

Rentabilidad del compostaje del alperujo como una alternativa bioeconómica

David Polonio^{1,2,*}, Anastasio J. Villanueva^{3,2} y José A. Gómez-Limón²

¹ Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía (AGAPA). Av. Menéndez Pidal s/n, 14004, Córdoba, España.

² WEARE-Water, Environmental, and Agricultural Resources Economics Research Group, Facultad de Derecho y CC. EE. y EE., Universidad de Córdoba. Puerta Nueva s/n, 14002, Córdoba, España.

³ Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro IFAPA Camino de Purchil, Apdo. 2027, 18004, Granada, España.

Resumen

La bioeconomía circular está muy presente en la agenda política actual, como consecuencia de la preocupación de la sociedad por el medio ambiente. Este nuevo paradigma se presenta como una oportunidad para el sector del olivar y de los aceites de oliva, dada la gran cantidad de subproductos que genera y su potencial de valorización. Entre las alternativas existentes para la valorización del alperujo y el hojín producido en las almazaras, el compostaje se presenta como una alternativa técnicamente viable, a pesar de lo cual su implantación es escasa. El objetivo de este estudio es analizar la rentabilidad financiera del compostaje de subproductos de la almazara, identificar los principales factores que la determinan y realizar un análisis de sensibilidad de estos. Para ello, se ha analizado la inversión necesaria y los costes de explotación de la actividad de compostaje, arrojando como resultado un margen comercial negativo (-3,64 €/t de compost), considerando la situación actual. No obstante, el margen comercial pasa a ser positivo (+9,52 €/t de compost) al no considerar el coste de oportunidad relativo a la venta del alperujo a la extractora. El análisis de sensibilidad indica que el precio de dicha venta, el precio del combustible y el precio del estiércol son los principales factores limitantes para la rentabilidad de la actividad. Asimismo, se incluye un análisis pormenorizado del efecto de la distancia a la extractora sobre el coste de producción del compost, obteniéndose que para distancias superiores a los 54 km el margen comercial es positivo.

Palabras clave: Bioeconomía, economía circular, valorización, subproductos, almazara, compost.

Profitability of olive mill pomace composting as a bioeconomy alternative

Abstract

The circular bioeconomy is top-ranked among the priorities of the political agenda due to society's concern for the environment. This new paradigm is presented as an opportunity for the olive oil sector due to the large quantities of by-products generated and their potential for valorization. Among the existing alternatives for valorizing olive pomace and olive leaves produced in olive mills, composting is pre-

* Autor para correspondencia: pg2pobad@uco.es

Cita del artículo: Polonio D., Villanueva A.J., Gómez-Limón J.A. (en prensa). Rentabilidad del compostaje del alperujo como una alternativa bioeconómica. ITEA-Información Técnica Económica Agraria. Vol. xx: 1-21. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.004>



sented as a technically feasible alternative, although its implementation is scarce. This study aims to analyze the financial profitability for olive mills of by-products composting, identify the main factors that determine this profitability, and conduct a sensitivity analysis regarding these factors. For this purpose, the investment and operating costs required for the composting activity have been assessed, determining that, under the current situation, the commercial margin of the activity is negative ($-\text{€}3.64/\text{t}$ of compost). Without considering the sale price of olive pomace to the extractor industry (which represents an opportunity cost for other valorization alternatives, like composting), the commercial margin is estimated to be positive ($+\text{€}9.52/\text{t}$ of compost). The sensitivity analysis has shown that fuel price, the sale price of the olive pomace to the extractor industry, and the manure price are the main limiting factors for the profitability of the composting valorization alternative. A detailed analysis of the effect of the distance to the pomace oil extraction industry on the cost of the compost produced was also carried out, showing that the commercial margin is positive for distances greater than 54 km.

Keywords: Bioeconomy, circular economy, valorization, by-products, olive mill, compost.

Introducción

En la última década la bioeconomía circular está apareciendo en la agenda política con una creciente intensidad, tanto a nivel extra (OECD, 2018) e intra comunitario (EC, 2020a), como a nivel nacional (MITECO, 2020) y autonómico (p. ej., CAPDR, 2018), con el fin de dar respuesta a las demandas de la sociedad sobre un desarrollo económico más respetuoso con el medio ambiente. La bioeconomía circular (BEC) integra los conceptos de bioeconomía y de economía circular en un modelo económico sostenible ambientalmente (Berbel *et al.*, 2021). Dentro de la BEC se circunscriben todas aquellas actividades económicas con base biológica que, a su vez, aplican consecuentemente los principios de circularidad en el proceso productivo, los cuales en esencia se refieren al uso eficiente de los recursos naturales y a la valorización de los residuos (Casillas-González *et al.*, 2022). Así, un elemento fundamental de este paradigma productivo es el cambio en la conceptualización de los “residuos” (flujos inservibles del proceso productivo) por el de “subproductos”, rechazando que estos sean “un problema a resolver” (tradicional gestión para su eliminación a mínimo coste), para pasar a ser “una oportunidad a aprovechar” para maximizar la generación de riqueza y empleo gracias a su valorización.

El sector del olivar y de los aceites de oliva está en disposición de aprovechar esa oportunidad, habida cuenta de que presenta una abundante producción de subproductos, a razón de 7 kg por cada kg de aceite de oliva producido (Polonio *et al.*, 2022). Estos subproductos se producen fundamentalmente en la fase industrial, incluyendo alperujo, hueso y hojín, producidos en una ratio de 4,5-5,0 kg/kg de aceite de oliva, la mayor parte de los cuales corresponden a alperujo. En este sentido, cabe señalar que España es el primer país productor de aceites de oliva, con una producción media anual superior a los 1,6 millones de toneladas (Vilar, 2022), cifra que da idea de la potencial relevancia de la BEC en este sector.

Asimismo, deben tenerse en cuenta diferentes vectores de cambio que incrementarán la importancia de las actividades BEC asociadas al sector oleícola en España. En primer lugar está la tendencia creciente en la superficie de olivar, con incrementos anuales superiores al 1 % en el periodo 1984-2015 (Berbel y Delgado-Serrano, 2017), así como la intensificación de su producción (Guerrero-Casado *et al.*, 2021), circunstancias que están provocando un incremento en la generación de estos subproductos. En segundo lugar, debe señalarse la tendencia a acortar la campaña de recolección de aceituna, lo que está ge-

nerando una fuerte presión en el modelo tradicional de valorización del alperujo mediante las extractoras de aceite de orujo, en la medida que la capacidad logística de estas para gestionar este subproducto está al límite (Vilar et al., 2020). Finalmente, cabe sumar los problemas estructurales del actual modelo de valorización, donde buena parte del alperujo (aproximadamente el 40 %) es gestionado en plantas de cogeneración, cuya viabilidad está condicionada por el precio de la energía, especialmente del gas natural. Episodios como la reciente paralización de este tipo de plantas por la subida del precio del gas (Diario ABC, 2022), no vienen sino a demostrar la debilidad estructural de las extractoras de aceite de orujo y el notable riesgo de ruptura de todo el ciclo de valorización, riesgo que se traslada al conjunto del sector oleícola, en la medida que la imposibilidad de gestionar estos subproductos podría provocar la paralización de la actividad productiva de las almazaras.

De lo comentado anteriormente, se evidencia cómo la valorización de los subproductos del sector oleícola exhibe un elevado potencial de generación de riqueza y empleo, lo cual es especialmente relevante en este sector considerando los problemas de rentabilidad que presenta (Parras et al., 2021). Este potencial se explica no solo por la elevada cantidad de biomasa producida como subproductos actualmente y por su tendencia creciente, sino también porque existe un escaso desarrollo de las alternativas de gestión asociadas a un mayor valor añadido, prevaleciendo actualmente aquellas situadas en la base de la "pirámide de valor" de la biomasa, especialmente las relacionadas con el aprovechamiento energético (Berbel y Posadillo, 2018). Además, gran parte del valor generado se obtiene fuera del sector almarazero, dado que este encomienda la gestión de la práctica totalidad de sus subproductos (especialmente alperujo) al sector extractor (Sanz et al., 2023).

