



**POLITÉCNICA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA**  
**AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**  
**GRADO EN CIENCIAS AGRARIAS Y BIOECONOMÍA**

*Ensilados de tomate de destrío para la alimentación  
de rumiantes.*

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Autor/a: Noelia López González**

**Tutor/a: José María Arroyo Martínez y Trinidad de  
Evan Rozada**

**Septiembre de 2025**



## **AGRADECIMIENTOS**

Las pruebas experimentales llevadas a cabo en este trabajo forman parte del proyecto PID2021-124648OB-C21 financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”.

Agradecer a mis tutores, el Dr. José María Arroyo Martínez y la Dra. Trinidad de Evan Rozada por su gran apoyo y darme la oportunidad de formar parte de este proyecto. Además, agradecerle a la Dra. María Dolores Carro por su colaboración siendo siempre de gran ayuda.

Por último, a mis padres y mi hermano, quienes me apoyan y animan siempre a conseguir todo aquello que me propongo.

## Índice de Figuras

- Figura 4.1** Bolsas selladas al vacío de 0,5 kg de los ensilados preparados. (PA: paja y tomate, C: capota y tomate). 14
- Figura 4.2** Manómetro digital para medir la presión de gas en los ensayos de fermentación in vitro. 19
- Figura 5.1** Evolución del contenido de fibra neutro detergente (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 22
- Figura 5.2** Evolución del contenido de fibra ácido detergente (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 23
- Figura 5.3** Evolución del contenido de cenizas (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 23
- Figura 5.4** Evolución del contenido de extracto etéreo (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 24
- Figura 5.5** Evolución del contenido de proteína bruta (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 24
- Figura 5.6** Evolución del contenido de azúcares (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 25
- Figura 5.7** Evolución del contenido de materia seca (%) entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 26
- Figura 5.8** Evolución del contenido de pH entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 26
- Figura 5.9** Evolución del contenido de N-NH<sub>3</sub> (g/kg MS) entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 27

**Figura 5.10** Evolución del contenido de ácido láctico (g/kg MS) entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). 27

**Figura 1.11** Evaluación fermentativa de los alimentos y los ensilados durante 144h. 33

## Índice de Tablas

**Tabla 4.1** Composición química (% de la materia seca, excepto la materia seca) de los subproductos empleados en la elaboración de los ensilados. 13

**Tabla 5.1** Evolución temporal de las concentraciones (g/kg MS) de ácidos grasos volátiles en ensilados estudiados. 30

**Tabla 5.2** Parámetros fermentativos de la incubación in vitro 24h de los silos elaborados en la apertura final. 31

**Tabla 5.3** Parámetros de cinética de los alimentos y sus ensilados. 34

**Tabla 5.4** Comparación de la energía metabolizable de distintos ensilados con los estudiados. 35

**Tabla 5.5** Alimentos, composición química y contenido energético de dietas de ovino de leche: control y con inclusión (10 y 20%) de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra. 36

**Tabla 5.6** Precios y ahorro de dietas de ovino de leche: control y con inclusión (10 y 20%) de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra. 37

## Lista de acrónimos y abreviaturas

**Ac/Pr** Acético/propiónico

**AGV** Ácidos Grasos Volátiles

**BAL** Bacterias Ácido-Lácticas

**c** Ritmo fraccional de producción de gas

**EE** Extracto Etéreo

**EEM** Error estándar de la media

**ETP** Ensilado de tomate de destrío con paja de cereal

**ETC** Ensilado de tomate de destrío con capota de almendra

**FAD** Fibra ácido detergente

**FAOSTAT** Base de datos corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación

**FEDNA** Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal

**FND** Fibra neutro detergente

**GEI** Gases de efecto invernadero

**Lag** Tiempo hasta que comienza la producción de gas

**LETC0** dieta control para ovino lechero, con 0% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra

**LETC10** dieta para ovino lechero, con 10% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra

**LETC20** dieta para ovino lechero, con 20% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra

**MAPA** Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

**MS** Materia seca

**N** Nitrógeno

**N-NH<sub>3</sub>** Nitrógeno amoniacal

**PB** Proteína bruta

**PPG** Producción potencial de gas

**RMPG** Ritmo medio de producción de gas

**UE** Unión Europea

# ÍNDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1.-INTRODUCCIÓN .....	3
2.- REVISIÓN BIBIOGRÁFICA.....	4
2.1 Tomate de destrío.....	4
2.2 Paja de cereal .....	5
2.3 Capota de almendra .....	6
2.4 El ensilado .....	7
2.4.1 Fases del ensilado .....	8
2.4.2 Factores que influyen en la calidad del ensilado .....	8
2.4.3 Ensilados utilizados hoy en día .....	9
2.4.4 Ensilaje de distintos subproductos agroindustriales .....	10
2.4.5 Estudios previos.....	10
3.- OBJETIVOS .....	12
3.1 Objetivo general .....	12
3.2 Objetivos específicos.....	12
4.- MATERIAL Y MÉTODOS .....	13
4.1. Diseño experimental.....	13
4.1.1 Muestras de tomate de destrío, paja de cereal y capota de almendra .....	13
4.1.2 Preparación de los ensilados.....	14
4.2. Estudio de la evolución del ensilado .....	15
4.3. Análisis de la composición química de los ensilados .....	16
4.4. Incubaciones in vitro: producción de ácidos grasos volátiles y cinética de fermentación .....	18
4.4.1 Cinéticas de producción de gas .....	18
4.4.2 Determinación de los parámetros fermentativos .....	19

4.4.3 Cálculos y Análisis estadísticos.....	19
4.6. Valoración económica y ambiental.....	21
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
5.1 Valor nutricional de los alimentos.....	22
5.2. Valor nutricional de los ensilados.....	22
5.3. Evolución de las características de los ensilados.....	26
5.4. Fermentación ruminal in vitro de los ensilados.....	30
5.4.1 Incubación in vitro de 24h.....	30
5.4.2 Cinética de la fermentación ruminal de los ensilados.....	33
5.6. Implicaciones prácticas, económicas y sostenibilidad.....	35
5.6.1 Comparación de los ensilados estudiados con otros utilizados en otras dietas.....	35
5.6.2 Evaluación económica del ETC.....	36
5.6.3 Enfoque sostenible de los ensilados.....	37
6.- CONCLUSIONES.....	39
7.- BIBLIOGRAFÍA.....	40

## RESUMEN

En este trabajo se estudió el aprovechamiento de subproductos agroindustriales en la alimentación de rumiantes a través de la elaboración de ensilados de tomate de destrío en combinación con paja de cereal (ETP) o con capota de almendra (ETC). El objetivo fue evaluar la viabilidad técnica y nutricional del ensilaje, evaluando su composición química, la evolución del proceso de ensilaje, así como la extensión y ritmo de degradación ruminal y los parámetros de fermentación ruminal en ensayos in vitro.

Durante el proceso de conservación, se observó una acidificación adecuada en ambos ensilados. En el ETP el pH descendió a 4,19, reflejando una fermentación activa. En el ETC, el descenso fue más moderado, a 4,49, ya que partía de un pH inicial más bajo, lo que permitió un control de la proteólisis y evitó pérdidas excesivas de proteína bruta. En las incubaciones in vitro a 24 h, la producción de gas fue de 106 ml/g de materia seca (MS) para ETP y de 128 ml/g MS para ETC, lo que sugiere una mayor degradabilidad ruminal de ETC. Los valores de pH al final de la incubación se mantuvieron neutros (7,15 y 7,18), mientras que las concentraciones de N-NH<sub>3</sub> fueron bajas, de 0,630 mmol/L en ETP y 0,572 mmol/L en ETC. En cuanto al perfil de ácido grasos volátiles, ETC mostró una mayor producción total que ETP (4,63 vs. 5,44 mmol/g MS), de acuerdo con su mayor producción de gas, y un aumento en la proporción de propiónico. Por su parte, ETP presentó valores más altos de acético y una relación acético/propiónico superior (2,97 vs. 2,35). La cinética de fermentación mostró diferencias notables entre los ensilados. El ETP alcanzó una producción potencial de gas (PPG) de 219 ml/g MS. En contraste, el ETC presentó un PPG menor (184 ml/g MS). La energía metabolizable fue de 7,37 MJ/kg MS para ETP y 8,21 MJ/kg MS para ETC, situándose ambas en valores intermedios frente a ensilados convencionales.

En conclusión, los resultados obtenidos evidencian que la inclusión de estos subproductos permite obtener ensilados estables y con un valor nutritivo adecuado para rumiantes. El ETP mostró un perfil más fibroso, mientras que el ETC destacó por su mayor rapidez de fermentación. Ambos representan una alternativa viable para diversificar las fuentes de forraje, reducir el desperdicio agroalimentario y fomentar sistemas ganaderos más sostenibles dentro de una economía circular. Además, el análisis económico indicó que la sustitución parcial de alfalfa por ETC puede resultar rentable siempre que el ahorro supere los 3 €/t, lo que refuerza su potencial como recurso forrajero competitivo.

