



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

GRADO EN INGENIERIA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRARIA

Valoración del orujo de aceituna en la alimentación del ganado porcino. Efectos de la tecnología de secado.

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor/a: Sandra Navarro Gómez

Tutor/a: Paloma García Rebollar

Mayo de 2025

ÍNDICE

1. GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	4
2. RESUMEN.....	5
3. INTRODUCCIÓN.....	6
4. ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1. Situación de partida.....	8
4.1.1. Descripción del proceso productivo de aceite de oliva y de sus subproductos.	9
4.1.2. Valorización del orujo de aceituna para la alimentación del ganado porcino	15
5. OBJETIVOS.....	18
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
6.1. Métodos analíticos.....	20
6.2. Análisis de digestibilidad <i>in vitro</i>	22
6.2.1. Reactivos de la metodología <i>in vitro</i>	22
6.2.2. Procedimiento de digestibilidad <i>in vitro</i>	25
6.3. Formulación de piensos de cebo para cerdos con orujos.....	30
6.4. Análisis estadístico	33
7. RESULTADOS.....	34
7.1. EFECTO DEL TIPO DE SECADO SOBRE LA COMPOSICIÓN Y VALOR NUTRICIONAL DEL ORUJO GRASO PARA PORCINO.....	34
7.2. COMPOSICIÓN Y VALOR NUTRITIVO DE LOS ORUJOS GRASOS TIPO CICLON Y SALIDA PARA LA ALIMENTACIÓN DEL PORCINO	39
7.3. FORMULACIÓN DE PIENSOS PARA PORCINO DE CEBO CON ORUJOS TIPO CICLÓN Y SALIDA.....	43
8. CONCLUSIONES.....	47
9. BIBLIOGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campañas de recogida y duración del almacenamiento (días) en balsas de los lotes de alperujo muestreados para el ensayo 1.....	19
Tabla 2. Listado de materias primas empleadas en la formulación y sus precios.	30
Tabla 3. Límites máximos y mínimos (%) de las materias primas en formulación de piensos para el cebo.	31
Tabla 4. Recomendaciones para la formulación de piensos para cerdos en crecimiento-cebo. Normas generales.	32
Tabla 5. Efecto de la tecnología de secado del alperujo sobre la composición química y digestibilidad in vitro de los orujos grasos.....	34
Tabla 6. Efecto de la tecnología de secado del alperujo sobre la fracción saponificable y el perfil de ácidos grasos de los orujos grasos.	36
Tabla 3. Estimación de la digestibilidad in vitro de la materia seca ¹ de los orujos grasos.	38
Tabla 7. Composición química y digestibilidad in vitro de los orujos tipo ciclón y salida.....	40
Tabla 8. Digestibilidad in vitro de la energía calculada de los orujos tipo ciclón y salida (Boisen y Fernández, 1997).....	42
Tabla 9. Matrices de formulación de los orujos grasos tipo ciclón y salida.....	44
Tabla 10: Composición de las fórmulas de piensos para cebo de porcino con cereales (F1), orujo ciclón (F2) u orujo graso salida (F3).....	45
Tabla 11. Coste de formulación (€/t) de los piensos formulados	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Molino de martillos	10
Figura 2: Batidora de almazara	10
Figura 3: Decanter, tornillo sin fin.....	11
Figura 4: Diagrama de extracción del aceite de oliva en 2 y 3 fases.....	11
Figura 5: Tanque de acero inoxidable para almacenamiento	12
Figura 6: Balsas de alperujo	13
Figura 7: Secadero tromel	14
Figura 8: Muestras de orujo ciclón y orujo salida almacenadas de duquesas y codificadas con fecha de campaña y tipo de tratamiento.....	20
Figura 9: Muestras con molienda 1 mm y 0,5mm	21
Figura 10: Equipo de combustión Dumas para el análisis de la proteína bruta.....	21
IFigura 11: Bomba calorimétrica para extracción de la energía bruta.....	23
Figura 12: Muestras situadas en la plataforma agitadora para ajuste de pH y proceder a la incubación.	27
Figura 13: Medidor de pH con electrodo fino.....	27
Figura 14: Incubador	28
Figura 15: Incubador con plataformas de agitación en su interior.....	28
Figura 16: Muestras filtrando con vacío.....	28
Figrua 17: Muestras filtradas en crisoles tras las incubaciones.	29
Figura 18: Crisoles introducidos en horno (550°C) para calcinar las muestras y obtener la digestibilidad in vitro de la MO	29
Figura 19: Muestras de orujo salida (OS) y orujo ciclón (OC)	39
Figura 20: Variación en los contenidos de Energía digestible (Kcal/ kg MS) de los orujos tipo ciclón y salida.	42

1. GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AG	Ácidos grasos
AGT	Ácidos grasos totales
C18:1	Ácido oleico
C18:2	Ácido linoleico
C18:3	Ácido α -linolénico
dEB	Digestibilidad de la energía bruta
DIV_MO	Digestibilidad in vitro de la materia orgánica
DIV_MS	Digestibilidad in vitro de la materia seca
DS	Desviación estándar
EB	Energía bruta
ED	Energía digestible
EE	Extracto etéreo
EEh	Extracto etéreo con hidrólisis ácida
EM	Energía metabolizable
EN	Energía neta
ESM	Error estándar de la media
FAD	Fibra ácido detergente
FEDNA	Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal
FND	Fibra neutro detergente
LAD	Lignina ácido detergente
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MO	Materia orgánica
MS	Materia seca
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl
PB	Proteína bruta
PB-FAD	Proteína ligada a la fibra ácido detergente
PB-FND	Proteína ligada a la fibra neutro detergente
SHS	Super-Heated Steam (Vapor sobrecalentado)

2. RESUMEN

El presente trabajo evalúa el valor nutritivo del orujo graso de aceituna para su utilización en alimentación porcina, considerando el impacto de diferentes tecnologías de secado y del tipo de subproducto generado en el proceso industrial. Se caracterizaron fisicoquímicamente diversos orujos obtenidos por secado en tromel, aire caliente y vapor sobrecalentado, analizando su composición química, fracción lipídica y digestibilidad *in vitro* de la materia seca. Asimismo, se estudiaron los subproductos de salida y ciclón del secado convencional, y se estimaron los niveles óptimos de inclusión y el valor económico del orujo en fórmulas comerciales para cebo porcino. Los resultados muestran que el secado con vapor sobrecalentado conserva mejor los ácidos grasos insaturados, mientras que el orujo ciclón presenta mayor digestibilidad energética. Se concluye que el orujo graso, especialmente el procedente de ciclón o secado con vapor, es un subproducto viable y económicamente eficiente en la formulación de piensos sostenibles para porcino.

ABSTRACT

This study explores the nutritional characterization and practical utilization of olive-pomace oilcake as a sustainable feed ingredient for grower-finisher pigs. The research investigates the impact of three industrial drying technologies—rotary drum drying, hot air drying, and superheated steam drying—on the physicochemical properties, lipid profile, and *in vitro* dry matter digestibility of olive-derived by-products. Detailed analysis was conducted on two fractions obtained from conventional drying methods (cyclone and outlet pomaces).

The findings indicate that while drying method did not significantly alter the proximate composition or digestibility coefficients, it markedly influenced the integrity of the lipid fraction. Superheated steam drying exhibited superior preservation of unsaturated fatty acids, notably oleic (C18:1) and linoleic (C18:2) acids, owing to reduced oxygen exposure. Cyclone pomace displayed higher lipid content and lower fiber-bound protein, enhancing its digestible energy value compared to the outlet fraction.

Moreover, linear optimization of commercial feed formulations demonstrated that olive-pomace oilcake can be included at levels of 15–20% without compromising energy density or amino acid balance. The utilization of cyclone-derived fractions enabled more cost-effective feed formulations. The integration of these by-products aligns with circular economy objectives by valorizing agro-industrial residues and reducing reliance on conventional raw materials.

In conclusion, olive-pomace oilcake—particularly from superheated steam-dried or cyclone-separated streams—offers both technical and economic advantages for sustainable pig nutrition.

3. INTRODUCCIÓN

España se sitúa en cabeza de la Unión Europea en cuanto a la producción de aceite de oliva, suponiendo aproximadamente el 70% de la producción en la Unión Europea y 45% de la producción mundial (MAPA, 2024). De la misma forma, España también es líder de la producción europea de ganado porcino, ocupando la 3ª posición a nivel mundial por detrás de dos grandes potencias, como son China y EE UU.

La producción de aceite de oliva de la campaña 2024/25 en España ascendió a 1,26 millones de toneladas (MAPA, 2024). Cabe destacar que a los cultivos de olivar les afecta un fenómeno denominado vecería que supone la alternancia de cosechas muy productivas con cosechas de menor producción, con lo cual no todos los años se obtienen cifras semejantes. En el proceso de extracción del aceite de oliva se genera un subproducto llamado alperujo con un alto contenido de humedad que contiene el orujo (restos de piel, pulpa y huesos de las aceitunas) y el alpechín (aguas de vegetación). Este subproducto se genera en grandes cantidades cada año, concretamente para producir 1 kg de aceite oliva se estima que se producen 4 kg de alperujo, lo cual suponen 5,05 millones de toneladas de alperujo anuales (MAPA, 2024). El alperujo presenta una elevada carga contaminante debido a su pH ácido, su elevada salinidad y su alto contenido en polifenoles que inhiben a la flora microbiana del suelo. La acumulación de alperujo en el suelo puede causar problemas medioambientales, como la contaminación de suelos y aguas superficiales.

La valorización de este subproducto mediante su incorporación en piensos para el ganado porcino de cebo tiene gran interés debido a su elevado contenido en grasa de alta calidad, que permitiría incorporarlo como fuente de energía en los piensos sustituyendo de ese modo una proporción de los cereales. De este modo, se mejoraría tanto la rentabilidad de la producción de carne de cerdo como la sostenibilidad del sector, ya que un alto porcentaje de los cereales incluidos en los piensos son de importación, y los piensos para ganado porcino suponen más de 45% del total de la fabricación de piensos en España.

El alperujo permanece durante un tiempo variable (0-8 meses) en balsas o tanques de almacenamiento hasta su procesado. Dado su alto contenido en humedad (70-75%) requiere un tratamiento previo de secado antes de su valorización en piensos. El proceso de secado convencional se basa en introducir el alperujo en secaderos rotativos continuos (tromel), donde la masa húmeda circula a lo largo de un tambor metálico inclinado que gira sobre un eje, atravesado por una corriente de gases calientes a elevadas temperaturas de entre 400 y 800°C, dependiendo del diseño del sistema y del combustible empleado. El calor de secado habitualmente se obtiene a partir de la combustión de otros subproductos (ej. hueso de aceituna y orujillos) y de los gases calientes generados por motores alimentados con gas natural. A pesar de la efectividad en la reducción de la humedad, este método de secado presenta importantes limitaciones.

El método convencional de secado del alperujo en tromel genera emisiones contaminantes a la atmósfera, incluyendo, partículas finas, compuestos orgánicos volátiles (COVs) y gases como CO₂, NO_x y SO_x, que suponen un riesgo ambiental y para la salud humana. Los límites máximos de estas emisiones están sujetos a una revisión inminente en la normativa ambiental europea, la cual demanda tecnologías más limpias y eficientes que no afecten a la calidad del aire. A su vez, el alto consumo energético del proceso supone un elevado coste económico y una significativa huella de carbono, especialmente cuando se usan combustibles fósiles. Por otra parte, el contacto directo de

este subproducto con los gases de combustión puede comprometer la calidad del producto final, acelerando la oxidación lipídica, lo que puede limitar su uso en alimentación animal.

Por esta razón, las industrias orujeras están investigando y evaluando actualmente nuevos métodos de secado que permitan minimizar las emisiones, reducir el consumo energético y preservar la calidad del producto seco. La técnica de secado con vapor de agua sobrecalentado parece prometedora ya que no emite partículas a la atmósfera y reduce la oxidación del aceite de orujo (Sehrawat et al., 2016).

La composición de los orujos es muy variable (de Blas et al., 2015) en función de la campaña, la variedad de aceituna y el tiempo de permanencia en las balsas. Trabajos previos (Ferrer et al., 2018; 2020) han demostrado que niveles de hasta el 20% de OS en piensos para cebo de porcino permiten sustituir parcialmente los cereales de las dietas sin afectar a los rendimientos productivos de los animales y mejorando la calidad de la grasa de la canal.