Existe una amplia variedad de alternativas disponibles de valorización de los subproductos de las almazaras. Básicamente, se pueden distinguir aquellas asociadas a su aprovechamiento energético (generación de energía eléctrica y térmica, gasificación, etc.), agrario (alimentación animal y compostaje) e industrial (extrayendo compuestos bioactivos para el sector farmacéutico, cosmético y alimentario), aunque son los dos primeros los que presentan un mayor nivel de desarrollo e implementación (Villanueva y La Cal, 2023). Entre las alternativas de valorización que están más desarrolladas, mostrando una probada viabilidad técnica, destaca el compostaje de alperujo (Álvarez de la Puente, 2010). Si bien hace tiempo que representa una alternativa viable para las almazaras de cara a valorizar sus propios subproductos, se viene observando cómo el número de almazaras que compostan su alperujo es muy escaso. Por ejemplo, en Andalucía, principal región productora a nivel mundial, se compostan solo el 1,5 % del alperujo producido (Sanz et al., 2023). Entre las razones para la reducida expansión de esta alternativa se pueden enumerar factores específicos, como las elevadas necesidades de espacio requeridas para su implementación o la necesidad de disponibilidad de estiércol en zonas cercanas a la almazara, así como factores generales asociados a obstáculos burocráticos y de índole normativa, la aversión al riesgo asociado al cambio o la relativa mayor dificultad de gestión (en comparación con la alternativa imperante de gestión externalizada). A ello podría unirse que es posible que la alternativa no ofrezca niveles de rentabilidad significativos. Sin embargo, no existen estudios científico-técnicos que estimen su rentabilidad privada, más allá de estimaciones de costes a escala experimental (Tortosa et al., 2012) o aproximaciones generales (Álvarez de la Puente et al., 2010), cuyos resultados no presentan el nivel de detalle necesario para una evaluación rigurosa de la rentabilidad como factor limitante para la implementación de esta alternativa de valorización.

En este sentido, el presente estudio pretende cubrir estas lagunas del conocimiento, teniendo como objetivo analizar detalladamente la rentabilidad privada del compostaje de subproductos de almazara (alperujo y hojín). Este análisis permitirá identificar los principales factores que determinan dicha rentabilidad privada y que pueden ser limitantes para su implementación, realizando un análisis sensibilidad de estos. Los resultados de este estudio presentan importantes implicaciones políticas y sectoriales, especialmente de cara a mejorar la sostenibilidad económica y ambiental del sector oleícola. Si bien el estudio se centra en Andalucía, por ser la principal zona productora de aceite a nivel mundial, el interés del trabajo excede de este ámbito geográfico, ya que la mayor parte de los resultados obtenidos pueden extrapolarse a otras regiones productoras.

Material y métodos

El compostaje del alperujo: ingeniería del proceso

El proceso de compostaje es un proceso aeróbico de descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos bajo ciertas condiciones, obteniéndose un producto final que es estable, libre de patógenos y semillas de malas hierbas, y cuya aplicación en el suelo es beneficiosa (Moreno y Mormeneo, 2008).

Existen varios sistemas para realizar el compostaje, que se diferencian básicamente en los procesos para el control de la aireación de la masa de materia orgánica. Según el sistema de aireación, se distinguen tres categorías: sistemas abiertos, cerrados y semicerrados. Los sistemas abiertos suelen predominar, especialmente por su facilidad de gestión. Entre ellos, destaca el sistema abierto de pilas o montones dinámicos (*windrow*), por presentar menores costes productivos y adaptarse

mejor a las condiciones de entrada discontinua de materia prima, como es el caso del alperujo. Los menores costes asociados a este sistema resultan, fundamentalmente, de unas necesidades menores de inversión y de un menor consumo de energía, utilizándose en ocasiones maquinaria habitualmente disponible en cualquier almazara, como son el tractor y la pala de volteo (Álvarez de la Puente, 2010). En este sistema, el material se dispone en largas pilas (cubiertas o no) y la aireación se produce por convección natural a partir de volteos periódicos. Debido a su idoneidad, este es el sistema analizado en este trabajo.

La producción de alperujo y de hojín de una almazara representa el 81 % y el 9 % de la cantidad de aceituna procesada (Polonio et al., 2022). El alperujo u orujo graso húmedo es el subproducto producido en las almazaras tras el proceso de extracción de aceite, mientras que el hojín se refiere a las hojas y ramas de pequeño calibre que se acumulan tras la limpieza de la aceituna a su llegada a la almazara. El aprovechamiento *in situ* de estos dos subproductos es el objetivo que persiguen las almazaras que realizan su compostaje. De esta manera se consigue valorizar estos subproductos como alternativa al procedimiento habitual de envío del alperujo a las extractoras, el cual, en el caso de las almazaras más alejadas de éstas, puede llegar a suponer un coste más que una valorización. Así, la valorización en la propia almazara de estos subproductos permite obtener un fertilizante comercializable, el compost de alperujo, cuya aplicación tiene efectos positivos en las propiedades bioquímicas (p. ej., cantidad de materia orgánica), químicas (macro y micronutrientes) y físicas (p. ej., capacidad de retención de agua) de los suelos agrícolas (García-Ruiz et al., 2012).

Existen varios parámetros técnicos que resultan clave en la elaboración de compost a partir de alperujo. Uno se refiere a la porosidad de la mezcla, que permite la aireación

de ésta de manera que haya disponibilidad de oxígeno para los microorganismos involucrados en el proceso de compostaje. Para asegurar una porosidad adecuada se requiere normalmente la adición de un material estructurante, sirviendo para ello el hojín, dada su disponibilidad en la almazara (Montemurro et al., 2009). Otro parámetro fundamental es la humedad de la mezcla. Considerando que el alperujo suele presentar un elevado contenido de humedad (en torno al 62 %), durante el proceso de compostaje se producirá un desecado de la masa hasta alcanzar unas pérdidas de humedad en torno al 50 % del peso inicial (Arvanitoyannis y Kassaveti, 2007). Finalmente, el tercer pará-

metro crítico se refiere a la relación carbono/nitrógeno (C/N). En este sentido, resulta conveniente adicionar estiércol para reducir la relación C/N al objeto de optimizar los procesos biológicos del compostaje y, además, mejorar las propiedades del producto final como fertilizante (aumento del contenido de N). En el presente trabajo se ha considerado el empleo de estiércol de ovino, por sus buenas características y por haber sido testado ampliamente en el compostaje de alperujo (Gómez-Muñoz et al., 2012).

La Figura 1 muestra el diagrama del itinerario técnico del proceso de compostaje de alperujo y hojín considerado. Estos subpro-

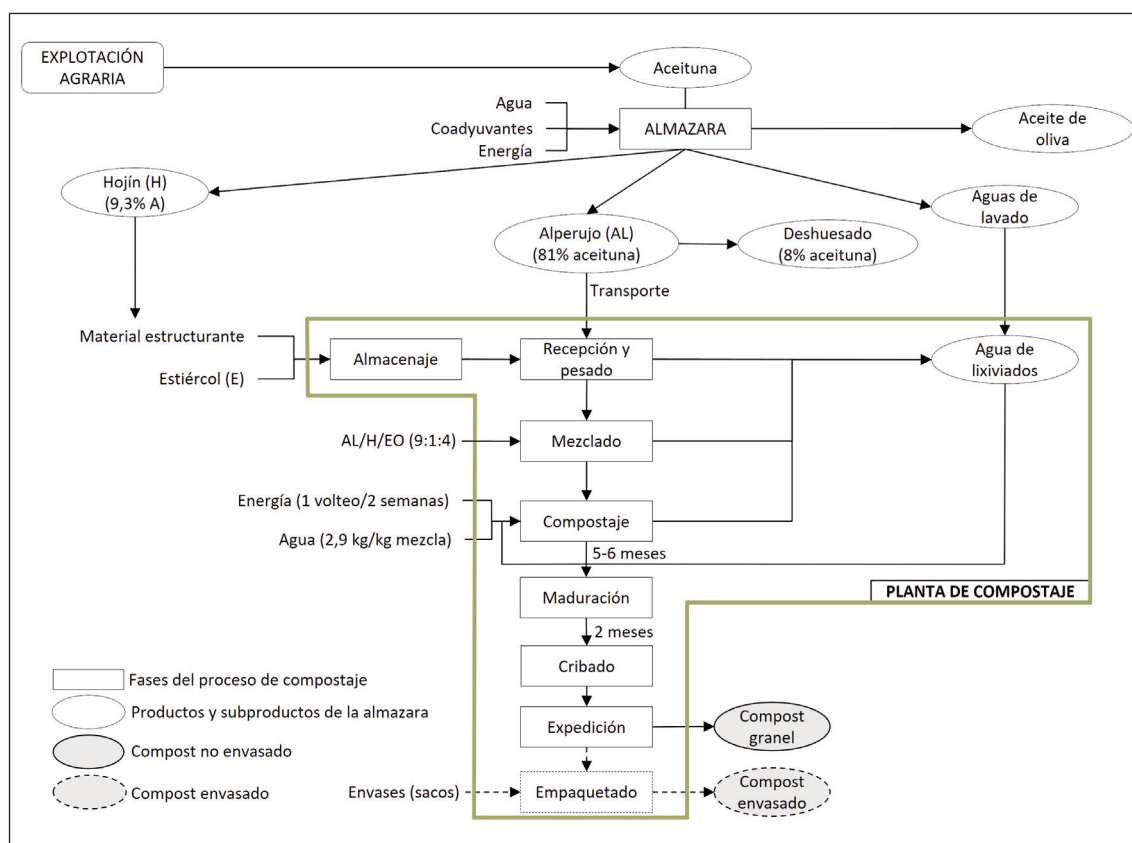


Figura 1. Esquema del proceso de compostaje.
 Figure 1. Outline of the composting process.

ductos junto con el estiércol se pesan y, a continuación, se mezclan en una relación alperujo/hojín/estiércol de 9/1/3,7 (González et al., 2017). Posteriormente, la masa pasa a la zona de compostaje, donde permanece entre 5 y 6 meses realizándole 1 volteo cada 2 semanas y aportándole una media de 2,9 kg de agua por cada kg de masa inicial (aunque esta cantidad es variable según la pluviometría). Seguidamente la masa permanece 2 meses en proceso de maduración, sin volteos ni incorporación de agua, para finalmente cribarla, obteniéndose como resultado el compost disponible para su comercialización a granel o envasado. Durante todo el proceso el agua de los lixiviados se recoge en una balsa y se recircula a la masa según las necesidades de ésta.