## ABSTRACT

This study evaluated the use of agro-industrial by-products in ruminant feeding through the production of silages made from undesirable tomatoes combined with cereal straw (TSS) or almond hulls (TAHS). The objective was to assess their technical and nutritional feasibility by characterizing their chemical composition, the fermentative evolution during ensiling, and their performance in 24-hour in vitro fermentations and gas production kinetics.

During the preservation process, both silages showed adequate acidification. In TSS, the pH decreased to 4.19, reflecting active fermentation. In TAHS, the decrease was more moderate, reaching 4.49, due to its lower initial pH, which allowed faster control of proteolysis and minimized losses of crude protein. In 24-hour in vitro incubations, gas production was 106 ml/g DM for TSS and 128 ml/g of dry matter (DM) for TAHS, indicating higher ruminal degradability in TAHS. Final pH values remained near neutral (7.15 and 7.18), while N-NH<sub>3</sub> concentrations were 0.630 mmol/L in TSS and 0.572 mmol/L in TAHS. Regarding the volatile fatty acid profile, TAHS showed higher total production (5.44 vs. 4.63 mmol/g DM) and an increased proportion of propionic acid. TSS, on the other hand, exhibited higher acetic acid and a greater acetate-to-propionate ratio (2.97 vs. 2.35). Fermentation kinetics revealed notable differences between the silages. TSS achieved a potential gas production (PGP) of 219 ml/g DM, while TAHS showed a lower PGP (184 ml/g DM). Metabolizable energy was 7.37 MJ/kg DM for TSS and 8.21 MJ/kg DM for TAHS, placing both in intermediate values compared to conventional silages.

In conclusion, the results demonstrate that the inclusion of these by-products produces stable silages with adequate nutritive value for ruminants. TSS exhibited a more fibrous profile, whereas TAHS was characterized by faster fermentation. Both represent a viable alternative to diversify forage sources, reduce agro-food waste, and promote more sustainable livestock systems under a circular economy approach. Furthermore, the economic analysis indicated that the partial replacement of alfalfa with TAHS can be considered profitable as long as the savings exceed €3/t, highlighting its potential as a competitive forage resource.

## 1.-INTRODUCCIÓN

En regiones mediterráneas como España, el cultivo de tomate constituye una de las principales producciones hortícolas, generando un volumen significativo de frutos no destinados al consumo humano debido a defectos visuales, daños mecánicos o excedentes de cosecha, representando entre el 3% y el 10% de la producción total (Marcos et al., 2019). Este “tomate de destrío” mantiene un perfil nutritivo de interés, pero su aprovechamiento suele verse limitado a usos de bajo valor añadido, como el compostaje o la eliminación, lo que implica pérdidas económicas, y un desaprovechamiento de recursos (FAO, 2013). La eliminación del tomate de destrío supone la liberación de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ), además, su alta humedad favorecerá la lixiviación en el lugar de descomposición.

Sin embargo, existen alternativas como la extracción de compuestos bioactivos (carotenoides como el licopeno) o su procesamiento industrial, produciendo jugos o separando sus componentes (pieles, semillas, etc.) los cuales requieren de inversiones en tecnología, infraestructuras y logística que restringen su implementación a gran escala (European Commission, 2018). En cambio, su incorporación en la alimentación animal, especialmente para rumiantes, ofrece una vía más inmediata, asequible y coherente con los principios de la bioeconomía circular, contribuyendo a reducir el desperdicio agroalimentario y la dependencia de insumos externos (Makkar, 2016).

En este contexto, debido a su alto contenido en humedad y los elevados costes para secarlo, el ensilado, se presenta como una de las técnicas más adecuadas para la conservación del tomate de destrío, ya que permite estabilizar materiales con alta humedad, preservar su valor nutritivo y asegurar su disponibilidad durante todo el año (Kung et al., 2018). Además, su combinación con subproductos fibrosos locales de bajo coste, como la capota de almendra o la paja de cereal, posibilita la obtención de forrajes alternativos que no compiten con cultivos destinados al consumo humano (Dupuis & Álvarez, 2015; Callejo, 2018).

Es por ello que, el presente trabajo evalúa la viabilidad y el valor nutricional del ensilaje de tomate de destrío mezclado con subproductos fibrosos, como capota de almendra o paja de cereal, planteando su uso en la alimentación de rumiantes como la estrategia más efectiva y realista para revalorizar este recurso y convertirlo en un ingrediente funcional dentro de sistemas ganaderos más sostenibles.

## **2.- REVISIÓN BIBIOGRÁFICA**

### **2.1 Tomate de destrío**

El tomate (*Solanum lycopersicum L.*) es uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial y un alimento básico en muchas dietas. En España, la producción anual de tomate supera los 4 millones de toneladas, posicionando al país entre los principales productores europeos (MAPA, 2023). Las regiones que concentran la mayor producción de tomate son Extremadura, Andalucía, Murcia y la Comunidad Valenciana, debido a sus condiciones climáticas favorables y a la disponibilidad de recursos hídricos adecuados (MAPA, 2023).

La mayoría del tomate producido se destina a la industria de transformación agroalimentaria, que incluye la fabricación de productos como salsas, purés, concentrados y conservas (Chávez-Mendoza & Sánchez, 2017). Este proceso genera importantes volúmenes de subproductos y residuos, principalmente en forma de tomates de destrío y orujo de tomate, que pueden representar entre el 3% y el 10% del total procesado (Marcos et al., 2019; Álvarez et al., 2020).

El tomate de destrío se refiere a aquellos frutos que no cumplen con los estándares comerciales debido a imperfecciones externas, sobremaduración o deformidades, por lo que son descartados para la venta directa. En España, la producción de este subproducto asciende a más de 150.000 toneladas anuales, concentrándose en las mismas regiones donde la producción de tomate es mayor: Extremadura, Andalucía, Murcia y la Comunidad Valenciana (MAPA, 2020). La elevada humedad del tomate de destrío (superior al 90%) dificulta su conservación y transporte, lo que limita su aprovechamiento directo en la alimentación animal o industrial (Chávez-Mendoza & Sánchez, 2017).

El aprovechamiento de este subproducto es un reto y una oportunidad para mejorar la sostenibilidad del sector hortofrutícola y ganadero. Por su alto contenido en agua y azúcares, el tomate de destrío es susceptible a fermentaciones no deseadas si no se maneja correctamente, dificultando su conservación (Álvarez et al., 2020). Sin embargo, su contenido nutricional, que incluye fibra, azúcares y compuestos bioactivos como licopeno y otros carotenoides, lo convierte en un recurso valioso para la alimentación animal y otros usos industriales (Correddu et al., 2023).

En consecuencia, se han explorado técnicas como el ensilado para conservar y valorizar el tomate de destrío. La combinación con materiales secos y fibrosos, como paja de cereal o capota de almendra, ayuda a mejorar las condiciones fermentativas y la estabilidad del ensilado, facilitando su uso como alimento para rumiantes (FAO, 2011; Álvarez et al., 2015). La proximidad geográfica de las zonas productoras de tomate de destrío y estos materiales fibrosos favorece la logística y el desarrollo de una economía circular regional, donde los residuos agroindustriales se transforman en recursos nutritivos (European Commission, 2018; MAPA, 2022).

## **2.2 Paja de cereal**

La paja de cereal es un subproducto agrícola generado durante la cosecha de cereales como trigo, cebada, avena y centeno. En España, la producción de cereales supera los 20 millones de toneladas anuales, siendo Castilla y León, Castilla-La Mancha, Aragón y Andalucía las principales comunidades autónomas productoras (MAPA, 2019). Como consecuencia directa de esta producción, se genera una gran cantidad de paja, que tradicionalmente se ha utilizado como alimento y cama para animales o como combustible rural, pero en los últimos años está ganando interés como materia prima en otros procesos industriales (FAO, 2011).

La paja está compuesta principalmente por estructuras fibrosas de baja digestibilidad, con un alto contenido en lignocelulosa y un bajo aporte energético y proteico. Aun así, su gran disponibilidad y bajo coste la convierte en un recurso valioso para ser usado como material estructural en mezclas ensiladas, donde contribuye a aumentar el contenido de materia seca (MS), mejorar la consistencia física, equilibrar la humedad del silo y favorecer un mejor ambiente para la fermentación láctica, evitando la proliferación de microorganismos indeseables y la formación de lixiviados que afectan negativamente la calidad del producto final (FAO, 2011).

Entre los beneficios de la paja de cereal destaca su abundancia regional, especialmente en las zonas con alta producción cerealista, lo que facilita su uso local y reduce los costes de transporte. Además, su uso como ingrediente en ensilados contribuye a la valorización de residuos agrícolas, integrándose en estrategias de economía circular que buscan minimizar el desperdicio y maximizar el uso eficiente de los recursos (European Commission, 2018). No obstante, un inconveniente importante es su bajo valor nutritivo, principalmente debido a su alta fibra muy lignificada y baja digestibilidad, que limita su

aporte energético y proteico en la alimentación animal (INRA, 2018). Por ello, suele utilizarse complementariamente con otros ingredientes más ricos en nutrientes para equilibrar la dieta de los rumiantes.

