el más viable en términos de calidad y ventajas económicas y ambientales, y considerando su rendimiento del 54,15%, se podría generar un total de 12,924 toneladas de biodiésel al año.

La implementación de una gestión adecuada de los residuos de aceites de fritura y el establecimiento de una planta de producción de biodiésel en Canarias pueden tener un impacto significativo en el mix energético del archipiélago. Esta iniciativa permitiría reducir la dependencia energética del exterior y promover el uso de un proceso más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Sin embargo, es fundamental realizar un estudio socioeconómico exhaustivo antes de llevar a cabo este proceso. Este estudio evaluará la viabilidad de la planta de biodiésel y analizará los beneficios en términos económicos y sociales. Se deben considerar aspectos como la inversión necesaria, los costos operativos, el impacto en el empleo local y los beneficios para la comunidad. Esta evaluación detallada garantizará que la implementación del proceso sea beneficiosa tanto desde el punto de vista económico como social, maximizando los resultados positivos y minimizando los posibles riesgos o impactos negativos.

---

## 6. CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

Como resultado de esta investigación, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El uso de un residuo como reactivo para la obtención de biodiésel presenta varios beneficios, por un lado, resuelve el problema de eliminación de residuos y por otro reduce los costos de producción.
- El empleo de aceite de fritura como materia prima en la obtención de biodiésel ofrece la posibilidad de aplicar una economía circular en el archipiélago canario.
- La producción de un biocombustible como el biodiésel en Canarias, puede contribuir a reducir la dependencia energética del archipiélago, además de generar empleo.
- La transesterificación heterogénea ofrece ventajas económicas y de sostenibilidad en comparación con la transesterificación homogénea.
- El catalizador Li/Pumita presenta ventajas económicas y ambientales al emplear un material natural, abundante y de bajo costo, además evita la generación de jabones y reduce efluentes durante el proceso de obtención de biodiésel.
- El catalizador Li/Pumita demuestra tener una buena actividad catalítica para la obtención de biodiésel a partir de aceites de fritura.
- El contenido de ácidos grasos libres del aceite de fritura usado como materia prima influye en la calidad del biodiesel producido.
- Todos los procesos de producción evaluados lograron una reducción considerable del índice de acidez del biodiésel en comparación con el aceite de partida.
- Se logra disminuir la acidez de los aceites de fritura utilizando un adsorbente sintetizado a partir de cáscaras de *Pongamia pinnata* en lugar del ácido sulfúrico, contribuyendo así a un proceso de obtención del biodiesel más sostenible.
- La densidad del biodiésel apenas varió entre los diferentes procesos de producción utilizados.
- La viscosidad cinemática del biodiésel disminuyó significativamente independientemente del proceso de producción empleado.

- El proceso de adsorción junto con la transesterificación homogénea y heterogénea (R.5 y R.6) presentaron los mayores contenidos de FAMES (ésteres metílicos de ácidos grasos), con valores de 99,93% y 99,87%, respectivamente.
- Utilizando un proceso de adsorción seguido de una transesterificación heterogénea (R.6) se logró producir un biodiésel que cumple con los parámetros de calidad analizados según la norma UNE-EN 14214, en cuanto a índice de acidez (0,28 mg KOH/g muestra), viscosidad cinemática (3,5 mm<sup>2</sup>/s), densidad (0,8600 g/cm<sup>3</sup>) y contenido en FAMES (99,87%).
- Entre los años 2012 y 2022 se generaron en Canarias un promedio estimado de 29.833,53 t/año de aceite de fritura.
- En base al proceso de producción de biodiésel más viable en términos de calidad, ventajas económicas y ambientales (R.6), y considerando su rendimiento del 54.15%, se estima que se podrían producir un total de 12.924 t/año de biodiésel en Canarias.
- Se demuestra la viabilidad de la producción de biodiesel a partir de aceites de fritura de una forma más eficiente y sostenible.

---

As a result of this research, the following conclusions have been obtained:

- The use of a waste as a reagent to obtain biodiesel has several benefits, on the one hand, it solves the problem of waste disposal and on the other it reduces production costs.
- The use of frying oil as a raw material in obtaining biodiesel offers the possibility of applying a circular economy in the Canary Islands.
- The production of a biofuel such as biodiesel in the Canary Islands can contribute to reducing the energy dependence of the archipelago, in addition to generating employment.
- Heterogeneous transesterification offers economic and sustainability advantages compared to homogeneous transesterification.
- The Li/Pumice catalyst has economic and environmental advantages by using a natural, abundant and low-cost material, also avoids the generation of soaps and reduces effluents during the process of obtaining biodiesel.
- The Li/Pumice catalyst proves to have a good catalytic activity for obtaining biodiesel from frying oils.
- The free fatty acid content of the frying oil used as a feedstock influences the quality of the biodiesel produced.
- All evaluated production processes achieved a considerable reduction in the acid number of biodiesel compared to the starting oil.
- It is possible to reduce the acidity of frying oils by using an adsorbent synthesized from *Pongamia pinnata* husks instead of sulfuric acid, thus contributing to a more sustainable biodiesel production process.
- The density of biodiesel hardly varied between the different production processes used.
- The kinematic viscosity of biodiesel decreased significantly regardless of the production process employed.
- The adsorption process together with homogeneous and heterogeneous transesterification (R.5 and R.6) presented the highest contents of FAMES (fatty acid methyl esters), with values of 99.93% and 99.87%, respectively.
- Using an adsorption process followed by heterogeneous transesterification (R.6) it was possible to produce a biodiesel that meets the quality parameters analyzed according to the UNE-EN 14214 standard, in terms of acid number



(0.28 mg KOH/g sample), kinematic viscosity (3.5 mm<sup>2</sup>/s), density (0.8600 g/cm<sup>3</sup>) and content in FAMES (99.87%).

