



Beta

Biodiversitat, Ecologia,
Tecnologia Ambiental i Alimentària

Mejora en la gestión y valorización del alperujo a través de procesos de digestión anaerobia y compostaje

*Guía técnica para el asesoramiento de
productores*

Octubre 2025



UNIVERSITAT DE VIC
UNIVERSITAT CENTRAL
DE CATALUNYA

Índice de contenidos

1. Antecedentes	4
2. Introducción	5
2.1. Contexto del sector oleícola	5
2.2. Cifras y tendencias	7
2.3. Problema actual de gestión del alperujo	9
3. Objetivos	10
4. El alperujo.....	10
5. Digestión anaerobia de alperujo	12
5.1. El proceso de digestión anaerobia y parámetros relevantes de operación	12
5.2. Gestión del alperujo a través del proceso de digestión anaerobia	14
5.2.1. Manejo del alperujo para digestión anaerobia.....	14
5.2.2. Tecnologías utilizadas para la digestión anaerobia de alperujo	14
5.3. Producción y purificación de biogás y enriquecimiento a biometano	16
5.3.1. Almacenamiento de biogás.....	16
5.3.2. Purificación y uso del biogás	17
5.3.3. Enriquecimiento del biogás.....	17
5.4. Gestión del digestato	18
5.4.1. Características y usos del digestato de alperujo	18
5.4.2. Obtención de productos biofertilizantes de calidad.....	19
6. Compostaje del alperujo	20
6.1. El proceso de compostaje y parámetros relevantes de operación.....	20
6.2. Gestión del alperujo a través del proceso de compostaje.....	22
6.2.1. Tecnologías de compostaje de alperujo y funcionamiento industrial	22
6.2.2. Aspectos relevantes de manejo	25
6.2.3. Tecnologías emergentes para la mejora del proceso	26
6.2.4. Ventajas y limitaciones de las tecnologías de compostaje para la gestión del alperujo	26
6.3. Resultados agronómicos y ambientales del compostaje de alperujo	27
6.3.1. Emisiones y sostenibilidad del proceso de compostaje.....	27
6.3.2. Características del compost de alperujo	27
6.3.3. Usos del compost de alperujo.....	28
6.4. Compostaje de digestato de alperujo, una solución sinérgica sostenible.....	29

6.5.	Experiencias en España y la UE	30
7.	Digestión anaerobia vs. compostaje	31
8.	Estrategias integradas y economía circular en la gestión del alperujo	33
8.1.	Enfoque de economía circular en el sector oleícola	33
8.2.	Integración tecnológica: compostaje y digestión anaerobia	33
8.3.	Modelos de gestión y gobernanza cooperativa.....	33
8.4.	Beneficios ambientales y socioeconómicos.....	34
9.	Implementación de la gestión sostenible de alperujo	34
9.1.	Buenas prácticas operativas	34
9.2.	Hoja de ruta hacia una gestión sostenible del alperujo.....	34
9.3.	Oportunidades de financiación.....	35
9.4.	Síntesis técnica y perspectivas de futuro.....	36
10.	Referencias bibliográficas.....	37

1. Antecedentes

El Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) es una institución de referencia en la investigación, desarrollo e innovación del sector agroalimentario. Con una trayectoria consolidada en la generación de conocimiento científico y la transferencia tecnológica, su misión es mejorar la sostenibilidad, competitividad y eficiencia de las actividades agroindustriales, especialmente en el medio rural.

En el marco de esta labor, el CITA ha identificado la gestión del alperujo —subproducto derivado de la extracción del aceite de oliva— como una de las áreas que requiere soluciones técnicas avanzadas y sostenibles. Este residuo, caracterizado por su elevado contenido en materia orgánica y humedad, plantea importantes desafíos medioambientales y económicos para las almazaras, particularmente en regiones con fuerte implantación del olivar.

Manejo del Alperujo

El alperujo es una mezcla semisólida compuesta por restos de pulpa, piel, hueso y agua procedente del proceso de obtención del aceite de oliva. Tradicionalmente ha sido considerado un residuo problemático debido a su difícil manejo, su volumen estacional y su impacto potencial sobre el suelo y las aguas si no se gestiona adecuadamente. Sin embargo, los avances en investigación han demostrado que este subproducto puede transformarse en un recurso de alto valor añadido, siempre que se apliquen procesos de tratamiento biológico apropiados.

Entre las alternativas más prometedoras se encuentran la digestión anaerobia y el compostaje, dos procesos naturales que permiten aprovechar su elevado contenido en materia orgánica. La digestión anaerobia convierte parte de esta materia en biogás, una fuente renovable de energía, mientras que el compostaje transforma el alperujo en compost, una enmienda orgánica de gran valor agronómico que mejora la fertilidad y la estructura de los suelos. Además, este compost contiene compuestos húmicos y otras sustancias beneficiosas que contribuyen a la salud del suelo y al cierre de ciclos de nutrientes en la agricultura.

El manejo adecuado del alperujo mediante estas tecnologías no solo reduce los impactos ambientales asociados a su acumulación o vertido, sino que también abre la puerta a modelos de economía circular en los que los residuos del proceso oleícola se convierten en recursos útiles para la propia producción agrícola.

Colaboración con el Centro Tecnológico Beta

En este contexto y con el fin de abordar el desafío de promover una gestión más sostenible del alperujo en el sector oleícola, el CITA colabora con el Centro Tecnológico BETA (CT BETA), entidad reconocida por su experiencia en la gestión sostenible de residuos orgánicos y el desarrollo de tecnologías medioambientales avanzadas.

A través de esta colaboración, el CT BETA transferirá su conocimiento técnico en materia de compostaje y digestión anaerobia al CITA, con el objetivo de capacitar tanto a técnicos como al sector oleícola en general. Esta colaboración se materializa en la elaboración de la presente guía técnica, que reúne los fundamentos científicos, tecnológicos y prácticos necesarios para convertir el alperujo en compost, digestato y biogás, productos de alto valor añadido que fortalecen la sostenibilidad del sector oleícola.

Asimismo, mediante actividades de asesoría técnica a almazaras y una jornada de transferencia de conocimiento, el proyecto colaborativo busca involucrar directamente a los productores, actores clave en la transición hacia un modelo de bioeconomía circular en las zonas rurales con actividad oleícola.

2. Introducció

2.1. Contexto del sector oleícola

El sector oleícola constituye uno de los pilares de la agricultura mediterránea, no solo por su peso económico sino también por su relevancia social, cultural y ambiental. España es el primer productor mundial de aceite de oliva, con más del 40 % de la producción global, y su tejido productivo está compuesto por un gran número de pequeñas y medianas almazaras, muchas de ellas de carácter cooperativo (MAPA, 2024) (Figura 1). Estas instalaciones representan un entramado socioeconómico fundamental en las zonas rurales, ya que permiten la participación directa de los agricultores en la transformación y comercialización de su producto, favoreciendo la redistribución de beneficios y el mantenimiento de comunidades locales.

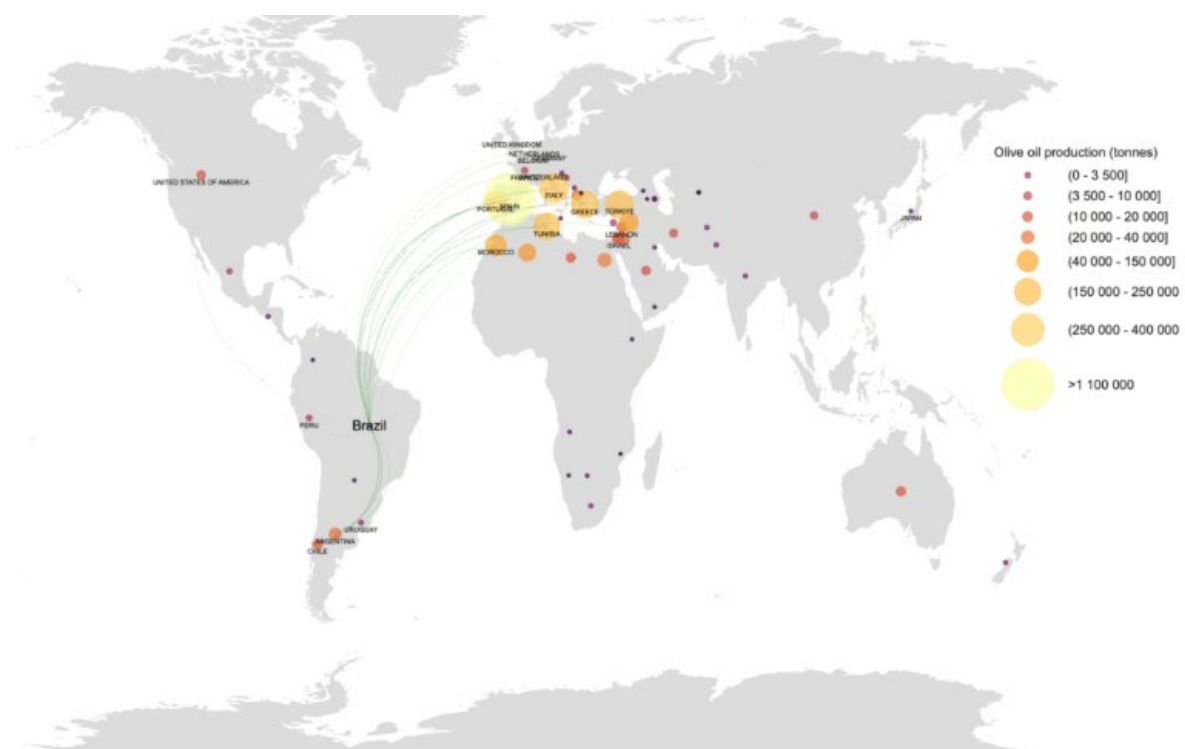


Figura 1. Producción mundial de aceite de oliva basado en la media 2020-2025. Fuente: Consejo Oleícola Internacional.

En regiones como Aragón, y particularmente en la provincia de Teruel, el olivar representa un cultivo de gran relevancia económica y social, contribuyendo al mantenimiento del paisaje, la fijación de población rural y la conservación de la biodiversidad. El Bajo Aragón concentra la mayor superficie y producción, donde el olivar convive con otros cultivos mediterráneos como el almendro o la vid. La Denominación de Origen Protegida (DOP) Aceite del Bajo Aragón se ha consolidado como un sello distintivo de calidad, vinculado a variedades autóctonas, como el Empeltre, que dotan de singularidad al aceite aragonés y lo posicionan en mercados diferenciados (MAPA, 2024).

Según las estimaciones más recientes, la producción mundial de aceituna se sitúa en unos 23 millones de toneladas anuales, de las cuales aproximadamente 20 millones se destinan a la obtención de aceite de oliva y 3 millones a la producción de aceitunas de mesa (Di Giacomo & Romano, S., 2022). Con el 69 % de la producción mundial, la Unión Europea es el mayor productor, concentrando la mayoría en países mediterráneos como España, Italia, Grecia y Portugal. Este predominio europeo convierte al sector oleícola en un elemento estratégico

de la política agraria comunitaria y lo sitúa en el centro de debates sobre sostenibilidad, comercio internacional y seguridad alimentaria.

El proceso de elaboración del aceite de oliva se concentra entre los meses de octubre y marzo, lo que provoca que en un corto intervalo de tiempo se generen grandes volúmenes de subproductos que deben ser gestionados de manera eficaz desde los puntos de vista económico, ambiental y sanitario (Aliakbarian, B. *et al.*, 2011). La naturaleza estacional del proceso incrementa la complejidad logística: las almazaras deben procesar rápidamente cantidades crecientes de aceituna y, a la vez, disponer de sistemas de almacenamiento o tratamiento para el alperujo producido.

En términos tecnológicos, la evolución del sector ha estado marcada por la progresiva sustitución de los sistemas de prensas tradicionales por técnicas de centrifugación, dando lugar a dos esquemas principales: el sistema trifásico (3P) y el bifásico (2P). En el primero, se incorpora agua en el proceso, lo que origina tres fracciones: el aceite, un residuo sólido denominado orujo y un efluente líquido altamente contaminante conocido como aguas residuales de almazara (OMWW). El sistema bifásico, en cambio, evita la adición de agua, produciendo únicamente el aceite y un residuo semisólido con elevada humedad y carga orgánica, denominado alperujo u “olive mill solid waste” (OMSW) (Christoforou, E. & Fokaidis, P.A., 2016) (Figura 2). La Fig. 6.a muestra gráficamente las diferencias entre el sistema trifásico y el bifásico.

a)



b)



Figura 2. Efluentes resultantes de la separación del aceite de oliva crudo. A) Aceite de oliva crudo; b) alperujo.
Fuente: Molí de la Vall Major (2025).

Diversos estudios basados en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) demuestran que el sistema bifásico resulta más sostenible que el trifásico en la mayoría de las categorías de impacto: menor consumo de agua, mayor eficiencia energética y reducción de costes operativos (Borja, R. *et al.*, 2006). No obstante, este avance tecnológico, que se está imponiendo en buena parte del arco mediterráneo, no elimina el problema de la gestión de residuos, sino que lo concentra en una sola fracción de gran volumen y complejidad.

A pesar de las ventajas ambientales del sistema 2P, el alperujo continúa siendo un subproducto de difícil aprovechamiento debido a su composición y a la concentración estacional de su producción. Por ello, la transición tecnológica debe acompañarse de estrategias de valorización sostenibles, capaces de transformar este residuo en un recurso. Este es el punto de partida de las iniciativas actuales en investigación y en políticas públicas, que apuestan por enfoques basados en la economía circular y en la bioeconomía como motores de cambio en el sector oleícola.

2.2. Cifras y tendencias

El volumen de alperujo generado está directamente ligado a la producción y procesado de aceituna y, en consecuencia, de aceite de oliva. España produce en promedio entre 1,2 y 1,6 millones de toneladas de aceite por campaña, lo que supone entre el 40 y el 45 % de la producción mundial (Di Giacomo, G. & Romano, S., 2022). Esta magnitud explica por qué la gestión del alperujo constituye un problema a escala nacional y europea.

A nivel territorial, la distribución de la producción de aceite es muy desigual (**Figura 3**). Andalucía concentra en torno al 80 % del total nacional, pero otras comunidades como Castilla-La Mancha, Extremadura, Cataluña y Aragón tienen un peso creciente en el sector. En el caso de Aragón, la superficie de olivar supera las 50.000 hectáreas, con un fuerte arraigo en el Bajo Aragón turolense, donde el cultivo tiene una gran relevancia económica y cultural (Gobierno de Aragón, 2024).

El alperujo generado en Aragón se estima en más de 100.000 toneladas anuales en campañas medias, con picos superiores en años de cosecha alta. Teruel es la provincia que concentra la mayor parte de esta producción, mientras que Huesca y Zaragoza contribuyen con volúmenes menores, aunque relevantes para la gestión global en la comunidad. La **Tabla 1** y la **Figura 4** muestran la relación entre aceite producido y alperujo estimado en diferentes escalas geográficas.