En el contexto del presente trabajo, la paja de cereal actúa como un complemento ideal para el tomate de destrío, proporcionando una mejor compactación y manejo del ensilado, actuando como absorbente de los efluentes y aumentando la MS de la mezcla ensilada, favoreciendo una mejor conservación y calidad fermentativa (FAO, 2011). La cercanía geográfica entre las zonas de producción de ambos subproductos facilita su aprovechamiento conjunto, dando lugar a modelos productivos sostenibles y regionalizados.

### **2.3 Capota de almendra**

La capota de almendra (mesocarpio) es la piel verde exterior que envuelve la almendra dentro del fruto del almendro. Este subproducto se genera durante el proceso de descascarillado y selección de la almendra para consumo humano o uso industrial. España es el segundo mayor productor mundial de almendra, con una producción anual que supera las 300.000 toneladas (MAPA,2022). Las principales zonas de producción se concentran en Murcia, Andalucía y la Comunidad Valenciana, regiones con una larga tradición en el cultivo de este fruto seco (MAPA, 2022).

La capota, que hasta hace poco era considerada un residuo de bajo valor, ha comenzado a ser objeto de interés debido a su composición química, que incluye un alto porcentaje de azúcares solubles y un contenido considerable en fibra, además de lípidos y compuestos bioactivos como polifenoles y antioxidantes (Dupuis & Álvarez, 2015; Marcos et al., 2019). Estas características indican que la capota puede aportar beneficios nutricionales y funcionales cuando se utiliza en la alimentación animal, especialmente para rumiantes que pueden fermentar la fibra contenida en esta materia (Dupuis & Álvarez, 2015; Marcos et al., 2019).

La producción anual de capota en las regiones mencionadas puede superar las 50.000 toneladas, una cantidad significativa que actualmente se desaprovecha o se utiliza como biomasa para combustión. Su incorporación en mezclas para ensilado con tomate de destrío ofrece una doble ventaja: por un lado, contribuye a incrementar el contenido de MS y asegura un adecuado aporte de fibra efectiva si se mantiene un tamaño de partícula que favorezca la rumia, lo que ayuda a prevenir problemas de fermentación indeseada;

por otro lado, suministra compuestos bioactivos con potencial para mejorar la salud ruminal y, en consecuencia, el rendimiento productivo de los animales (Marcos et al., 2019; Correddu et al., 2023).

Sin embargo, la capota presenta también algunas limitaciones para su uso en alimentación animal. Su procesamiento previo, que puede incluir trituración o molienda para adecuar su tamaño de partícula, puede aumentar los costes y la complejidad del manejo (Dupuis & Álvarez, 2015). También, la variabilidad en su composición depende de la variedad de almendra y las condiciones de procesamiento tras la cosecha, esto puede afectar la calidad nutricional del producto final. Por ello, es fundamental realizar análisis para ajustar su inclusión en las mezclas ensiladas y optimizar los beneficios nutricionales y tecnológicos (Dupuis & Álvarez, 2015; Recalde, 2025).

En este trabajo, la capota de almendra se considera un ingrediente complementario ideal para el tomate de destrío en la elaboración de ensilados, permitiendo la valorización de un subproducto regional de elevada disponibilidad y potenciando una economía circular basada en el aprovechamiento sostenible de los recursos agroindustriales (European Commission, 2018; MAPA, 2022).

## **2.4 El ensilado**

El ensilado es una técnica de conservación de forrajes y subproductos agroindustriales húmedos que se basa en la fermentación anaerobia controlada de materiales vegetales con el objetivo de preservar su valor nutritivo a lo largo del tiempo. Esta técnica es fundamental en la alimentación de rumiantes, ya que permite disponer de alimentos de calidad durante períodos en los que no hay disponibilidad de pastos frescos o de ciertos subproductos estacionales (Álvarez et al., 2015; Álvarez et al., 2020).

El proceso consiste en almacenar el material vegetal en condiciones de ausencia de oxígeno, de forma que los azúcares solubles presentes en la materia prima sean fermentados por bacterias ácido-lácticas (BAL), que generan ácido láctico como producto principal. Este ácido provoca una rápida caída del pH, que inhibe el desarrollo de microorganismos indeseables (como clostridios, enterobacterias o levaduras) y estabiliza el producto. (Kung et al., 2018)

#### 2.4.1 Fases del ensilado

Según Callejo (2018) y McDonald et al. (1991), el proceso de ensilado se desarrolla en las siguientes fases sucesivas:

- Fase aerobia inicial: Comienza en el momento del llenado del silo. El oxígeno presente favorece la actividad de microorganismos aeróbicos, como hongos y bacterias del suelo. Esta fase debe durar lo menos posible, ya que provoca pérdidas energéticas y eleva la temperatura. Una correcta compactación y sellado del silo es crucial para minimizar el aire contenido en el silo de esta etapa.
- Fase de fermentación: Al agotarse el oxígeno, comienza la fermentación anaerobia. Las BAL convierten los azúcares en ácido láctico, reduciendo el pH hasta niveles de seguridad (generalmente entre 3,8 y 4,2). Si la fermentación es rápida y eficiente, se consigue un silo estable, nutritivo y seguro. También pueden formarse en pequeñas cantidades otros ácidos como el acético, propiónico o butírico.
- Fase de estabilización: Una vez alcanzado el pH óptimo, la fermentación se detiene y el silo entra en una fase de conservación estable, que puede durar varios meses si se mantiene sellado y sin oxígeno. Durante este periodo, las pérdidas nutricionales son mínimas.
- Fase de apertura y utilización: Al abrir el silo, la entrada de oxígeno reactiva la actividad microbiana, especialmente de levaduras y hongos, que pueden provocar el deterioro del silo si no se maneja adecuadamente. Por ello, es importante un consumo diario regular que evite que el frente del silo quede expuesto durante largos periodos.

#### 2.4.2 Factores que influyen en la calidad del ensilado

Numerosos factores afectan la calidad final del ensilado, tanto en su composición nutricional como en su estabilidad microbiológica:

- Contenido en MS: Idealmente entre 30 y 35%. Materiales muy húmedos (como el tomate de destrío) aumentan el riesgo de formación de lixiviados y fermentaciones indeseables. Por lo tanto, es habitual mezclarlo con materiales fibrosos secos, como pueden ser la paja de cereal o la capota de almendra (FAO, 2011; Callejo, 2018).

- Contenido en azúcares solubles (azúcares fermentables): Esencial para alimentar las BAL. Un contenido bajo en azúcares reduce la eficiencia de la fermentación y puede dar lugar a fermentaciones butíricas o putrefactivas.
- Tampón ácido-base del material: Algunos materiales vegetales tienen una alta capacidad tampón (resisten la bajada de pH), lo que dificulta alcanzar un pH de conservación adecuado.
- Carga microbiana inicial: La presencia de bacterias lácticas naturales o la adición de inoculantes comerciales puede mejorar la fermentación y la estabilidad.
- Compactación y sellado: Cuanto mejor se compacte y selle el silo, menor será la presencia inicial de oxígeno y mayor la eficiencia de la fermentación.

#### 2.4.3 Ensilados utilizados hoy en día

En España, los ensilados más utilizados son los ensilados de maíz, alfalfa y hierba, siendo cada uno de ellos más adecuado para ciertas especies ganaderas y para diferentes sistemas de producción.

- Ensilado de maíz: Es uno de los forrajes más utilizados en la alimentación animal por su elevado valor energético. Según FEDNA (2019), presenta en torno a 10,5 MJ/kg MS de energía metabolizable (EM), acompañado de un bajo contenido proteico y un nivel reducido de minerales. En España constituye la base de las dietas para vacas lecheras en sistemas intensivos, y también se emplea en la alimentación de vacuno de carne, ovejas lecheras y cabras en producción intensiva.

- Ensilado de alfalfa: Destaca por su alto contenido en proteína bruta y un buen nivel energético, con valores próximos a 8,4 MJ/kg MS de EM (FEDNA, 2019). Se utiliza de forma habitual en dietas de rumiantes lecheros (vacas, ovejas y cabras) y en animales jóvenes en recría, contribuyendo a cubrir los requerimientos proteicos y favorecer el crecimiento.

- Ensilado de hierba: Presenta un valor energético más bajo que el maíz o la alfalfa, situándose entre 6,7 y 7,5 MJ/kg MS de EM, en función de la especie forrajera y el momento de siega. Aporta fibra y proteína de forma relevante en regiones con baja disponibilidad de pastos, siendo un recurso estratégico en vacas lecheras como reserva para invierno, así como en ovino y caprino en sistemas semi-extensivos (FEDNA, 2019).

#### 2.4.4 Ensilaje de distintos subproductos agroindustriales

El ensilado se ha convertido en una estrategia clave para la valorización de subproductos de origen agrícola e industrial, como frutas, hortalizas, restos de poda o residuos del procesado de alimentos. Su aprovechamiento permite reducir el desperdicio, disminuir los costes de alimentación y cerrar ciclos productivos en clave de bioeconomía circular (Herrero et al., 2013; Makkar, 2016).

Entre los subproductos más estudiados en combinación con forrajes o materiales secos figuran:

- Orujo de tomate, cítricos, piña, melón y sandía.
- Pulpa de remolacha, bagazo de cerveza o residuos de panadería.
- Poda de olivo, hojas de vid o restos de hortalizas frescas.