Durante el secado convencional del alperujo en tromel se obtienen dos subproductos diferentes, orujo salida (OS) que procede de la cinta del secadero y orujo ciclón (OC) que es una fracción pulverulenta que queda retenida en los ciclones de extracción de los gases húmedos. Actualmente los OC se reciclan sobre los OS, representando alrededor de un 3% en peso del orujo producido. Sin embargo, trabajos previos han mostrado que el OC tiene un menor contenido en fibra que el OS (Marcos et al., 2019) por lo que su valor nutritivo para porcino puede ser diferente.

En este trabajo se realizarán estudios de caracterización y evaluación del valor nutritivo para ganado porcino del alperujo secado por diferentes métodos: secado convencional (tromel), con vapor sobresaturado o con aire seco a altas temperaturas, así como de un nuevo subproducto (el orujo ciclón) obtenido durante el proceso de secado convencional.

4. ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. Situación de partida

La escasez de recursos para la alimentación animal en los sistemas de producción ganadera actuales y la competencia por los mismos es una realidad, que requiere un esfuerzo importante por parte de la comunidad científica y la sociedad para explorar alternativas sostenibles y tratar de producir “más con menos”. La ganadería intensiva, principalmente la producción de animales monogástricos es la principal consumidora de piensos concentrados que habitualmente incluyen materias primas nobles como los cereales y la soja. Estos ingredientes compiten directamente con la alimentación humana (Smith et al., 2013) y son cada vez menos competitivos por su elevado precio para la alimentación animal. Además, en un escenario de cambio climático como el actual, se prevé que la producción de cereales se vea fuertemente afectada y existan variaciones anuales que condicionen la disponibilidad de estas materias primas (Challinor et al., 2014). Por lo tanto, estudiar la utilización de materias primas alternativas, tales como los subproductos resultantes de actividades agroindustriales, es esencial para asegurar la sostenibilidad económica, social y ambiental de la ganadería actual y futura. En particular, el sector porcino es un sector clave para convertir estos subproductos en proteína animal de una forma sostenible, por su importancia para la producción de carne a nivel mundial, su fisiología digestiva y su alta eficiencia de transformación (Zijlstra y Beltranena, 2013).

Los subproductos generados por la industria agroalimentaria, debido a su carácter local y por su condición de subproductos tienen una menor carga ambiental asociada, pueden contribuir a la reducción de la huella de carbono de los productos animales (Del Prado et al., 2013). Además, el uso de estos subproductos para alimentación animal ofrece a las industrias agroalimentarias una vía alternativa de eliminación de los residuos que se generan en los procesos, esencial para cumplir con la presión legislativa que existe en el ámbito de la protección medioambiental. Aunque existan usos alternativos para esos residuos, por razones éticas, su canalización hacia alimentación animal es la vía de uso preferente en el marco de la estrategia de Economía Circular de la UE, respecto a otras como la obtención de energía (biocombustibles), digestión anaerobia o fertilización para las que pueden ser útiles otro tipo de sustratos o residuos no aptos para la alimentación. En definitiva, y desde un punto de vista global, los subproductos agroindustriales constituyen una alternativa útil para promover la eficiencia y sostenibilidad del sector agrario, con el uso de recursos locales para el desarrollo de la ganadería, contribuyendo a cerrar los ciclos de nutrientes a nivel local.

Los países mediterráneos cuentan con una importante tradición agroindustrial. Los subproductos agroindustriales disponibles para alimentación animal en esta zona pueden ser de origen muy diverso, incluyendo restos de frutas y hortalizas, subproductos de cereales o de la producción de aceites (tortas de oleaginosas) o biocombustibles (granos secos de destilerías o DDGS). El uso de subproductos derivados de procesos agroindustriales en los piensos presenta algunas limitaciones y riesgos relacionados con su composición variable y posibles problemas de toxicidad (Bernard, 2010; Zijlstra y Beltranena, 2013). Para poder utilizar con seguridad una materia prima en alimentación animal, que sea poco conocida o en una especie distinta a la habitual, es importante conocer los factores que afectan a su variabilidad, valor nutritivo y grado de aprovechamiento, así como su impacto en el producto final (carne, huevos y leche) mediante ensayos *in vitro* e *in vivo*.

Existen muchos subproductos agroindustriales altamente disponibles en España durante prácticamente todo el año para los que la información existente sobre su composición, valor nutritivo y límites de inclusión en los piensos es escasa. Este es el caso de subproductos típicamente mediterráneos como los subproductos del olivar que han sido principalmente estudiados para la alimentación de rumiantes (Bampidis y Robinson, 2006; Molina-Alcaide y Yañez-Ruiz, 2008; Gharbi y Benarif, 2011). Sin embargo, diferencias en la composición de los subproductos generados y la incorporación de nuevos sistemas de deshidratación en las industrias orujeras que generan estos subproductos, hacen que su uso para alimentación animal deba ser reevaluado, especialmente en piensos para animales monogástricos como el porcino. Además, teniendo en cuenta la importancia del sector porcino español, la utilización de subproductos en la alimentación de esta especie constituye una vía rápida de valorización contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad del sector agroganadero español.

4.1.1. Descripción del proceso productivo de aceite de oliva y de sus subproductos.

4.1.1.1.Recolecta

El grueso de la recolección de aceituna para aceite de oliva tiene lugar entre los meses de noviembre a enero, aunque hay algunas regiones y campañas que llegan a prolongarse hasta el mes de mayo, especialmente en zonas con climas fríos o variedades tardías. Las aceitunas una vez recogidas deben trasladarse a la almazara en el menor tiempo posible, preferentemente el mismo día, evitando la compactación excesiva que puede provocar fermentaciones anaeróbicas.

4.1.1.2.Recepción de las olivas en la almazara

Una vez se recibe el fruto en la almazara, pasa a un proceso de clasificación, diferente en base a la variedad, el grado de madurez, el estado fitosanitario, etc. Tras ser clasificadas son sometidas a un proceso de limpieza, lavado, pesaje y almacenamiento hasta el momento de la molienda.

4.1.1.3.Molienda y batido

La molienda es necesaria para llevar a cabo la trituración de la aceituna hasta convertirla en una masa usando un molino de martillos (Figura 1), liberando así el aceite que contienen los tejidos vegetales, obteniendo una pasta compuesta por una fase sólida (tejidos vegetales) y una fase líquida de consistencia pastosa (aceite y agua).

La pasta obtenida se traslada a una batidora (Figura 2), cuya misión es reunir las gotas líquidas dispersas en la pasta de forma lenta y continua.

La batidora contiene un depósito con paletas giratorias por donde circula agua caliente a una temperatura lo suficientemente alta como para disminuir la viscosidad, pero sin superar los 30°C para que no se pierdan los compuestos aromáticos y no se aceleren los procesos de oxidación del aceite.



Figura 1: Molino de martillos



Figura 2: Batidora de almazara

4.1.1.4. Proceso de extracción del aceite.

El sistema de extracción de aceite de oliva actualmente en uso se distingue del método tradicional por operar de manera continua, optimizando la eficiencia del proceso. Esta extracción se lleva a cabo mediante centrifugadoras horizontales conocidas como decanters (Figura 3), en las cuales la masa de aceituna es sometida a una rotación de alta velocidad dentro de un cilindro que integra un rotor con sinfín interior girando en sentido contrario. Este mecanismo permite la separación física de los componentes sin la necesidad de aplicar calor ni añadir productos químicos, basándose exclusivamente en la diferencia de densidades entre el aceite, el agua y los sólidos presentes en la pasta.

Históricamente, el proceso se realizaba en tres fases; sin embargo, en la actualidad, el sistema de dos fases (Figura 4) se ha consolidado como el predominante en España, siendo adoptado por aproximadamente por el 98% de las almazaras. La principal diferencia entre ambos sistemas radica en que el sistema de dos fases no requiere la adición de agua, lo que elimina la generación de alpechín. En su lugar, el subproducto generado es el alperujo, una mezcla semisólida con una composición similar al orujo del sistema de tres fases, pero con un contenido de humedad significativamente mayor (entre el 70-75 %). Por cada 100 kg de aceitunas procesadas, se obtienen entre 70-80 kg de alperujo.

Desde una perspectiva medioambiental y operativa, el sistema de dos fases representa una mejora sustancial, ya que reduce de forma considerable el consumo de agua —hasta diez veces menos en comparación con el sistema de tres fases— y disminuye la energía necesaria tanto para calentar como para centrifugar la masa, traduciéndose en un proceso más sostenible y eficiente.

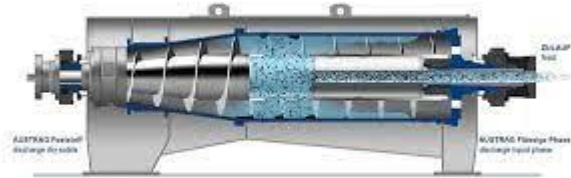


Figura 3: Decanter, tornillo sin fin

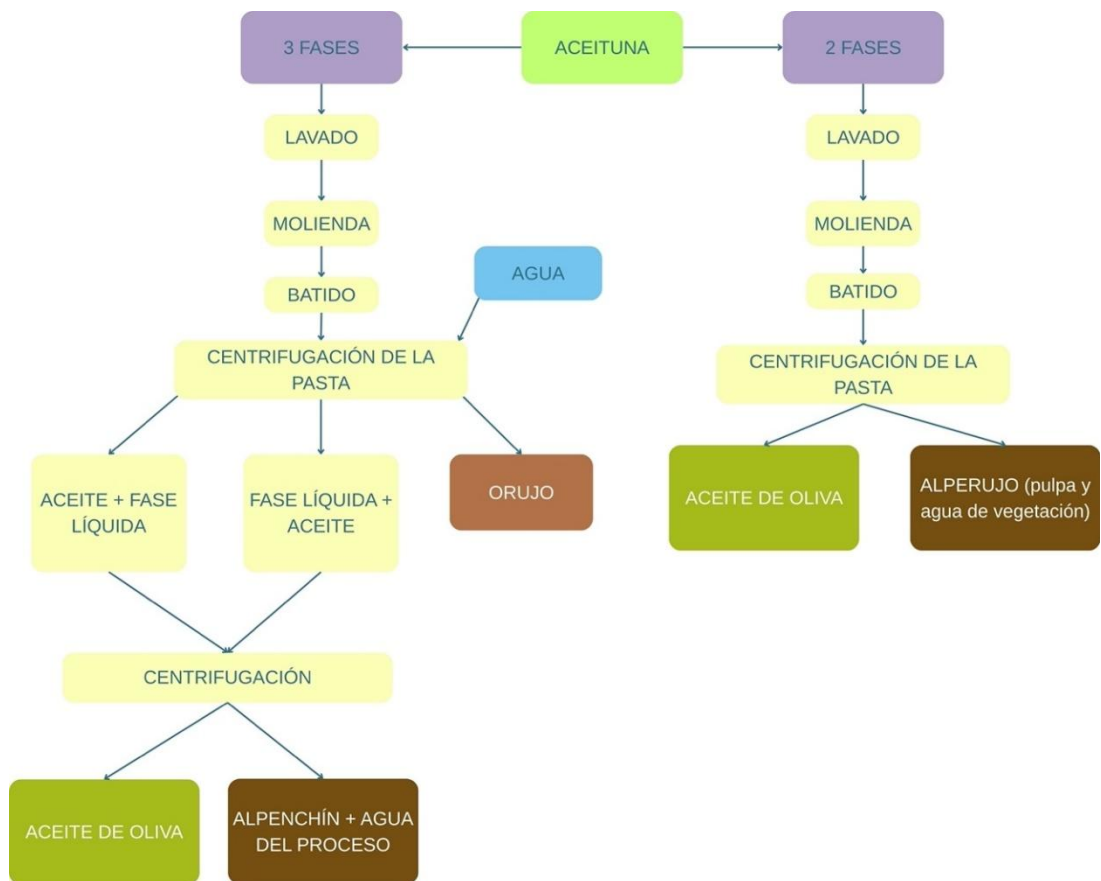


Figura 4: Diagrama de extracción del aceite de oliva en 2 y 3 fases.

4.1.1.5. Almacenaje y envasado del aceite de oliva.

El aceite de oliva se envasa en tanques de acero inoxidable para evitar su enturbiamiento. El material debe de ser opaco e impermeable para evitar que absorba olores y la oxidación de los pigmentos por la luz. La temperatura optima de almacenamiento es a 15°C.