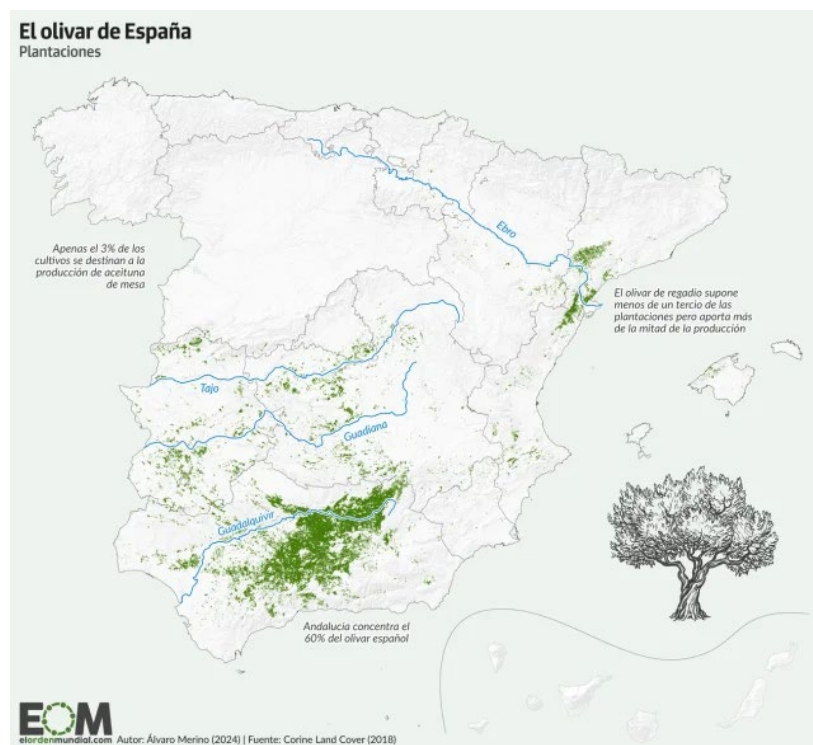


Figura 3. Balance del sector del aceite de oliva en España (campaña 2023-24). Fuente: Efeagro.com.

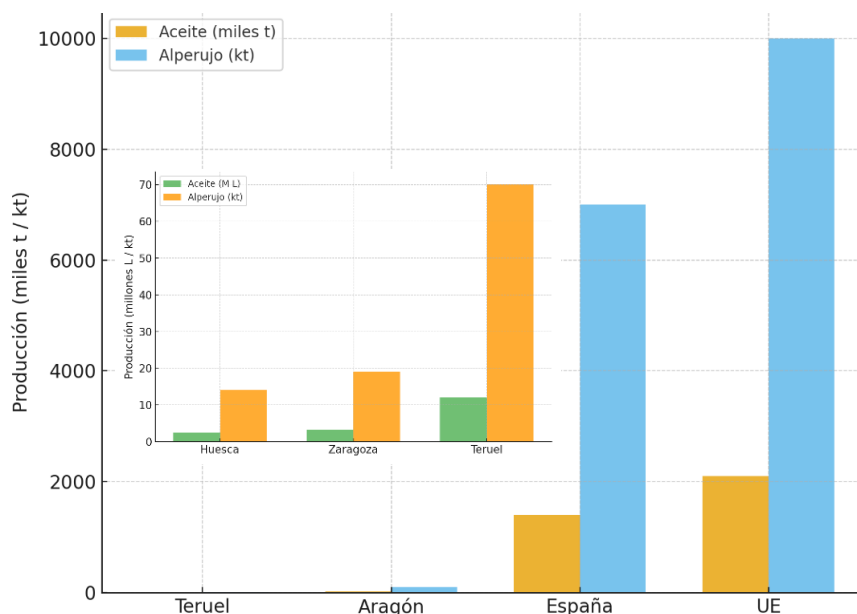


Figura 4. Producción de aceite y generación de alperujo en Aragón, España y la UE.

Tabla 1. Producción de aceite y alperujo en la UE, España y Aragón (2024).

Región	Producción aceite	Producción de alperujo	Fuente
Teruel (Bajo Aragón)	≈2,0 millones L	≈11,6 kt	Aliakbarian, B., <i>et al.</i> (2011)
Aragón	≈17,8 millones L	≈103 kt	Christoforou, E. & Fokaides, P.A. (2016)
España	≈1,4 Mt	≈5–9 Mt	Borja, R., <i>et al.</i> (2006)
Unión Europea	≈2,1 Mt	≈8–13 Mt	Restuccia, A., <i>et al.</i> (2022)

Más allá de Aragón, la comparación entre España y la Unión Europea permite entender la magnitud del flujo de biomasa asociado a la producción de aceite. En la UE se producen más de 2 millones de toneladas de aceite por campaña, con un volumen asociado de entre 8 y 13 millones de toneladas de alperujo (Comisión Europea, 2025). Este subproducto se concentra principalmente en países mediterráneos productores (España, Italia, Grecia y Portugal).

Desde el punto de vista de las tendencias y de mercado, se observan varios aspectos relevantes:

- Crecimiento sostenido de la producción mundial: la superficie de olivar ha crecido de forma notable en las últimas décadas, no solo en el Mediterráneo, sino también en países como Estados Unidos, Australia, Chile o Argentina. Esto supone un incremento progresivo de los volúmenes de subproductos a gestionar.
- Concentración temporal de los residuos: la mayor parte del alperujo se genera en un corto periodo (de octubre a marzo), lo que plantea problemas logísticos para su almacenamiento y valorización inmediata.
- Transición tecnológica hacia sistemas 2P: la progresiva sustitución de las almazaras de tres fases por las de dos fases incrementa la cantidad de alperujo sólido generado, reduciendo las aguas residuales, pero concentrando el desafío en un único flujo de biomasa húmeda (Borja, R., *et al.* 2006; Orive, M., *et al.*, 2016).

- Creciente presión normativa y ambiental: tanto la UE como los gobiernos nacionales promueven directivas orientadas a la reducción de emisiones, la valorización energética de residuos y la aplicación de los principios de economía circular en el sector agroalimentario. El Pacto Verde Europeo y la Estrategia “De la Granja a la Mesa” se alinean con este enfoque (Comisión Europea, 2025).

En resumen, los datos reflejan un fenómeno de gran magnitud: millones de toneladas de alperujo producidas cada año, con un peso significativo en España y, dentro de esta, en regiones emergentes como Aragón. La evolución tecnológica y las políticas ambientales marcan la dirección de futuro, que pasa necesariamente por la valorización sostenible de este subproducto.

2.3. Problema actual de gestión del alperujo

El alperujo presenta características fisicoquímicas particulares: alto contenido de humedad, elevada carga orgánica y compuestos fenólicos con efecto inhibitor en el crecimiento vegetal. Estos atributos dificultan su eliminación o valorización directa y, en la práctica, muchas almazaras lo almacenan en balsas, lo destinan a usos energéticos poco eficientes o recurren a soluciones provisionales que no garantizan sostenibilidad ambiental (Restuccia, A., *et al.* 2022).

En numerosas almazaras todavía se practica el vertido en estanques abiertos para evaporar el agua y, posteriormente, la aplicación directa al suelo (**Figura 1**). Esta opción, aunque simple, plantea riesgos ambientales importantes: consumo de superficie, malos olores, emisiones de metano (CH₄) y óxidos de azufre, proliferación de plagas y, lo más relevante, la alteración de las propiedades físico-químicas del suelo y la calidad de aguas subterráneas (Orive, M., *et al.* 2016). Las legislaciones nacionales, de hecho, imponen límites estrictos a estas prácticas debido al alto contenido en fenoles, la acidez y la fitotoxicidad del alperujo (Serrano, A., *et al.*, 2021).



Figura 5. Almacenamiento de alperujo en grandes depósitos abiertos a la atmósfera. Fuente: *smallops.eu* (2025).

La utilización de alperujo o alperujo seco en alimentación animal también se ha estudiado. Sin embargo, los compuestos fenólicos actúan como inhibidores enzimáticos y limitan su valor nutricional, pese a su elevada fracción fibrosa (Dermeche, S., *et al.*, 2013). La combustión para producción energética se ha convertido en una de las vías de valorización más extendidas, aunque el elevado contenido en agua y los problemas de aglomeración en calderas plantean restricciones técnicas y económicas (Messineo, A., *et al.*, 2013).

En este sentido, la búsqueda de alternativas sostenibles y eficaces de valorización se ha convertido en una prioridad. El compostaje y la digestión anaerobia se perfilan como opciones con gran potencial, capaces de transformar este residuo en productos de valor (compost agrícola, biogás y digestato), integrándose en los

principios de economía circular y contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6 sobre calidad del agua.

3. Objetivos

El objetivo general de la presente guía es transferir conocimiento sobre la mejora en la valorización del alperujo a través de los procesos de digestión anaerobia y compostaje y gestión de los productos generados: el biogás y digestato.

Como objetivos específicos de temáticas de transferencia de conocimiento a productores, la presente guía cumple con los siguientes:

- Desarrollo de un sistema eficiente de digestión anaerobia y compostaje para el alperujo.
- Optimización de la producción de biogás y su posterior purificación para obtener biometano de alta calidad.
- Manejo adecuado del digestato resultante, asegurando su tratamiento y reducción de impacto ambiental.
- Minimización de los residuos generados en el sector oleícola y aprovechamiento de compost y digestato como enmienda y fertilizante orgánico, u otros usos sostenibles.

4. El alperujo

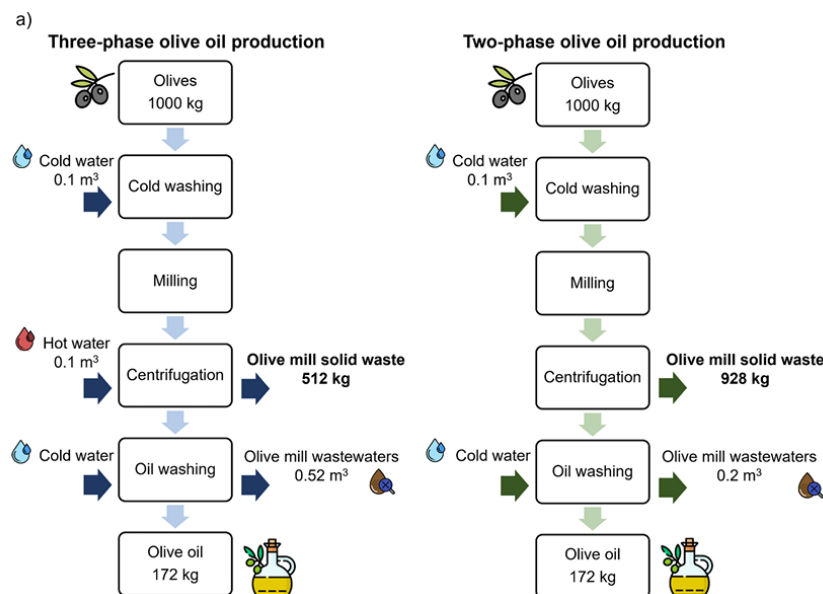
El alperujo es el residuo sólido que se obtiene durante el proceso de extracción de aceite de oliva mediante el método de centrifugación, en dos fases, de la aceituna molida. Está compuesto por una mezcla de piel, pulpa, huesos de aceituna y agua residual del proceso. A diferencia del orujo tradicional, el alperujo contiene mayor cantidad de agua y residuos orgánicos, lo que lo convierte en un subproducto de difícil manejo debido a su alto contenido en materia orgánica y humedad. Actualmente se utiliza principalmente para la producción de energía térmica (por secado y combustión) o compostaje, aunque su digestión anaerobia cada vez está siendo más implementada para producir biogás y biometano. La **Figura 6** muestra los principales procesos de producción de aceite de oliva y la generación del alperujo en cada caso, además de la composición típica de ambos tipos de alperujo obtenidos por centrifugación en dos o tres fases. En general, el alperujo tiene un pH bajo (4,7 - 5,2), alta relación carbono-nitrógeno, de 45 a 75% de agua, de 18 a 25% de celulosa y hemicelulosa y de 8 a 15% de lignina. El contenido en humedad viene determinado por la tecnología de extracción de aceite de oliva empleada (45-55% para los sistemas de 3 fases y 55-75% para los sistemas de dos fases).

En España, se producen aproximadamente entre 4 y 6 millones de toneladas de alperujo al año, dependiendo de la campaña de producción de aceitunas. Esta cifra varía en función de la cantidad de aceitunas procesadas para la extracción de aceite de oliva, ya que el alperujo es el principal residuo de ese proceso. España, como uno de los mayores productores de aceite de oliva a escala mundial, genera una gran cantidad de este subproducto que requiere una adecuada gestión para minimizar su impacto ambiental. Entre las vías de gestión actuales del alperujo aplicadas en España, se destacan aquellas orientadas a su valorización para reducir su impacto ambiental y aprovechar sus componentes. Las principales vías de gestión del alperujo son:

- Extracción de aceite residual en almazaras: Se extrae el aceite de orujo, de menor calidad, para usos industriales o refinado.
- Compostaje: Se emplea la enmienda orgánica obtenida para fertilizar suelos agrícolas. Se estima que entre el 10 % y el 20 % del alperujo se valoriza como enmienda orgánica a través de procesos de compostaje.

- **Alimentación animal:** En algunas zonas, tras un post-tratamiento para la mejora de su digestibilidad, se destina a la alimentación de ganado.
- **Producción de energía:** Se utiliza para la generación de biomasa y, cada vez más, de biogás, aprovechando su contenido energético. Se estima que entre el 30 % y el 50 % del alperujo generado en España se valoriza en forma de biomasa para su posterior combustión.
- **Investigación y desarrollo:** explorando nuevos usos en la industria química y farmacéutica.

a)



b)

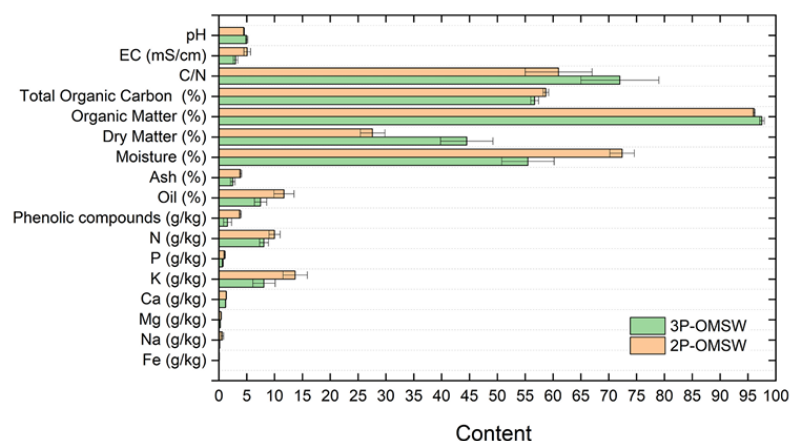


Figura 6. a) Proceso de producción de aceite de oliva y generación de alperujo por centrifugación en dos o tres fases; b) composición de los dos tipos de alperujo obtenidos. Fuente: Lenzuni, et al. (2024).