Según Callejo (2018) y Álvarez et al. (2015), el uso de estos subproductos en el ensilado presenta un potencial elevado, pero debe ajustarse cuidadosamente el equilibrio entre humedad, fibra y azúcares fermentables. Una correcta formulación garantiza silos estables, nutricionalmente interesantes y ambientalmente sostenibles.

En el caso del tomate de destrío, su combinación con capota de almendra y paja de cereal permite generar una mezcla con un nivel adecuado de MS, buena estructura física y una base energética útil, aprovechando tres subproductos disponibles localmente y complementarios. En esta línea, Álvarez et al. (2015) evaluaron el ensilado de tomate de destrío con paja de cereal y pulpa de remolacha, destinado a la alimentación caprina, destacando su potencial para reducir desperdicios, aprovechar recursos locales y generar un ensilado estable y nutritivo, adecuado para su inclusión en dietas de pequeños rumiantes.

#### 2.4.5 Estudios previos

Estudios recientes destacan el potencial de subproductos agroindustriales como ingredientes en la alimentación de rumiantes. Recalde (2025) evaluó la capota de almendra en varios experimentos, analizando su composición química, valor energético y fermentación ruminal in vitro; además, estudió su inclusión en concentrados para corderos y distintos tratamientos de ensilado con aditivos. Los resultados indicaron que la capota puede incorporarse sin afectar la fermentación ni el crecimiento animal, mejora el perfil de ácidos grasos de la carne y que los ensilados muestran buena estabilidad y pH.

Heyko (2025) evidenció que el picado previo de la capota de almendra y la adición de BAL mejoran la calidad y estabilidad del ensilado de capota de almendra. Marcos et al. (2019) demostraron que el tomate de desecho se fermenta rápidamente en el rumen y puede incluirse en dietas sin afectar la fermentación ni la producción de metano. Todo ello resalta la importancia de la combinación de subproductos agroindustriales y técnicas de conservación para optimizar su valor nutritivo. Por lo tanto, en el presente trabajo se propone analizar la evolución de ensilados de tomate de desecho combinados con otros subproductos, determinando su viabilidad como ensilado y su efecto sobre la fermentación ruminal, el valor nutritivo y el impacto económico y ambiental, contribuyendo así a la bioeconomía circular.

### **3.- OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Evaluar el ensilaje como método de conservación para la valorización del tomate de destrío, mediante su mezcla con otros subproductos de origen local, con destino a la alimentación de rumiantes.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Evaluar la evolución de la fermentación de los distintos ensilados formulados, mediante indicadores de calidad del proceso de fermentación: características organolépticas, pH, concentración de ácido láctico, amoníaco y ácidos grasos volátiles (AGV), así como la calidad microbiológica de los ensilados.
2. Evaluar la composición química de los ensilados, su ritmo y extensión de degradación ruminal y los parámetros de fermentación ruminal mediante metodologías *in vitro*.
3. Evaluar el impacto económico y medioambiental de la inclusión de ensilado de tomate en las dietas para rumiantes de leche.

## 4.- MATERIAL Y MÉTODOS

Los experimentos pertenecientes a este trabajo se realizaron en el Departamento de Producción Animal perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (E.T.S.I.A.A.B.) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), los cuales fueron aprobados por el Comité de Cuidado Empleo de Animales Experimentales de la Comunidad Autónoma de Madrid (PROEX 035/17).

### 4.1. Diseño experimental

#### 4.1.1 Muestras de tomate de destrío, paja de cereal y capota de almendra

Para la elaboración de los distintos ensilados se contó con tomates de destrío obtenidos de la compañía Cool-Vega Company, S.L. situada en Alhama de Murcia en Murcia, la capota de almendra fue proporcionada por la empresa Iberian Smart Financial Agro (ISFA) ubicada en Miajadas (Cáceres) y la paja de cereal facilitada por un proveedor local. La muestra de tomate de destrío se congeló hasta la elaboración de los ensilados para evitar su deterioro, por otro lado, la capota de almendra fue recogida con una máquina vibradora y un manto, siendo así una recogida directa del árbol evitando su contaminación con el suelo, mientras que la paja estaba almacenada a temperatura ambiente.

La composición química de estos subproductos se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Composición química (% de la materia seca, excepto la materia seca) de los subproductos empleados en la elaboración de los ensilados.

Item	Tomate de destrío	Ensilado de tomate de destrío + paja	Ensilado de tomate de destrío + capota de almendra
Materia seca	4,50	89,5	87,6
Cenizas	11,0	6,40	10,4
Proteína bruta	14,5	6,01	5,23
Fibra neutro detergente	17,5	72,7	33,2
Fibra ácido detergente	13,3	39,9	25,8
Extracto etéreo	2,88	1,54	2,31
Azúcares	28,7	2,56	16,5

#### 4.1.2 Preparación de los ensilados

Para este estudio se prepararon diferentes tipos de ensilado con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica y nutricional en alimentación animal. Las formulaciones fueron elaboradas con tomate de destrío, combinado con subproductos vegetales fibrosos de origen regional, paja de cereal y capota de almendra troceada de manera manual. El tomate fue triturado manualmente para mejorar su manejo y homogeneidad en la mezcla. Las mezclas se realizaron en cajas de plástico, en proporciones predeterminadas que permitieran alcanzar un contenido final de MS entorno al 37-38%, intervalo considerado óptimo para la fermentación láctica (Callejo, 2018). Sin embargo, debido al gran volumen de paja necesario para alcanzar dicho contenido en MS, se redujo la cantidad necesaria, de modo que el contenido de MS de este ensilado fue menor al esperado (<30%), presentando una mayor cantidad de tomate en comparación con el ensilado de tomate de destrío + capota de almendra (ETC). Se preparó una cantidad de cada mezcla suficiente (>10 kg) para la preparación de todos los microsilos.

Una vez homogeneizadas las mezclas, se procedió al envasado hermético en bolsas de polietileno multicapa, con baja permeabilidad al oxígeno y capacidad aproximada de 3 kg. Se elaboraron un total de 16 bolsas por tratamiento: 12 bolsas de 0,5 kg, destinadas a ser abiertas en las fases de fermentación correspondientes a los días 0, 4 y 30; y 4 bolsas de 1 kg, reservadas para la apertura a los 90 días, que corresponde al final del proceso estándar de ensilado. Las bolsas fueron compactadas en una envasadora al vacío para eliminar el aire y cerradas por termoselladura. Posteriormente, se almacenaron en un espacio protegido de la luz, a temperatura ambiente constante (20–25 °C) y en condiciones anaerobias controladas durante todo el periodo experimental.



**Figura 4.1** Bolsas selladas al vacío de 0,5 kg de los ensilados preparados. (PA: paja y tomate, C: capota y tomate)

## 4.2. Estudio de la evolución del ensilado

El análisis de la evolución del ensilado se llevó a cabo mediante la apertura de 4 bolsas de cada mezcla en cuatro momentos clave: días 0, 4, 30 y 90, de acuerdo con el protocolo de evaluación fermentativa establecido por Callejo (2018), explicado anteriormente. En cada apertura, se registró el peso neto del contenido de cada bolsa y se realizaron observaciones organolépticas (color y olor) como indicadores visuales y sensoriales preliminares de la calidad del ensilado.

A continuación, el contenido completo de cada bolsa fue mezclado de forma homogénea, se extrajo una muestra de 50 g que se mezcló con 500 ml de agua destilada y posteriormente fue homogeneizada durante 90 s con una batidora doméstica. La mezcla resultante se filtró utilizando cuatro capas de gasa según la metodología descrita por Samarasinghe et al. (2019). Sobre el filtrado obtenido se midió inmediatamente el pH con un pHmetro (modelo Crison 20, Crison, Madrid, España). Seguidamente, se tomaron 1,7 ml del mismo filtrado, que fueron transferidos a tubos Eppendorf que contenían 80  $\mu$ l de ácido sulfúrico (10%; v/v). Estas muestras se conservaron a -20 °C hasta su análisis posterior para la determinación de AGV, nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y ácido láctico.

Además, se extrajeron dos submuestras de 50 g adicionales para cuantificar el contenido de MS en el ensilado. En el día 90, que marcaba el final del periodo de conservación, se recogió una submuestra adicional de 100 g, la cual fue congelada a -80 °C inmediatamente y posteriormente liofilizada para el análisis de composición química.

Para los análisis de AGV, las muestras previamente congeladas fueron descongeladas, agitadas y centrifugadas durante 20 minutos a 13.000 rpm a 4 °C. Se tomaron a continuación 0,8 ml del sobrenadante, los cuales se mezclaron con 0,5 ml de una solución desproteinizadora compuesta por ácido crotónico al 0,06% y ácido metafosfórico al 2% disueltos en agua destilada. Estas mezclas fueron almacenadas en refrigeración (4 °C) durante 24 h y posteriormente centrifugadas bajo las mismas condiciones descritas anteriormente. El sobrenadante final (1,2 ml) se depositó en viales específicos para cromatografía, que fueron congelados a -20 °C y enviados al laboratorio de la Universidad de León. Allí se realizó el análisis de AGV mediante cromatografía de gases utilizando un cromatógrafo Shimadzu GC-2010 (Shimadzu Europa GmbH, Duisburg, Alemania) equipado con una columna TR-FFAP (30 m  $\times$  0,53 mm  $\times$  1  $\mu$ m; Supelco, Madrid, España).