Figura 5: Tanque de acero inoxidable para almacenamiento

4.1.1.6. Transporte del alperujo.

La masa de alperujo se recoge en una tolva situada en el exterior de la almazara. Posteriormente es transportada a las plantas orujeras para su procesado. No se aconseja el almacenamiento del orujo en las balsas por un tiempo superior a dos meses, ya que puede suponer un deterioro de la calidad del aceite de orujo y de los subproductos extraídos. Las orujeras funcionan en continuo durante la campaña de producción de aceite de oliva, pero su capacidad de procesamiento es limitada por lo que el alperujo se puede acumular hasta 6-8 meses en las balsas de las orujeras.

4.1.1.7. Obtención del orujo en las plantas orujeras.

Una vez transportado el alperujo a las plantas extractoras, la masa se trata para la obtención del denominado aceite de extracción o aceite de orujo, generándose dos subproductos el orujo grasoso y, tras la extracción del aceite de orujo, el orujillo.



Figura 6: Balsas de alperujo

4.1.1.8. Repaso de centrifugado.

El alperujo tiene un contenido de aceite muy variable, entre el 5-15% y una humedad entre el 70-75%. En las orujeras, esta masa se somete a un centrifugado de repaso para una segunda extracción del aceite, en un tambor cilíndrico que gira a gran velocidad. A la salida de este centrifugado se obtiene aproximadamente un 2% de aceite y una masa de alperujo con una humedad en torno al 72%.

4.1.1.9. Tamizado y Molienda

Antes de realizar los procesos de secado, el alperujo se somete a un proceso de tamizado para retirar los huesos, y de molienda para obtener un tamaño de partícula adecuado.

4.1.1.10. Secado

El objetivo de este proceso es reducir el contenido de humedad de la masa de alperujo para pasar desde un 70-72% de humedad al 12% aproximadamente, siendo este valor el recomendable para la extracción posterior del aceite de orujo.

La fase de secado se realiza en secaderos rotativos y continuos (Tromel) por los que circula una corriente de gases calientes a alta temperatura (400-800°C) no superando los 70-80°C en la masa húmeda del alperujo. De este

proceso se obtienen dos subproductos; el orujo de salida, un subproducto con alto contenido de material lignificado, y el orujo ciclón, que sería la fracción de polvo que queda retenida en los filtros de los ciclones de extracción de gases.



Figura 7: Secadero tromel

4.1.1.11. Extracción del aceite de orujo

Finalmente se realiza el proceso de extracción del aceite de orujo, el cual se desarrolla en una planta extractora en continuo que consta de un extractor de banda horizontal. La singularidad del tratamiento es que la condensación de hexano se realiza con aire, de ese modo se reduce el consumo de agua para la refrigeración. Se emplean aerocondensadores, capaces de condensar 7000 kg/h de hexano y vapor de agua, y disponen de una alta superficie de intercambio $1800-2.350\text{m}^2$. Este proceso de extracción se divide en cinco fases:

- Extracción del aceite de orujo graso seco
- Extracción del disolvente del orujo seco extractado
- Evaporación del disolvente del aceite
- Absorción del disolvente de los incondensables
- Condensación de los vapores de hexano y agua

4.1.2. Valorización del orujo de aceituna para la alimentación del ganado porcino

En España se producen anualmente 18,4 millones de toneladas de residuos agroindustriales y el 67% de ellos son de origen vegetal (UPN, 2014; MAPAMA, 2017). Los sectores agrarios más importantes y, por tanto, los subproductos locales más disponibles para la alimentación animal proceden de los sectores del vino y aceite de oliva (40%), hortofrutícola (15%), la pulpa de remolacha (27%) y los cereales (18%). Estos subproductos tienen generalmente altos contenidos de humedad (<20-30% de materia seca) y fibra. También son estacionales, lo que deriva en limitaciones prácticas y ambientales, tales como un difícil manejo y altos costes de transporte entre plantas y fincas, e importantes problemas de almacenamiento y conservación.

Hoy en día existen nuevas tecnologías para secar de forma sostenible y rentable el alperujo, manteniendo o aumentando el valor nutricional de los productos obtenidos. Uno de los más prometedores para el alperujo es el secado con vapor sobrecalentado (SHS). Las altas temperaturas (150 °C) del SHS conducen a un tiempo de procesamiento más corto (hasta un 30%) en comparación con el secado por aire caliente, con un impacto positivo en la eficiencia general del proceso, reduciendo la demanda de energía de la industria en un 20-30% y su huella ambiental. Es importante tener en cuenta que la temperatura del alperujo secado con SHS nunca supera los 100°C, que es la temperatura de evaporación del agua presente en el producto. Además, no se produce oxidación porque el SHS es inerte por defecto, no hay oxígeno libre, y el producto también se esteriliza durante el proceso de secado, lo que evita los problemas asociados con la carga de microorganismos. La tecnología SHS ha demostrado ser un método eficaz para secar pulpa de remolacha azucarera y granos de cereales fermentados (Pronyck et al., 2004, Tang et al., 2000, 2004), pero todavía es bastante nueva en la industria oleícola y actualmente solo está disponible a nivel de planta piloto. La investigación industrial previa realizada por la empresa de secado de alperujo más grande de España (SACYR que facilita las muestras de este proyecto) ha mostrado que la composición general y la calidad nutricional del alperujo seco SHS mejoran (análisis realizado por UPM RedLab 268) en comparación con el secado convencional del mismo producto secado con aire caliente (Fernández Cucurull, comunicación personal). En este proyecto se estudiará el efecto de estas nuevas tecnologías de secado del alperujo sobre la composición y el valor nutricional de estos subproductos agroindustriales fibrosos para piensos de cerdos cebo.

Con independencia del tipo de secado del alperujo, su composición química varía ampliamente según las variedades de aceitunas y su estado de maduración, las condiciones climáticas durante el cultivo y el proceso de extracción del aceite utilizado. Estos factores determinan cambios en la proporción de sus distintos constituyentes (epicarpio, mesocarpio, endocarpio y restos de huesos) que tienen composiciones químicas sensiblemente diferentes. El orujo deshuesado graso, o pulpa de aceituna, contiene una cantidad significativa de aceite de alta calidad y un alto contenido en fibra lignificada. Según las bases de datos consultadas (FEDNA 2019 y Feedipedia), el orujo graso tiene una concentración de grasa de entre un 10 y un 20% sobre materia seca, de alta calidad (rica en oleico), que le hace de gran interés para su inclusión en piensos de acabado de cebo o gestación de ganado porcino. Además, el orujo tiene una cantidad apreciable y variable de compuestos fenólicos (0,3-5 %MS) principalmente ortofenoles como la oleuropeína (Vázquez et al., 1974). Estos compuestos tienen, además de propiedades nutricionales, una capacidad antimicrobiana y antioxidante que puede ser

valorizada en alimentación animal para reducir el uso de productos antimicrobianos en piensos. El orujo deshuesado graso es, por tanto, un subproducto agroindustrial que por sus características y disponibilidad estaría inicialmente indicado para la fabricación de piensos para las fases de cebo y gestación en ganado porcino, las de mayor volumen de fabricación, donde podrían tener un impacto importante sobre el coste de los piensos, el microbiota intestinal y el bienestar animal.

La producción de piensos para cebo de porcino en España ha crecido exponencialmente en los últimos años (MAPA, 2023). La producción de 2021 con respecto a 2020 supone una variación de un 5% siendo la producción de 13.569.820 Tm vs 12.921.390 Tm (MAPA, 2021). Las materias primas del grupo 1, cereales suponen un 68,2% del total de las materias primas usadas en España para piensos, gran parte de los cereales usados para piensos en España son de importación, para suplir el déficit de la producción nacional. La importación de cereales ha aumentado en un 14,8% en relación con la media de las últimas 5 campañas y un 17,92% respecto a la campaña anterior (MAPA, 2019).

Existen varias potencialidades y algunas limitaciones para el uso del orujo grasos en la alimentación porcina. Entre los orujos secos se comercializan diferentes productos (OS sin hueso, OS parcialmente desgrasado y OS desgrasado) en función de su contenido en materia grasa bruta (FEDNA, 2019). Los ensayos de valor nutricional in vivo han demostrado diferencias en la digestibilidad de la energía, siendo mayor en los orujos grasos ($0,479 \pm 0,040$) en comparación con los parcialmente desgrasados ($0,327 \pm 0,049$) (Ferrer et al., 2018). Aunque el contenido graso (hasta un 16-18 %) puede ser importante, la energía digestible para cerdos, determinada en ensayos in vivo con estos subproductos es moderada (2150 kcal/kg para el OS graso y 1168 kcal/kg para OS parcialmente desgrasados), debido a su alto contenido en fibra insoluble y lignina. El método de secado del alperujo añade variabilidad a la composición de estos subproductos y puede afectar a su valor nutricional.

En términos de rendimiento y aceptabilidad por parte de los cerdos, niveles de inclusión de 12% OS en los piensos de finalización de cebo no afectaron los rendimientos productivos en cebo y en matadero de los animales (Ferrer et al., 2020). Adicionalmente, la inclusión de OS incrementó el contenido de ácido oleico en la grasa subcutánea de los animales. Otros estudios demostraron también una buena aceptabilidad hasta niveles de inclusión del 15% en el caso de OS (Joven et al., 2014).

Por otra parte, los subproductos fibrosos en dietas para porcino pueden tener un efecto favorable sobre la reducción de la contaminación ambiental asociada a los purines. En este sentido, debe tenerse en cuenta que la legislación europea ejerce una presión cada vez mayor sobre la ganadería intensiva debido a sus efectos negativos sobre la calidad del aire y la atmósfera, la tierra y el suelo, el agua, y la biodiversidad. En España, el porcino es la segunda especie con mayor contribución a las emisiones de GEI dentro de la ganadería, siendo responsable del 14% de las emisiones dentro del sector agrario (MAPA, 2020). Estas emisiones proceden principalmente del almacenamiento de los purines. La relación entre la alimentación y las emisiones de gases de los purines se debe a que la composición de los piensos modifica el comportamiento digestivo del animal, incluyendo factores como el aprovechamiento de los nutrientes (digestibilidad) y la capacidad de fermentación de los diferentes ingredientes a nivel intestinal. Ambos factores modifican la composición y características del purín y, con ello, las emisiones de gases como el NH_3 o los gases con efecto invernadero (GEI) como el metano (CH_4) o el óxido nitroso (N_2O) (Canh et al., 1998; Jarret et al., 2011; Philippe and Nicks, 2015).

Por su fisiología, y a diferencia de los animales rumiantes, la inclusión de subproductos fibrosos en piensos de cerdos modifica directamente la composición de las deyecciones. Varios trabajos (Rigolot et al. 2010, Jarret et al., 2011; 2012) han demostrado un efecto de reducción de las emisiones de NH_3 del purín al aumentar el contenido en fibra fermentable de las dietas (Cahn et al., 1998), debido a un aumento de la proporción de N en heces (proteína microbiana) a la vez que se reduce la cantidad de N eliminado en orina (N mineral). En el caso de la fibra menos digestible como la del orujo, una reducción de la digestibilidad de la dieta también incrementa la presencia de N en heces reduciendo el N en orina (Becaccia et al., 2015). Además, podría haber una interacción entre el nivel de fibra y grasa en los piensos sobre la fermentación cecal. Otros factores como la cantidad de N ligado a fibra en los piensos reducen también, de manera clara, las emisiones de NH_3 del purín (Antezana et al., 2014).

En el caso de las emisiones de GEI, la información existente en la bibliografía sobre su relación con la composición de los piensos es variable. Algunos estudios no encuentran diferencias claras en la emisión potencial de CH_4 utilizando subproductos fibrosos como los DDGS o harina de colza (Jarret et al., 2011), y otros observan una reducción del potencial de emisión de CH_4 de los purines cuando se incorporan estos subproductos. Sin embargo, cuando estas emisiones se expresan por animal, el incremento en el volumen de las deyecciones que provoca la inclusión de fibra hace que la cantidad de CH_4 emitido por animal y día sea generalmente superior (Jarret et al., 2012; Torres-Pitarch et al., 2014).

A nivel de suelos, tanto la capacidad fertilizante del purín como las pérdidas esperadas en forma de emisiones de gases tras su aplicación dependen de su composición (Sommer et al., 2003). Los resultados obtenidos hasta el momento sugieren que los purines obtenidos de cerdos alimentados con piensos ricos en fibra son capaces también de reducir las emisiones de CH_4 y N_2O expresadas en CO_2 equivalentes (Sánchez-Martín et al., 2017).

Hipótesis de partida

La hipótesis de partida de este proyecto es que la utilización de subproductos fibrosos (orujo graso de aceituna) en la alimentación del ganado porcino puede incrementar la sostenibilidad económica y medioambiental de la producción de carne, a través de una sustitución parcial de los granos de cereales en los piensos sin afectar a los rendimientos productivos de los cerdos de cebo.