Como se puede observar en la **Figura 6**, el alperujo además dispone de un alto contenido en compuestos fenólicos y sales. Además, el alperujo dispone de un poder calorífico superior que varía entre 4500 y 5500 kcal/kg, comparable a la biomasa de origen leñoso como la madera seca (PCS de entre 4000 y 5000 kcal/kg). De esta

manera, el alperujo, después de una etapa de secado, puede ser valorizado mayoritariamente como biomasa para generación de calor. Sin embargo, la combustión del alperujo, aun siendo una vía de valorización con potencial, presenta varios retos en términos de sostenibilidad de resolución costosa, como son la gran generación de emisiones de combustión y de cenizas que requieren de tratamientos adicionales. Sin embargo, procesos como el compostaje (**Figura 7**) y la digestión anaerobia se postulan como procesos altamente sostenibles para la valorización del alperujo ya que ambos producen sustratos con valor agronómico, bioenergía (en el caso de la digestión) y un secado natural del material (en el caso del compostaje) con menor generación de emisiones gaseosas.

a)



b)

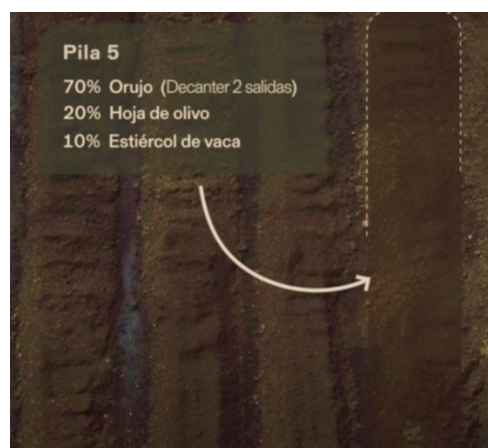


Figura 7. a) Alperujo de oliva crudo; b) co-compostaje de alperujo de oliva. Fuente: Olimerca; Proyecto PRIMA SUSTAINoLIVE.

5. Digestión anaerobia de alperujo

A continuación, se detallan los procedimientos técnicos necesarios para llevar a cabo de forma viable la valorización del alperujo a través de la digestión anaerobia. Dichos procedimientos integran desde la etapa de pre-tratamiento y mezcla con otros sustratos orgánicos para optimizar el proceso de digestión, hasta la utilización del biogás y digestato obtenidos para una mayor sostenibilidad ambiental y económica del proceso.

5.1. El proceso de digestión anaerobia y parámetros relevantes de operación

El proceso de digestión anaerobia es un proceso biológico, de alta eficiencia y ambientalmente sostenible implementado para generar bioenergía a partir de materia orgánica (residuos, subproductos, biomasa agrícola, etc.). Los productos principales de la digestión anaerobia son: el biogás, un gas rico energéticamente compuesto mayoritariamente por CH_4 (50% - 75%), dióxido de carbono (CO_2) y otros componentes minoritarios (amoníaco, sulfuro de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, siloxanos, etc.); y el digestato, un efluente líquido o semi-sólido estable, con alto contenido en nutrientes y valor agronómico. El biogás se puede transformar directamente en bioenergía a través de tecnologías de combustión (caldera) y co-generación (motores de generación de energía eléctrica y térmica), o bien se puede transformar en gas natural renovable a través de tecnologías de purificación y mejora de su contenido en metano. El proceso biológico, en sí, consta de diversas conversiones bioquímicas realizadas por distintos grupos de bacterias y arqueas, en ausencia de oxígeno (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). La diversidad microbiana que se desarrolla en un digestor anaerobio estará en equilibrio y será resultado de las condiciones específicas de digestión. Esto significa que la cinética, rendimiento y estabilidad del proceso, traducidos en productividad de biogás y mineralización y composición de digestato, dependerá del equilibrio microbiológico que se desarrolle en el digestor anaerobio. La **Figura 8** muestra

gráficamente el esquema de valorización de un sustrato orgánico a través de digestión anaerobia, así como las etapas del proceso.

La puesta en marcha de un digestor anaerobio requiere de un inóculo, es decir, un material orgánico que contenga la diversidad microbiana requerida para realizar la digestión anaerobia de los residuos y subproductos de interés. Habitualmente, se busca un inóculo similar al que se espera obtener en el nuevo proceso (digestato fresco procedente de otra planta) o bien un inóculo que pueda contener una gran diversidad microbiana anaerobia y permita desarrollar aquellas poblaciones capaces de llevar a cabo el proceso de digestión completo (deyecciones ganaderas de porcino o de bovino).

En cuanto al diseño tecnológico y del proceso, la digestión anaerobia se puede realizar en un solo paso (un único reactor o digestor) o bien en dos pasos (dos etapas de digestión; una primera para realizar la acidogénesis y una segunda para realizar el resto del proceso biológico). La separación de las etapas de digestión permite, en ocasiones, mejorar la productividad de biogás y optimizar la degradación de la materia orgánica, además de un mayor control de proceso. Sin embargo, la digestión anaerobia en dos etapas suele ser menos viable económicamente debido a los altos costes de inversión. Por lo tanto, y debido a su diseño simple y facilidad de operación, los reactores continuos o semi-continuos de mezcla completa son los más implementados para llevar a cabo la digestión anaerobia de sustratos orgánicos. Este tipo de diseño resulta en una mayor homogeneidad de las variables de proceso (concentración de productos, pH, temperatura, entre otras). El diseño de la tecnología dependerá en gran parte de la naturaleza de la mezcla orgánica a digerir (sólida, semi-sólida o líquida, biodegradabilidad y contenido en sólidos volátiles). La caracterización de la mezcla orgánica a digerir permitirá definir el tiempo de residencia hidráulico del digestor y, como resultado, el volumen y dimensiones del digestor, la carga orgánica a tratar y la productividad y capacidad del gasómetro a implementar.

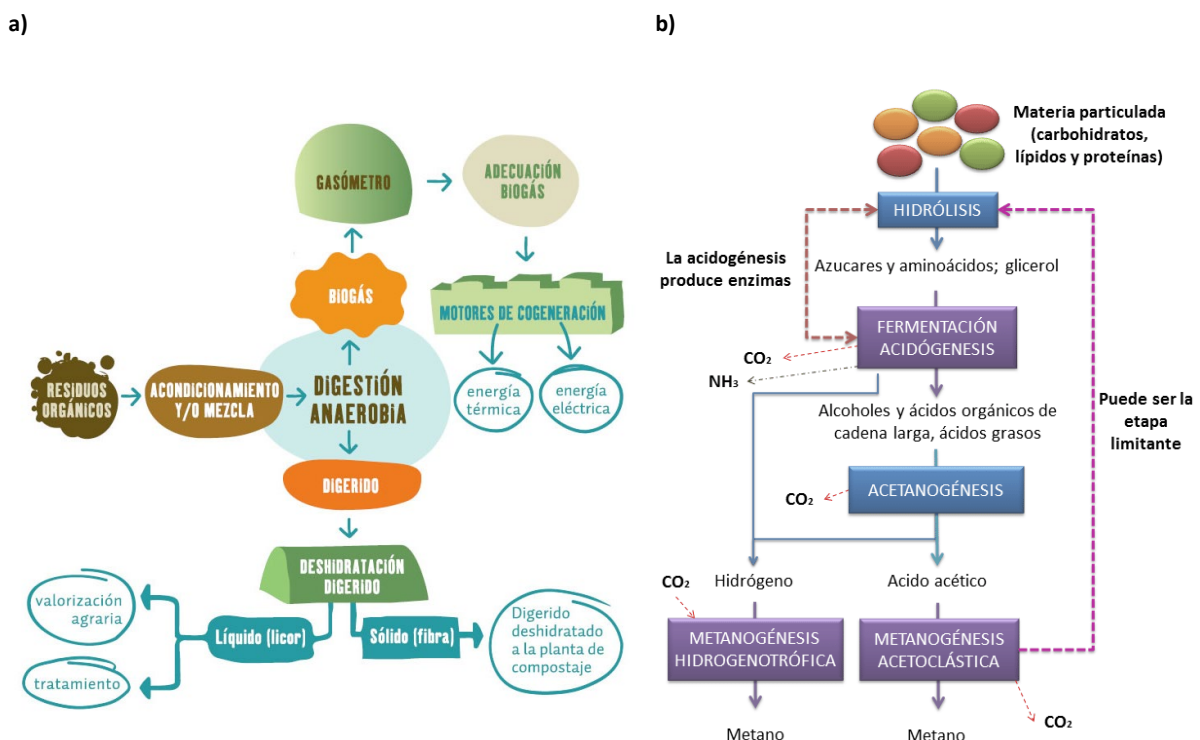


Figura 8. a) Proceso de digestión anaerobia de sustratos orgánicos y, b) etapas biológicas del proceso. Fuente: Agència de Residus de Catalunya; Salazar L.A. (2016).

Respecto a los parámetros de operación, la temperatura suele ser un parámetro clave en digestión anaerobia ya que determina el rendimiento del proceso y, como resultado, la productividad de biogás. Rangos de temperatura

mesófilos (entre 30 °C y 40 °C) suelen ser favorables en el proceso de digestión. Sin embargo, existen otros parámetros que pueden contrarrestar el efecto positivo de una operación en rango mesófilo, estos son valores de pH ácidos, alta salinidad, alto contenido lignocelulósico, relaciones C/N superiores a 40 o inferiores a 10, alta concentración en compuestos antibacterianos (polifenoles, aromáticos, etc.). Este sería el caso del alperujo, que deberá ser tratado previamente o mezclado con materiales orgánicos que contrarresten el desequilibrio de su naturaleza química convirtiéndolo en un sustrato apto para digestión anaerobia (pH neutro, salinidad media-baja, bajo contenido lignocelulósico, C/N entre 20 y 30, bajo contenido en compuestos antimicrobianos).

5.2. Gestión del alperujo a través del proceso de digestión anaerobia

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el alperujo es uno de los principales residuos de la industria aceitera y corresponde a una mezcla de alpechines (fase líquida), restos de aceituna (hueso, mesocarpo, piel) y restos grasos. Aunque el alto contenido lipídico del alperujo afecte negativamente al proceso de digestión anaerobia, haciéndolo inestable por su bajo contenido en nitrógeno y alto contenido en compuestos aromáticos (polifenoles), su óptimo manejo, pre-tratamiento y co-digestión con otros residuos que equilibren la naturaleza del alperujo es altamente recomendable para la obtención de biogás y biofertilizantes orgánicos (digestato).

5.2.1. Manejo del alperujo para digestión anaerobia

El aprovechamiento del alperujo para la producción de biogás requiere un manejo cuidadoso desde que sale de la almazara. Su carácter estacional (octubre–marzo), junto con su alta humedad y carga orgánica, obliga a actuar con rapidez: cuanto más fresco se trate, mayor será el potencial energético. Si no se dispone de capacidad de tratamiento inmediata, debe almacenarse en condiciones controladas o ensilarse, evitando su fermentación espontánea al aire libre, que reduce el carbono disponible y genera pérdidas por lixiviación.

El alperujo presenta una composición compleja, con alto contenido en carbono pero también en grasas, lignina y compuestos fenólicos que pueden dificultar la digestión anaerobia (Borja, *et al.*, 2006). Por ello, antes de su entrada al digestor suele someterse a pretratamientos físicos o térmicos —triturado, homogeneización o calentamiento a 60–80 °C— que mejoran su fluidez y biodegradabilidad. En algunos casos, se han ensayado tratamientos biológicos o enzimáticos para reducir los fenoles, que pueden inhibir parcialmente la producción de metano (Raposo, *et al.*, 2010).

Para equilibrar su composición y estabilizar el proceso, el alperujo se mezcla con otros residuos más húmedos y ricos en nitrógeno, como estiércoles, purines o restos agroalimentarios. Esta co-digestión no solo mejora la relación C/N, sino que también aumenta la producción de biogás entre un 15 y un 30 % respecto al tratamiento del alperujo solo. En particular, la combinación alperujo–estiércol bovino (1:1) ha mostrado resultados muy positivos en estabilidad y rendimiento energético (Mata-Alvarez, *et al.*, 2014).

Los digestores más utilizados son los reactores de mezcla completa (CSTR) o los de digestión seca (véase sección 5.2.2), que operan normalmente en régimen mesofílico (35–38 °C) con tiempos de residencia de 25 a 40 días. En sistemas termofílicos (50–55 °C) el proceso puede ser más rápido y eficaz en la eliminación de patógenos, aunque exige un control térmico más riguroso. El arranque del reactor se realiza con inóculo activo procedente de otras plantas de biogás, aumentando gradualmente la carga orgánica hasta alcanzar la estabilidad.

En condiciones óptimas, la digestión del alperujo produce entre 250 y 350 m³ de biogás por tonelada de materia orgánica volátil, con un contenido de metano del 60–65 % (Borja, *et al.*, 2006; Raposo, *et al.*, 2010). Esto equivale a una producción energética de 4,5–5,5 MWh por cada 100 toneladas tratadas, además de un digestato rico en nutrientes que puede compostarse o aplicarse en agricultura. De este modo, el proceso cierra el ciclo del olivar: el residuo se convierte en energía, fertilidad y sostenibilidad, reflejando plenamente los principios de la economía circular.

5.2.2. Tecnologías utilizadas para la digestión anaerobia de alperujo

Las tecnologías de digestión anaerobia existentes en el mercado son diversas, aunque se pueden clasificar en tecnologías para realizar una digestión vía seca o vía húmeda. La digestión vía seca es aquella que se necesita

realizar cuando el alimento o sustrato tiene un contenido en sólidos mayor al 20 %, que sería el caso del alperujo. Existen sistemas patentados como VALORGA (Francia), DRANCO (Bélgica) o Kompogas (Suiza) para realizar digestión anaerobia por vía seca. Estas tecnologías requieren de sistemas de homogeneización, alimentación y agitación específicos para hacer frente al movimiento y digestión de materiales orgánicos con alta concentración de sólidos. En la **Figura 9** se pueden observar estos tipos de digestores. Sin embargo, se pueden encontrar empresas de tecnología que han mejorado estos digestores o han desarrollado su propia tecnología para realizar digestión anaerobia por vía seca.