El contenido de N-NH<sub>3</sub> fue determinado a partir del sobrenadante obtenido en la primera centrifugación, siguiendo la metodología de Weatherburn (1967). Para ello, se mezclaron 60 µl del sobrenadante con 5 ml de una solución de fenolnitroprusida (preparada con 10 g de fenol y 50 mg de nitroprusida sódico en 1 litro de agua destilada) y 5 ml de una solución de hipoclorito sódico (formulada con 5 g de NaOH y 8,4 ml de hipoclorito sódico en 1 litro de agua destilada). Se preparó una curva de calibración utilizando una solución estándar de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02143 M diluida en diferentes concentraciones. Las muestras y estándares se agitaron con vórtex y se incubaron a 37 °C durante 20 minutos en baño de agua. Posteriormente, la absorbancia se midió a 625 nm en un espectrofotómetro Epoch (Bioteck Instruments, Swindon, Reino Unido).

El análisis de ácido láctico se realizó con 50 µl del sobrenadante, diluidos en 450 µl de agua destilada. Se añadieron 3 ml de ácido sulfúrico concentrado (96%), alcanzando un volumen final de 3,5 ml, en condiciones similares a las utilizadas para la curva patrón. Después de agitar durante 30 segundos, las muestras se incubaron 10 minutos en un baño de aceite a 100 °C, y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Luego, se añadieron 50 µl de una solución de CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O al 4% y 100 µl de p-fenilfenol al 1,5% en etanol al 95%. Las mezclas se agitaron en un vórtex y se incubaron a 30 °C durante 60 minutos en un baño de agua. Finalmente, la absorbancia se registró a 570 nm empleando el mismo espectrofotómetro (Epoch, Bioteck Instruments, Swindon, Reino Unido).

El análisis microbiológico tuvo lugar en la apertura final de los ensilados (día 90), donde se recogieron 100 g de muestra, que fueron enviados bajo condiciones de refrigeración al Laboratorio Finca Mouriscade (Lalín, Pontevedra) para su análisis microbiológico. Dicho análisis se llevó a cabo mediante técnicas clásicas de cultivo en placa, dentro de las 24 h posteriores a la recepción de las muestras. Se determinó el contenido de: *Clostridium perfringens*, *Enterobacterias spp*, *Escherichia coli*, levaduras, *Listeria monocytogenes*, mohos, *Salmonella spp* y *Staphylococcus coagulasa* +.

#### **4.3. Análisis de la composición química de los ensilados**

Las muestras de los alimentos utilizados y de los ensilados abiertos el día 90 una vez liofilizados se molieron a un tamaño de criba de 1 mm y se emplearon para la determinación su composición química:

- Materia seca y cenizas: El contenido de MS se determinó mediante secado en estufa a 103 °C durante 24 h (método 934.01; AOAC, 2005). Posteriormente, se

determinó la fracción de cenizas incinerando las muestras a 550 °C durante 4 horas en un horno mufla (método 967.05; AOAC, 2005).

- Proteína bruta (PB) y nitrógeno (N): El contenido total de N se determinó mediante un analizador LECO FP-528 (Leco Corporation, Saint Joseph, MI, EE. UU.) (método 984.13; AOAC,2005), y a partir de este valor se calculó la PB, aplicando el factor de conversión convencional ( $N \times 6,25$ ).
- Fibra neutro detergente (FND) y fibra ácido detergente (FAD): El contenido de FND y FAD se determinaron siguiendo el método secuencial de Van Soest et al. (1991) y Robertson y Van Soest (1981), utilizando el sistema ANKOM 200 (Ankom Technology Corp., Fairport, NY, EE. UU.), sin corrección por cenizas. Para el análisis de FND se empleó  $\alpha$ -amilasa termoestable, sin uso de sulfito de sodio. Las muestras fueron introducidas en bolsas ANKOM F57 de 25  $\mu$ m de tamaño de poro, termoselladas previamente, que permiten una retención eficaz del residuo insoluble durante los procesos de digestión y lavado. El contenido en nitrógeno ligado a la FAD fue determinado directamente sobre el residuo recuperado.
- Extracto etéreo (EE): Se realizó mediante extracción con éter etílico (método 920.39; AOAC, 2005), adaptado al sistema ANKOM XT10 (Ankom Technology Corp., Fairport, NY, EE. UU.). Para este análisis, las muestras fueron colocadas en bolsas ANKOM XT4, especialmente diseñadas para resistir solventes orgánicos, las cuales fueron previamente selladas térmicamente.
- Azúcares: La concentración de azúcares solubles se determinó mediante el método de Yemm y Willis (1954), basado en la reacción colorimétrica de la antrona disuelta en ácido sulfúrico concentrado. En medio ácido, los enlaces glicosídicos de los oligosacáridos se hidrolizan, liberando monosacáridos que reaccionan con la antrona, produciendo una coloración verde-azulada cuantificable por espectrofotometría. Para el análisis, se pesaron por duplicado 250 mg de muestra molida en un matraz, se añadieron 100 ml de etanol al 80%, y se agitó durante 1 h. El extracto se filtró y se pipetearon 2 ml del filtrado en tubos de ensayo enfriados en hielo, a los que se añadieron 10 ml de disolución de antrona. Los tubos, sellados con una canica como condensador, se calentaron en baño María a 100 °C durante 20 min y se enfriaron posteriormente. De cada muestra se tomaron 200  $\mu$ l por triplicado en microplaca, y la absorbancia se midió

a 625 nm en un espectrofotómetro (Epoch, Biotek Instruments, Swindon, Reino Unido).

Todos los análisis se llevaron a cabo por duplicado excepto la FND y FAD que se hizo por cuadruplicado, garantizando la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

Este conjunto de determinaciones permitió establecer la calidad nutritiva de cada tipo de ensilado y sirvió como base para la posterior estimación del valor energético y proteico de las muestras.

#### **4.4. Incubaciones in vitro: producción de ácidos grasos volátiles y cinética de fermentación**

Se llevaron a cabo dos tipos de incubaciones in vitro utilizando líquido ruminal fresco como inóculo, sobre los ensilados del día 90 y los alimentos principales: tomate de destrío, paja de cereal y capota de almendra. Dicho líquido se obtuvo de cuatro ovejas adultas canuladas en rumen de raza Manchega de peso promedio  $65,0 \pm 1,12$  kg, alojadas en condiciones controladas y alimentadas con una dieta basada en heno de gramíneas y heno de alfalfa (2:1) ad libitum, complementada con 350 g/día de concentrado comercial por animal. El líquido ruminal se obtuvo, antes de la administración del alimento del día, extrayendo contenido ruminal a través de la cánula ruminal y filtrándolo sobre cuatro capas de gasa. El líquido obtenido se trasladó de forma inmediata al laboratorio.

##### 4.4.1 Cinéticas de producción de gas

La producción de gas se evaluó mediante un ensayo de fermentación in vitro a partir de las muestras de ensilado correspondientes al día 90. Para ello, se pesaron 200 mg de cada muestra y se colocaron en viales de vidrio de 60 ml. El medio de cultivo se preparó siguiendo las indicaciones descritas por Goering y Van Soest (1970) y el protocolo general de incubación in vitro propuesto por De Evan et al. (2020), siendo previamente gaseado con dióxido de carbono para garantizar condiciones anaerobias. Posteriormente, se mezcló con líquido ruminal fresco en una proporción 4:1 (medio:líquido ruminal).

En cada vial se dosificó 20 ml de esta mezcla utilizando una bomba peristáltica (modelo 520UIP31, Watson-Marlow Fluid Technology Group, Barcelona, España). Los viales se cerraron herméticamente con tapones de goma macizos, se agitaron y se incubaron a 39 °C durante 144 horas. La presión generada por la fermentación se midió en distintos tiempos (2, 4, 6, 9, 12, 22, 26, 30, 34, 48, 55, 72, 96 y 144 horas) utilizando un manómetro

digital (Wide Range Pressure Meter, Widereager, Sper Scientific LTD, Scottsdale, AZ, EE.UU.), y se registró el volumen de gas con una jeringa graduada de plástico.



**Figura 4.2** Manómetro digital para medir la presión de gas en los ensayos de fermentación in vitro.

Además, para cada inóculo ruminal empleado, se incluyeron dos viales sin sustrato (blancos) que permitieron corregir el volumen de gas producido, restando el gas endógeno generado en los controles al registrado en los viales con muestra.

#### 4.4.2 Determinación de los parámetros fermentativos

Con el objetivo de evaluar los productos finales derivados de la fermentación ruminal, se llevó a cabo una incubación in vitro de 24 h utilizando el mismo procedimiento descrito previamente para la cinética de producción de gas con la única diferencia que en este caso la incubación se limitó a 24 horas y se midió la producción de gas a las 4 y 12 h con el fin de liberar el gas producido y cuya acumulación no pudiera comprometer la fermentación. A las 24 h se volvió a medir la presión tras lo cual se agitaron los viales, se abrieron midiéndose inmediatamente el pH y se tomó una muestra para la determinación de AGV, y N-NH<sub>3</sub> empleando las metodologías previamente detalladas en el apartado 4.2.