Como puede inferirse del itinerario técnico descrito, para realizar el proceso de compostaje de alperujo y hojín la almazara debe disponer de unas instalaciones adecuadas para ello. Las instalaciones consideradas en el presente trabajo, que se asumen que sería necesario construir constituyendo un activo fijo (inmovilizado) para la almazara, son: i) zona de recepción, almacenaje y mezclado, en la que se almacenan los distintos productos que se van a mezclar con el alperujo (hojín y estiércol) y se produce la descarga de los camiones; ii) zona de compostaje, en la que se realiza la mayor parte del proceso de compostaje; iii) balsa de lixiviados, que recoge los lixiviados de las zonas de compostaje y recepción; y iv) zona de cribado, expedición y empaquetado, consistente en una nave industrial para el afino y cribado del compost y su posterior ensacado (si bien, en las almazaras cooperativas se asume que la mayor parte del compost será expedido a granel)¹.

Análisis de rentabilidad: método de cálculo y fuentes de información

Para analizar la rentabilidad financiera de la producción de compost de alperujo se han estimado tanto los costes como los ingresos de la actividad, a partir de los cuales se determina el margen comercial como indicador de rentabilidad de esta alternativa de valorización.

Para el cálculo de los costes de producción, se ha considerado la tradicional estructuración basada en costes fijos y variables. Los costes fijos (o costes de estructura) son los derivados de inversiones en activos fijos (no se consumen en un único ciclo productivo) y que se caracterizan por ser independientes de los niveles de producción. Por su parte, los costes variables son aquellos que, como las materias primas, la energía, el coste de personal, etc., se pueden ajustar en el corto plazo en función del volumen de producción.

Para nuestro caso de estudio, los *costes fijos* se han estimado considerando la inversión necesaria para el establecimiento de las instalaciones correspondientes. Para la realización de estos cálculos, se ha considerado una almazara andaluza de tamaño medio (procesado anual de 5.000 t de aceituna, valor promedio de las almazaras en Andalucía).

En una almazara con esta dimensión media se considera que se producen anualmente 4.050 t de alperujo y 468 t de hojín, (según lo estimado por Polonio et al., 2022). Para llevar a cabo el compostaje de estas cantidades de subproductos es necesario el aporte de 1.667 t de estiércol de ovino, dando como resultado final 3.324 t de compost. Además, teniendo en cuenta el tamaño de la almazara

¹ Se asume que la almazara posee espacio en instalaciones anexas o cercanas a la misma para la ubicación de las instalaciones, cuestión usual en las almazaras que realizan compost procedente de alperujo.

tipo considerada, es necesario disponer de unas instalaciones con las siguientes características (González *et al.*, 2017): 12.817 m² de zona de recepción y de compostaje, 1.563 m³ de volumen de la balsa de lixiviados; 625 m² de lámina de agua de esta balsa y 600 m² de nave de almacenamiento.

Para estimar la inversión inicial en activos fijos necesaria se han considerado diversos presupuestos obtenidos a partir de una revisión bibliográfica, seleccionándose finalmente el de Vega (2011), por ser el más completo respecto de la estimación del coste de buena parte de las instalaciones, y el de Lozano *et al.* (2017) específicamente para la nave de cribado, expedición y empaquetado. Las principales partidas incluidas en el presupuesto son: movimientos de tierra, solera, canalizaciones, cerramiento, balsa, maquinaria, grupo de bombeo y riego, nave de almacenamiento y seguridad y salud.

El estudio se ha realizado para la campaña oleícola 2021/22, por lo que los costes de inversión se han actualizado hasta septiembre de 2022 (*i. e.* final de campaña). Para ello, se han seguido los criterios establecidos en el Real Decreto 1359/2011. En particular, las fórmulas utilizadas son las relacionadas con las estructuras de hormigón armado y pretensado, las de obras de modernización y transformación en regadíos y conducciones de derivados plásticos y las de obras de edificación con alto componente de materiales metálicos e instalaciones. Para la actualización de la mano de obra asociada a la construcción de instalaciones, se ha utilizado el índice nacional de mano de obra en construcción publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

Una vez actualizados los presupuestos al final de la campaña 2021/22, se han obtenido las cuantías de las inversiones necesarias de las distintas instalaciones, proporcionalmente a la superficie de la zona de compostaje y al tamaño de la balsa de lixiviados. Para calcular las amortizaciones correspondientes se han

utilizado los coeficientes de amortización lineales medios legalmente permitidos por el Ministerio de Hacienda y Función Pública.

Teniendo en cuenta las inversiones necesarias para las instalaciones, los costes fijos se han estimado sumando los siguientes conceptos:

1. La amortización de las inversiones realizadas en activos fijos.
2. La renta de la tierra, calculada utilizando los datos de la renta de la tierra de un terreno rural de tierra de labor de secano en Jaén, proporcionados por la Consejería de Agricultura, Agua, Pesca y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía (CAPADR), actualizada a septiembre de 2022 con el IPC general.
3. El mantenimiento de las instalaciones, estimado aplicando para ello un 5 % del coste de inversión (Carrión, 2017).
4. Los costes de seguros de las instalaciones, gestión y administración, estimados a tanto alzado en base a la experiencia de los expertos consultados.

Por su parte, considerando la ingeniería del proceso descrita en el apartado anterior, los costes variables estimados han sido los siguientes (Proietti *et al.*, 2016; Renkow y Rubin, 1998):

1. Consumo de alperujo. El coste del alperujo utilizado se ha calculado como coste de oportunidad. El empleo del alperujo para compostaje supone un coste de oportunidad, en la medida que éste puede ser vendido a la industria extractora para la extracción de aceite de orujo de oliva crudo. Si bien cabe señalar que el precio del alperujo ha sido con frecuencia cero en el histórico de campañas, en las campañas más recientes dicha industria está pagando un precio moderado por el mismo. Este precio depende de varios factores endógenos del proceso productivo en almazara, en concreto de la cantidad

de aceite y huesecillo que presente el alperujo y la distancia de la almazara a la planta extractora². La estimación de este coste de oportunidad se realizó a partir de una encuesta a almazaras (n = 52) a la que se aplicó el test de Tukey para eliminar valores atípicos, obteniendo un dato medio de precio pagado por las extractoras durante la campaña 2021/22 de 10,8 €/t de alperujo y una distancia media entre la almazara y la extractora de 33 km.

1. Con el objetivo de estudiar la variable precio de remuneración por el alperujo frente a la distancia a la extractora más cercana, a partir de las observaciones recogidas en la encuesta, se ha realizado una regresión polinomial de grado 2 entre ambas variables, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$y = 7 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 2 \cdot 10^{-4} x + 1,66 \cdot 10^{-2} \quad [1]$$

1. donde y representa el precio de remuneración por el alperujo y x la distancia de la almazara a la extractora más cercana. El ajuste muestra un R^2 de 0,26, lo cual se considera aceptable.
2. Consumo de estiércol. El coste de adquisición del estiércol (18 €/t) se ha estimado a partir de consultas a empresas suministradoras del mismo en Andalucía y a la Asociación Nacional de Criadores de Ovino Segureño (ANCOS). Para el transporte se ha considerado un coste de 6 €/t por el transporte hasta una distancia de 10 km.
3. Consumo de combustible (gasóleo B empleado por el tractor con la pala cargadora), estimado considerando un tractor de 100 CV y los costes unitarios estimados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Ali-

mentación (MAPA). El coste medio del gasóleo B para la campaña 2021/22 (1,28 €/l) se ha estimado a partir de las consultas realizadas sobre precios de carburantes en estaciones de servicio del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO).