Por su composición (elevado contenido en grasa y moderado en proteína), el orujo graso puede aportar valores aceptables de energía y reemplazar parte los cereales en los piensos, cuya disponibilidad para alimentación animal se verá reducida en los próximos años. No obstante, la composición y valor nutritivo de los orujos grasos puede variar en función de la tecnología de secado del alperujo y del lugar de obtención de los subproductos en el proceso de secado convencional con trómel.

5. OBJETIVOS

En este contexto, el proyecto tiene como objetivos generales:

Objetivo 1. Caracterizar la composición fisicoquímica de diferentes tipos de orujo graso de aceituna en función del proceso de secado y su manejo en una planta de secado de alperujo, y valorar los factores que afectan a su digestibilidad in vitro para porcino.

Objetivo 2. Determinar el valor nutritivo para porcino de los dos subproductos de orujo graso obtenidos en el secado convencional del alperujo.

Objetivo 3. Calcular los niveles máximos de inclusión y el valor (€/tonelada) de distintos tipos de orujos en fórmulas comerciales de cebo para porcino.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se contó con un total 36 muestras de orujos grasos deshidratados procedentes de la misma planta industrial de secado (SEDEBISA-SACYR Industrial), localizada en Puente Genil (Córdoba). Las muestras fueron recogidas en tres campañas diferentes (2018/19; 2019/20, y 2020/2021).

Para el ensayo 1, un total de seis lotes de alperujo fresco procedentes de las dos primeras campañas de recogida fueron muestreados a la entrada al secadero de la planta, a tres tiempos diferentes de almacenamiento en las balsas (n=18). En la tabla 1 se muestran los tiempos de almacenamiento de los lotes de alperujo en las balsas según campaña de recogida.

Tabla 1. Campañas de recogida y duración del almacenamiento (días) en balsas de los lotes de alperujo muestreados para el ensayo 1.

<i>Lotes</i>	<i>Campañas</i>	<i>Días de almacenamiento</i>
1	2018/2019	55
2	2018/2019	112
3	2018/2019	180
4	2019/2020	45
5	2019/2020	90
6	2019/2020	135

Las muestras de alperujo fresco se trasladaron al laboratorio de la planta industrial donde se secaron hasta un contenido del 10% de humedad con vapor sobrecalentado (Sharp AX-SP300R, 120°C 4h) o con aire seco (estufa Dry-Big Selecta; 108°C 8h)., Las muestras de orujos grasos deshidratadas con el proceso convencional (trómel, 80-100°C 30') del alperujo se recogieron a la salida del secadero industrial. A continuación, todas las muestras de orujos grasos del ensayo fueron extractadas en el laboratorio de la planta industrial para conseguir los correspondientes orujillos de cada método de secado. Estas muestras (orujillos) también se analizaron en el laboratorio de Producción Animal de la UPM, pero los resultados de estos análisis no se incluyen en este trabajo.

Para el ensayo 2, se muestrearon por separado los dos subproductos del proceso industrial de secado por el método convencional (tromel): los orujos salida (OS) y los orujos ciclones (OC) de un total de 10 lotes de alperujo de dos campañas (2019/2020 y 2020/2021; n=5 lotes de orujos por campaña). Los tiempos de almacenamiento del alperujo en balsas fueron similares para las muestras de las dos campañas, 30, 60, 90, 120 y 150 días de almacenamiento (n=20).

En todas las muestras se registró la fecha de recogida y las condiciones del tipo de secado del alperujo. Las muestras fueron identificadas en el laboratorio de la UPM mediante una codificación que hacía referencia a su año de campaña y tipo de secado (Figura 8).



Figura 8: Muestras de orujo ciclón y orujo salida almacenadas de duquesas y codificadas con fecha de campaña y tipo de tratamiento.

6.1. Métodos analíticos

Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Unidad de Producción Animal del Departamento de Producción Agraria de la Universidad Politécnica de Madrid con los métodos de la AOAC (2020). Las muestras se molieron a 1 mm y a 0,5 mm (Figura 9) según las especificaciones de los distintos protocolos analíticos a seguir. Los análisis de todas las muestras se realizaron por triplicado.

- Materia seca (MS; 925.10), Cenizas (642.05), Proteína bruta, (990.03; Combustión, Dumas, Figura 10), Extracto etéreo (EE) y EE con hidrólisis ácida (EEh), utilizando éter de petróleo como solvente (991.36, 920.39) y los Azúcares (974.106).
- Fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD), lignina ácido detergente (LAD) secuencialmente utilizando el sistema de bolsas de filtrado (Ankom Technology, New York) y los protocolos propuestos por Mertens (2002), (AOAC 973.187) y Van Soest et al. (1991) con amilasa y sulfito de sodio en el análisis de la FND, y se expresaron libres de cenizas. En series paralelas sin añadir sulfito sódico, se determinó la proporción de N ligado a FND y FAD en los residuos de los análisis.
- Energía bruta mediante bomba calorimétrica (Figura 11) adiabática (Parr Instruments, Moline, IL).

Los análisis del contenido y perfil de ácidos grasos se realizaron en la Facultad de Veterinaria (UCM) mediante extracción y metilación directa (Sukhija y Palmquist, 1988) de las muestras liofilizadas para su análisis por cromatografía de gases (López-Bote et al., 1997).



Figura 9: Muestras con molienda 1 mm y 0,5mm



Figura 10: Equipo de combustión Dumas para el análisis de la proteína bruta..



Figura 11: Bomba calorimétrica para extracción de la energía bruta.

6.2. Análisis de digestibilidad *in vitro*

Para el análisis de la digestibilidad *in vitro* de la energía para ganado porcino se siguió el método propuesto por Boisen y Fernandez (1997). Las digestiones se realizaron en tandas con 8 muestras cada una, incluyendo cada muestra por triplicado y 2 blancos para corregir los valores de digestibilidad en cada tanda.

La metodología de Boisen y Fernández (1997) para la determinación de la digestibilidad de la materia seca (DIV MS) y la materia orgánica (DIV MO) consta de tres pasos, que permiten estimar de manera independiente la proporción de MS y MO digeridas en cada paso. El primer paso simula la digestión en estómago, el segundo paso la digestión en el intestino delgado, y el tercer paso la digestión en ciego. En este trabajo se analizaron los residuos resultantes del proceso *in vitro* de digestión en dos pasos (hasta íleon) y en tres pasos (total). Los resultados incluidos en este trabajo corresponden sólo a la metodología de tres pasos.

6.2.1. Reactivos de la metodología *in vitro*

6.2.1.1. Soluciones buffer

○ Buffer fosfato 1 (0,1M pH=6):

Este procedimiento se realiza por mezcla de volúmenes.

- 17,7 g de di-Sodio Hidrogenofosfato dihidrato ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (MW 177.0 g/mol) (Figura 12). Agitar y enrasar a 1L con agua destilada extrayendo previamente el agitador magnético.
- 15.6 g Sodio dihidrogenofosfato dihidrato ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (MW 156.01 g/mol). Agitar y enrasar a 1L con agua destilada extrayendo previamente el agitador magnético.
- En un vaso de 1 L mezclar **61,5 mL** de la disolución de Na_2HPO_4 con **438.5 mL** de la disolución NaH_2PO_4 y añadir agua destilada hasta volumen aprox. de 800 – 900 mL.
- Ajustar pH a 6 con NaOH 1M o HCl 1M con la disolución en agitación.
- Trasvasar a un matraz de 1 L, añadir agua destilada para enrasar.

Es muy importante la temperatura ($T^a = 25\text{-}30^\circ \text{C}$), ya que afecta significativamente a la lectura del pH.

○ Buffer 2 (0,2M pH=6,8):

Este procedimiento se realiza por mezcla de volúmenes.

- 35.4 g de di-Sodio Hidrogenofosfato dihidrato ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Figura 12). Agitar y enrasar a 1L con agua destilada extrayendo previamente el agitador magnético.
- 31.2 g Sodio dihidrogenofosfato dihidrato ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Merck 1.06342). Agitar y enrasar a 1L con agua destilada extrayendo previamente el agitador magnético.
- En un vaso de 1 L mezclar **245 mL** de la disolución de Na_2HPO_4 con **255 mL** de la disolución NaH_2PO_4
- Ajustar pH a 6 con NaOH 1M o HCl 1M de la disolución en agitación.
- Trasvasar a un matraz de 1 L, añadir agua destilada y enrasar.

Es muy importante la temperatura ($T^a = 25\text{-}30^\circ \text{C}$), ya que afecta significativamente a la lectura del pH.

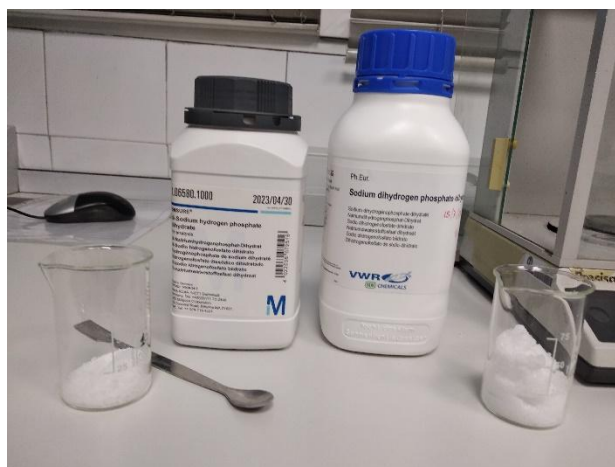


Figura 12: Reactivos principales de los Buffers, di-Sodio Hidrogenofosfato dihidrato y Sodio dihidrogenofosfato dihidrato.

6.2.1.2. Otros reactivos

- **Ácido Clorhídrico (HCl 0,2M):** (Panreac 131020)
 - Pesar 16,56 mL de HCl al 37%.
 - En matraz de 1 L, diluir en 1 L de agua destilada.
- **Ácido Clorhídrico (HCl 1M):** (Panreac 131020)
 - Pesar 82,81 mL de HCl al 37%.

- En matraz de 1 L, diluir en 1 L de agua destilada.
- **Hidróxido sódico (0,6M):** (Panreac 141687)
 - Pesar 24,74 g de NaOH en vaso de precipitados 1 L y disolver en agua destilada (aprox. 800 mL).
 - Diluir en 1 L de agua destilada.
- **Hidróxido sódico (1M):** (Panreac 141687)
 - Pesar 41,24 g de NaOH.
 - Diluir en 1 L de agua destilada.
- **Cloranfenicol** (0,5 g Chloroamphenicol/100 mL etanol) (guardar en nevera protegido de la luz):
 -
 - 0,5 g de Cloranfenicol (Sigma C0378).
 - 100 mL de EtOH.
- **EDTA (0,2 M)**, tarda en disolverse 1,5-2 horas:
 - Pesar 58,448 g de EDTA (Panreac 131026).
 - Diluirlos en vaso 1 L con 800 mL de agua destilada añadiendo la sal lentamente (difícil dilución) y agitar 20-30'. **Aplicar calor para favorecer la disolución.**
 - Ajustar el pH a 7-7.5 aproximadamente con NaOH (escamas) 10-20 g poco a poco, esperando a que se disuelvan antes de añadir más.
 - **Esperar que se enfríe (20-25°)** para ajustar el pH a 8 con NaOH 1M en un volumen de aprox. 800-900 mL. Finalmente, trasvasar a matraz de 1L y enrasar a 1L.
- **Ácido acético (30%):**
 - 300 mL de ácido acético glacial (Panreac 141008).
 - Diluirlo en agua destilada y enrasar en un matraz aforado de 1 L.
- **Phenylmethanesulfonil fluoride:**
 - Pesar 1 g de phenylmethanesulfonil fluoride (Sigma 329-98-6).
 - Diluir en aprox 80 mL de metanol (Panreac 141091) y enrasar en matraz de 100 mL

6.2.1.3. Complejos enzimáticos

- **Pepsina Sigma no. P-7012 2,5 unit/g.** La pepsina es la principal enzima proteolítica producida en el estómago. Digiere las proteínas mediante la hidrólisis de los enlaces peptídicos interiores, con escisión preferente de residuos hidrofóbicos y aromáticos en las posiciones P1 y P1'.
- **Pancreatina Sigma no. P-1750 4xUSP.** La pancreatina contiene componentes enzimáticos que incluyen tripsina, amilasa y lipasa, ribonucleasa y proteasa, producidas por las células exocrinas del páncreas porcino. Esta combinación de enzimas le permite hidrolizar las proteínas, el almidón y las grasas.
- **Viscozyme Sigma Aldrich.** Complejo multienzimático que contiene una amplia gama de carbohidrasas, incluyendo arabinasa, celulasa, β -glucanasa, hemicelulasa y xilanasa. Este preparado se genera a partir de una cepa del grupo de mohos del género *Aspergillus*, capaz de degradar la fibra fermentable, incluyendo polisacáridos no amiláceos, además de liberar el material ligado a fibra favoreciendo de ese modo la disponibilidad de otros nutrientes atrapados por la fibra y reduciendo la viscosidad.