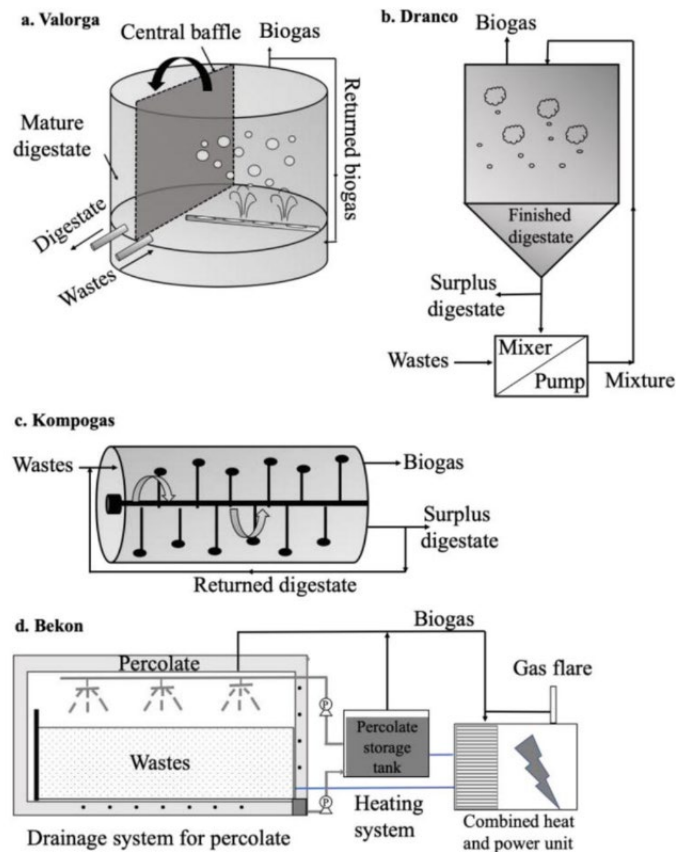


Figura 9. Digestores anaerobios de vía seca. Fuente: Riya et al. 2019.

En el caso de la digestión por vía húmeda, el contenido en sólidos del alimento es inferior al 20%, preferiblemente menor al 15%, y tanto las tecnologías de digestión como los sistemas de alimentación y agitación son más sencillos que los anteriores. El sistema de digestión más conocido es el de mezcla completa (**Figura 10c**), que consiste en un tanque agitado, a menudo mecánicamente, con entrada continua o semicontinua de mezcla de sustratos y salida de digestato.

Existe una mejora en el diseño de este tipo de digestor de mezcla completa que está basado en separar físicamente las etapas de hidrólisis del sustrato (degradación de los sólidos orgánicos a moléculas más pequeñas) y de acidogénesis y metanogénesis (conversión de las moléculas orgánicas pequeñas en ácidos grasos y biogás). Este tipo de digestores se denominan de dos etapas y a menudo presentan una operación más estable y mayor producción de biogás.

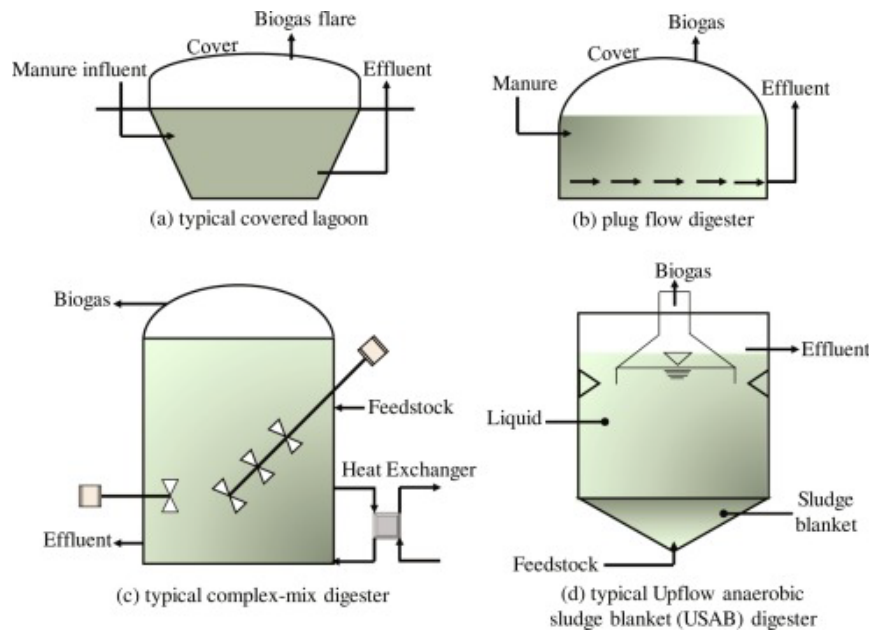


Figura 10. Sistemes de digestió anaeròbia convencionals per a la valorització de substrats líquids o semi-líquids. *Fuente: O'Connor, et al. 2021.*

En cuanto a la alimentación de ambos tipos de tecnologías, en el caso de la digestión por vía seca, habitualmente, la homogeneización del residuo se realiza en la misma línea de alimentación a través de un sistema de densificación. En el caso de la digestión por vía húmeda, es necesario disponer de un sistema previo de preparación de la mezcla, consistente en un tanque no hermético donde se cargan los sustratos líquidos y sólidos (FORM triturada en este caso) y se realiza la mezcla mecánicamente.

5.3. Producción y purificación de biogás y enriquecimiento a biometano

Una vez producido, el biogás se puede almacenar, purificar y utilizar de diferentes formas, dependiendo de la escala de la planta y el propósito final de su producción.

5.3.1. Almacenamiento de biogás

El almacenamiento de biogás se puede realizar en campanas flexibles o membranas, en tanques presurizados o en sistemas de doble membrana. Habitualmente, las plantas más pequeñas incorporan una campana flexible en la cúpula del digester que se expande o contrae a medida que se acumula o purga el biogás en del sistema. Este tipo de almacenamiento mantiene en contacto la mezcla en proceso de digestión con el biogás producido, de manera que el sistema es más compacto y a la vez sencillo de operar, aunque menos versátil que los tanques presurizados o los sistemas de almacenamiento de doble membrana. Los tanques presurizados se suelen utilizar en plantas de gran capacidad que almacenan el biogás para su transporte o una utilización más eficiente. En el caso de los sistemas de doble membrana, son sistemas separados del digester que permiten almacenar el biogás de forma independiente y controlada, pudiendo almacenar el biogás ya purificado, a mayor presión y menor temperatura. En la **Figura 11** se presentan los sistemas de almacenamiento de biogás más utilizados.

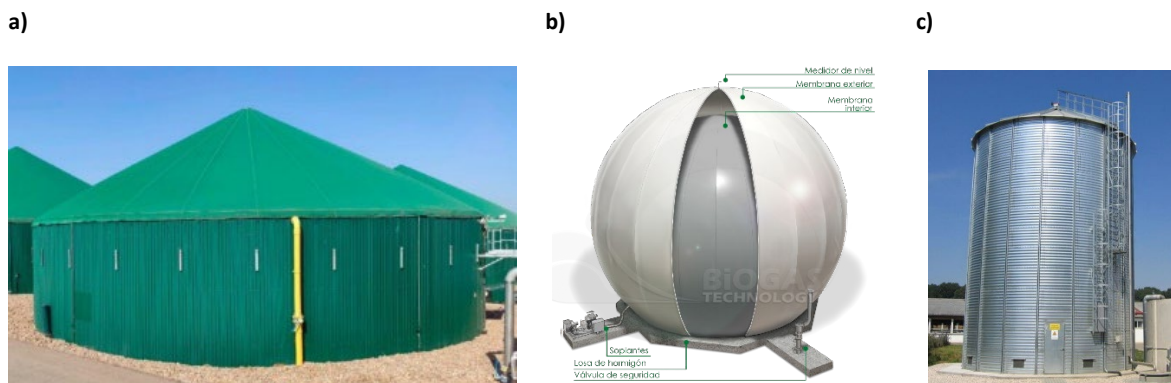


Figura 11. Sistemas de almacenamiento de biogás típicos; a) Almacenamiento en campana o membrana flexible (GENIA), b) almacenamiento en gasómetro de doble membrana (Biogas Technology), c) almacenamiento en tanque presurizado (Environtec).

5.3.2. Purificación y uso del biogás

Las principales impurezas que puede contener un biogás producido en un sistema de co-digestión anaerobia de alperujo son vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y amoníaco. Dichas impurezas deben ser removidas para mejorar la calidad del biogás, aumentar la eficiencia de generación eléctrica y evitar daños en los equipos (motores de combustión, instrumentación de proceso, tuberías, etc.). A continuación, se describen brevemente los sistemas de purificación de biogás que más habitualmente se encuentran en plantas de digestión anaerobia de pequeña escala:

- Deshumidificación

La deshumidificación de biogás se realiza a través de intercambiadores de calor, que permitan disminuir la temperatura del biogás y condensar el vapor de agua, o bien a través de filtros de carbón activo, con capacidad de retener la humedad y eliminar pequeñas trazas de otros contaminantes.

- Desulfuración

La desulfuración de biogás se realiza a través de procesos tanto biológicos como físico-químicos. En el caso de plantas de pequeña escala, los procesos biológicos contribuyen en la sostenibilidad económica ya que son tecnologías con bajo CAPEX y OPEX asociados. Entre las tecnologías basadas en procesos biológicos nos podemos encontrar los biofiltros, biofiltros percoladores y biolavadores y todos ellos presentan eficiencias de eliminación de sulfuro de hidrógeno mayores al 90%. En el caso de las tecnologías físico-químicas encontramos los filtros de carbón activado o los sistemas de lavado químico. Estas tecnologías funcionan por adsorción o absorción del sulfuro de hidrógeno en un material sólido o un líquido alcalino.

Una vez obtenido el biogás purificado, éste se destina a la generación de energía eléctrica o térmica (motores o turbinas de co-generación), ya sea para autoconsumo o venta. Las plantas de digestión anaerobia de gran capacidad optarían a generar biometano o gas natural renovable a través del enriquecimiento del biogás purificado, ya sea para su inyección en la red de gas natural o uso como combustible para vehículos o cogeneración de energía eléctrica.

5.3.3. Enriquecimiento del biogás

El enriquecimiento del biogás o biogas upgrading es un proceso mediante el que se logra separar de manera selectiva el metano del resto de gases que componen el biogás. Entre las tecnologías más avanzadas se encuentran la absorción química de CO₂ (utilizando aminas o álcalis para eliminar esta impureza), membranas selectivas a metano o CO₂ (para lograr un corriente de metano de alta pureza) y absorción por presión (comprimiendo el biogás y adsorbiendo selectivamente en materiales específicos). La **Figura 12** muestra dos de estas tecnologías.

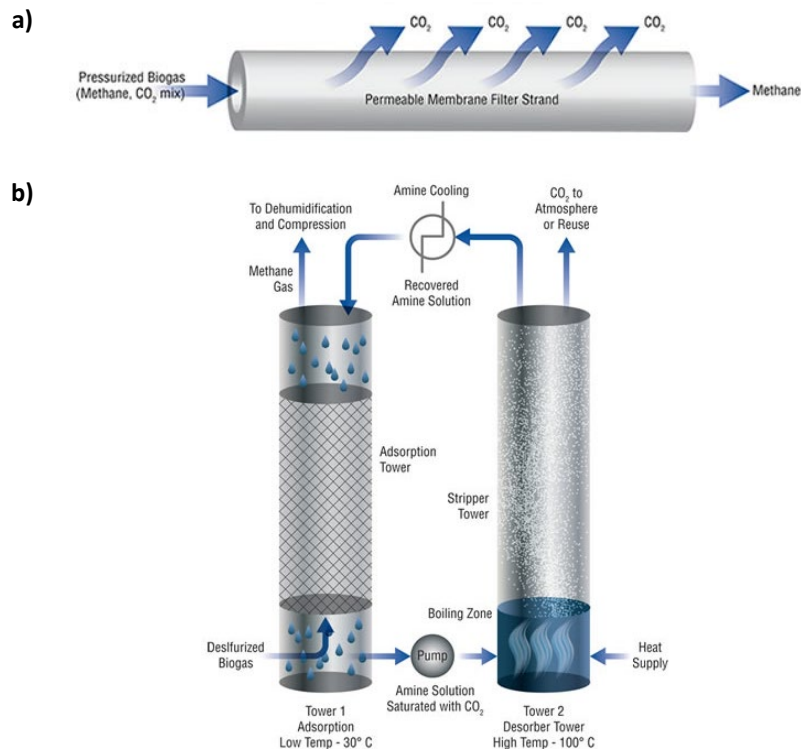


Figura 12. Tecnologies de enriquitiment de biogàs. A) Enriquitiment per membrana selectiva, b) Enriquitiment per absorció en aminas.

5.4. Gestió del digestato

La correcta gestió del digestato permete tancar el cicle de nutrients dentro del sistema oleícola, reduint el ús de fertilitzants minerals, millorant la fertilitat dels sòls i disminuint la càrrega ambiental del conjunt del procés. La seva valorització a través de compostatge o formulació de biofertilizants líquids constitueix un element clau dentro de les estratègies d'economia circular aplicades al sector.

5.4.1. Característiques i usos del digestato de alperujo

El digestato derivat del alperujo presenta habitualment un contingut en sòlids totals del 15–25 % i en sòlids volàtils del 60–70 %, el que indica una matèria orgànica parcialment estabilitzada. La seva relació C/N, entre 10 i 15, fa promoure la disponibilitat de nitrogen en forma amoniacal. La fracció líquida sol·la concentra nitrogen, potassi i micronutrients, mentre que la fracció sòlida reté la matèria orgànica, el fòsfor i els compostos húmics (Fernández-Hernández, *et al.*, 2014; Tamborrino, *et al.*, 2021).

Per a facilitar el seu maneig i aprofitament, el digestato es separa en dos fraccions mitjançant decantació o centrifugació:

- **Fracció sòlida:** es destina al compostatge, procés que estabilitza la matèria orgànica, elimina patògens i olores, i millora les propietats agròniques del material. El compost resultant és ric en carboni estable i adequat per a la millora de sòls agrícoles o la restauració de sòls degradats.
- **Fracció líquida:** pot tractar-se mitjançant filtració, stripping d'amoniac o concentració per evaporació, donant lloc a biofertilizants líquids d'alta qualitat agrònica. Aquests productes aporten nutrients de ràpida assimilació i poden aplicar-se mitjançant fertirrigació en oliveres u altres cultius mediterrànies.

El aprovechamiento conjunto de ambas fracciones —compost y biofertilizante— permite obtener un producto integral que combina nutrientes disponibles y materia orgánica estable, mejorando la eficiencia del uso del nitrógeno y reduciendo la pérdida de carbono del suelo. Este enfoque ha mostrado resultados positivos en experiencias del sur de España e Italia, donde el compost derivado de digestato de alperujo ha incrementado la capacidad de retención de agua y el contenido húmico de los suelos (Fernández-Hernández, *et al.*, 2014).

5.4.2. Obtención de productos biofertilizantes de calidad

El uso agrícola del digestato y sus derivados está regulado por el Real Decreto 999/2019, que establece los requisitos para la comercialización y aplicación de productos fertilizantes en España, en coherencia con el Reglamento (UE) 2019/1009. Ambas normativas garantizan la seguridad ambiental y la calidad agronómica de los materiales valorizados, fijando límites estrictos de metales pesados, patógenos y contaminantes orgánicos. Los digestatos que cumplen estos criterios pueden inscribirse como enmiendas húmicas, abonos orgánicos o fertilizantes organominerales, según su composición y nivel de estabilización.