4. Coste de mano de obra directa. Para estimar el coste de la mano de obra relacionada con el compostaje se ha utilizado el Convenio Colectivo de las Industrias del Aceite de la Provincia de Jaén, considerando la categoría profesional de 'obrero' y una experiencia de 7 años. El coste incluye los seguros sociales. Las horas de trabajo se han calculado considerando que a la planta de compostaje llegan 74 t diarias de subproductos, que la masa se voltea una vez cada dos semanas durante 6 meses y contabilizando el transporte del alperujo y el hojín desde la almazara a la zona de compostaje. Para todo ello se considera (Sánchez *et al.*, 2006): (i) un rendimiento de volteo de 42 m³/h, (ii) una distancia a la zona de compostaje de 0,5 km, (iii) una velocidad del tractor de 20 km/h y (iv) 8 h de trabajo diarias durante todos los días de la semana. Las horas de trabajo totales ascienden a 2.018.
5. Costes de mantenimiento y reparación de la maquinaria, estimados considerando un tractor de 100 CV, siguiendo las estimaciones del MAPA antes comentadas.
6. Coste de energía eléctrica, que incluye el consumo asociado a la planta de compostaje y el del sistema de riego. El consumo eléctrico de la planta se ha calculado en base a la superficie y a los datos de luminarias aportados por Moreno (2018). En el caso del riego, se considera el consumo de

² El precio del alperujo pagado por la extractora depende también de factores exógenos a la almazara, en particular el precio del aceite de orujo y el mercado de la energía (concretamente, precio del gasóleo, electricidad y, en su caso, gas natural), dado que en buena medida determinan los precios de venta de los principales productos posteriormente producidos por la extractora.

una bomba de 4,5 kW funcionando durante 60 h al año. El precio del kWh se ha estimado a partir de la tarifa 3.0 TD de Enesa publicada en noviembre de 2022, que establece un precio de 0,2771 €/kWh para los 6 períodos de consumo. En el coste eléctrico se incluye el impuesto de electricidad y el coste de la potencia contratada.

7. Coste de analíticas para el control de la producción de compost. Se ha estimado la realización de 3 analíticas anuales al compost elaborado.

A partir de las estimaciones de costes fijos y variables arriba comentadas, se ha estimado el coste anual del proceso de compostaje como suma de ambos componentes. Los resultados de estas estimaciones se discutieron con técnicos de almazaras que compostan alperujo, quienes validaron los cálculos realizados.

El cálculo del margen comercial arriba comentado se ha complementado con la estimación del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de rentabilidad (TIR) correspondiente al proyecto de inversión necesario para desarrollar la valorización del alperujo mediante su compostaje. Así, mientras el anterior indicador (margen comercial) cuantifica la ganancia/pérdida contable del proceso productivo, estos dos indicadores de rentabilidad (VAN y TIR) consideran los flujos de caja generados por el proyecto inversión, teniendo en cuenta el momento en que estos se realizan. Por este motivo, su cálculo permite analizar de forma más precisa la rentabilidad financiera del proceso de compostaje. Para la estimación de estos dos indicadores se han considerado los siguientes parámetros de la inversión: (i) una duración del proyecto de 25 años (vida útil del activo fijo que requiere mayor inversión; la solera), (ii) una tasa de actualización del 6 %, acorde al reducido riesgo del proyecto, (iii) una tasa media de inflación anual del 3 %, que afecta por igual a cobros y pagos, y (iv) un valor liquidación del proyecto equivalente al valor contable de la inversión a la finalización de este (año 25).

Finalmente, se ha realizado un análisis de sensibilidad de las principales variables que influyen en el coste del proceso de compostaje. Para ello se han medido las elasticidades del coste de elaboración del compost en función de las siguientes variables: precio del gasóleo B, distancia de la almazara a la planta de compostaje, distancia de transporte del estiércol desde el punto de adquisición, precio del estiércol, precio de remuneración de la tractora por el alperujo y distancia de la almazara a la tractora. Este análisis de sensibilidad ha permitido identificar los factores clave para la viabilidad del compostaje *in situ* del alperujo.

Resultados

Análisis de rentabilidad financiera del compostaje del alperujo

La Tabla 1 muestra la estimación de la inversión inicial necesaria para el establecimiento de la planta de compostaje, desglosada por partidas presupuestarias. La inversión total estimada asciende a 847.852 euros. Por partidas, destacan por su importancia la solera de hormigón (52,1 %) y la nave de almacenamiento (15,8 %). La aplicación de los coeficientes medios de amortización supone un coste de amortización anual de 34.144 euros.

La Tabla 2 presenta los costes e ingresos de explotación de la planta de compostaje, así como su margen comercial. Los costes totales se estiman en 206.020 euros anuales, representando los fijos el 19,5 %, mientras que los costes variables suponen el 80,5 %. Aproximadamente tres cuartas partes de los costes totales se corresponden con el consumo de alperujo (coste de oportunidad por no llevarlo a la tractora, 21,2 %); el consumo de estiércol (19,4 %); el consumo de combustible (19,1 %), especialmente derivado del proceso de volteo de la masa; y el coste de mano de obra directa (15,2 %).

Tabla 1. Inversión necesaria para el establecimiento de la planta de compostaje de alperujo y coeficientes de amortización.

Table 1. Investment required for the olive pomace composting plant and depreciation coefficients.

Concepto	Valor (€)	(%)	Coefficiente de amortización anual (%)
Movimiento de tierras	51.425	7,2	1,3
Solera	371.293	52,1	4,0
Canalizaciones	14.557	2,0	6,7
Cerramientos	13.304	1,9	6,7
Balsa de lixiviados	47.317	6,6	6,7
Maquinaria	62.382	8,8	7,7
Grupo de bombeo y riego	31.661	4,4	6,7
Nave de almacenamiento	112.664	15,8	2,0
Seguridad y salud	7.878	1,1	3,3
<i>Subtotal</i>	<i>712.480</i>	<i>100,0</i>	
Costes generales (13%)	92.622		
Beneficio industrial (6%)	42.749		
Total	847.852		

Teniendo en cuenta que se producen 3.324 toneladas anuales de compost, el proceso tiene un coste final de 61,98 €/t de compost. Este coste se reduce a 48,82 €/t, en caso de no considerar el coste de oportunidad de venta del alperujo.

Por su parte, los ingresos obtenidos del compostaje de alperujo y hojín son básicamente los relativos a la venta del compost obtenido. Se ha estimado un precio de venta de 58,33 €/t, promedio obtenido de las consultas a cooperativas que producen compost a partir de alperujo. De estos cálculos se estima un margen comercial negativo de -3,64 €/t. Los valores del VAN y de la TIR obtenidos para el correspondiente proyecto de inversión resultan igualmente negativos (-621.932 € y -2,2 %, respectivamente), denotando que la construcción y puesta en marcha de una planta de compostaje de alperujo no resulta rentable bajo estas condiciones.

En caso de no considerar el citado coste de oportunidad (o que el precio del alperujo sea cero, como ha ocurrido en campañas pasadas o como ocurre en el caso de algunas almazaras -p. ej., muy alejadas de las extractoras), se obtiene un margen comercial positivo de 9,52 €/t. Asimismo, considerando este escenario donde los flujos de caja anteriores a la realización del proyecto son nulos, el VAN y la TIR de la inversión en la planta de compostaje propuesta resultan favorables, en la medida que el primero es positivo (VAN = 147.188 €) y la segunda es superior al coste de oportunidad del capital considerado (TIR = 7,5 % > 6 %). Se evidencia con ello que en el probable caso que el precio de venta del alperujo baje en un futuro (bajada del precio del aceite de orujo e incremento de los costes de transporte), la rentabilidad del compostaje se incrementaría hasta hacer la actividad viable financieramente.

Tabla 2. Costes, ingresos y margen comercial de la planta de compostaje de alperujo.
 Table 2. Operating costs, income, and trade margin for the olive pomace composting plant.