6.2.2. Procedimiento de digestibilidad *in vitro*

Antes de comenzar el proceso, hay que encender la estufa de incubación a 40°C horas para que la temperatura se estabilice. Si la habitación donde se realiza el ensayo está muy fría, hay que encender la calefacción a 25°C. Es recomendable que los buffers, antes de empezar el procedimiento, se introduzcan en el baño para que estén a una temperatura entre 25 y 30°C.

6.2.2.1. Primer paso

- Para la realización del primer paso se procede a pesar 0,5 g de muestra con una precisión $\pm 0,001$ g, molida previamente a un tamaño de partícula de 0,5 mm.
- La muestra es introducida en un matraz erlenmeyer de una capacidad de 100 mL con un agitador magnético en su interior.
- Añadimos 25 mL de buffer A, precalentado previamente en el baño, y 10 mL de HCl 0,2M, manteniendo en agitación las muestras (Figura 12) para proceder al ajuste de su pH a 2 con el equipo de medición de pH (Figura 13), mediante la adición de HCl 1M o NaOH 1M.
- Añadimos 1 mL de una solución de Pepsina (25 mg/1 mL de agua destilada) y 0,5 mL de cloranfenicol para evitar el crecimiento de bacterias durante la incubación. La solución enzimática de pepsina se prepara justo antes de empezar el análisis.
- Finalmente introducimos las muestras en el incubador (Figura 14) a una temperatura de 39°C en agitación constante (Figura 15), durante un periodo de 2 horas.

6.2.2.2. Segundo paso

Una vez concluida la primera incubación:

- Incorporamos a los erlenmeyers 10 mL de buffer B y 5 mL de NaOH 0,6M, manteniendo en agitación las muestras para llevar el pH a 6,8 ajustando con HCl 1M o NaOH 1M.
- Añadimos 1 mL de una solución de Pancreatina (100 mg/mL de agua destilada) preparada justo antes de aplicarla dado que su composición es inestable. La solución de pancreatina debe ser centrifugada a 2500 rpm durante 10 minutos para descartar el residuo no disuelto. Finalmente introducimos las muestras en el incubador a 39°C, con agitación constante y una duración de 4 horas.

6.2.2.3. Tercer paso

Tras finalizar la segunda incubación:

- Añadimos 10 mL de EDTA 0,2 M y ajustamos el pH con ácido acético 20% cuidadosamente porque baja con rapidez.
- Añadimos 0,5 mL de Viscozyme, e introducimos los matraces en el incubador.
- Se procede con la última incubación, con las mismas características de los pasos previos, pero con una duración de 18 horas.

6.2.2.4. Filtración

Hay que usar "*Fritted crucibles*": El día anterior a la filtración, incorporar 0,4 g (± 0.05 g) de Celite en un crisol limpio de porosidad 2 (anotar peso celite). Introducir crisol+celite en el horno a 550° C por 4 horas (a las 4 horas se apaga el horno, esperar 30 minutos y sacar al desecador, esperar 1 hora hasta que se enfríen).

1. Filtrar la mezcla de los Erlenmeyer en los crisoles de filtrado con ayuda de vacío (Figura 16) :

- Realizar **lavados con agua destilada caliente** para arrastrar toda la muestra del matraz.
- Dos lavados de **10 mL etanol** (96%)
- Dos lavados de **10 mL acetona** (99,5%)

2. Introducir los crisoles con la muestra filtrada (Figura 17) en la **estufa a 103° C** toda la noche. Posteriormente desecador 30' y **anotar peso** para determinar **DIV_MS**

3. Introducir los crisoles con la muestra seca y pesada en el **horno mufla a 550° C** (Figura 18) para calcinar la muestra durante 4 horas (a las 4 horas se apaga el horno, esperar 30 minutos y sacar al desecador donde hay que esperar 1 hora hasta que enfríen). Posteriormente **anotar peso** para determinar **DIV_MO**



Figura 12: Muestras situadas en la plataforma agitadora para ajuste de pH y proceder a la incubación.



Figura 13: Medidor de pH con electrodo fino.



Figura 14: Incubador

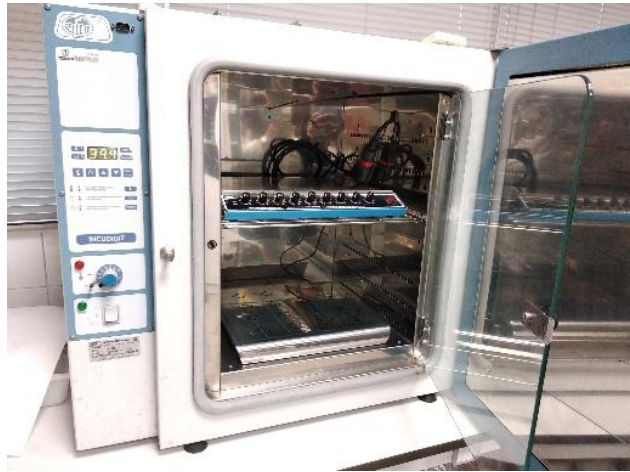


Figura 15: Incubador con plataformas de agitación en su interior.



Figura 16: Muestras filtrando con vacío



Figura 17: Muestras filtradas en crisoles tras las incubaciones.



Figura 18: Crisoles introducidos en horno (550°C) para calcinar las muestras y obtener la digestibilidad in vitro de la MO

6.3. Formulación de piensos de cebo para cerdos con orujos

Para llevar a cabo este estudio, se formularon tres piensos de cebo, uno basal con cereales y soja, y otros dos alternativos en los que se ofrecieron los dos tipos de orujos, ciclón (OC) y salida (OS).

La formulación de piensos se realizó con un software comercial (NC-SingleMix; FORMAT International) que calcula la composición a coste mínimo (€/t pienso) mediante programación lineal. Para ello es necesario implementar en el programa las materias primas disponibles para la fabricación y sus precios, las restricciones en cuanto a límites máximos de incorporación de dichas materias primas, y los niveles mínimos y máximos de nutrientes en cada pienso.

En la Tabla 2 se presentan las materias primas disponibles para la formulación de los piensos y los precios considerados. Para los cereales y harina de soja se trata de los precios medios en 2022 publicados en los Informes de Precios de piensos del MAPA (2023). Para el resto de las materias primas y minerales se han considerado los precios medios para el año 2022 en las lonjas de Barcelona, Tarragona y Bilbao (MIAVIT, 2023). En el caso de los AA's y dado que existe mucha variabilidad de precios según empresas, además del listado de precios de MIAVIT (2023) se ha consultado con fabricantes de piensos comerciales y se han comparado los resultados con los precios medios para Europa publicados por Feed Additive Price (2023).

Tabla 2. Listado de materias primas empleadas en la formulación y sus precios.

Materias primas disponibles	COSTE (€/t)
CEBADA	240
MAIZ NACIONAL	252
TRIGO BLANDO	259
SALVADO Y TERCERILLAS	195,5
HARINA DE COLZA 00 SOLVENTES	394
HARINA DE SOJA 47	500
GRASA MEZCLA	1000
ACEITE DE SOJA	1028
CARBONATO CALCICO	27
FOSFATO MONOCALCICO	1485
SAL MARINA 98	85
DL-METIONINA	2540
L-LISINA 50	1800
L-TREONINA	1795
L-TRIPTOFANO	8450
PREMIX 0,3%	2500

En la Tabla 3 se muestran los rangos de valores máximos, mínimos o libre acceso para cada una de las materias primas siguiendo las recomendaciones de Tablas FEDNA (2019), que se implementaron en el programa NC-Single-Mix.

Tabla 3. Límites máximos y mínimos (%) de las materias primas en formulación de piensos para el cebo.

MATERIA PRIMA	MÍNIMO	MÁXIMO
CEBADA	.	.
MAIZ NACIONAL	.	40
TRIGO BLANDO	.	45
SALVADO Y TERCERILLAS	.	12
HARINA DE COLZA 00	.	12
HARINA DE SOJA 47	.	.
GRASA MEZCLA	.	4
ACEITE DE SOJA	.	6
PREMIX 0,3%	0,3	0,3

Finalmente, en la Tabla 4 se indican los valores fijados para los niveles de nutrientes de los piensos, donde se especifican los rangos tanto máximos como mínimos para cada nutriente. Señalar también que el premix comercial incorporaba fitasas.

Tabla 4. Recomendaciones para la formulación de piensos para cerdos en crecimiento-cebo. Normas generales.

Nutriente	CRECIMIENTO (60-100 Kg)	
	Min	Max
ENERGIA METABOLIZABLE, kcal/kg	3180	.
ENERGIA NETA, Kcal/kg	2400	.
EXTRACTO ETereo, %	4	8
FIBRA BRUTA, %	3,5	6,3
FIBRA NEUTRO DETERGENTE, %	11	15,5
ALMIDON, %	33	.
PROTEINA BRUTA, %	.	.
CALCIO, %	0,65	0,8
FOSFORO TOTAL, %	0,43	.
FOSFORO DIGESTIBLE, %	0,25	.
MAGNESIO, %	400	.
SODIO, %	0,17	0,2
COLORO, %	0,14	.
POTASIO, %	0,25	1,05
ACIDO LINOLEICO, %	.	1,50
LISINA TOTAL %	0,90	.
METIONINA TOTAL %	0,28	.
METIONINA + CISTEINA TOTAL %	0,54	.
TREONINA TOTAL %	0,58	.
TRIPTÓFANO TOTAL %	0,17	.
VALINA TOTAL %	0,61	.
ISOLEUCINA TOTAL %	0,49	.
LISINA DIGEST, STD %	0,77	.
METIONINA DIGEST, STD %	0,24	.
METIONINA + CISTEÍNA DIGEST, STD %	0,46	.
TREONINA DIGEST, STD %	0,50	.
TRIPTÓFANO DIGEST, STD %	0,15	.
VALINA DIGEST, STD %	0,52	.
ISOLEUCINA DIGEST, STD %	0,42	.

6.4. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el programa SAS (2008). En el ensayo 1, los resultados se analizaron con un análisis de varianza (ANOVA) completamente al azar con el tipo de secado como efecto principal y el tiempo de almacenamiento del alperujo en balsas como covariable. Para la predicción de la digestibilidad in vitro se realizó un procedimiento de regresión stepwise utilizando como variables independientes los valores de composición química de las muestras. En el ensayo 2, los efectos principales considerados en el ANOVA fueron el tipo de orujo, la campaña de recogida y su interacción. Los resultados se presentan como medias de mínimos cuadrados.

7. RESULTADOS

7.1. EFECTO DEL TIPO DE SECADO SOBRE LA COMPOSICIÓN Y VALOR NUTRICIONAL DEL ORUJO GRASO PARA PORCINO.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de composición química y digestibilidad enzimática in vitro de los orujos grasos deshidratados con las tres tecnologías: secado convencional (tromel), con aire caliente a altas temperaturas, y con vapor sobresaturado.

Tabla 5. Efecto de la tecnología de secado del alperujo sobre la composición química y digestibilidad in vitro de los orujos grasos.