En el caso del alperujo, los digestatos presentan un elevado potencial para su transformación en biofertilizantes de calidad, tanto en formato sólido como líquido. La fracción sólida, rica en carbono orgánico y fósforo, puede compostarse y emplearse como enmienda húmica o compost agrícola; mientras que la fracción líquida, con altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y potasio, puede concentrarse o estabilizarse para formular biofertilizantes líquidos aptos para fertirrigación (Fernández-Hernández, *et al.*, 2014; Tamborrino, *et al.*, 2021).

Experiencias recientes en España y el arco mediterráneo han demostrado el potencial de esta valorización. En Italia y Grecia, el proyecto LIFE OLIVE4CLIMATE (2019) utilizó digestatos procedentes de alperujo mezclados con compost vegetal para obtener una bio-enmienda húmica certificada, que incrementó la capacidad de retención de agua y la actividad microbiana del suelo. En Andalucía, ensayos realizados por el IFAPA Alameda del Obispo (2022) demostraron que la fertirrigación con digestato líquido de alperujo, correctamente ajustado en pH y concentración, alcanzó rendimientos equivalentes a los fertilizantes químicos convencionales, con un aumento del contenido de materia orgánica en suelos de olivar.

Otros proyectos, como AgroBioGas (2020) en Portugal, han desarrollado biofertilizantes líquidos concentrados a partir de digestatos de alperujo y estiércol bovino, estabilizados mediante stripping de amonio y filtración, aplicados con éxito en cultivos de cereal y viñedo. Asimismo, en la planta de biogás de Mora la Nova (Tarragona) se ha producido un compost organomineral granulado, combinando digestato sólido de alperujo con roca fosfórica y zeolitas naturales, comercializado como fertilizante sostenible para cultivos leñosos (Mora la Nova Biogas Plant, 2021).

6. Compostaje del alperujo

6.1. El proceso de compostaje y parámetros relevantes de operación

El compostaje es un proceso biológico aerobio de transformación de la materia orgánica en condiciones controladas, que conduce a la obtención de un material estabilizado, libre de patógenos y rico en sustancias húmicas, conocido como compost (Madejón, E., *et al.*, 2007). Este proceso reproduce, de forma acelerada y optimizada, la descomposición natural de los residuos orgánicos, gracias a la actividad de comunidades microbianas que metabolizan la materia biodegradable (Figura 13).

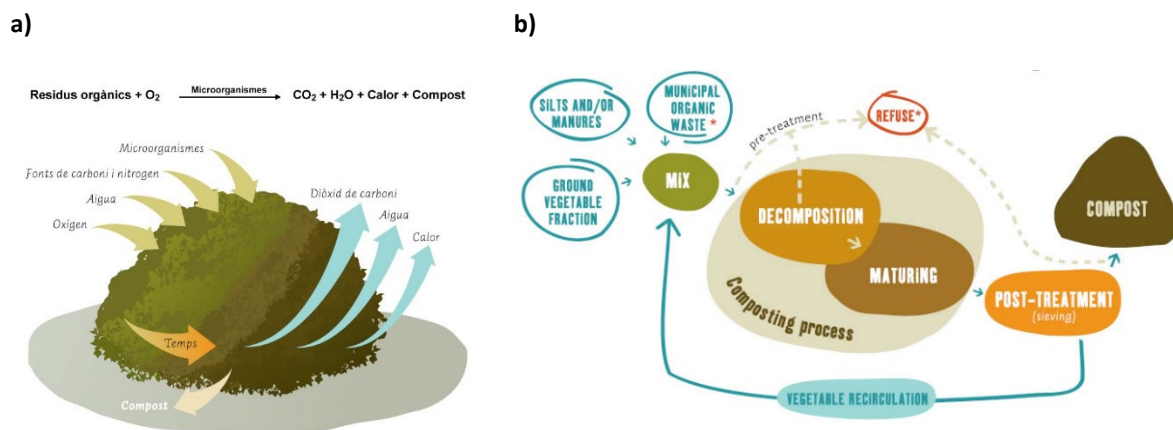


Figura 13. Proceso de compostaje: a) Flujos de entrada y salida del proceso, b) etapas del proceso. Fuente: Agència de Residus de Catalunya (2025)

El proceso de compostaje se desarrolla en varias fases sucesivas en las que las condiciones de operación, como la T, pH, humedad, % oxígeno, diversidad microbiana, porosidad, etc., varían en función de la evolución en la degradación de la materia orgánica (Figura 14):

- Fase mesófila: ocurre en los primeros días, con temperaturas entre 20–40 °C. Predominan bacterias y hongos mesófilos que degradan compuestos fácilmente asimilables (azúcares, almidones).
- Fase termófila: puede alcanzar 55–65 °C y dura varias semanas. En esta etapa se produce la degradación de proteínas, grasas y celulosa por microorganismos termófilos. Es crucial para la higienización, ya que elimina semillas, patógenos y organismos indeseables.
- Fase de enfriamiento: una vez agotados los compuestos más fácilmente degradables, la temperatura desciende y reaparecen organismos mesófilos, con actividad sobre compuestos más recalcitrantes (lignina, taninos).
- Fase de maduración: se produce la humificación y estabilización final del compost. Esta etapa puede prolongarse varias semanas o meses, y es esencial para garantizar que el producto final no sea fitotóxico y pueda aplicarse en suelos agrícolas sin efectos negativos (Bernal, M.P. *et al.*, 1998).

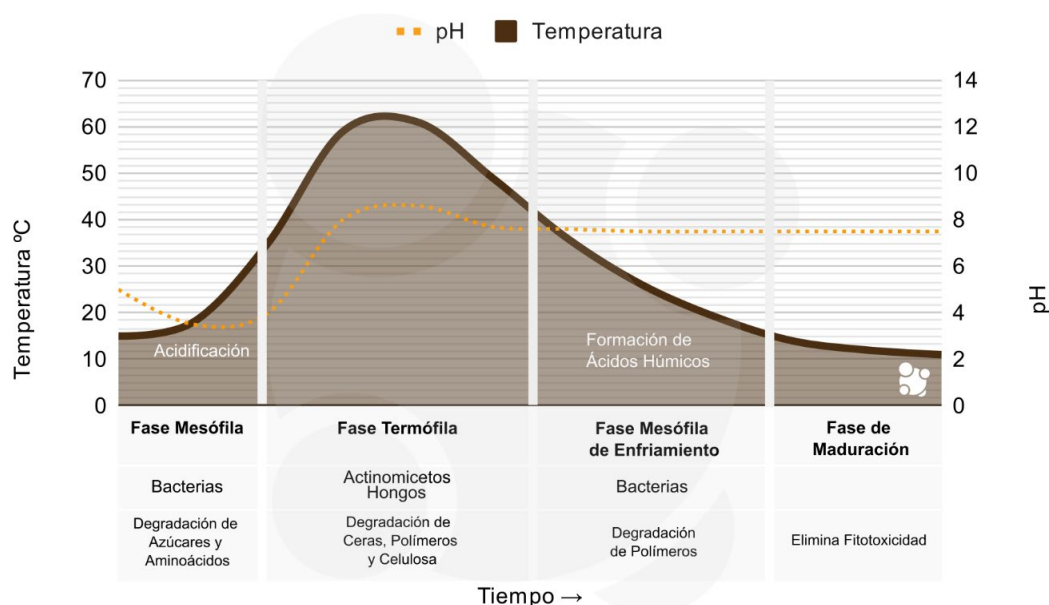


Figura 14. Perfiles de T y pH típicos en las fases del proceso de compostaje. Fuente: CSR Laboratorio (2025)

En cuanto a los parámetros de operación, el éxito del compostaje depende principalmente de la optimización de la relación C/N, humedad, aireación y pH (Amanina F. *et al.*, 2022):

- Relación C/N: un equilibrio adecuado entre carbono (fuente de energía) y nitrógeno (para la síntesis microbiana) es fundamental. Se recomienda una relación inicial entre 25:1 y 35:1. El alperujo, con un C/N desbalanceado y bajo contenido en nitrógeno, suele requerir el aporte de materiales ricos en N (estiércoles, lodos de depuradora). De esta manera, debe mezclarse con una proporción adecuada de biomasa rica en N (por ej.: estiércoles animales).
- Humedad: debe mantenerse entre 50–60 %. El alperujo presenta humedades superiores al 65–70 %, lo que genera problemas de compactación y limitación del oxígeno. Por ello es frecuente mezclarlo con materiales estructurantes (ramas de poda, restos de poda de olivo, astillas de madera).
- Aireación y oxigenación: la oxigenación adecuada previene la aparición de condiciones anaerobias que producirían malos olores, acumulación de ácidos grasos volátiles y ralentización del proceso. Se consigue mediante volteos periódicos o sistemas forzados de aireación y es necesario que mantenga la concentración de oxígeno en el interior del sustrato por encima del 5%.
- Porosidad: La porosidad de un material sólido es la fracción ocupada por aire y agua, es decir, aquel espacio que no está ocupado por la fracción sólida del residuo. Si el residuo carece de porosidad debe ser acondicionado con material estructurante para facilitar la existencia de poros de distintos tamaños que estén ocupados equilibradamente con aire y agua. Un término muy utilizado para describir esta propiedad es el FAS (*Free Air Space*), el cual se define como el volumen disponible con aire respecto del total, que no se encuentra ocupado por agua y la fracción sólida. Se define como valor óptimo para el compostaje de residuos, un valor de FAS equivalente al 30%, mientras otros autores amplían este valor a un rango óptimo de 30-60 %. En el caso del alperujo, un material estructurante para mejorar la porosidad podría ser la poda chipeada.
- pH: varía a lo largo del proceso. Inicialmente puede ser ácido (pH 5–6) debido a la liberación de ácidos orgánicos, pero tiende a estabilizarse en valores cercanos a la neutralidad en la fase de maduración (pH 7–8).

6.2. Gestión del alperujo a través del proceso de compostaje

El compostaje del alperujo no puede entenderse como un proceso lineal, sino como una estrategia de gestión integrada, que requiere ajustar proporciones de mezcla, aireación y humedad para superar las limitaciones propias de este subproducto. Cuando se diseñan adecuadamente estas condiciones, se obtiene un compost estable, maduro y con potencial de uso como enmienda orgánica en suelos agrícolas, cerrando el ciclo productivo del olivar bajo un enfoque de economía circular.

A continuación, se detallan las tecnologías existentes de compostaje aplicables al procesado del alperujo, las consideraciones de manejo y operación y las tecnologías emergente para la mejora del proceso.

6.2.1. Tecnologías de compostaje de alperujo y funcionamiento industrial

El compostaje del alperujo puede realizarse mediante diferentes tecnologías, cuya elección depende de factores como el volumen de residuo generado, la disponibilidad de materiales complementarios, el espacio físico y los recursos económicos de la almazara o la cooperativa. A continuación, se presentan los principales sistemas aplicados en la práctica.

1. Pilas volteadas (windrows)

Las pilas volteadas consisten en hileras de material orgánico depositadas al aire libre, con dimensiones variables (1,5–3 m de altura y hasta 50 m de longitud). El volteo periódico —realizado con volteadoras específicas o maquinaria agrícola adaptada (p. ej., cargadoras frontales)— garantiza la aireación y homogenización del material, evitando zonas anaerobias (**Figura 15**). El tiempo de proceso suele oscilar entre 3 y 6 meses, dependiendo de la temperatura ambiental, la frecuencia de volteo (cada 1–2 semanas en verano, cada 2–4 semanas en invierno) y la mezcla de materiales. El alperujo se suele combinar con estiércol ovino o bovino para corregir la relación C/N y con restos de poda triturados para aportar estructura.

En regiones como Aragón, este sistema es muy utilizado en cooperativas pequeñas por su sencillez y bajo coste, aunque exige disponer de superficies de terreno amplias y no cubiertas.

Un ejemplo de funcionamiento del proceso a escala industrial sería el siguiente:

1. Preparación de la mezcla (alperujo + estiércol + restos de poda triturados).
2. Formación de la pila con altura de 1,5–2,5 m y base de 2–4 m.
3. Volteo cada 1–3 semanas en función de la temperatura interna y la humedad.
4. Maduración final durante varias semanas hasta alcanzar estabilidad.

a)



b)



Figura 15. Sistema de pilas volteadas en la Planta de Puerta de Villas (a) y volteadora mecánica para la aireación del sustrato (b). Fuente: Oleovista.com (2025)

2. Sistemas estáticos aireados

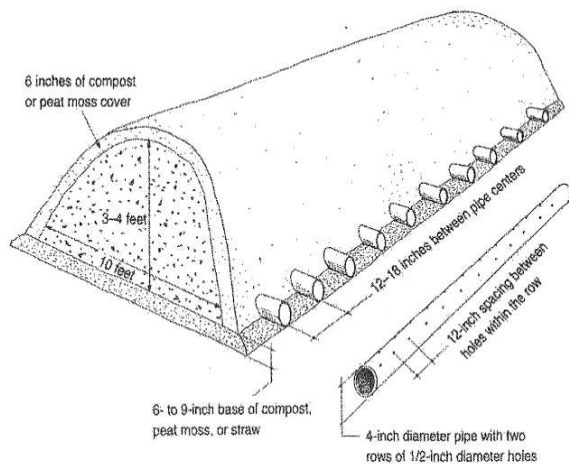
En este sistema, el material se coloca en pilas fijas que no se voltean, pero que disponen de tubos perforados enterrados o situados bajo la pila, conectados a un sistema de ventilación. El aire se introduce de forma forzada (ventiladores) o natural (efecto chimenea), asegurando una oxigenación uniforme (**Figura 16**). Es un sistema que permite controlar la temperatura y la humedad mediante la regulación del aire, reduciendo la emisión de olores y lixiviados. El tiempo de compostaje es algo menor que en las pilas volteadas (2–4 meses de fase activa) y resulta idóneo para plantas medianas que manejan volúmenes elevados de alperujo, ya que reduce la mano de obra asociada al volteo.

En Cataluña ya se han implementado este tipo de sistemas, donde algunas cooperativas han instalado sistemas de aireación forzada para tratar conjuntamente alperujo y gallinaza.

Un ejemplo de funcionamiento del proceso a escala industrial sería el siguiente:

1. Mezcla inicial equilibrada (alperujo + correctores).
2. Disposición en una pila compacta de hasta 3–4 m de altura.
3. Instalación de tubos perforados bajo la pila conectados a ventiladores.
4. Aireación controlada mediante temporizadores o sensores de oxígeno/temperatura.
5. Descarga tras 6–12 semanas, seguida de maduración al aire libre si es necesario.

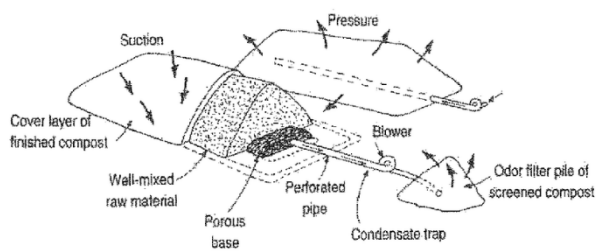
a)



b)



c)



d)



Figura 16. Sistemas de pilas aireadas. (a, b) sistema de pilas con aireación pasiva; (c, d) sistema de pilas con aireación forzada. Fuente: Rynk et al. (1992).