Concepto	Valor absoluto (€)	(%)	Valor unitario (€/t)
Costes			
<i>Fijos</i>			
Amortización de las inversiones en activos fijos	34.144	16,6	
Renta de la tierra	395	0,2	
Mantenimiento de las instalaciones	1.583	0,8	
Costes de seguros	3.000	1,5	
Costes de gestión y administración	1.000	0,5	
<i>Total costes fijos</i>	<i>40.122</i>	<i>19,5</i>	<i>12,07</i>
<i>Variables</i>			
Consumo del alperujo (coste de oportunidad)	43.740	21,2	
Consumo de estiércol	39.906	19,4	
Consumo de combustible	39.422	19,1	
Coste de mano de obra directa	31.269	15,2	
Costes de mantenimiento y reparación de la maquinaria	7.869	3,8	
Coste de energía eléctrica	3.339	1,6	
Coste de analíticas para el control de la producción	354	0,2	
<i>Total costes variables</i>	<i>165.898</i>	<i>80,5</i>	<i>49,91</i>
Total costes	206.020	100,0	61,98
Ingresos			
Venta del compost	193.910	100,0	58,33
Total ingresos	193.910	100,0	58,33
Margen comercial	-12.109		-3,64

Análisis de sensibilidad de costes

Los resultados del apartado anterior muestran que la mayor parte del coste de producción del compost se relaciona con los costes variables de explotación (80,5 % del coste total). Por este motivo, parece oportuno analizar el impacto diferencial de diversos pará-

metros considerados para la estimación de los costes variables de producción, al objeto de determinar cuáles de ellos son más determinantes de la viabilidad del compostaje de los subproductos de las almazaras. En este sentido, se ha considerado de interés analizar la influencia individual de los siguientes pa-

rámetros: (i) precio de venta del alperujo, (ii) distancia de la almazara a la extractora, (iii) precio del estiércol, (iv) precio del gasóleo B, (v) distancia almazara a planta compostaje y (vi) distancia de transporte del estiércol.

El impacto normalizado de estos parámetros sobre el coste de producción del compost puede obtenerse mediante el concepto de

elasticidad, que permite cuantificar la sensibilidad de una variable (en nuestro caso, el coste total de producción) ante cambios en otra de la cual depende (en nuestro caso, el valor de un parámetro determinante de los costes variables). Matemáticamente, la elasticidad del coste de producción a calcular se corresponde con la siguiente fórmula:

$$\text{Elasticidad del coste producción} = \frac{\text{Variación porcentual coste producción}}{\text{Variación porcentual parámetro analizado}} = \frac{\frac{\text{coste producción}}{\text{Coste de referencia}}}{\frac{\text{valor parámetro}}{\text{Valor de referencia}}} \quad [2]$$

La Tabla 3 muestra la elasticidad del coste de producción obtenida para cada uno de los parámetros analizados. El análisis de estos resultados pone de manifiesto que los principales parámetros que afectan al coste del compostaje y que constituyen los factores clave para la viabilidad del proceso son: el precio de venta del alperujo a la extractora, el precio del combustible (gasóleo B), y el precio de adquisición del estiércol.

De los valores de elasticidad obtenidos, puede estimarse el impacto de un aumento potencial del 10 % en el valor de cada uno

de los parámetros clave sobre el coste del compostaje, considerando invariables el resto de los parámetros (*i. e.*, condición *ceteris paribus*). Así, por ejemplo, en el caso de incrementar el precio del gasóleo B en un 10 %, el coste del compostaje se incrementaría en 1,19 €/t ($0,1914 \times 10 \% \times 61,98 \text{ €/t}$). En el caso de que el incremento del 10 % afecte al precio de venta del alperujo, el coste se incrementaría en 1,32 €/t ($0,2123 \times 10 \% \times 61,98 \text{ €/t}$). Finalmente, en el caso de incrementar el precio del estiércol en ese mismo 10 %, el coste del compost aumentaría en 0,90 €/t ($0,1457 \times 10 \% \times 61,98 \text{ €/t}$).

Tabla 3. Elasticidad del coste de producción compost de alperujo respecto de los principales parámetros que lo determinan.

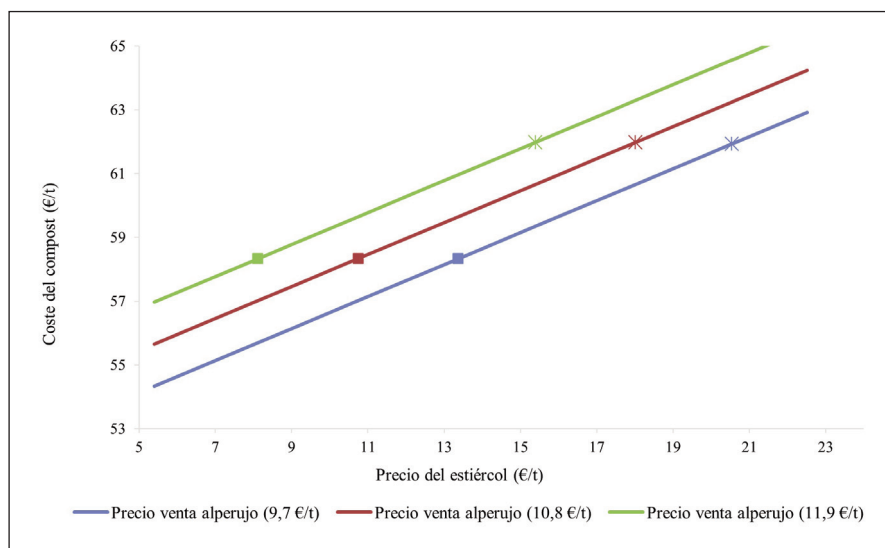
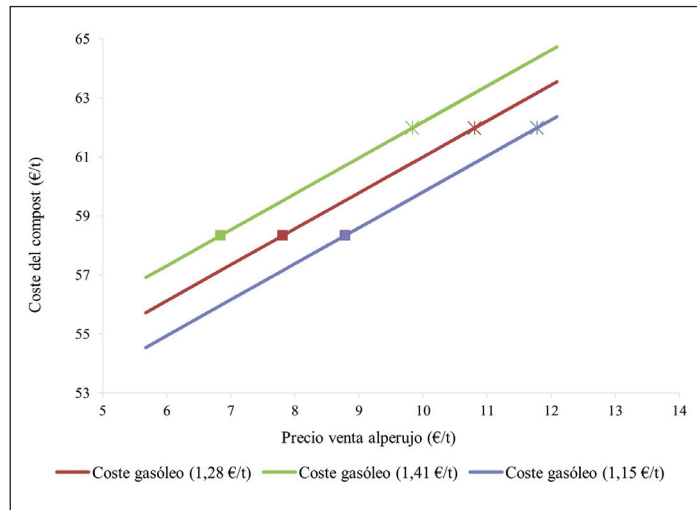
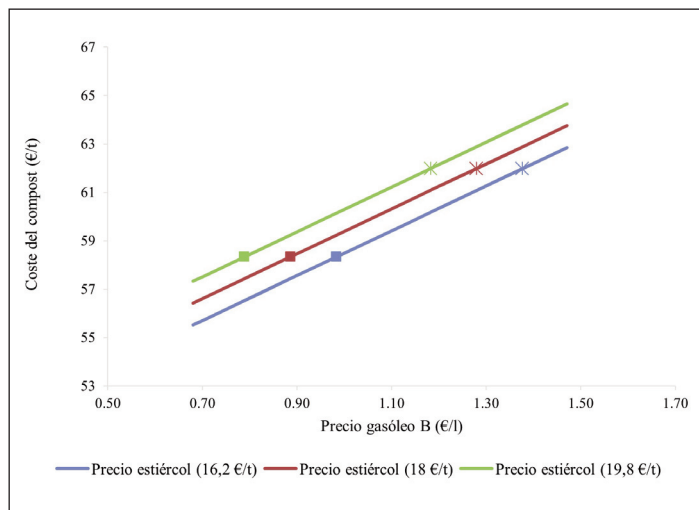
Table 3. Elasticity of the composting cost in function of the main parameters affecting it.

Parámetro	Elasticidad	Porcentaje de variación para conseguir la viabilidad
Precio del gasóleo B	0,1914	-30,7
Distancia de almazara a la planta de compostaje	0,0055	-
Distancia de transporte del estiércol	0,0480	-
Precio del estiércol	0,1457	-40,3
Precio de venta del alperujo	0,2123	-27,7
Distancia de la almazara a la extractora	-0,1000	65,8

El análisis de sensibilidad del coste del compostaje ante las variaciones de los parámetros analizados también puede visualizarse de forma gráfica, tal y como se muestra en la Figura 2, donde se representan los resultados

de estimaciones de variaciones de estos tres parámetros tomados dos a dos.

En la Figura 2 se indica como referencia el nivel de coste calculado en la Tabla 2 (61,98 €/t) (puntos señalizados con asterisco), así como



Nota: Los cuadrados muestran los valores a partir de los cuales el margen comercial es positivo; los asteriscos muestran los valores para los cuales el coste y el margen comercial es el de la Tabla 2.