Composición (%MS)	Tipo de secado			ESM ¹ (n=6)	P<
	TROMEL	AIRE	VAPOR		
Materia seca, MS %	93,4	91,6	90,6	1,60	0,446
Cenizas	6,11	7,43	7,35	0,61	0,280
Materia orgánica	93,9	92,6	92,6	0,61	0,280
Energía bruta, kcal/kg MS	5.255	5.273	5.343	66,1	0,594
Extracto etéreo con hidrólisis ácida, EEh	10,5	11,7	12,0	0,54	0,151
Fibra Neutro Detergente, FND	54,8	51,9	54,0	3,02	0,813
Fibra Ácido Detergente, FAD	39,4	36,9	38,8	2,11	0,716
Lignina ácido detergente	19,2	17,9	19,9	1,16	0,524
Hemicelulosas	15,4	15,1	15,2	1,24	0,981
Celulosa	20,2	18,9	18,9	1,23	0,711
Proteína bruta, PB	9,61	8,90	10,4	1,10	0,627
PB-FND	6,76	6,31	6,81	0,72	0,629
PB-FAD	4,20	4,30	4,55	0,46	0,844
Azúcares	6,44	4,08	4,36	1,05	0,272
Residuo ²	12,5	16,0	11,8	2,79	0,583
Digestibilidad in vitro (%)					
Materia seca	50,7	50,9	53,5	0,808	0,160
Materia orgánica	52,8	52,3	55,0	0,794	0,144

¹ Error estándar de la media

² Calculado como diferencia para un 100% MS = (100 – Cenizas – EEh – PB – FND – Azúcares)

El tipo de secado del alperujo no afectó ($P>0,15$) a la concentración de materia seca (MS; 91,8%), cenizas (6,96 %MS), fibras neutro y ácido detergente (53,7 y 38,5 %MS), lignina (19,1 %MS), proteína (9,75 %MS) y azúcares (4,98 %MS) de los orujos. De igual forma, la concentración de energía bruta de los orujos no fue diferente ($P>0,59$) entre tecnologías de secado, y el valor obtenido (5.295 kcal/kg MS) fue elevado debido al alto contenido en grasa (11,4 %MS) y lignina (19,1 %MS) de los orujos, dado que ambos componentes tienen un alto poder calorífico.

Durante el secado del alperujo se generan gradientes térmicos que favorecen las interacciones entre proteína y fibra. Sin embargo, la diferencia en las temperaturas aplicadas y la duración del proceso entre tecnologías de secado no afectó a la proporción de proteína ligada a la fracción fibra (PB-FND y PB-FAD). Los valores obtenidos fueron elevados en todos los casos, encontrándose un 70 y un 45% de la proteína total de los orujos en los residuos de la FND y FAD, respectivamente. La alta proporción de proteína ligada a la fibra son debidos a que el calor provoca la desnaturalización de las proteínas, lo que implica el despliegue de su estructura tridimensional y la exposición de grupos reactivos que pueden interactuar con los componentes de la fibra. Además, la desnaturalización de las proteínas puede favorecer la formación de enlaces con los polifenoles presentes en el alperujo (ej. taninos) y en la fracción fibra, afectando a la solubilidad de la proteína y a la capacidad de absorción de agua de la fibra, y modificando sus propiedades físicas y químicas (Molina-Alcaide y Yañez-Ruiz, 2008).

Con independencia del tipo de secado ($P>0,50$), en la pared celular de los orujos la fracción mayoritaria fue la celulosa (36 %MS), seguida de las hemicelulosas (28%) y la lignina (19,1 %MS). La fracción residual (13,2 %MS), estimada como diferencia con el resto de los componentes analizados sobre MS, tuvo valores moderados. Esta fracción residual de los orujos corresponde a pectinas con alto poder gelificante que pueden ser fermentadas por la flora microbiana digestiva, y compuestos lipídicos no saponificables de bajo valor nutricional (terpenos, pigmentos, carotenos, etc) no extraídos con el solvente utilizado (ej, éter de petróleo) para el análisis de la fracción grasa (Rubio-Senent et al., 2015).

Por último, se estudió también si las diferencias en temperaturas y tiempos de duración entre tecnologías de secado del alperujo podían modificar la digestibilidad in vitro de la MS (DIV_MS) de los orujos deshidratados para ganado porcino. La DIV MS (51,9%) y la DIV MO (53,4%) no se vieron afectadas por el tipo de secado empleado y los valores obtenidos (Tabla 1) fueron bajos como consecuencia del elevado contenido en fibra lignificada del orujo.

Como la grasa es el componente de mayor importancia nutricional y valor económico de los orujos, se realizó también el análisis de esta fracción mediante extracción y metilación directa, lo que permitió cuantificar el total de la fracción saponificable compuesta por los ácidos grasos (AG) y el perfil de AG de los orujos. En la Tabla 6 se muestran los resultados.

Tabla 6. Efecto de la tecnología de secado del alperujo sobre la fracción saponificable y el perfil de ácidos grasos de los orujos grasos.

Composición (g/kg)	Tipo de secado			ESM (n=6)	P <
	TROMEL	AIRE	VAPOR		
AG totales, AGT	101b	112b	121a	4,87	0,035
C14:0	0,342	0,482	0,458	0,112	0,657
C16:0	12,6	12,5	14,1	1,36	0,608
C16:1 n-9	0,132	0,163	0,168	0,011	0,115
C16:1 n-7	0,997	0,880	1,094	0,193	0,742
C17:0	1,49	1,87	1,85	0,296	0,591
C17:1	0,119	0,145	0,164	0,010	0,022
C18:0	2,89	3,38	3,48	0,262	0,255
C18:1 n-9	66,5b	76,4b	81,1a	3,82	0,045
C18:1 n-7	1,56	1,33	1,80	0,278	0,499
C18:2 n-6	11,9b	12,8b	14,0a	0,541	0,038
C18:3 n:3	1,00b	1,14b	1,25a	0,055	0,023
C18:4 n-3	0,419	0,349	0,300	0,048	0,214
C20:1 n-9	0,991	0,903	0,771	0,160	0,596
Saturados	17,3	18,2	19,9	1,51	0,436
Monoinsaturados	70,3b	79,8b	85,1a	3,80	0,035
Poliinsaturados	13,3b	14,3b	15,5a	0,59	0,043

La suma total de AG fue significativamente mayor ($P < 0,05$) en los orujos secados con vapor sobrecalentado que en los secados con aire caliente y tromel. Estas diferencias para el total de AG saponificables del orujo entre tecnologías de secado se debieron a una disminución ($P < 0,05$) en los orujos secados con aire caliente y tromel de los AG monoinsaturados (como el ácido oleico C18:1, que puede representar hasta un 80% de los AG aceite de orujo) y poliinsaturados (como el linoleico C18:2) respecto a los secados con vapor sobresaturado, mientras que los AG saturados no variaron entre tipos de secado.

El método tradicional de secado del alperujo en secaderos rotativos tipo trómel, donde se hace circular una corriente de gases calientes a altas temperaturas (400-800°C), presenta un elevado riesgo de oxidación de los AG debido a la presencia de oxígeno libre. El secado con aire caliente, aunque es menos agresivo que el trómel porque se realiza a temperaturas más moderadas (aproximadamente 108-110°C) tiene una duración mayor (8-10 h), por lo que el orujo húmedo queda igualmente expuesto al oxígeno lo que puede provocar la oxidación de los AG insaturados. Por el contrario, en el secado con vapor

sobrecalentado se utiliza vapor de agua calentado por encima de su punto de ebullición en ausencia de aire, creando un ambiente con mínima presencia de oxígeno que reduce significativamente las reacciones de oxidación. Los AG saturados son más resistentes a la oxidación porque no tienen dobles enlaces, y por tanto, no se observaron variaciones significativas entre los diferentes métodos de secado.

Estos resultados pueden tener importantes implicaciones tanto para la industria del aceite de orujo de oliva como para la alimentación animal, ya que demuestran que la elección del método de secado del alperujo puede influir directamente en la calidad nutricional del orujo graso obtenido. La disminución de la oxidación de los AG insaturados con el secado con vapor sobrecalentado del alperujo es especialmente relevante, considerando que los AG insaturados constituyen más del 80% de la fracción saponificable del aceite de orujo de oliva utilizado en alimentación humana. En relación con la alimentación animal, Ferrer et al. (2020) demostraron que la calidad de la grasa de la canal mejoraba significativamente en cerdos que recibían piensos con un 12% de orujo graso de aceituna, aumentando su contenido en AG monoinsaturados, especialmente palmitoleico, heptadecanoico, oleico y vaccenico, en comparación con cerdos que recibían una dieta control basada en cereales y harina de soja. Por lo tanto, el mayor contenido en AG insaturados del orujo secado con vapor sobrecalentado puede aumentar también su valor nutritivo para la alimentación del porcino.

Como no existieron diferencias por el tipo de secado y se utilizaron lotes de alperujo recogidos a diferentes tiempos de almacenamiento en la orujera, la composición química del alperujo fue diferente según la fecha de muestreo, debido a la fermentación que se produce durante su almacenamiento en las balsas (Marcos et al., 2019). Por tanto, se procedió a estimar mediante una regresión paso a paso los principales factores que determinan la DIV MS en los orujos deshidratados. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimación de la digestibilidad in vitro de la materia seca¹ de los orujos grasos.

$$DIVMS = 104,0 \pm 9,95 - 0,94 \pm 0,18 \mathbf{FND}$$

$$R^2 = 0,67; P < 0,001$$

$$DIVMS = 82,6 \pm 11,6 - 0,97 \pm 0,15 \mathbf{FND} + 0,20 \pm 0,07 \mathbf{AGT}$$

$$R^2 = 0,79; P < 0,001$$

$$DIVMS = 61,7 \pm 12,9 - 0,73 \pm 0,16 \mathbf{FND} + 0,24 \pm 0,06 \mathbf{AGT} + 0,83 \pm 0,34 \mathbf{Azúcares}$$

$$R^2 = 0,87; P < 0,001$$

El factor más importante que afectó a la digestibilidad de los orujos para porcino fue la concentración de FND ($R^2=0,669$; $P<0,001$). Los cerdos tienen una capacidad limitada para fermentar la fibra en el intestino grueso, y el alto grado de lignificación de la FND del orujo impide su degradación por la flora microbiana digestiva. La estimación de la DIV MS mejoró incluyendo la concentración total de AG ($R^2=0,791$; $P<0,001$) y de azúcares ($R^2=0,866$; $P<0,001$) en la ecuación de predicción. Ambos componentes se digieren y absorben fácilmente a nivel del intestino delgado, por lo que una concentración más alta en el alperujo de estos nutrientes implica también una mejora significativa del valor nutricional para porcino de los orujos grasos obtenidos.

En resumen, el secado con vapor sobrecalentado del alperujo aumentó la concentración de AG insaturados del orujo graso respecto al secado convencional con tromel o aire caliente, probablemente por disminuir la oxidación de estos AG debido a la ausencia de oxígeno libre. Sin embargo, la tecnología de secado del alperujo no modificó el resto de los parámetros de composición química del orujo, ni tampoco la DIV MS y DIV MO para porcino.

7.2. COMPOSICIÓN Y VALOR NUTRITIVO DE LOS ORUJOS GRASOS TIPO CICLON Y SALIDA PARA LA ALIMENTACIÓN DEL PORCINO

La segunda parte de este trabajo consistió en el análisis de los dos subproductos obtenidos durante el secado del alperujo con la tecnología convencional de secado con tromel. Los orujos tipo OC y OS presentaron diferencias en sus propiedades físicas que hacían muy fácil su identificación visual, siendo las muestras de OC de una coloración más oscura que las de OS (Figura 19)



Figura 19: Muestras de orujo salida (OS) y orujo ciclón (OC)

Estas diferencias entre los dos tipos de orujos estuvieron asociadas a la ausencia de partículas de hueso en las muestras de OC, ya que este subproducto es la fracción pulverulenta retenida en los ciclones de extracción de gases y concentra las partículas menos densas y más ligeras. Por el contrario, en las muestras de OS las partículas de hueso, por ser más pesadas, quedan retenidas en la masa del alperujo durante el secado, y a su vez, aportan una coloración más clara al subproducto OS final. Además, la filtración de los residuos del tercer paso de la digestibilidad *in vitro* de las muestras de OC resultó ser muy lenta, probablemente debido a la ausencia de estas partículas de huesos y a la solubilización de la fracción soluble de la fibra (pectinas) que formó una masa gelatinosa que hizo difícil la filtración.

En relación con las diferencias en composición química de los dos subproductos (OC y OS), la campaña de recogida del alperujo y su interacción con el tipo de orujo no influyeron significativamente ($P > 0,15$) sobre las variables estudiadas, por lo cual fueron excluidos del modelo en el análisis estadístico. En la Tabla 7 se presentan los resultados de composición química de los dos orujos estudiados.

Los dos subproductos presentaron un contenido similar en MS y cenizas. Por lo tanto, no hubo diferencias en el contenido en MO potencialmente digestible para porcino (92,1 %MS) entre los orujos tipo OC y OS. Sin embargo, los dos parámetros (FND y grasa)

identificados como principales determinantes de la digestibilidad de la MS para porcino en el primer ensayo fueron diferentes entre OC y OS, y el contenido en azúcares fue similar.

Tabla 7. Composición química y digestibilidad in vitro de los orujos tipo ciclón y salida.