3. Túneles y reactores cerrados

Los túneles y bioreactores representan la opción más tecnificada. El sustrato a compostar se introduce en contenedores cerrados (túneles de hormigón, tambores metálicos o módulos de acero inoxidable) donde se controla automáticamente la aireación, temperatura y humedad (Figura 17). La fase termófila se alcanza rápidamente, asegurando la higienización en 1–2 semanas, y completándose el proceso en 6–8 semanas, mucho más rápido que en los sistemas abiertos. El sistema de compostaje en túnel o reactor cerrado permite trabajar en cualquier época del año, ya que no depende del clima exterior. Con este tipo de sistemas se reducen las emisiones difusas y se facilita la captación de lixiviados, lo que lo hace compatible con normativas ambientales más estrictas. La principal limitación es el coste: requiere inversiones elevadas y personal especializado, por lo que suele aplicarse en plantas centralizadas de compostaje que reciben alperujo de varias almazaras.

Un ejemplo de funcionamiento del proceso a escala industrial sería el siguiente:

1. Carga de la mezcla en un túnel o reactor sellado.
2. Aireación forzada mediante ventiladores y sistemas de recirculación.
3. Control de humedad mediante riego por aspersión interna.

4. Fase termófila controlada (55–65 °C) en 1–2 semanas.
5. Descarga y paso a maduración externa o segunda fase en otro módulo.



Figura 17. Sistema de túneles de compostaje. Fuente: www.compost-systems.com (2025).

6.2.2. Aspectos relevantes de manejo

Tal y como se ha mencionado previamente, el alperujo se debe procesar sin demora para evitar su degradación biológica y la generación de emisiones indeseables. En el caso del compostaje, y teniendo en cuenta los parámetros de operación descritos con anterioridad (*ver sección 6.1*), sería necesario mezclar el alperujo con poda triturada de olivar, u otro tipo de estructurante vegetal (aportación de estructura, porosidad y reducción de la humedad de la mezcla), y residuos ricos en nitrógeno para compostar de forma óptima el alperujo y producir un compost de calidad agronómica (Paredes, C., *et al.*, 2008; Bustamante, M.A., *et al.*, 2010). La Tabla 2 muestra las relaciones C/N típicas de algunos sustratos para la estimación de la relación final de diversas mezclas.

Tabla 2. Relaciones C/N típicas de sustratos orgánicos co-compostables

Material	Relación C/N	Material	Relación C/N
Alperujo	44	Alfalfa	12
Hojín / Poda Olivar	36	Trébol	23
Poda Olivar	75	Café Molido	20
Residuos de Fruta	35	Desperdicio de Alimentos	20
Hojas	60	Purín	13
Periódico Triturado	175	Gallinaza	12
Cáscaras de cacahuete	75	Heno	25
Agujas de Pino	80	Estiércol	12 – 15
Cáscara de Arroz	49	Algas	19
Paja	75	Restos de Hortícolas	25
Astillas de Madera / Serrín	400		

Por lo tanto, la secuencia de etapas para la realización del co-compostaje de alperujo sería:

- Recepción y almacenamiento de los sustratos (alperujo y preferentemente deyecciones ganaderas)
- Mezclado de volúmenes estimados de sustratos (por ej. medición en pala tractora) e incorporación de poda triturada (aportación de estructura y aireación).
- Ajuste de proporciones hasta lograr 25–30:1 de C/N y 50–60 % de humedad
- Compostaje en pilas con volteos, estáticos o túneles

6.2.3. Tecnologías emergentes para la mejora del proceso

Las investigaciones recientes han introducido mejoras en el compostaje del alperujo, principalmente enfocadas en la mejora de la sostenibilidad del proceso determinada principalmente por los consumos energéticos (sistemas con aireación forzada) y la generación de emisiones (gases de efecto invernadero y amoníaco, principalmente). A continuación, se describen brevemente aquellas que ya se están aplicando a escala industrial:

- Adición de biochar. Este material carbonoso mejora la aireación, retiene nutrientes y reduce emisiones de gases como metano y óxido nitroso.
- Inoculación microbiana. La introducción de hongos ligninolíticos (ej. *Phanerochaete chrysosporium*) o bacterias celulolíticas acelera la degradación de lignina y polifenoles, acortando el tiempo de maduración.
- Compostaje con membranas semipermeables. El uso de cubiertas especiales permite retener calor y humedad, reduciendo emisiones de olores y lixiviados, sin necesidad de infraestructuras cerradas (**Figura 18**).



Figura 18. Compostaje con membranas semipermeables.

En definitiva, la elección de la tecnología depende de la escala de producción y de los recursos disponibles. En el caso del sector oleícola aragonés, donde predominan pequeñas y medianas almazaras, las pilas volteadas y el co-compostaje con estiércoles locales se presentan como las alternativas más realistas. Para proyectos cooperativos o mancomunados de mayor envergadura, podrían considerarse sistemas estáticos o túneles de compostaje, especialmente cuando el objetivo sea cumplir con estándares ambientales más estrictos y aprovechar mejor el potencial agronómico del alperujo.

6.2.4. Ventajas y limitaciones de las tecnologías de compostaje para la gestión del alperujo

A continuación, se plantea la comparativa de sistemas empleados para el co-compostaje del alperujo, en términos de ventajas y limitaciones, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones en la selección de un sistema adecuado para la gestión del alperujo.

Tabla 3. Comparativa de sistemas empleados para el co-compostaje del alperujo

Sistema	Ventajas	Limitaciones	Escala típica
Pilas volteadas	Bajo coste; fácil implementación; uso de maquinaria agrícola común; flexibilidad en volúmenes	Gran necesidad de superficie; dependiente de clima; riesgo de lixiviados y olores	Pequeñas y medianas almazaras, uso local
Estáticos aireados	Aireación uniforme; menos mano de obra; control moderado de proceso; reducción de olores	Requiere inversión en sopladores; consumo energético; diseño más complejo	Cooperativas medianas o mancomunadas
Túneles/Reactores	Control total (temperatura, humedad, oxígeno); higienización rápida; minimiza emisiones y lixiviados	Inversión alta; costes operativos elevados; requiere personal especializado	Plantas centralizadas, proyectos piloto
Co-compostaje (con estiércol, poda, lodos)	Equilibra C/N; reduce humedad; acelera el proceso; mejora calidad del compost final	Necesidad de logística para materiales adicionales; riesgo sanitario con lodos	Muy extendido en España e Italia
Emergentes (biochar, inoculación, membranas)	Potencial de reducir emisiones; mayor eficiencia del proceso; mejora la calidad agronómica	En fase experimental; costes altos; falta de estandarización	Proyectos de investigación y demostración

6.3. Resultados agronómicos y ambientales del compostaje de alperujo

6.3.1. Emisiones y sostenibilidad del proceso de compostaje

El compostaje del alperujo ofrece ventajas ambientales claras respecto a prácticas tradicionales como el vertido en balsas o la combustión, aunque durante el proceso también se generan emisiones que deben ser consideradas. El dióxido de carbono es la principal salida gaseosa, resultado natural de la respiración microbiana. Sin embargo, cuando el material se compacta y aparecen zonas anaerobias, se pueden emitir metano y óxido nitroso, dos gases de efecto invernadero con un impacto climático muy superior. Además, la volatilización de amoníaco conlleva tanto molestias por olores como pérdidas de nitrógeno, reduciendo el valor fertilizante del compost final. La liberación de compuestos orgánicos volátiles, especialmente durante las primeras fases, también puede generar olores intensos, asociados a la degradación de lípidos y fenoles característicos del alperujo fresco.

La experiencia demuestra que una gestión adecuada permite minimizar estas emisiones. El volteo periódico o la aireación forzada garantizan la oxigenación, evitando la formación de metano y óxido nitroso. La adición de restos de poda o astillas mejora la porosidad, mientras que el estiércol aporta nitrógeno y microorganismos activos que aceleran la degradación y reducen pérdidas de amoníaco. En instalaciones más avanzadas, la cubrición de pilas con membranas semipermeables o la filtración de gases a través de biofiltros ha mostrado eficacia en la reducción de olores y emisiones difusas. Con estas prácticas, se ha estimado que el compostaje bien gestionado puede reducir entre un 40 y un 60 % las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con sistemas de gestión no controlados

6.3.2. Características del compost de alperujo

El compost resultante del tratamiento del alperujo presenta una composición y unas propiedades agronómicas definidas (Tabla 4). Una vez completada la maduración, el contenido en materia orgánica se sitúa en valores elevados, entre un 40 y un 60 %, y la relación carbono/nitrógeno se ajusta en torno a 15–20, lo que garantiza estabilidad y madurez. El pH, inicialmente ácido, evoluciona hacia la neutralidad o incluso valores ligeramente

básicos, lo que favorece su aplicación en suelos agrícolas. La humedad se reduce hasta situarse en torno al 35–45 %, lo que facilita tanto el almacenamiento como la aplicación en campo. Un aspecto fundamental es la reducción de compuestos fenólicos, responsables de la fitotoxicidad del alperujo fresco. Durante el proceso de compostaje estos compuestos son degradados o polimerizados, de modo que el producto final resulta seguro para la germinación y el desarrollo de los cultivos. Resumidamente, mediante el proceso de compostaje de alperujo es viable conseguir una enmienda estable, con bajo riesgo ambiental (baja presencia de contaminantes y bajos efectos fitotóxicos) y apto para su incorporación en estrategias de fertilización orgánica. La Figura 14 muestra la composición de diversos compost obtenidos a partir de alperujo mezclado con estiércol ovino y de caballo.

Tabla 4. Composición típica de un compost de alperujo.

Parámetro	Rango típico	Observaciones
Materia orgánica (%)	40 – 60	Elevada estabilidad tras maduración
Relación C/N	15 – 20	Indicador de compost maduro y estable
pH	7 – 8	Neutral o ligeramente básico
Humedad (%)	35 – 45	Adecuada para almacenamiento y aplicación
N total (%)	1 – 2	Nitrógeno de liberación lenta
P ₂ O ₅ (%)	0.3 – 0.6	Aporte moderado de fósforo
K ₂ O (%)	1 – 2	Potasio útil en cultivos leñosos
Polifenoles	Muy reducidos	Eliminados durante la humificación

	ANEO	AVEO	ANEC	ANEORP
Humedad (%)	12,6±1,60	10,8±1,40	12,4±0,80	13,7±2,10
pH	8,7±0,2	9,1±0,1	8,3±0,4	8,9±0,4
CE (ds m ⁻¹)	5,3±0,3	4,1±0,4	4,6±0,3	5,7±0,8
MO (g kg ⁻¹)	427±61,0	403±80,0	396±58,3	521±51,1
COT (g kg ⁻¹)	244±27,2	223±22,0	233±36,3	279±18,2
Polifenoles Totales (%)	0,19±0,03	0,13±0,01	0,05±0,01	0,16±0,03
IG (%)	82±3,2	82±4,0	84±3,2	92±1,1
C/N	15,6±1,40	16,1±3,33	17,8±0,81	19,2±3,50
N Total (%)*	1,73±0,15	1,63±0,14	1,47±0,14	1,60±0,21
P (%)*	0,40±0,02	0,30±0,07	0,33±0,06	0,40±0,06
K (%)*	2,70±0,57	2,43±0,14	1,83±0,07	3,37±0,07
Ca (%)*	14,1±1,40	14,2±2,82	13,2±2,41	12,0±1,41
Mg (%)*	1,20±0,21	1,00±0,21	1,07±0,12	1,37±0,19
Na (%)*	1,00±0,14	0,90±0,07	1,03±0,18	1,03±0,14
Fe (g kg ⁻¹)*	3,13±0,64	3,87±0,92	2,87±0,07	2,90±0,35
Cu (mg kg ⁻¹)*	120±7,2	104±10,5	37±2,8	88±4,3
Zn (mg kg ⁻¹)*	57±2,1	53±3,6	44±9,0	58±6,8
Mn (mg kg ⁻¹)*	158±30,0	143±27,5	146±27,6	141±24,1

ANEO (Alperujo fresco + Estiércol de oveja), AVEO (Alperujo seco + Estiércol de oveja), ANEC (Alperujo fresco + Estiércol de caballo + urea), ANEORP (Alperujo fresco + Estiércol de oveja + Restos de paja), CE (conductividad eléctrica), MO (materia orgánica), COT (carbono orgánico total), IG (índice de germinación). * Resultados expresados sobre materia seca.

Figura 19. Composición de diversos tipos de compost de mezclas de alperujo y otros sustratos orgánicos. Fuente: Fernández A., et al. (2015).

6.3.3. Usos del compost de alperujo

La aplicación más extendida del compost de alperujo es en la propia olivicultura, donde se reincorpora al suelo del que proceden las aceitunas, cerrando el ciclo de nutrientes en el marco de la economía circular y reduciendo los costos en fertilización (Figura 15). La mejora de la estructura, el incremento de la capacidad de retención de agua y el aporte de materia orgánica estable resultan especialmente valiosos en suelos mediterráneos, frecuentemente pobres y sometidos a procesos de erosión. Además de su uso en olivares, este compost se emplea en otros cultivos leñosos como viñedos y almendrales, así como en horticultura de regadío, donde contribuye a optimizar la gestión del agua y los nutrientes. También se utiliza en proyectos de restauración ambiental, en suelos degradados o en procesos de revegetación de taludes y márgenes de infraestructuras,

debido a su capacidad para mejorar la fertilidad y favorecer el establecimiento de vegetación. En viveros y jardinería, el compost de alperujo puede integrarse como componentes de sustratos, sustituyendo parcialmente a la turba. Esto no solo representa una opción más sostenible, sino que también amplía el mercado potencial de valorización de este subproducto. En todos los casos, su aplicación debe adaptarse a las condiciones del suelo y a las necesidades de los cultivos, considerando que se trata de un producto con mayor valor como enmienda orgánica de efecto gradual que como fertilizante de respuesta inmediata.

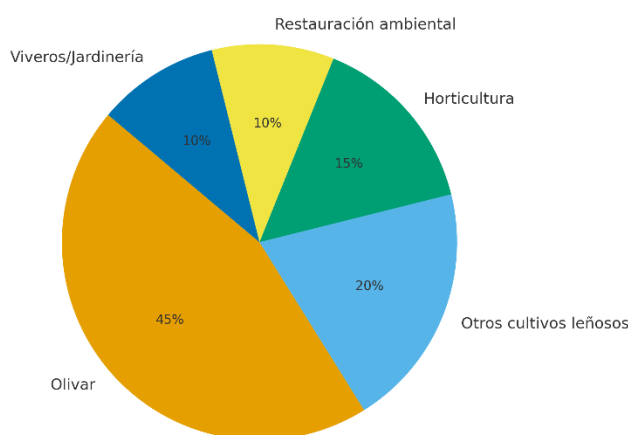


Figura 20. Distribución estimada de las principales aplicaciones del compost de alperujo en España, basada en experiencias reportadas en Andalucía y Comunidad Valenciana. Fuentes: Fernández-Hernández *et al.* (2014); Álvarez de la Puente *et al.* (2016); IFAPA–Junta de Andalucía (2015); García-Rández *et al.* (2023).