Figure 2. Análisis de sensibilidad del coste del compost de alperujo en función de los parámetros clave. Figure 2. Sensitivity analysis of the cost of composting olive pomace in function of the key parameters.

los niveles a partir de los cuales se haría positivo el margen comercial (puntos señalizados con cuadrado), que se corresponden con un coste de producción de compost de 58,33 €/t. Así, por ejemplo, se visualiza (ver serie representada en color rojo) cómo para que el margen comercial de la producción de compost no sea negativo, el precio del gasóleo B debería reducirse un 30,7 %, hasta alcanzar los 0,89 €/l; o reducirse el precio de venta del alperujo un 27,7 %, hasta los 7,81 €/t; o disminuir el precio del estiércol un 40,3 % hasta alcanzar 10,75 €/t.

El resto de las series (en colores verde y azul) muestran escenarios que consideran variaciones de ± 10 % respecto de la situación de referencia de los tres parámetros más determinantes para el coste del compost. Así, por ejemplo, se puede observar cómo al variarse el precio de referencia del estiércol (18,0 €/t) hasta 16,2 €/t o 19,8 €/t, las modificaciones necesarias en el precio del gasóleo para conseguir un margen comercial positivo varían igualmente hasta 0,98 €/l o 0,79 €/l, respectivamente.

Cabe realizar un análisis más pormenorizado respecto del precio de venta del alperujo a la extractora. Este depende de varios factores, fundamentalmente de: (i) la distancia a la extractora (a mayor distancia el precio es menor ya que el transporte lo suele pagar la extractora); (ii) el contenido de hueso y aceite del alperujo; y (iii) el precio de mercado del aceite de orujo de oliva crudo. De hecho, en los casos en que la distancia a la extractora es elevada, el contenido de hueso y/o aceite es reducido y el precio del aceite de orujo es bajo, el precio a pagar por la extractora puede llegar a ser cero, e incluso requerir un cobro por el servicio de retirada del alperujo de la almazara.

Se realiza aquí un análisis complementario centrado en el primero de los parámetros, *i. e.* distancia entre extractora y almazara, manteniendo el resto *ceteris paribus*. La Fi-

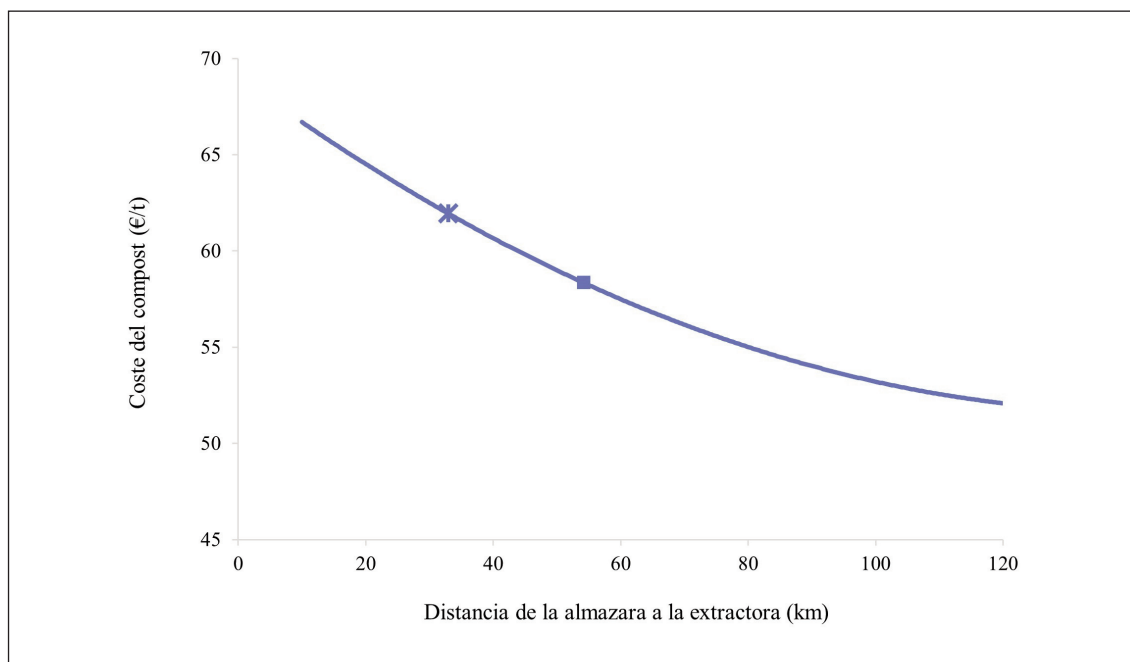
gura 3 muestra cómo afecta la distancia entre la almazara y la extractora al coste de producción de compost, estimaciones realizadas sobre la base de la relación establecida por la ecuación (1).

Como puede observarse en la figura 3, un incremento del 66 % en la distancia entre la almazara y la extractora (de 33 a 54 km, *i. e.* desde el punto indicado con asterisco hasta el indicado con cuadrado) supondría reducir el coste de compostaje en un 5,9 % (pasando de 61,98 a 58,33 €/t), como consecuencia de la reducción del precio del alperujo en un 27,7 % –de 10,8 a 7,8 €/t–, alcanzándose un margen comercial cero. A partir de este umbral de 54 km, el margen comercial positivo aumenta, lo cual explica que en los casos en que las almazaras estén alejadas de las extractoras más allá de este umbral la alternativa de compostaje pueda ser viable.

Discusión

Contrastación de los resultados

Los resultados obtenidos pueden corroborarse observando la situación actual de la valorización del alperujo, en la medida en que la mayoría de las plantas de compostaje de alperujo operativas se localizan en zonas periféricas respecto del denominado ‘eje del olivar’, que es donde se sitúan la práctica totalidad de extractoras. Esto ocurre, por ejemplo, en la zona del Valle de los Pedroches de Córdoba y en la Sierra de Cádiz. En el caso del Valle de los Pedroches, la cooperativa Oliverera de los Pedroches (OLIFE), ubicada en el término municipal de Pozoblanco, realiza compostaje y la extractora con extracción química más cercana se encuentra a una distancia de 91 km, concretamente en el municipio de Villa del Río. Según el modelo de costes descrito en los apartados anteriores, OLIFE tiene unos costes de producción de 53,93 €/t



Nota: el cuadrado muestra el valor a partir del cual el margen comercial es positivo; el asterisco muestra el valor para el cual el coste y el margen comercial es el de la Tabla 2.

Figura 3. Coste del compost de alperujo en función de la distancia de la extractora a la almazara.

Figure 3. Cost of olive pomace compost in function of the distance from the olive pomace oil plant to the olive mill.

compost y unos ingresos de 58,33 €/t compost, presentando un margen comercial positivo de 4,4 €/t compost, que puede llegar a 7,02 €/t compost si la cooperativa se acoge a ayudas y dispone de maquinaria propia. En el caso de la Sierra de Cádiz, la Cooperativa Agrícola N^a Sra. de los Remedios-Picasat, ubicada en Olvera, tiene la extractora más cercana a una distancia de 68 km (extractora de Fuente de Piedra), lo que supone un coste de producción de compost de 56,42 €/t compost y un margen comercial de 1,92 €/t compost, que puede llegar a 4,53 €/t compost si la cooperativa cuenta con subvención y maquinaria propia.

En ambos casos, la rentabilidad del compostaje de alperujo se ve favorecida, además,

por la existencia de una alta disponibilidad de estiércol, que abarata y reduce su coste de transporte.

Rentabilidad financiera y económica del compostaje del alperujo

Los resultados evidencian la falta de rentabilidad financiera (desde una perspectiva privada) del compostaje de los subproductos de almazara, explicando en buena medida la escasa implementación de esta alternativa de valorización frente a la tradicional alternativa de venta a la extractora. No obstante, debe comentarse que el compostaje del alperujo es un proceso que, formando parte del nuevo paradigma de la economía circular,

genera diversas externalidades positivas. Entre ellas cabe destacar la mitigación del cambio climático derivado de la fijación de carbono en el suelo y la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (Madejón *et al.*, 2020), ambas motivadas por el uso del compost como sustituto de otros fertilizantes de síntesis, cuya producción requiere de grandes cantidades de energía, normalmente procedente de fuentes fósiles (Boldrin *et al.*, 2009; Favoino y Hogg, 2008). En este sentido, Gómez-Muñoz *et al.* (2012) estiman que aplicaciones duraderas (concretamente de 16 años) de compost de alperujo en plantaciones de olivar podrían incrementar el carbono orgánico del suelo en 30 t/ha. De hecho, si se reconociese este secuestro de carbono dentro del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (ETS por sus siglas en inglés), este uso de compost de alperujo podría generar importantes ingresos para el sector del olivar, habida cuenta de que el precio medio por tonelada de carbono durante el año de análisis alcanzó los 80 €/t CO₂-eq (European Commission, 2023). Además, cabe añadir otros beneficios ambientales difíciles de cuantificar monetariamente, como aquellos relacionados con la mayor fertilidad del suelo, mejoras en la capacidad de retención de agua, menores emisiones de contaminantes de agua (p. ej., nitrógeno) y el incremento de la biodiversidad del suelo por la mayor actividad microbiana (García-Ruiz *et al.*, 2012; Gómez-Muñoz *et al.*, 2012).