#### 4.4.3 Cálculos y Análisis estadísticos

Los datos de producción de gas obtenidos a partir de las muestras del ensilado de tomate de destrío + paja (ETP) y ETC se ajustaron al modelo exponencial de producción de gas de Ørskov y McDonald (1979):

$$Y = PPG \cdot (1 - e^{-c \cdot (t - Lag)})$$

Siendo:

- Y: producción de gas en el tiempo t (ml/g MS)
- PPG: producción potencial de gas (ml/g MS)
- c: ritmo fraccional de producción de gas (%/h)
- Lag: tiempo necesario para que comience la producción de gas (hora)

Empleando el procedimiento PROC NLIN del software estadístico SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC, EE. UU.). Con estos datos se calculó el ritmo medio de producción de gas (RMPG) mediante la fórmula:

$$RMPG = \frac{(PPG \times c)}{[2 \times (\ln 2 + c \times Lag)]}$$

El valor de RMPG representa el ritmo de producción de gas entre el inicio de la incubación y la mitad de la producción potencial de gas.

Este método ha sido validado en numerosos estudios como una herramienta fiable para caracterizar la digestibilidad y la degradación microbiana de los forrajes (Theodorou et al., 1994).

Todos los análisis estadísticos se realizaron de manera independiente para los dos ensilados ya que el contenido en MS diferente por la dificultad de conseguir una mezcla homogénea en el ensilado ETP.

La variación en la composición química entre los días 0 y 90 en cada ensilado se analizó mediante un análisis de varianza unifactorial siendo el Día el factor fijo. Los parámetros de la evolución temporal de cada tipo de ensilado se analizaron mediante un análisis de varianza unifactorial, considerando el Día de apertura (0, 4, 30 y 90) como efecto. La comparación entre medias se realizó mediante el test de Tukey.

Se compararon los parámetros de las cinéticas de producción de gas entre la paja y el ETP y por otro lado de la capota y el ETC mediante análisis de varianza mixto, considerando el tipo de alimento como factor fijo y como factor aleatorio el inóculo ruminal (oveja donante). Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el procedimiento MIXED de SAS usando el software estadístico SAS (SAS Inst. INC., Cary, NC, EEUU). Se declararon diferencias significativas para  $P < 0,05$  y tendencias para  $0,05 < P < 0,10$ .

El contenido de EM, expresado en MJ/kg de MS, se estimó según la ecuación propuesta por Menke y Steingass (1988). Esta ecuación emplea como variables el volumen de gas producido tras 24 h de incubación (G24, ml/300 mg de MS de muestra) junto con el contenido de PB y EE, ambos expresados en g/kg MS. La ecuación empleada fue la siguiente:  $EM = 2,43 + 0,1206 \times G24 + 0,0069 \times PB + 0,0187 \times EE$

#### **4.6. Valoración económica y ambiental**

Se realizó una valoración del impacto económico del uso de subproductos agroindustriales en la alimentación de ovinos de leche. Para ello, se formularon tres dietas isoproteicas e isoenergéticas en las que se sustituyó parte del heno de alfalfa por ETC. La dieta control contenía un 45% de heno de alfalfa, mientras que en las dietas experimentales se reemplazó el 10% y el 20% de este forraje por ETC, respectivamente. Esta sustitución permitió evaluar el ahorro económico potencial derivado del uso del subproducto, considerando su precio como un porcentaje del valor del heno de alfalfa y comparando el coste total de las dietas con la dieta control.

Se llevó a cabo también una valoración cualitativa del impacto ambiental del uso de ETC. Su incorporación permite aprovechar subproductos agroindustriales que, de otro modo, se desperdiciarían, y contribuye a reducir la dependencia de recursos externos a la explotación (FAO, 2013). Esta práctica se enmarca dentro del enfoque de bioeconomía circular promovido por la Unión Europea (European Commission, 2018) y coincide con los principios de sostenibilidad y uso responsable de recursos descritos en la literatura (Makkar, 2016).

## 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Valor nutricional de los alimentos

Los resultados del análisis químico (Tabla 4.1) permiten evaluar la adecuación de los valores obtenidos en este estudio al compararlos con fuentes de referencia reconocidas, como FEDNA (2019) y Feedipedia (2020).

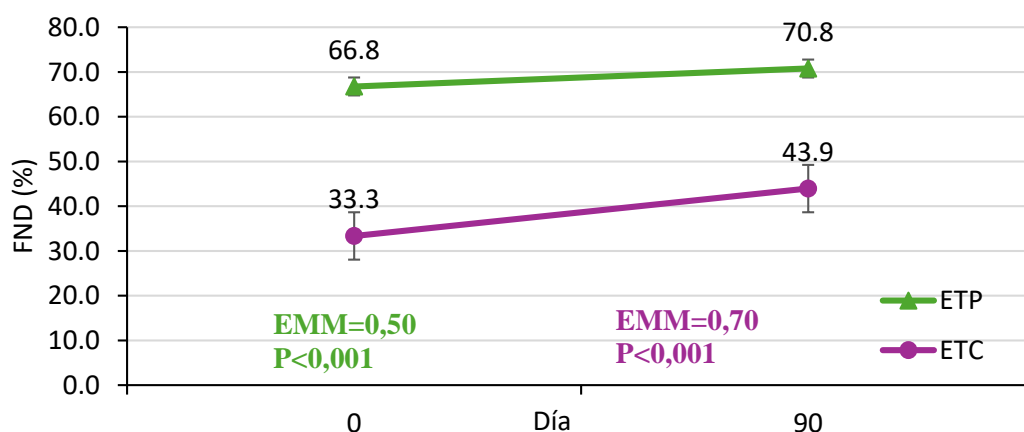
En el caso de la paja de cereal, la composición calculada se encuentra dentro del rango de referencia, aunque con un contenido de PB y azúcares ligeramente superior al reportado por FEDNA (2019).

Respecto a la capota de almendra, los valores obtenidos se aproximan a los descritos en Feedipedia (2020), si bien se observaron niveles algo inferiores en MS y azúcares.

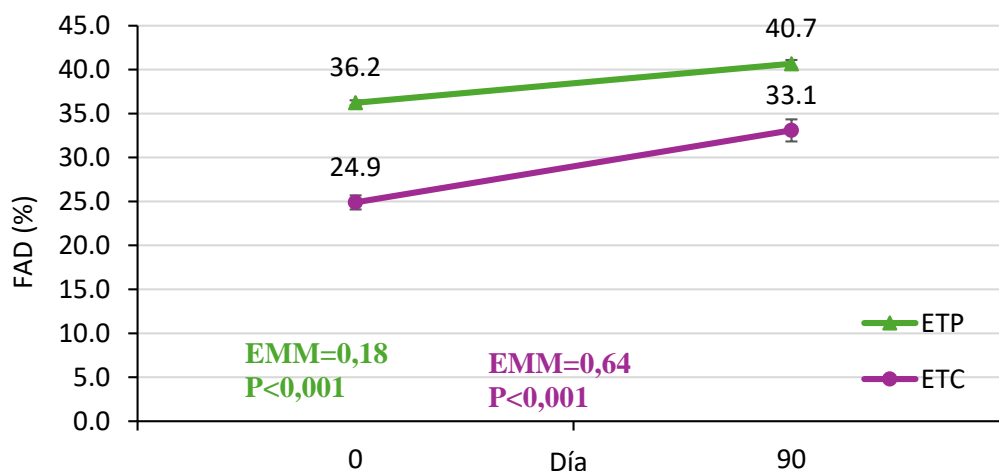
Finalmente, para el tomate de destrío, los resultados son parecidos a los reportados por Santos (2025).

### 5.2. Valor nutricional de los ensilados

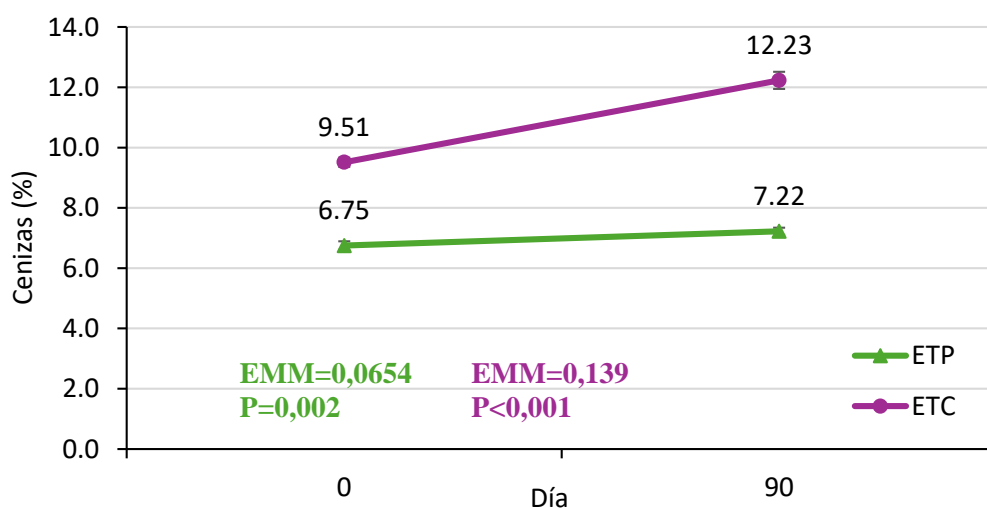
En las Figuras 5.1-5.6 se muestra la evolución de la composición química de los ensilados de tomate de destrío mezclados con paja o capota de almendra. Como consecuencia del proceso de ensilaje, el contenido de FND, FAD y cenizas aumentó en ambas mezclas. Este incremento fue más pronunciado en el ETC, con aumentos de 10,6; 8,20 y 2,72 puntos porcentuales en FND, FAD y cenizas, respectivamente, frente a los incrementos de 2,00; 4,50 y 0,47 puntos porcentuales observados en el ETP.