6.4. Compostaje de digestato de alperujo, una solución sinérgica sostenible

Tal y como se ha descrito anteriormente, el digestato de alperujo es el subproducto resultante de la digestión anaerobia de este residuo. Tras la fase de biodigestión, en la que la fracción más fácilmente biodegradable del alperujo se transforma en biogás, queda un material semisólido con alto contenido en agua, materia orgánica parcialmente degradada y nutrientes minerales como nitrógeno, fósforo y potasio. Aunque el digestato presenta un valor fertilizante superior al alperujo fresco, suele requerir un tratamiento adicional para estabilizarlo, reducir olores y mejorar sus propiedades de almacenamiento y aplicación. El compostaje es, en este contexto, la estrategia más eficaz (Albuquerque *et al.*, 2012). El proceso de compostaje del digestato permite completar la estabilización de la materia orgánica que no fue degradada en el biodigestor, reduciendo la respiración microbiana residual y minimizando el riesgo de emisiones de olores y lixiviados. Durante la fase termófila, se produce además una higienización del material, eliminando patógenos y semillas de malas hierbas, lo que aumenta la seguridad de su uso agrícola (Pognani *et al.*, 2018). La composición del digestato, más húmedo y con menor relación carbono/nitrógeno que el alperujo fresco, hace necesaria la mezcla con materiales estructurantes y ricos en carbono, como restos de poda triturados, astillas de madera o incluso paja y estiércol. Estas enmiendas mejoran la aireación y permiten ajustar la relación C/N para obtener un compost equilibrado y estable (Albuquerque *et al.*, 2012).

Los beneficios asociados al compostaje del digestato de alperujo son múltiples. Desde el punto de vista ambiental, se evita el vertido del digestato líquido, que puede generar emisiones difusas y contaminación de aguas si no se gestiona adecuadamente. Desde el punto de vista agronómico, se obtiene un compost enriquecido en nutrientes minerales —especialmente nitrógeno y potasio— y con una fracción de materia orgánica más estable que el digestato original. Este compost de digestato puede utilizarse como enmienda en suelos agrícolas, como biofertilizante en cultivos leñosos o como componente de sustratos en viveros, dependiendo de la calidad final alcanzada (Tamborrino *et al.*, 2021).

La combinación de digestión anaerobia y compostaje se perfila así como un modelo integrado de valorización del alperujo: en una primera fase se produce energía renovable en forma de biogás, y en una segunda se transforma el digestato en un producto agrícola seguro y de valor. Este enfoque encaja plenamente en la estrategia de economía circular y ofrece una solución de alta sostenibilidad para el sector oleícola, capaz de reducir impactos ambientales, diversificar fuentes de ingresos y mejorar la gestión de residuos en almazaras de diferente escala (Alburquerque *et al.*, 2012; Pognani *et al.*, 2018) (Tabla 5).

Tabla 5. Diferencias principales entre la gestión de alperujo y digestato de alperujo mediante compostaje

Aspecto	Compostaje de alperujo fresco	Compostaje de digestato de alperujo
Materia prima	Alperujo, con elevada humedad, alto contenido en grasas y polifenoles.	Digestato de alperujo, más homogéneo, con menor fracción biodegradable y mayor contenido mineral.
Relación C/N inicial	Alta (25–35), requiere materiales ricos en N (estiércol, lodos) para equilibrar.	Baja (<15), necesita aportes de materiales estructurantes ricos en carbono (poda triturada, astillas).
Contenido en agua	Muy elevado (60–70 %), difícil de manejar si no se mezcla con correctores secos.	También alto (65–75 %), pero con menor contenido graso y fenólico que facilita el proceso.
Fitotoxicidad inicial	Alta, por polifenoles y ácidos grasos volátiles; requiere tiempo de humificación.	Baja a moderada, la digestión previa reduce polifenoles y otros compuestos tóxicos lo que mejora el índice de germinación del producto.
Proceso de compostaje	Más lento, especialmente en la fase inicial (>2 meses de procesado); necesita mezclas bien ajustadas.	Más rápido y estable, gracias a la degradación parcial ya realizada en el biodigestor (90 días de procesado)
Producto final	Compost con buena estabilidad, enmienda orgánica de liberación lenta, contenido moderado de nutrientes.	Compost enriquecido en nutrientes minerales (N y K), más fertilizante que el del alperujo fresco.
Aplicaciones	Enmienda orgánica en olivares y otros cultivos leñosos, restauración de suelos, jardinería.	Fertilizante orgánico con mayor valor nutritivo, uso en cultivos intensivos, mezclas para sustratos y viveros.
Ventaja clave	Aprovechamiento directo del subproducto de almazara sin necesidad de digestión previa.	Permite integrar digestión anaerobia (energía renovable) y compostaje (fertilizante), cerrando el ciclo circular.

6.5. Experiencias en España y la UE

El compostaje del alperujo ha pasado en pocos años de ser una práctica experimental a consolidarse como una de las vías más prometedoras de gestión en el sector oleícola. En España, donde se concentra casi la mitad de la producción mundial de aceite de oliva, los primeros ensayos se llevaron a cabo en Andalucía a finales de los años noventa, impulsados por el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) y diversas universidades. Estos trabajos demostraron que, mediante el co-compostaje con estiércoles y restos de poda, era posible transformar el alperujo en un compost estable y apto para aplicación agrícola. Estudios a largo plazo en

olivares de Jaén confirmaron mejoras en la fertilidad del suelo y en la productividad, sin efectos negativos sobre la calidad del fruto ni del aceite obtenido (Fernández-Hernández et al., 2014; IFAPA, 2015).

En Aragón, aunque la producción de aceite es más reducida, también se han desarrollado iniciativas piloto, especialmente en el Bajo Aragón turolense. Allí, algunas cooperativas han ensayado pilas volteadas al aire libre, mezclando el alperujo con estiércol ovino, lo que ha permitido reducir la fitotoxicidad inicial y mejorar suelos agrícolas pobres en materia orgánica. Estas experiencias ponen de relieve que incluso a pequeña escala el compostaje puede ser una herramienta viable y rentable para la valorización del residuo.

En la Comunidad Valenciana y en Cataluña se han realizado experiencias de co-compostaje con lodos de depuradora y restos vegetales. Estos estudios han demostrado que la incorporación de residuos de diferentes orígenes no solo favorece la biodegradación del alperujo, sino que también permite gestionar de manera conjunta varios flujos orgánicos que de otro modo serían problemáticos (García-Rández et al., 2023).

A nivel europeo, Italia ha sido uno de los países con mayor tradición en la valorización del alperujo. En regiones como Apulia y Sicilia se han desarrollado plantas de compostaje que combinan el alperujo con restos de poda de olivo, produciendo un compost certificado para su uso en agricultura ecológica (Tamborrino et al., 2021). En Grecia, proyectos de compostaje en zonas semiáridas han mostrado que el aporte regular de compost de alperujo mejora el contenido de materia orgánica del suelo, favorece la retención de agua y contribuye a frenar procesos de erosión y desertificación (Stoyanova et al., 2017). En Portugal, por último, el modelo predominante ha sido el de plantas comunitarias en el Alentejo, donde varias almazaras aportan sus residuos a una misma instalación, reduciendo costes de inversión y obteniendo un compost destinado a olivares y viñedos locales (Orive et al., 2016).

En conjunto, estas experiencias confirman que el compostaje no solo es técnicamente viable, sino que ya se aplica con éxito en distintos contextos mediterráneos. Las diferencias se encuentran en la escala, los materiales complementarios empleados y el grado de tecnificación, pero el objetivo común es transformar un residuo problemático en un recurso de alto valor para la agricultura y la restauración ambiental.

7. Digestión anaerobia vs. compostaje

El alperujo puede gestionarse mediante distintas estrategias de valorización, siendo el compostaje y la digestión anaerobia las dos opciones más consolidadas y con mayor potencial de aplicación en el ámbito mediterráneo. Ambas tecnologías presentan ventajas y limitaciones que deben ser consideradas en función de la escala de la almazara, la disponibilidad de recursos complementarios (estiércoles, restos vegetales, agua), el marco normativo y los objetivos prioritarios de cada productor.

Mientras que el compostaje se orienta a la estabilización de la materia orgánica y a la producción de enmiendas agrícolas, la digestión anaerobia pone el acento en la generación de energía renovable en forma de biogás, acompañada de un digestato que puede ser valorizado mediante su aplicación directa al suelo o su compostaje posterior.

La elección entre uno u otro sistema no responde únicamente a criterios técnicos, sino también a factores económicos, ambientales y sociales. A continuación, se presenta una tabla comparativa (Tabla 6) que sintetiza los principales aspectos diferenciales entre ambos procesos, con el fin de ofrecer una visión clara y práctica para la toma de decisiones en el sector oleícola (Tabla 7).

Tabla 6. Comparativa entre el proceso de compostaje y la digestión anaerobia de sustratos orgánicos.

Aspecto	Compostaje	Digestión anaerobia
Objetivo principal	Estabilización de la materia orgánica y obtención de enmienda orgánica para el suelo.	Producción de energía renovable (biogás) y obtención de digestato.
Materia prima	Alperujo fresco mezclado con co-sustratos o estructurante (estiércol, poda, lodos).	Alperujo fresco (a menudo requiere pretratamiento: dilución, inoculación, mezcla con otros residuos húmedos).
Relación C/N inicial	Ajustada con co-sustratos ricos en N (15–30).	Baja, necesita co-digestión con residuos más ricos en N.
Duración del proceso	2–6 meses, según sistema y clima.	20–40 días de retención hidráulica, según reactor.
Productos generados	Compost maduro, estable, rico en materia orgánica.	Biogás (CH ₄ + CO ₂) y digestato semisólido/líquido.
Valor agronómico	Aporta carbono estable, mejora estructura, retención hídrica y fertilidad de suelos.	Digestato aporta nutrientes disponibles (N, P, K), pero menos carbono estable y alto contenido salino.
Valor energético	Nulo.	Elevado: producción de biogás (energía térmica y eléctrica, o biometano).
Requisitos técnicos	Relativamente sencillos; maquinaria agrícola común.	Tecnologías avanzadas (CSTR, UASB, digestores secos); mayor control técnico.
Coste de inversión	Bajo a medio, según escala.	Alto, requiere infraestructuras y mantenimiento especializado.
Coste operativo	Moderado (volteo, aireación, mano de obra).	Elevado (operación continua, personal cualificado, consumo energético).
Impacto ambiental	Reduce fitotoxicidad, mejora suelos, emisiones controlables con buenas prácticas.	Mitiga emisiones de GEI al generar energía renovable, pero riesgo de fugas de metano si no se gestiona bien.
Escala de aplicación	Adecuado para pequeñas y medianas almazaras, cooperativas.	Más viable en plantas centralizadas o grandes almazaras.

Tabla 7. Matriz de decisión para la implementación del compostaje, digestión anaerobia o ambos como solución sostenible de gestión del alperujo.

Escenario	Condiciones clave	Opción más adecuada	Justificación
Pequeña almazara aislada (<2.000 t aceituna/año)	Producción limitada, baja capacidad de inversión, disponibilidad local de estiércol/poda.	Compostaje en pilas volteadas o sistemas aireados.	Bajo coste, simplicidad operativa, aprovechamiento agrícola directo en la propia finca o cooperativa.
Cooperativa mediana (2.000–10.000 t/año)	Capacidad de agrupar residuos, acceso a maquinaria, posibilidad de acuerdos locales.	Compostaje centralizado con co-sustratos.	Economías de escala, gestión conjunta de residuos, obtención de compost para reparto entre socios.
Gran almazara (>10.000 t/año)	Alta capacidad de inversión, interés en energía renovable, posibilidad de venta de electricidad/biometano.	Digestión anaerobia + compostaje del digestato.	Permite producción energética y fertilización orgánica, cerrando el ciclo circular.
Planta regional o intercomunitaria	Varios municipios/almacenes agrupados, financiación pública o privada.	Digestión anaerobia a gran escala con cogeneración y posterior compostaje del digestato.	Gestión integral de grandes volúmenes, mayor eficiencia energética, valorización agronómica del residuo final.
Entornos con fuerte limitación hídrica o normativa estricta en vertidos	Restricciones legales, necesidad de reducir aguas residuales.	Compostaje bifásico con residuos secos como correctores.	Menor riesgo ambiental, adaptación a normativa y optimización de recursos hídricos.

8. Estrategias integradas y economía circular en la gestión del alperujo

8.1. Enfoque de economía circular en el sector oleícola

El sector oleícola está inmerso en una transición hacia modelos productivos más sostenibles, impulsada por la creciente exigencia ambiental, la innovación tecnológica y el marco normativo europeo en materia de economía circular. Tradicionalmente considerado un residuo problemático, el alperujo se reconoce hoy como un recurso estratégico, con alto potencial energético, agronómico y económico. Su composición lo convierte en una materia prima idónea para la obtención de bioproductos, bioenergía y enmiendas orgánicas (Christoforou & Fokaidis, 2016; Di Giacomo & Romano, 2022).

El concepto de economía circular se basa en cerrar los ciclos de materiales y energía dentro de la cadena de valor. En el caso del aceite de oliva, esto implica reintegrar los subproductos generados —hojas, alpechín y alperujo— en el propio sistema productivo, ya sea como fertilizantes orgánicos, biogás, biofertilizantes líquidos o incluso biomateriales. Este enfoque no solo reduce residuos y emisiones, sino que mejora la competitividad del sector al diversificar fuentes de ingreso y reducir costes de gestión (Restuccia *et al.*, 2022).

A nivel político y estratégico, la Unión Europea ha marcado una hoja de ruta clara mediante la Estrategia “De la Granja a la Mesa” y el “Plan de Acción de Economía Circular”, que promueven la valorización de subproductos agrícolas como recursos. En España, documentos como la Estrategia Española de Bioeconomía Horizonte 2030, el PERTE Agroalimentario y las estrategias autonómicas (por ejemplo, la Estrategia Aragonesa de Bioeconomía) consolidan este marco, promoviendo la implementación de soluciones tecnológicas limpias, la colaboración entre sectores y la creación de valor añadido en las zonas rurales (MAPA, 2022; Gobierno de Aragón, 2021).

8.2. Integración tecnológica: compostaje y digestión anaerobia

El modelo más eficiente para la valorización integral del alperujo combina dos tecnologías complementarias: la digestión anaerobia y el compostaje. Este enfoque de doble etapa permite aprovechar de forma óptima tanto la fracción energética como la orgánica del residuo, reduciendo simultáneamente su impacto ambiental.

En una primera fase, el alperujo (sólo o co-digerido con otros residuos agroindustriales) se somete a un proceso de fermentación anaerobia que genera biogás, una mezcla de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) aprovechable para producir electricidad, calor o biometano. El subproducto sólido y líquido resultante, denominado digestato, conserva una elevada proporción de nutrientes minerales y materia orgánica parcialmente estabilizada (Borja *et al.*, 2006; Messineo *et al.*, 2020).