Todas estas externalidades positivas benefician al conjunto de la sociedad, pero no son remuneradas por el mercado (no están internalizadas en el precio de venta del compost). Si estas fuesen valoradas monetariamente y se integrasen en el análisis de rentabilidad, a buen seguro se evidenciaría que esta alternativa de valorización es rentable económicamente para el conjunto de la sociedad. En este sentido, la generación de estas externalidades podría justificar, desde una perspectiva pública, la conveniencia de que el apoyo

de las administraciones a este tipo de actividad no sólo cubriese parte de los costes de inversión (como en el resto de las inversiones productivas en el medio rural), sino que también cubriese parte de los costes de explotación, al objeto de hacer viable la producción de compost y con ello la generación de estos beneficios públicos. En todo caso, la posibilidad de subvencionar la actividad corriente de compostaje de alperujo requeriría basarse en estudios de valoración de las externalidades positivas generadas, al objeto de garantizar que la implementación de estas subvenciones supone realmente una mejora del bienestar social (*i. e.*, las subvenciones requeridas son menores que el bienestar asociado a la producción de externalidades) (Villanueva *et al.*, 2018).

Factores clave para la rentabilidad financiera relativos a los costes

Asimismo, sobre la estimación general de costes y márgenes del compostaje del alperujo, existen algunas circunstancias que influyen en los cálculos realizados y conviene discutir.

En primer lugar, es común que las almazaras cuenten con maquinaria (tractor y pala acoplada) que no se usa de manera continua, y que puede ser utilizada para los procesos de volteo, produciéndose, en estos casos, un ahorro sobre la inversión inicial del 9 %.

En segundo lugar, es igualmente importante tener en cuenta que este tipo de proyectos pueden tener apoyo por parte de las administraciones públicas, gracias a las líneas de subvenciones del segundo pilar de la PAC destinadas a favorecer el desarrollo rural. En Andalucía, durante el período 2007-2011 se apoyó el 50 % de la inversión en plantas de compostaje ejecutadas, hasta un tope máximo de 100.000 euros. Estas subvenciones para nuestro caso de estudio supondrían un ahorro del 12 % sobre la inversión.

Así, en el caso que se diesen las dos circunstancias anteriores, las estimaciones recogidas en la Tabla 2 se verían significativamente modificadas, ya que el coste de producción del compost se reduciría hasta 59,36 €/t (apenas un 4 %), si bien el margen permanecería en negativo (-1,03 €/t). Los indicadores del VAN y de la TIR resultantes para este escenario resultan igualmente negativos (-416.358 € y -0,3 %, respectivamente). De hecho, para que esta alternativa de valorización resultase rentable en los términos actuales, las subvenciones disponibles deberían incrementarse hasta cubrir el 66 % de inversión total.

Además, cabe señalar que en almazaras certificadas para producción ecológica, la obtención de compost de alperujo permite a sus socios sustituir la adquisición de productos autorizados para fertilizar el suelo, lo que normalmente les supone un elevado coste (Álvarez de la Puente *et al.*, 2010), por el uso del compost de producción propia. De la observación de parte de las actuales plantas de compostaje se deduce que este beneficio ha sido clave en muchos casos para adoptar la decisión empresarial de abordar la inversión para la elaboración de compost en la propia almazara. Dos claros ejemplos de ello son las cooperativas comentadas previamente de OLIFE y N^a Sra. de los Remedios-Picasat.

Factores clave para la rentabilidad financiera relativos a los ingresos

En un escenario de elevada inflación y de crisis energética no parece muy probable que se produzca una bajada del precio de los combustibles o del precio de venta del alperujo como para que el margen comercial de la actividad de compostaje pase a ser positivo. Sin embargo, sí parecen mucho más factibles escenarios de incremento de los precios del compost. Esta plausibilidad está motivada por varias tendencias sostenidas en los últimos años:

- Incremento de la superficie en producción ecológica y, por tanto, de la necesidad de fertilizantes orgánicos aptos para dicha producción. Así, cabe señalar que durante el período 2006-2022, la superficie en producción ecológica en Andalucía se ha incrementado un 151 %, pasando de 537.269 a 1.346.123 ha, de las cuales 117.237 ha son de olivar (el 7,3 % de la superficie total de este cultivo). En este sentido, alcanzar la meta definida dentro de la “Estrategia de la Granja a la Mesa” (EC, 2020b) por la cual al menos un 25 % de la superficie agraria debe gestionarse bajo este sistema de producción, reforzará de seguro esta tendencia expansiva.
- Incremento general del precio de los fertilizantes, tanto de síntesis como orgánicos. En particular, según el MAPA, entre enero de 2017 y enero de 2023, el precio de las enmiendas orgánicas se ha incrementado un 36 %.
- Incremento de la demanda de antes orgánicos, tanto para mitigar los impactos de la agricultura sobre el cambio climático reduciendo las emisiones de N₂O (Aguilera *et al.*, 2013), como para reducir la contaminación por nitratos en zonas vulnerables sustituyendo a los abonos nitrogenados sintéticos (Gomes *et al.*, 2023).

Considerando escenarios de incremento del precio del compost, mientras el resto de los parámetros permanecen como en la actualidad, debe señalarse que la alternativa de compostaje de subproductos de almazara se viabilizaría con incrementos de este superiores al 6,2 % (cuando precio del compost se iguala al coste de producción: 61,98 €/t).

Limitaciones del análisis realizado

Conviene reconocer las limitaciones del presente trabajo de cara a alumbrar investigaciones venideras. En cuanto a la influencia de

los factores clave en el coste del compostaje, en el futuro sería necesario desarrollar un modelo que permitiese analizar de manera conjunta la influencia que ejercen todos los factores en el coste. Dicho modelo debería tener en cuenta las relaciones entre las diferentes variables, por ejemplo, teniendo en cuenta la interrelación entre los mercados alimentarios, energéticos y de insumos agrarios. En este sentido cabe apuntar cómo el incremento de los costes energéticos repercute en el incremento del coste del estiércol, no sólo por su transporte, sino también porque repercute en el coste de todos los fertilizantes (químicos y orgánicos).

Conclusiones

Los resultados obtenidos de la presente investigación indican que la alternativa de compostaje como valorización actual de los principales subproductos del proceso de obtención del aceite de oliva (alperujo y hojín), no es rentable para la mayoría de las almazaras, lo que justifica su escasa implementación en la actualidad, a pesar del éxito técnico de las experiencias realizadas hasta la fecha (Álvarez de la Puente *et al.*, 2010).

Esta alternativa de valorización comienza a ser rentable en almazaras situadas a cierta distancia de la extractora de aceite de orujo más cercana, en las que existe disponibilidad cercana de estiércol y/o existe una demanda local importante de compost como fertilizante para la producción ecológica. También podría serlo si el precio del compost se incrementase, lo que desde un punto de vista prospectivo es probable, habida cuenta de la actual evolución de la superficie en producción ecológica y del precio de los abonos orgánicos que ésta requiere.

El trabajo se ha basado en un análisis económico desde la perspectiva privada (costes y beneficios empresariales), sin tener en cuenta

externalidades positivas del proceso. Considerar elementos como la fijación de carbono o la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero como consecuencia de la reducción en el consumo de fertilizantes de síntesis en un análisis económico desde una perspectiva pública, incrementaría notablemente la rentabilidad (social) de la valorización de los subproductos de almazara mediante compostaje. Estos resultados podrían justificar el apoyo de las administraciones a los costes de explotación del compostaje, como incentivo que permitiría la mejora del bienestar social, a la par que hacer viable esta alternativa de valorización de forma generalizada.

Agradecimientos

Esta investigación está enmarcada dentro del proyecto OLEACIRC "Bioeconomía circular en el sector del olivar: análisis técnico-económico de alternativas innovadoras de valorización de subproductos para mejorar la sostenibilidad sectorial" (ref. PP.AVA23.INV2023 02.042 de la Convocatoria de Investigación IFAPA 2022).

Referencias bibliográficas

- Aguilera E., Lassaletta L., Sanz-Cobena A., Garnier J., Vallejo A. (2013). The potential of organic fertilizers and water management to reduce N₂O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164: 32-52. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.09.006>.
- Álvarez de la Puente J.M. (2010). Manual de compostaje para agricultura ecológica. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, Sevilla, España. 49 pp.
- Álvarez de la Puente J.M., García Ruiz R., Jáuregui Arana J., Martín Pérez A. (2010). Compostaje de alperujos en Andalucía. *Fertilidad de la Tierra* 41: 12-14.