**Figura 5.1** Evolución del contenido de fibra neutro detergente (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media.

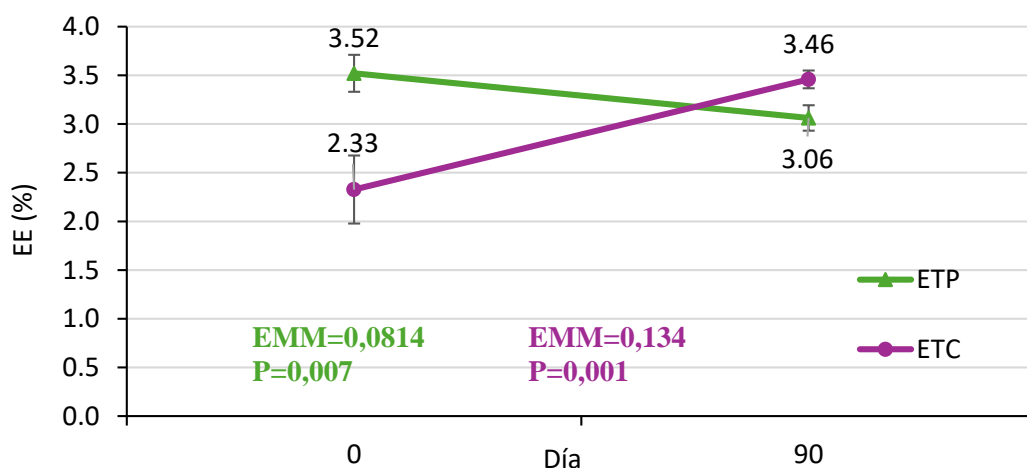


**Figura 5.2** Evolución del contenido de fibra ácido detergente (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media.

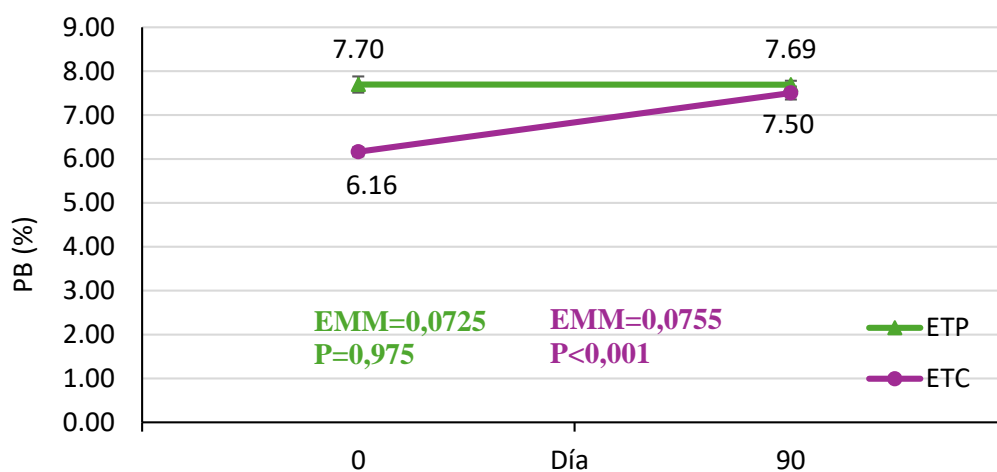


**Figura 5.3** Evolución del contenido de cenizas (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media. P: p-valor de significancia.

En el caso del EE (Figura 5.4), se observó una evolución distinta: aumentó en el ETC, mientras que disminuyó en el ETP. En cuanto a la PB (Figura 5.5), el ETC presentó un aumento de 1,34 puntos porcentuales, sin cambios estadísticamente significativos en el ETP. En el caso del contenido de azúcares solubles (Figura 5.6), en ambas mezclas de ensilado se observó una disminución, siendo esta más acusada en el ETC, con una reducción de 14,0 puntos porcentuales, frente a 5,34 puntos porcentuales en el ETP.



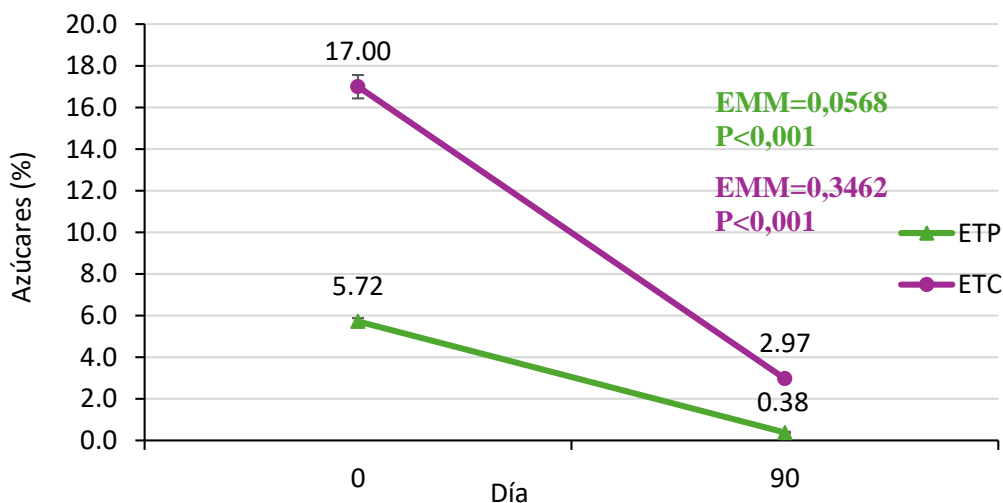
**Figura 5.4** Evolución del contenido de extracto etéreo (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media.



**Figura 5.5** Evolución del contenido de proteína bruta (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media. P: p-valor de significancia.

Es destacable la disminución del contenido en EE en el ETP, el cual podría deberse principalmente a la mayor humedad inicial del material, con un porcentaje de MS del 28,8%. Esto puede favorecer la lixiviación de lípidos y otros compuestos solubles durante la fermentación, ya que en un ambiente con más humedad es más fácil que se pierdan estos nutrientes (Kung et al., 2018). Además, la paja, por su naturaleza fibrosa y baja digestibilidad, puede ser más susceptible a la degradación de grasas por la actividad de microorganismos y enzimas presentes durante el proceso de ensilado.

También es común que, durante la fermentación anaerobia, ciertos lípidos se oxiden o se transformen, lo que puede contribuir a la reducción del EE (McDonald et al., 1991). Por todo ello, estos procesos combinados explicarían la caída del EE en el ETP tras 90 días.



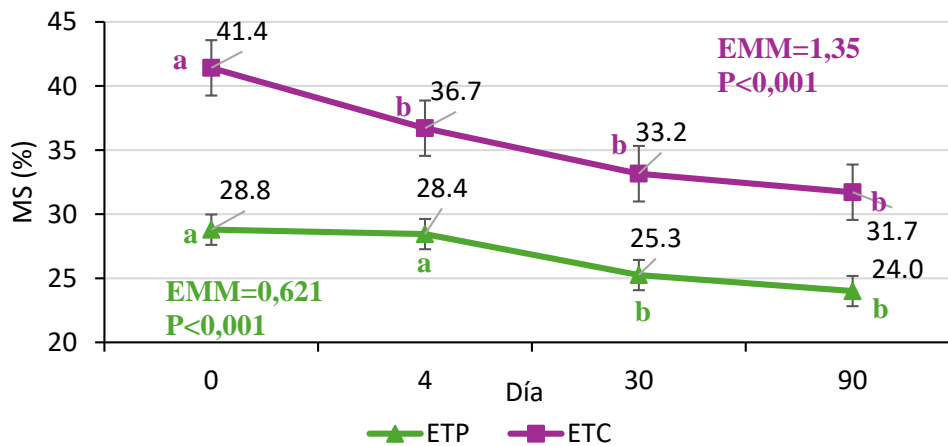
**Figura 5.6** Evolución del contenido de azúcares (%) entre los días 0 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media. P: p-valor de significancia.

Como se comenta en el apartado 5.1, los azúcares representan una fracción significativa de la MS inicial, por lo que se degradan rápidamente provocando que su porcentaje de pérdida desencadene un aumento proporcional en la concentración del resto de los componentes analizados. Esto explica por qué, al finalizar el proceso de ensilado, se observa un incremento notable en la mayoría de los parámetros expresados en porcentaje de MS, aun cuando su cantidad absoluta no haya aumentado de forma real.