Composición (%MS)	CICLÓN	SALIDA	ESM ¹ (n=10)	P<
Materia seca, MS %	94,1	92,5	0,398	0,096
Cenizas	8,33	7,44	0,406	0,122
Materia orgánica	85,8	85,0	0,659	0,429
Energía bruta, kcal/kg MS	5.607	5.337	44,8	<0,001
Extracto etéreo con hidrólisis ácida, EEh	16,4	12,3	0,545	<0,001
Fibra bruta	40,5	38,4	1,49	<0,001
Fibra Neutro Detergente, FND	41,8	50,9	1,55	<0,001
Fibra Ácido Detergente, FAD	29,9	36,4	0,960	<0,001
Lignina ácido detergente, LAD	14,6	19,2	0,534	0,002
Hemicelulosas	11,9	14,6	0,678	0,013
Celulosa	15,3	17,2	0,566	0,001
Proteína bruta, PB	10,1	8,64	0,616	0,114
PB-FND	7,12	6,11	0,549	0,208
PB-FAD	4,80	4,01	0,296	0,078
Azúcares	9,52	9,38	2,06	0,960
Residuo ²	14,3	12,3	1,49	0,344
Digestibilidad in vitro (%)				
Materia seca	63,7	54,5	1,35	<0,001
Materia orgánica	61,7	52,5	1,50	<0,001

¹ Error estándar de la media

² Calculado como diferencia para un 100% MS = (100 – Cenizas – EEh – PB – FND – Azúcares)

Las fracciones fibrosas (FND, FAD y LAD) fueron alrededor de un 22% mayores (P<0,05) en los orujos tipo OS que en OC, lo que probablemente está relacionado con la presencia de partículas de huesos en los OS. De hecho, el grado de lignificación de la fibra calculado como el porcentaje de LAD en la FND, también tendió (P=0,053) a ser mayor en OS respecto a OC (37,7% y 34,9%, ESM=0,01, respectivamente). Además, la fracción grasa, más ligera, que se concentra en la fracción pulverulenta de los ciclones, fue un 33% mayor (P<0,001) en los OC comparada con los OS.

La ausencia de diferencias entre OC y OS para los azúcares puede explicarse porque las muestras de OC y OS procedían de los mismos lotes de alperujo y la concentración de azúcares de los orujos depende principalmente de la fermentación que haya ocurrido en el alperujo durante el almacenamiento (Marcos et al., 2019).

Ambos subproductos (OC y OS) presentaron un contenido en PB bajo (9,33 %MS) y de escasa importancia práctica para la alimentación del porcino, ya que al encontrarse la PB unida a la fibra (70,1% PB-FND), su digestibilidad es muy baja (33-37% para la pulpa de aceituna en Tablas FEDNA 2019). Sin embargo, se observó que en OC la proporción de PB-FAD tendió ($P < 0,10$) a ser mayor que en OS, probablemente debido a que las partículas de polvo de OC están sometidas a temperaturas más elevadas de secado que la fracción sólida del OS, al estar en contacto directo con la corriente de gases calientes durante el secado en tromel.

Para la fracción residual de la MO (ej. fibra soluble) no hubo diferencias entre OC y OS (13,3 %MS) porque el tiempo de almacenamiento y la posible fermentación de componentes solubles en los lotes de alperujo fue el mismo para las muestras de OC y OS.

Como consecuencia del contenido más bajo en FND y mayor de grasa de los orujos tipo OC, la digestibilidad *in vitro* de la MS y MO fue un 18% mayor ($P < 0,001$) en OC que en OS. Por otra parte, la DIV MS media para los orujos tipo OS en este ensayo fue algo mayor al valor obtenido para el orujo secado con tromel en el primer ensayo (54,5 y 50,9 %, respectivamente), y esta diferencia probablemente sea debida al mayor contenido en azúcares de las muestras de OS en el segundo ensayo.

A partir de los valores de DIV MO de las muestras de OC y OS, se calculó la digestibilidad de la Energía bruta (dEB) (Tabla 8) para porcino utilizando la ecuación propuesta por Boisen y Fernández (1997), y se estimó el contenido en Energía Digestible (ED). Para ello se multiplicaron los valores de dEB calculados, por los contenidos de Energía Bruta (EB) analizados en cada muestra. Los resultados se presentan en la tabla 5.

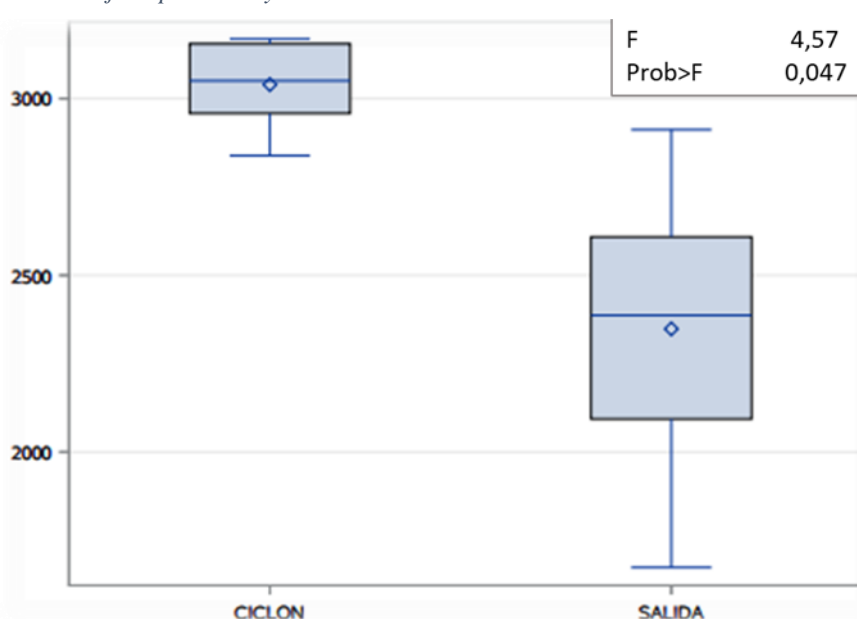
La dEB fue un 23% mayor en los orujos tipo OC que en los OS, pero la ED de los OC fue un 30% mayor a la de los OS, porque los orujos tipo OC tienen más grasa y, por tanto, mayor contenido en EB que los OS. Los valores de ED obtenidos fueron mayores a los de Tablas FEDNA (2.400 kcal ED/kg MS para el orujo de aceituna integral con un 16,2 %EE, y 2.011 kcal ED/kg MS para el orujo de aceituna parcialmente desengrasada con un 11,9 %EE). Sin embargo, fueron próximos a los obtenidos por Ferrer et al. (2018) en ensayos de digestibilidad *in vivo* con cerdos de cebo (2872 kcal/kg MS y 2.190 kcal/kg MS) utilizando orujos de composición química similar a los de este trabajo.

Tabla 8. Digestibilidad in vitro de la energía calculada de los orujos tipo ciclón y salida (Boisen y Fernández, 1997).

	CICLÓN	SALIDA	ESM ¹ (n=10)	P<
Digestibilidad in vitro Energía bruta (%)	54,2	44,0	1,66	<0,001
Energía Digestible (kcal/kg MS)	3.040	2.348	85,2	<0,001

Finalmente, para comparar la variación en el contenido en ED de las muestras de OC y OS se realizó la prueba de Levene de homogeneidad de varianzas. Los resultados se presentan en un gráfico de cajas en la Figura 20 e indicaron una variabilidad menor ($P=0,046$) de las concentraciones de ED para porcino en los orujos tipo OC ($DS= \pm 126$ kcal/kg MS) que en los OS (± 360 kcal/kg MS).

Figura 20: Variación en los contenidos de Energía digestible (Kcal/ kg MS) de los orujos tipo ciclón y salida.



¹Error estándar de la media (n=10) y nivel de significación (P<),

En resumen, las diferencias en composición química muestran que OC y OS son dos subproductos diferentes, ambos ricos en energía (aproximadamente un 65 y 85% de la ED para porcino de la cebada, respectivamente; Tablas FEDNA, 2019). Por lo tanto, el orujo tipo OC tiene un valor energético mayor para la alimentación de cerdos cebo que el OS. Esto, unido a su menor variabilidad, justifica el interés de un uso diferenciado de los orujos tipo OC y OS en la alimentación del ganado porcino.

7.3. FORMULACIÓN DE PIENSOS PARA PORCINO DE CEBO CON ORUJOS TIPO CICLÓN Y SALIDA.

La valorización de los orujos de aceituna mediante su incorporación en la formulación de piensos para el ganado porcino tiene gran interés, porque su alto contenido en grasa rica en oléico puede mejorar la calidad de la grasa en la carne de cerdo, y porque permitiría reducir la alta dependencia de la importación de cereales para la alimentación animal en España. Trabajos previos (Ferrer et al., 2017; 2020) han demostrado que niveles de hasta un 20% de orujo grasos de aceituna en piensos de cebo para cerdos permiten sustituir parcialmente a los cereales en las fórmulas, sin afectar a los rendimientos productivos de los animales.

Para estimar los niveles máximos de incorporación y precios de interés de los orujos tipo OC y OS en la formulación de dietas de cebo para cerdos, en este ensayo se formularon tres piensos, uno convencional con cereales (T1) y otros dos alternativos, ofreciendo OC (T2) u OS (T3) como materias primas a coste 0.

En primer lugar, se calcularon las matrices de los orujos grasos tipo OC y OS para incluirlas en el programa de formulación. Para ello se utilizaron los valores medios de composición química y la DIVMO de los orujos tipo OC y OS analizados en el ensayo 2 para calcular la ED (kcal/kg) de las muestras con la ecuación propuesta por Boisen y Fernández (1997). A continuación, los valores de Energía Metabolizable (EM) y Energía Neta (EN) de las muestras de OC y OS se calcularon utilizando las ecuaciones propuestas por Noblet et al. (2003) para cerdos en crecimiento

$$EM/ED = 100,7 - 0,021 PB \text{ (g/kg MS)} - 0,005 FND \text{ (g/kg MS)}$$

$$EM \text{ (kcal/kg)} = ED \text{ (kcal/kg)} \times EM/ED$$

$$EN \text{ (kcal/kg)} = 0,73 \times EM \text{ (kcal/kg)} + 13,1 \times EE \text{ (\%)} + 3,7 \times \text{Almidón (\%)} \\ - 6,7 \times PB \text{ (\%)} - 9,7 \times FB \text{ (\%)}$$

Las matrices de los orujos tipo OC y OS, expresadas sobre producto fresco, que se incluyeron en el programa de formulación se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Matrices de formulación de los orujos grasos tipo ciclón y salida.

Composición (%)	CICLÓN	SALIDA
Materia seca, MS	94,1	92,5
Cenizas	7,84	6,88
Energía Digestible, kcal/kg	2.860	2.172
Energía Metabolizable, kcal/kg	2.760	2.085
Energía Neta, kcal/kg	1.935	1.363
Extracto etéreo	15,4	11,4
Fibra bruta	38,1	35,5
Fibra Neutro Detergente, FND	39,3	471
Fibra Ácido Detergente, FAD	28,1	33,7
Lignina ácido detergente, LAD	13,7	17,8
Proteína bruta, PB	9,50	7,99
Almidón	0	0
Azúcares	8,96	8,68
Calcio, %	1,00	1,00
Fósforo, %	0,20	0,20
Fósforo digestible, %	0,07	0,07
Sodio	0,09	0,09
Cloro	0,50	0,50
Lisina	0,66	0,56
Metionina	0,14	0,12
Metionina+Cistina	0,25	0,21
Treonina	0,41	0,35
Triptófano	-	-
Isoleucina	0,47	0,40
Valina	1,08	0,92

Los resultados de la formulación de piensos F1 (control), F2 (con OC) y F3 (con OS) se presentan en las Tablas 10.

Tabla 10: Composición de las fórmulas de piensos para cebo de porcino con cereales (F1), orujo ciclón (F2) u orujo graso salida (F3).