- Between 2012 and 2022, an estimated average of 29,833.53 t/year of frying oil was generated in the Canary Islands.
- Based on the most viable biodiesel production process in terms of quality, economic and environmental advantages (R.6), and considering its yield of 54.15%, it is estimated that a total of 12,924 t/year of biodiesel could be produced in the Canary Islands.
- The feasibility of producing biodiesel from frying oils in a more efficient and sustainable way is demonstrated.

---

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abbaszaadeh, A., Ghobadian, B., Omidkhah, M. R., & Najafi, G. (2012). Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy conversion and management*, *63*, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.027>
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A. R., & Sulaiman, N. M. N. (2012). The effects of water on biodiesel production and refining technologies: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*, *16*(5), 3456-3470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.004>
- Ataretaco. (s. f.). Recuperado 14 de julio de 2023, de <https://www.ataretaco.org/>
- Biodisol. (s. f.). *La producción de Biodiésel*. Recuperado 14 de julio de 2023, de <https://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas-comunes/la-produccion-de-biodiesel-materias-primas-procesos-calidad/>
- Brito, A., Díaz, C., & Díaz, L. (2022). *Catalizador heterogéneo para la obtención de biodiesel*.
- Castelo Mato, R. (2019). *Estudio técnico del proceso, tecnologías y capacidad de producción de biodiesel en Canarias a partir de aceites de fritura* (A. Brito Alayón, D. J. Escalante Ayala, & G. E. I. Q. Industrial, Eds.).
- Chakrabarti, P. P., & Prasad, R. B. N. (2012). *Biodiesel Production from Jatropha curcas Oil* (pp. 463-490). New York, NY: Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4806-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4806-8_25)
- Davenport, J., & Wayth, N. (2023). *Statistical Review of World Energy 2023 | 72 nd edition*. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Díaz González, C. (2013). *Extracción química de aceite y obtención de biodiesel en dos etapas a partir de «Jatropha curcas» en condiciones óptimas* (A. Brito Alayón, K. Rodríguez Espinoza, & U. de L. Laguna. D. de I. Q. y T. Farmacéutica, Eds.).
- Díaz, L., & Brito, A. (2022). *Carbón de cultivo energético para la producción de biodiésel*.
- Ekoatlantica de Recuperación, S.L. (s. f.). Recuperado 14 de julio de 2023, de [https://gestoresderesiduos.org/manager\\_centers/ekoatlantica-de-recuperacion-s-l](https://gestoresderesiduos.org/manager_centers/ekoatlantica-de-recuperacion-s-l)
- Eurostat. (2023). *Energy statistics*. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG\\_IND\\_EFF\\_\\_custom\\_413790](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_EFF__custom_413790)
-

---

7/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=30276a0e-65ad-437c-980a-4d0948822650

- Ganduglia, F. (2009). *Manual de Biocombustibles* [ARPEL].  
<https://books.google.es/books?id=a2HH8c2IDUYC&printsec=frontcover&dq=manual+#v=onepage&q&f=false>
- Gobierno de Canarias. (s. f.). *Instituto Canario de Estadística (ISTAC)*. Recuperado 13 de julio de 2023, de [www.gobiernodecanarias.org/istac](http://www.gobiernodecanarias.org/istac)
- Gobierno de Canarias. (2021). *ESTRATEGIA CANARIA DE ECONOMÍA CIRCULAR 2021 – 2030*.  
[https://www.gobiernodecanarias.org/cmsweb/export/sites/economia/galeria/Galeria\\_politica\\_economica\\_2/2021-07-ECEC\\_-doc-completo-GobCan.pdf](https://www.gobiernodecanarias.org/cmsweb/export/sites/economia/galeria/Galeria_politica_economica_2/2021-07-ECEC_-doc-completo-GobCan.pdf)
- Gobierno de Canarias. (2022). *Anuario Energético de Canarias 2021*.  
<https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/ocean/actualidad/articulos-de-opinion>
- Koh, M. Y., & Tinia, T. I. (2011). A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Número 5).  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.013>
- Lázaro, M. (2018). *Alteraciones De Los Aceites Vegetales Durante La Fritura. Universidad de Sevilla, 1(1)*.
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. En *Applied Energy* (Vol. 87, Número 4).  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 70(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Balance Energético de España 2021*.  
<https://energia.gob.es/balances/Balances/Paginas/Balances.aspx>
- Nayab, R., Imran, M., Ramzan, M., Tariq, M., Taj, M. B., Akhtar, M. N., & Iqbal, H. M. N. (2022). Sustainable biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification of feedstock materials – A review. *Fuel*, 328.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125254>
- RECYOIL ENERGY, S.L. (s. f.). Recuperado 14 de julio de 2023, de <http://www.recyoilenergy.es/>
-

Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chong, W. T., & Boosroh, M. H. (2013). Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 22). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.055>

Vilarrasa, E. (2014). Desarrollo de materiales para adsorción. *Universidad Malacitanas*.