- Arvanitoyannis I.S., Kassaveti A. (2007). Current and potential uses of composted olive oil waste. *International Journal of Food Science & Technology* 42: 281-295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01211.x>
- Berbel J., Borrego-Marín M.M., Gómez-Limón J.A., Villanueva A.J., Cátedra M., Capote C. (2021). Factores habilitantes y limitantes para el éxito de iniciativas de bioeconomía circular en Andalucía. *Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía, Sevilla, España*. 98 pp.
- Berbel J., Delgado-Serrano M.M. (2017). La economía y la bioeconomía en el sector del olivar y del aceite. En: *Economía y comercialización de los aceites de oliva. Factores y perspectivas para el liderazgo español del mercado global* (Eds. Gómez-Limón J.A. y Parras M.), pp. 397-412. *Cajamar Caja Rural, Almería, España*. pp. 397-412.
- Berbel J., Posadillo A. (2018). Review and analysis of alternatives for the valorisation of agro-industrial olive oil by-products. *Sustainability* 10: 237. <https://doi.org/10.3390/su10010237>
- BOE (Boletín Oficial del Estado) (2011). Real Decreto 1359/2011, de 7 de octubre, por el que se aprueba la relación de materiales básicos y las fórmulas-tipo generales de revisión de precios de los contratos de obras y de contratos de suministro de fabricación de armamento y equipamiento de las Administraciones Públicas. *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, Madrid*.
- Boldrin A., Andersen J.K., Møller J., Christensen T.H., Favoino E. (2009). Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research* 27: 800-812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>
- CAPDR (Consejería de Agricultura Pesca y Desarrollo Rural) (2018). *Estrategia andaluza de bioeconomía circular*. *Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Junta de Andalucía, Sevilla, España*. 354 pp.
- Carrión F. (2017). *Optimización del coste de aplicación de agua en riego por aspersión y goteo*. Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España. 166 pp.
- Casillas-González A.C., Pérez-Camacho M.N., García-López M., Cátedra-Cerón M.M., Capote C., Martín-Jiménez I., Villanueva A.J. (2022). Estrategias de bioeconomía circular. Un análisis comparativo a nivel europeo. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 118: 613-630. <https://doi.org/10.12706/itea.2022.016>
- Diario ABC (2022). "El precio de la energía obliga a parar al 40% del sector orujero". *Noticia publicada el 25/07/2022*. Disponible en: <https://sevilla.abc.es/agronoma/noticias/cultivos/aceites-de-oliva/energia-parar-sector-orujero/>
- EC (European Commission) (2020a). *Circular Economy Action Plan: for a cleaner and more competitive Europe*. *European Commission, Brussels*. 28 pp.
- EC (European Commission) (2020b). *A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. COM(2020) 381 final. *European Commission, Brussels*. 20 pp.
- EC (European Commission) (2023). *Report on the functioning of the European carbon market in 2022*. COM(2023) 654 final. *European Commission, Brussels*. 56 pp.
- Favoino E., Hogg D. (2008). The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste Management & Research*: 26: 61-69. <https://doi.org/10.1177/0734242X08088584>.
- García-Ruiz R., Ochoa M.V., Hinojosa M.B., Gómez-Muñoz B. (2012). Improved soil quality after 16 years of olive mill pomace application in olive oil groves. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 803-810. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0080-7>.
- Gomes E., Antunes I.M.H.R., Leitão B. (2023). Groundwater management: Effectiveness of mitigation measures in nitrate vulnerable zones – a Portuguese case study. *Groundwater for Sustainable Development* 21: 100899. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100899>
- Gómez-Muñoz B., Hatch D.J., Bol R., García-Ruiz R. (2012). The compost of olive mill pomace: From a waste to a resource. Environmental benefits of its application in olive oil groves. En: *Sustainable development. Authoritative and leading edge content for environmental management* (Ed. Curkovic S), pp. 459-484. *IntechOpen, London, UK*. <https://doi.org/10.5772/48244>

- González P.J., Jaúregui J., Ortiz M.J., Aguirre I. (2017). Calculadora de plantas de compostaje en pilas dinámicas. En: *Reciclando los residuos para mejorar los suelos y el medioambiente. V Jornadas de la Red Española de Compostaje* (Eds. López R. y Cabrera F.), pp. 34-38. Red Española de Compostaje, Sevilla, España.
- Guerrero-Casado J., Carpio A.J., Tortosa F.S., Villanueva A.J. (2021). Environmental challenges of intensive woody crops: The case of super high-density olive groves. *Science of the Total Environment* 798: 149212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149212>
- Lozano D., Ayuso J., López M. (2017). Proyecto de ejecución de planta de compostaje de alperujo en Campillos (Malaga). Universidad de Cordoba, Cordoba, España. 184 pp.
- Madejón E., Lozano L., Panettieri M., Moreno B., Benítez E. (2020). Compost de alperujo como fertilizantes de olivar de secano. En: *Compostaje Webinars 2020* (Eds. Gómez Sánchez MÁ, González Hernández AI, Morales Corts MR y Pérez Sánchez R), pp. 102-106. Red Española de Compostaje, Madrid, España.
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico) (2020). *España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular*. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, Madrid, España. 65 pp.
- Montemurro F., Diacono M., Vitti C., Debiase G. (2009). Biodegradation of olive husk mixed with other agricultural wastes. *Bioresource Technology* 100: 2969-2974. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.038>
- Moreno J., Mormeneo R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa, Madrid, España. 570 pp.
- Moreno R. (2018). Estudio de los consumos eléctricos de una almazara y sistema de riego. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Jaén, Jaén, España. 193 pp.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (2018). *Meeting Policy Challenges for a Sustainable Bioeconomy*. OECD Publishing, Paris. 195 pp.
- Parras M., Torres-Ruiz F.J., Gómez-Limón J.A., Ruz A., Vega-Zamora M., Parra-López C., Sayadi S., Colombo S. (2021). Estrategias para una oleicultura jiennense más competitiva. Diputación Provincial de Jaén, Jaén, España. 119 pp.
- Polonio D., Villanueva A.J., Gómez-Limón J.A. (2022). Cuantificación de los recursos biomásicos del sector oleícola en Andalucía: Una aproximación actualizada. *C3-Bioeconomy: Circular and Sustainable Bioeconomy* 3: 7-34. <https://doi.org/10.21071/c3b.vi3.14172>.
- Proietti P., Calisti R., Gigliotti G., Nasini L., Regni L., Marchini A. (2016). Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. *Journal of Cleaner Production* 137: 1086-1099. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.158>
- Renkow M., Rubin A.R. (1998). Does municipal solid waste composting make economic sense? *Journal of Environmental Management* 53: 339-347. <https://doi.org/10.1006/jema.1998.0214>
- Sánchez A., Espinosa D., Olmedo M. (2006). Estudio de alternativas de diseño de plantas de compostaje en almazaras ecológicas de tamaño reducido. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural, Junta de Andalucía, Sevilla, España. 122 pp.
- Sanz A., Parra T., Polonio D., Manrique T. (2023). Estimación de índices e indicadores relacionados con los recursos biomásicos procedentes de las almazaras y las entamadoras del olivar. *Simposium Expoliva*, 10-13 mayo, Jaén, España.
- Tortosa G., Albuquerque J.A., Ait-Baddi G., Cegarra J. (2012). The production of commercial organic amendments and fertilisers by composting of two-phase olive mill waste ("alperujo"). *Journal of Cleaner Production* 26: 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.008>
- Vega M. (2011). Viabilidad de plantas de compostaje, y potencial uso agrícola del compost de alperujo producido, en almazaras del grupo Oleoestepa. Aplicación al caso de Arbecquisur S.C.A. Universidad de Sevilla, Sevilla, España. 140 pp.
- Vilar J., Caño S., Raya I., Moreno L., Velasco M.M. (2020). El sector de procesado del alperujo. Posibilidades de un potencial colapso financiero y

- operativo. Asociación Nacional de Empresas de Aceite de Orujo, Sevilla, España. 74 pp.
- Vilar J. (2022). Producción mundial de aceites de oliva. En: Informe anual de coyuntura del sector oleícola (Ed. Parras M), pp. 62-67. Cátedra Caja Rural AOVES de Jaén, Jaén, España.
- Villanueva A.J., Granado-Díaz R., Gómez-Limón J.A. (2018). La producción de bienes públicos por parte de los sistemas agrarios. UCOPress, Editorial Universidad de Córdoba, Córdoba, España. 273 pp.
- Villanueva AJ, La Cal JA (2023). Valorización de subproductos del sector oleícola: coyuntura actual e innovaciones futuras. Symposium Expoliva 2023 10-13 mayo, Jaén, España.
- (Aceptado para publicación el 29 de enero de 2024)