MATERIAS PRIMAS (%)	F1	F2	F3
Cebada 9,6 pb	32,7	21,5	24,8
Maíz nacional	40,0	40,0	40,0
Salvado y tercerillas 23%alm	12,0	-	-
Harina de soja 47	11,1	13,7	14,1
Orujo ciclón	-	19,6	-
Orujo salida	-	-	15,03
Grasa mezcla	1,52	2,80	3,61
Carbonato cálcico	1,14	0,66	0,76
Fosfato monocálcico	0,50	0,93	0,89
Cloruro sódico marino 98	0,37	0,35	0,36
DI metionina	0,03	0,03	0,03
L-lisina 50	0,32	0,14	0,15
L-treonina	0,04	-	0,001
L-triptófano	-	0,004	-
Premix 0,3%	0,30	0,30	0,30
NUTRIENTES (%)			
Materia seca	87,9	89,3	88,9
Cenizas	4,56	5,32	4,98
Proteína bruta	13,2	13,4	13,2
Extracto etéreo	4,00	7,74	7,30
FND	14,6	16,5	16,5
FAD	4,84	8,55	8,36
Almidón	45,7	36,8	38,6
Energía metabolizable (kcal/kg)	3153	3150	3150
Energía neta (kcal/kg)	2400	2446	2418

Los tres piensos fueron iso-nutritivos, es decir, aportaron los mismos niveles de energía neta y de aminoácidos esenciales para satisfacer las necesidades de los cerdos en cebo. Sin embargo, el nivel de grasa añadida en los piensos F2 y F3 aumentó para compensar el menor valor de ED de los orujos por su alto contenido en fibra.

Por otro lado, los niveles máximos de incorporación de orujos tipo OC y OS fueron moderados (19,6% para el OC y 15,0% para el OS), no superando el nivel máximo recomendado del 20%, por lo que no se prevén efectos negativos sobre los rendimientos productivos de los cerdos de acuerdo con Ferrer et al. (2017, 2020).

A estos niveles máximos de incorporación de los orujos, el precio de interés fue de 42,3 €/t para el orujo tipo OC y de 36,4 €/t para el orujo tipo OS. Además, el coste de los piensos F2 y F3 que incluían orujos OC y OS a dichos precios fue menor que el coste del pienso F1 a base de cereales (Tabla 11).

Tabla 11. Coste de formulación (€/t) de los piensos formulados.

	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
<i>COSTE €/t</i>	222,1	207,9	218,0

La disminución del coste de los piensos con orujo (F2 y F3) se debió a que el nivel de incorporación de la cebada se redujo un 34% en el pienso F2 con orujo tipo OC, y un 24% en el pienso F3 con orujo tipo OS. Si bien estos resultados son válidos en las condiciones de precios de las materias primas disponibles utilizadas en la formulación, pueden variar si dichas condiciones cambian. En cualquier caso, demuestran que es posible sustituir hasta un 30% de los cereales incluidos en los piensos de cerdos, por subproductos agroindustriales como el orujo graso, reduciendo el coste de la alimentación en la fase de cebo.

En resumen, la incorporación de OC y OS en fórmulas de piensos para porcino de cebo permite reducir la cantidad de cereales utilizada en la fabricación de piensos, consiguiendo de ese modo aumentar la rentabilidad y sostenibilidad medioambiental de la producción de carne de cerdo en España.

8. CONCLUSIONES

El análisis fisicoquímico evidenció que la tecnología de secado afecta principalmente a la fracción lipídica del orujo graso. El secado con vapor sobrecalentado preservó un mayor contenido de ácidos grasos insaturados (C18:1 y C18:2), debido a la mínima exposición al oxígeno, sin alterar significativamente la digestibilidad in vitro de la materia seca. Estos resultados sugieren un mayor valor biológico y menor riesgo de oxidación lipídica en este tipo de orujo.

Los subproductos del secado convencional presentan características diferenciales: el orujo ciclón mostró menor contenido en fibra detergente y mayor extracto etéreo, lo que se traduce en una mayor digestibilidad de la energía (dEB). Esto le otorga un mejor perfil nutricional para su uso en cerdos en fase de cebo, siendo especialmente útil en dietas con restricción de materias primas energéticas tradicionales.

Mediante formulación lineal se determinaron niveles óptimos de inclusión del orujo de hasta el 15-20% sin comprometer la energía neta ni los perfiles de aminoácidos esenciales. El orujo ciclón permitió una mayor eficiencia económica (€/t) en la dieta final, con un coste marginal de sustitución favorable frente a materias primas convencionales. Su uso apoya estrategias de sostenibilidad mediante la valorización de subproductos oleícolas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis, 17th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, EEUU.
- APHA 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21st ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- Base de datos de Feedipedia. 2014. <http://www.feedipedia.org>
- Bampidis V.A., Robinson P.H. 2006. Citrus by-products as ruminant feeds: A review. *Animal Feed Science and Technology* 128: 175-217.
- Bernard, J.K. 2010. Using by-product feeds. Bulletin 1320. University of Georgia.
- Base de datos de Feedipedia. 2014. <http://www.feedipedia.org>
- Boisen, S., Fernández, J.A. 1995. Prediction of the apparent ileal digestibility of protein and aminoacids in feedstuffs and feed mixtures for pigs by *in vitro* analyses. *Anim. Feed Sci. Techn.* 51: 29-43.
- Boisen, S., Fernández, J.A. 1997. Prediction of the total tract digestibility of energy in feedstuffs and pig diets by *in vitro* analyses. *Anim. Feed Sci. Techn.* 68: 277-286.
- Boisen, S. 2003. A new concept for feed evaluation based on standardised digestible amino acids and potential physiological energy of nutrient fractions in pig feeds. En: Souffrant, W.-B. (Ed.), *Progress in Research on Energy and Protein Metabolism and Nutrition*, pp. 129–132.
- Canh, T.T., Verstegen, M.W.A., Aarnink, A.J.A., Schrama, J.W. 1997. Influence of dietary factors on nitrogen partitioning and composition of urine and faeces of fattening pigs. *Journal of Animal Science* 75: 700-706.
- Cahn, T.T., Sutton, A.L., Aarnik, A.J.A., Verstegen, A.W.A., Scrama, J.W. and Bakker, G.C.M. 1998. Dietary carbohydrates alter the fecal composition and pH and the ammonia emission from slurry of growing pigs. *Journal of Animal Science* 76: 1887-1895.
- Cerisuelo A., Castelló L., Moset V., Martínez M., Hernández P., Piquer O., Gómez E., Gasa J., Lainez M. 2010a. The inclusion of ensiled citrus pulp in diets for growing pigs: Effects on voluntary intake, growth performance, gut microbiology and meat quality. *Livestock Science* 134: 180-182.
- Cerisuelo A., Iranzo B., Piquer O., Fernández C., Pascual J.J., Ródenas L., Cervera C., Hernández P., Moset, V. 2010b. Uso de la pulpa cítrica ensilada en raciones para cerdos de cebo: Valor nutritivo y efectos sobre la salud intestinal y la calidad de la canal. Seminario Internacional Porcicultura Tropical 2010, La Habana, 25-28 Mayo.
- Cerisuelo, A., Lainez, M., Torres, A., Moset, V. 2012. Increasing energy and lysine in diets for growing-finishing pigs in hot environmental conditions: Consequences on performance, digestibility, slurry composition and gas (carbon dioxide, ammonia and methane) emission. *Journal of Animal Science* 90: 1489-1498.
- Cerisuelo, A., Ferrer, P., Beccaccia, A., Calvet, S., Cambra-López, M., Estellés, F., Antezana, W., García-Rebollar, P., De Blas, C. 2014. Fibrous agroindustrial by-products in pig diets: Effects on nutrient balance and gas emission. 65th Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP), Copenhagen, 25-28 Agosto.
- Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. and Chhetri, N. 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4: 287-291.

- De Blas, J. C., Ferrer, P., Rodríguez, C. A., Cerisuelo, A., García-Rebollar, P., Calvet, S., Farias, C., 2018. Nutritive value of citrus co-products in rabbit feeding. *World Rabbit Science*, 26, 7.
- Del Prado, A., Mas, K., Pardo, G., Gallejones, P. 2013. Modelling the interactions between C and N farm balances and GHG emissions from confinement dairy farms in northern Spain. *Science of the Total Environment* 465: 156-165.
- FAO, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org>
- FEDNA, 2010. Tablas Fedna de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos. 3ª ed. C. de Blas, G.G. Mateos, P. García-Rebollar (eds), pp. 502.
- FEDNA, 2013. Necesidades nutricionales para ganado porcino: Normas FEDNA. C. De Blas, J. Gasa, GG Mateos (eds). Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal, Madrid, Spain, 109 pp.
- FEDNA, 2017. Tablas FEDNA de composición de alimentos y valor nutritivo. <http://www.fundacionfedna.org/tablas-fedna-composicion-alimentos-valor-nutritivo>
- FEFAC, 2016. Vision on animal feed industry: A knowledge driven, reliable partner of a competitive livestock sector. European Feed Manufacturers' Federation (FEFAC). 2016. <http://www.fefac.eu/files/67546.pdf>
- FEDNA, 2019. Tablas Fedna de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos. C. de Blas, P. García-Rebollar, M- Gorrachategui y G.G. Mateos. Ed. Fundación FEDNA. 604 pp
- Ferrer, P., Calvet, S., García-Rebollar, P., de Blas, C., Bonet, J., Coma, J., Cerisuelo, A. 2017. Olive cake in pigs feeding: effects on performance, carcass and meat quality and gas emission. 2nd World Conference on Innovative Animal Nutrition and Feeding (WIANF), Budapest, October 18–20, 2017.
- Ferrer, P., García-Rebollar, P., Cerisuelo, A., Ibáñez, M.A., Rodríguez, C.A., Calvet, S., De Blas, C. 2018. Nutritional value of crude and partially defatted olive cake in finishing pigs and effects on nitrogen balance and gaseous emissions. *Animal Feed Science and Technology*, 236:131–140.
- Ferrer, P., Calvet, S., García-Rebollar, P., de Blas, C., Jiménez-Belenguer, A.I, Hernández, P., Piquer, O., Cerisuelo, A, (2020) Partially defatted olive cake in finishing pig diets: implications on performance, faecal microbiota, carcass quality, slurry composition and gas emission. *Animal*, 14: 426-434,
- García-Rebollar, P., de Blas, C., Mateos, G. G. 2015. XXXI Curso Especialización FEDNA: Avances Nutrición y Alimentación Animal. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal, Madrid, Spain.
- Jarret, G., Cozannet, P., Martinez, J., Dourmad, J.Y., 2011a. Effect of different quality wheat dried distiller's grain solubles (DDGS) in pig diets on composition of excreta and methane production from faeces and slurry. *Livest. Sci.* 140, 275-282.
- Jarret, G., Martinez, J., Dourmad, J-Y. 2011b. Effect of biofuel co-products in pig diets on the excretory patterns of N and C and on the subsequent ammonia and methane emissions from pig effluent. *Animal*, 5(4):622-631.
- Jarret, G., Cerisuelo, A., Peu, P., Martinez, J., Dourmad, J-Y. 2012 Impact of pig diets with different fibre contents on the composition of excreta and their gaseous emission and anaerobic digestion. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 160: 51-58.
- Joven, M., Pintos, E., Latorre, M.A., Suárez-Belloch, J., Guada, J.A. 2014. Effect of replacing barley by increasing levels of olive cake in the diet of finishing pigs Growth

- performances, digestibility, carcass, meat and fat quality. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 185–193.
- MAPAMA. 2017. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Servicio general de estadísticas. 2017. Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *How to Feed the World in 2050*; FAO: Rome, Italy, 2009a. 15.
- MAPAMA. 2018. El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales indicadores económicos 2017. Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- MAPAMA2021. https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/alimentacion-animal/acceso-publico/produccion_de_piensos_y_comercio_exterior.aspx Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- MAPAMA. 2023. <https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/alimentacion-animal/acceso-publico/precios.aspx> Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Marcos, C.N.; de Evan, T.; García-Rebollar, P.; de Blas, C.; Carro, M.D. (2019) Influence of storage time and processing on chemical composition and in vitro ruminal fermentation of olive cake. *Journal Animal Physiology and Animal Nutrition* 00:1–10.
- Molina Alcaide, E. y Yañez Ruíz, DR, (2008). **Potential use of olive by-products in ruminant feeding**: A review. *Animal Feed Science Technology*, 147: 247-264
- Noblet, J., van Milgen, J. 2004 Energy value of pig feeds: effect of pig body weight and energy evaluation system. *Journal of Animal Science*;82 E-Suppl:E229-238.
- Smith, J., Sones, K., Grace, D., MacMillan, S., Tarawali, S., Herrero, M. 2013. Beyond milk, meat, and eggs: role of livestock in food and nutrition security. *Animal Frontiers* 3 (1): 6-13.
- Sommer, S.G., Générumont, S., Cellier, P. Hutchings, N.J., Olesen, J.E., Morvan, T. 2003. Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field. *European Journal of Agronomy* 19: 465-486.
- .Van Soest, J.P., Robertson, J.B., Lewis, B.A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74, 3583–3597.
- Zijlstra, R.T., Beltranena, E. 2013. Swine convert co-products from food and biofuel industries into animal protein for food. *Animal Frontiers* 3 (2): 48-53.