En la segunda fase, este digestato se somete a un proceso de compostaje controlado, donde la materia orgánica residual se estabiliza bajo condiciones aeróbicas, reduciendo la humedad y eliminando patógenos. El resultado final es un compost de alta calidad agronómica, apto para su uso en suelos agrícolas y proyectos de restauración (Justino *et al.*, 2012; Manthos *et al.*, 2023).

Las sinergias entre ambos procesos son claras: la digestión anaerobia disminuye la carga orgánica y la fitotoxicidad inicial del alperujo, facilitando el compostaje posterior, mientras que el compostaje final mejora las propiedades del digestato y asegura la valorización completa del residuo. Este modelo integrado ya se aplica con éxito en Italia, Grecia y Portugal, donde consorcios o cooperativas de almazaras gestionan plantas conjuntas de digestión y compostaje (Tamborrino *et al.*, 2021; Orive *et al.*, 2016). En España, su replicabilidad es alta, especialmente en regiones con concentración de almazaras y disponibilidad de co-sustratos agrícolas.

8.3. Modelos de gestión y gobernanza cooperativa

El aprovechamiento eficiente del alperujo requiere una gestión coordinada. En este sentido, las cooperativas oleícolas desempeñan un papel central en la transición hacia la sostenibilidad (Serrano *et al.*, 2021; Dermeche *et al.*, 2013). La creación de plataformas de valorización compartida permite:

- Reducir costes de inversión y operación mediante economías de escala.
- Facilitar el acceso a financiación y subvenciones.
- Garantizar la trazabilidad y el cumplimiento normativo.
- Mejorar la competitividad y la imagen ambiental del sector.

Ejemplos en Andalucía y el Alentejo portugués demuestran que el modelo cooperativo no solo es viable, sino que constituye la vía más eficaz para implantar infraestructuras de valorización circular en zonas rurales. Estas plantas, además de gestionar el alperujo, pueden diversificar su actividad mediante la recepción de otros residuos agroindustriales, generando ingresos adicionales y reforzando la economía local (MAPA, 2023).

8.4. Beneficios ambientales y socioeconómicos

Las estrategias integradas de valorización del alperujo presentan ventajas significativas:

- **Ambientales:** reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mejora de la calidad del suelo, reducción del uso de fertilizantes minerales y minimización del vertido de residuos.
- **Económicas:** ahorro en costes de gestión, generación de energía renovable y fertilizantes orgánicos, creación de empleo local.
- **Sociales:** fortalecimiento del tejido cooperativo, fijación de población rural y mejora de la percepción pública del sector oleícola.

En conjunto, el aprovechamiento integral del alperujo encarna los principios de la bioeconomía circular: transformar residuos en recursos, cerrar ciclos de materia y energía, y crear valor añadido en el territorio.

9. Implementación de la gestión sostenible de alperujo

A continuación, se describe la aplicación práctica de las estrategias circulares y su articulación en el territorio, con especial énfasis en la planificación, las buenas prácticas y las oportunidades de apoyo financiero.

9.1. Buenas prácticas operativas

Una gestión sostenible del alperujo debe apoyarse en buenas prácticas que aseguren la eficiencia técnica y minimicen los impactos ambientales:

- **Separación y almacenamiento controlado.** Evitar acumulaciones prolongadas sin manejo, que generan lixiviados, malos olores y emisiones difusas.
- **Uso de co-sustratos.** Mezclar alperujo con estiércoles, restos de poda o lodos de depuradora para equilibrar la relación C/N y mejorar la degradabilidad.
- **Control de parámetros clave.** En compostaje (temperatura, humedad, aireación); en digestión (pH, carga orgánica, tiempo de retención).
- **Valorización responsable del producto final.** Aplicar compost o digestato ajustando las dosis a las necesidades del cultivo y evitando contaminación difusa.
- **Gestión cooperativa.** Fomentar alianzas entre almazaras para compartir infraestructuras, costes y conocimiento técnico.

9.2. Hoja de ruta hacia una gestión sostenible del alperujo

La transición hacia modelos circulares de gestión del alperujo puede plantearse en fases temporales. A continuación se proponen las actuaciones consideradas a corto, medio y largo plazo para realizar dicha transición:

- **Corto plazo (1–3 años):**
 - Abandono progresivo de prácticas de vertido en balsas.
 - Extensión del compostaje básico en pilas dentro de las propias almazaras o cooperativas locales.
- **Medio plazo (3–7 años):**
 - Generalización de plantas de compostaje centralizadas, con incorporación de co-sustratos agroindustriales.
 - Primeras experiencias piloto de digestión anaerobia a escala mediana, vinculadas a cooperativas o agrupaciones de almazaras.
- **Largo plazo (7–15 años):**
 - Integración de sistemas combinados digestión + compostaje en polos regionales de bioeconomía.
 - Producción de biometano e incorporación del compost de digestato en estrategias de mejora de suelos agrícolas y restauración ambiental.

9.3. Oportunidades de financiación

El desarrollo de modelos circulares en el sector oleícola se apoya en un marco sólido de financiación pública y programas europeos, nacionales y autonómicos, orientados a la innovación, la sostenibilidad y la transición energética.

A **nivel europeo**, la **Política Agraria Común (PAC)** sigue siendo una de las principales fuentes de apoyo, con ayudas destinadas a prácticas agroambientales, inversiones en modernización de instalaciones y fomento de la bioeconomía en zonas rurales. Junto a ella, el **Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (Next Generation EU)** continúa impulsando proyectos que promueven la descarbonización, la eficiencia energética y la gestión sostenible de residuos agroindustriales, canalizados a través del **Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)** de España.

El **Programa LIFE**, gestionado por la Comisión Europea, mantiene convocatorias anuales para proyectos de demostración y replicación en economía circular, gestión de residuos y valorización de subproductos agrícolas. En paralelo, el programa Horizonte Europa, especialmente dentro de su Clúster 6 “Alimentación, Bioeconomía, Recursos Naturales, Agricultura y Medio Ambiente”, ofrece financiación para proyectos de I+D+i enfocados en la valorización de biomasa, la innovación agroindustrial y la integración de tecnologías limpias.

A **nivel nacional**, destacan las líneas impulsadas por el **Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO)**, en el marco del **PERTE de Economía Circular** y el **PERTE Agroalimentario**, que apoyan inversiones empresariales orientadas a reducir el impacto ambiental de la industria, mejorar la eficiencia energética y fomentar la reutilización de recursos. El **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)** financia proyectos de biogás y autoconsumo renovable, tanto en explotaciones agrarias como en cooperativas, mientras que el **Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI)** y la entidad pública **ENISA** respaldan iniciativas de innovación tecnológica en PYMES agroindustriales.

En el **ámbito autonómico**, las comunidades con mayor presencia oleícola —como Andalucía, Aragón, Castilla-La Mancha o Extremadura— han incorporado la economía circular y la bioeconomía como ejes prioritarios de sus estrategias de desarrollo regional. Estas regiones suelen convocar anualmente programas de apoyo a la valorización de subproductos, la implantación de energías renovables, el compostaje comunitario y la creación de plantas de biogás agroindustrial. En Aragón, la iniciativa “**Aragón Circular**”, impulsada por el Instituto Aragonés de Fomento, y en Andalucía, la **Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular**, son ejemplos de marcos activos que canalizan ayudas e incentivos dirigidos a empresas y cooperativas agroalimentarias.

Además, tanto el **Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)** como el **Fondo Social Europeo Plus (FSE+)** siguen siendo instrumentos clave para financiar proyectos de innovación, cooperación empresarial y formación técnica vinculados a la economía circular y la sostenibilidad rural.

En conjunto, este entramado de programas y organismos configura una red de apoyo estable que facilita la transición del sector oleícola hacia un modelo más eficiente, competitivo y respetuoso con el medio ambiente. Aprovechar estas oportunidades requerirá de una gestión profesionalizada, la creación de consorcios cooperativos y una planificación técnica sólida que integre los principios de la bioeconomía circular.

9.4. Síntesis técnica y perspectivas de futuro

El desarrollo tecnológico y la coordinación institucional serán determinantes para consolidar un nuevo paradigma de gestión del alperujo. El compostaje y la digestión anaerobia, combinados en un modelo circular, representan soluciones maduras y sostenibles que ya están demostrando su viabilidad técnica y económica.

El reto actual no reside en la tecnología, sino en la implementación territorial, la cooperación entre productores y la capacidad de acceder a financiación y conocimiento. Avanzar hacia una gestión integral permitirá transformar la industria oleícola en un modelo de referencia en sostenibilidad, energía renovable y economía circular a nivel europeo.

10. Referencias bibliográficas

AgroBioGas (2020). *Integrated management of olive mill residues through biogas and biofertilizer production*. Instituto Politécnico de Beja, Portugal.

Aliakbarian, B., Casale, M., Paini, M., Ibáñez, E., Cifuentes, A., & Spigno, G. (2011). Olive oil waste: Environmental problems and alternative solutions. *Journal of Food Engineering*, *104*, 56–63.

Albuquerque, J. A., de la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca, F., Roldán, A., Cegarra, J., & Bernal, M. P. (2012). Agrochemical characterization of “alperujo” composts produced by combining anaerobic digestion and composting. *Waste Management*, *32*(6), 1131–1138.

Bernal, M. P., Navarro, A. F., Roig, A., Cegarra, J., & García, D. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, *63*, 91–99.

Borja, R., Rincón, B., Raposo, F., & Sánchez, E. (2006). Olive mill wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, *99*, 377–388.

Borja, R., Martín, A., Alonso, V., & García, I. (2006). Comparison between three-phase and two-phase olive oil mill effluents in batch anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal*, *32*, 195–202.

Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Espinosa, A., & Pérez-Murcia, M. D. (2010). Co-composting of the solid waste fraction of olive mill wastewater with agroindustrial by-products: Optimization of the process and agricultural use of the final product. *Waste Management*, *30*, 807–813.

Christoforou, E., & Fokaides, P. A. (2016). A review of olive mill solid wastes to energy utilization techniques. *Waste Management*, *49*, 346–363.

Comisión Europea (2019). *Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre productos fertilizantes de la UE*. Bruselas: Comisión Europea.

Comisión Europea (2025). *Olive oil production in the European Union – Market report 2024/25*. Bruselas: European Commission.

Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., & Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Prospects and potential in animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, *185*, 1–16.

Di Giacomo, G., & Romano, S. (2022). Global olive oil production and market trends. *Journal of Agricultural Science*, *14*, 112–124.

Fernández-Hernández, A., Plaza, C., Polo, A., & Plante, A. F. (2014). Application of compost of two-phase olive mill waste on olive grove: Effects on soil, olive fruit and olive oil quality. *Waste Management*, *34*(7), 1139–1147.

Fernández-Hernández, A., Plaza, C., Polo, A., & Plante, A. F. (2014). Agronomic use of composted olive mill wastes: Effects on soil fertility and crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *185*, 29–39.

García-Rández, A., Peña, M., Rodríguez, L., & Hernández, J. (2023). Is the direct soil application of two-phase olive mill waste (alperujo) compatible with soil quality protection? *Agronomy*, *13*(10), 2585.

Gobierno de Aragón – Departamento de Agricultura (2024). *Producción de aceite de oliva en Aragón. Campaña 2023/24*. Zaragoza: Gobierno de Aragón.

Gobierno de España (2019). *Real Decreto 999/2019, de 10 de diciembre, por el que se regulan los productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado*, nº 302.

IFAPA (2015). *Diez años de aplicación de compost de alperujo en olivar*. Junta de Andalucía.

IFAPA (2022). *Ensayos de fertirrigación con digestato de alperujo en olivar andaluz*. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural, Junta de Andalucía.

LIFE OLIVE4CLIMATE (2019). *Adaptation to climate change through carbon balance improvement in the olive oil sector*. European Commission.

Madejón, E., Díaz, M. J., López, R., & Cabrera, F. (2007). Composting of olive mill wastes: Technical and agronomic aspects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119, 243–251.

MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) (2024). *Campaña oleícola 2023/2024. Datos de producción nacional*. Madrid: MAPA.

Marañón, E., Fernández, Y., Alonso, F. J., & Quiroga, G. (2009). *Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427.

Messineo, A., Volpe, R., & Nicolini, A. (2020). Olive mill solid waste combustion: Technical challenges. *Energy Procedia*, 120, 234–241.

Mora la Nova Biogas Plant (2021). *Informe técnico de valorización del digestato de alperujo para la producción de fertilizantes organominerales*.

Orive, M., Pérez, J., Rodríguez, L., & Silva, C. (2016). Composting practices in the Alentejo: Cooperative management of olive mill waste. *Waste Biomass Valorization*, 7(4), 845–854.

Orive, M., Pérez, J., Rodríguez, L., & Silva, C. (2016). Environmental impact of olive oil mill waste landspreading. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 24550–24562.

Paredes, C., Cegarra, J., Roig, A., Sánchez-Monedero, M. A., & Bernal, M. P. (2008). Co-composting of olive mill wastes with animal manures: Evolution of organic matter and humic substances. *Bioresource Technology*, 99, 2812–2820.

Pognani, M., D'Imporzano, G., Scaglia, B., & Adani, F. (2018). Digestate composting for sustainable organic fertilizer production. *Waste Biomass Valorization*, 9, 1–12.

Raposo, F., de la Rubia, M. A., Fernández-Cegri, V., & Borja, R. (2010). Anaerobic digestion of two-phase olive mill solid waste: Kinetic modeling and process performance. *Journal of Environmental Management*, 91(8), 1898–1906.

Restuccia, A., Spagna, G., & Puglisi, G. (2022). Environmental impact of olive oil extraction: A life cycle assessment of two-phase vs three-phase systems. *Sustainability*, 14.

Salazar, L. A. (2016). *Estabilización de los residuos gallinaza de jaula y vinaza mediante codigestión anaerobia*. Tesis doctoral, Universidad Industrial de Santander (Colombia).

Serrano, A., López, J., Pérez, D., & Hernández, R. (2021). Mediterranean regulations on olive mill waste disposal and utilization. *Journal of Cleaner Production*, 312.

Stoyanova, M., Penkov, D., & Gocheva, S. (2017). Impact of olive mill wastes on soil and groundwater. *Applied Soil Ecology*, *119*, 198–205.

Stoyanova, M., Penkov, D., & Gocheva, S. (2017). Composting of olive mill wastes in semi-arid regions: Effects on soil fertility. *Journal of Environmental Management*, *204*, 512–520.

Tamborrino, A., Leone, A., & Catalano, P. (2021). Valorization of olive by-products in Mediterranean countries. *Renewable Agriculture and Food Systems*.

Tamborrino, A., Leone, A., & Catalano, P. (2021). Olive oil by-products management: Strategies for sustainable valorization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110–126.

Centre Tecnològic BETA

Universitat de Vic – Universitat Central de Catalunya

Carretera de Roda, 70

08500 – VIC (Barcelona), Espanya

www.betatechcenter.com

info.beta@uvic.cat

+34 93 881 61 68