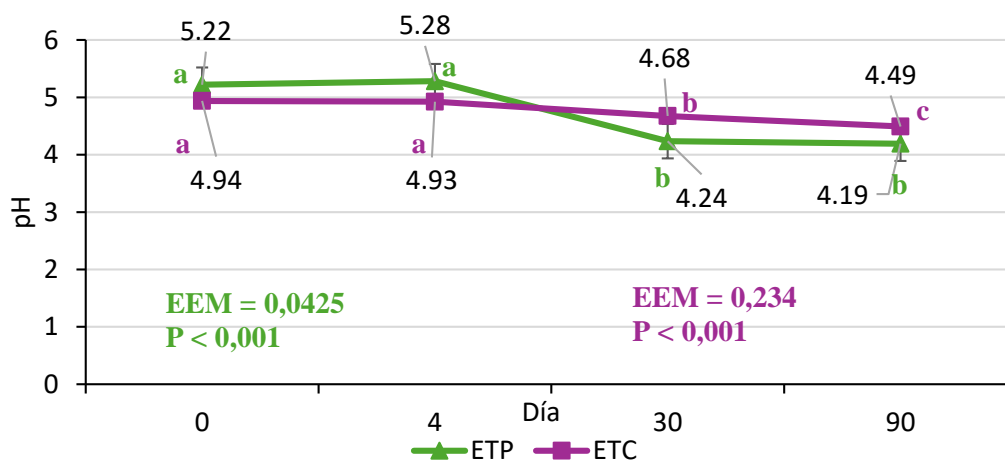
Durante el proceso de ensilado, los azúcares solubles presentes en las materias primas empleadas (fundamentalmente glucosa, fructosa y sacarosa) desempeñan un papel clave en la fermentación láctica. Estos compuestos, altamente fermentables, son utilizados como sustrato principal por las BAL, que los transforman en ácidos orgánicos, principalmente ácido láctico. Esta fermentación es esencial para reducir rápidamente el pH del medio y así inhibir el desarrollo de microorganismos no deseados (McDonald et al., 1991; Muck, 2010). Además, la pronunciada disminución de los azúcares es indicativa de una fermentación activa, especialmente durante las primeras fases del ensilado, cuando las condiciones anaerobias y la presencia de humedad y azúcares favorecen el crecimiento de BAL.

### 5.3. Evolución de las características de los ensilados

Durante el proceso de ensilado, se observaron cambios significativos en los parámetros fermentativos analizados en ambos tipos de ensilados (ETP y ETC) a lo largo del tiempo. La MS (Figura 5.7) disminuyó de manera progresiva desde el inicio hasta el día 30 en ambos ensilados, para posteriormente estabilizarse el día 90. Respecto al pH (Figura 5.8), disminuyó en los dos ensilados a partir del día 30, siendo más pronunciada para el ETP alcanzando un menor pH el día 90, aunque inicialmente el ensilado de capota presentó un menor pH.

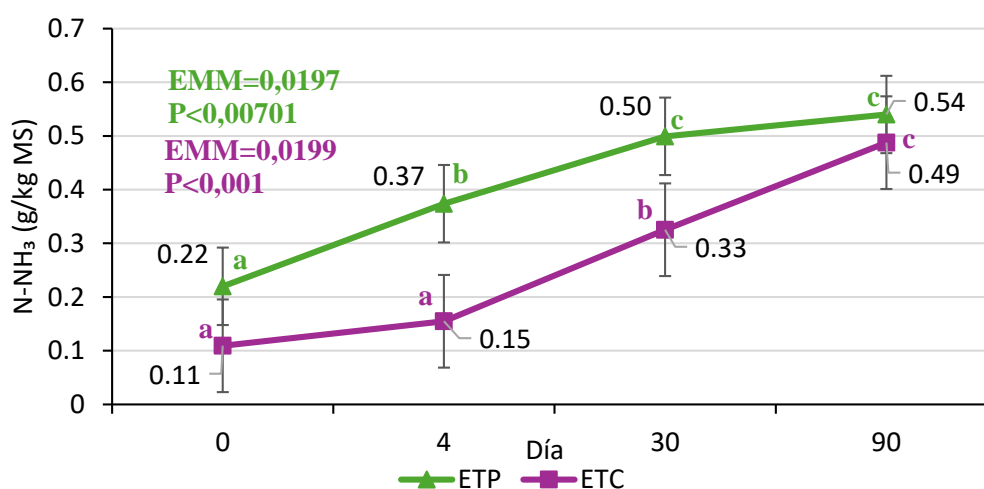


**Figura 5.7** Evolución del contenido de materia seca (%) entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media.

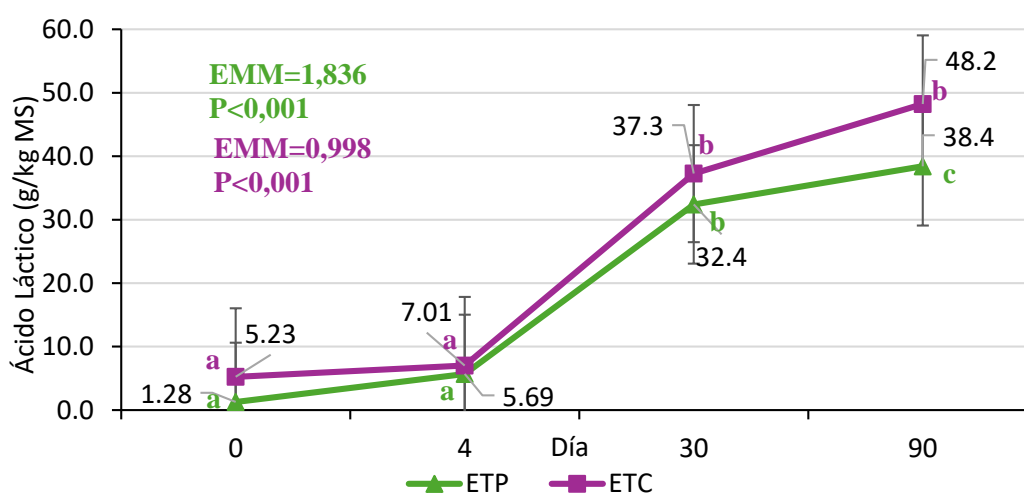


**Figura 5.8** Evolución del contenido de pH entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media.

El contenido de N-NH<sub>3</sub> (Figura 5.9), aumentó de forma progresiva en ambos ensilados, presentando valores consistentemente superiores en el ETP con un aumento de (0,22 g/kg MS al inicio y 0,54 g/kg MS al día 90) y en el ETC de (0,11 g/kg MS al inicio y 0,49 g/kg MS al día 90). El contenido en ácido láctico (Figura 5.10) también aumentó en ambos ensilados. En el ETP el contenido en ácido láctico alcanzó a los 90 días 38,4 g /kg MS que supuso un gran incremento desde 1,28 g/kg MS al inicio. En el ETC los valores ascendieron de 5,23 g/kg MS a 42,97 g/kg MS.



**Figura 5.9** Evolución del contenido de N-NH<sub>3</sub> (g/kg MS) entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media.



**Figura 5.10** Evolución del contenido de ácido láctico (g/kg MS) entre los días 0, 4, 30 y 90 de ensilados de tomate de destrío + paja (ETP) y tomate de destrío + capota de almendra (ETC). EEM: error estándar de la media. P: p-valor de significancia.

Las pérdidas de materia seca durante el proceso de ensilado se deben principalmente a la respiración vegetal residual, la respiración y fermentación del silo y la producción de efluentes. Estos procesos conducen a la degradación de la materia orgánica y a la disminución de compuestos nutritivos de alto valor, lo que compromete la calidad fermentativa y el valor nutritivo global del ensilaje (Borreani et al., 2018).

En el ETP, el pH descendió de 5,22 a 4,19 unidades, lo que refleja un proceso de acidificación marcado durante la fermentación. Esta disminución permite alcanzar condiciones de mayor estabilidad en el material, aunque en paralelo puede mantenerse una cierta actividad proteolítica hasta que el pH alcanza niveles suficientemente bajos.

En el ETC, el pH inicial ya era más reducido 4,94, por lo que el descenso durante el proceso fue más limitado llegando a 4,49. Esta menor variación no indica una fermentación deficiente, sino que el material partía de condiciones ácidas favorables que contribuyen a limitar la proteólisis y reducen la pérdida de PB (McDonald et al., 1991; Muck, 2010).

El aumento en contenido en N-NH<sub>3</sub> de los ensilados fue similar para ambos, aunque el ETP mostró un incremento más rápido que el ETC. Ambos ensilados partían de similares niveles bajos de PB, sin embargo, el menor pH inicial en el ETC y mayor contenido en azúcares solubles podría haber ralentizado la actividad proteolítica bacteriana. En cualquier caso, comparando con ensilados de gramíneas o de maíz, cuyos valores finales de N-NH<sub>3</sub> suelen situarse entre 0,5 y 1,5 g/kg MS (McDonald et al., 1991; Muck, 2010), los niveles obtenidos en ambos materiales pueden considerarse bajos al inicio del ensilado y ligeramente bajos al final del período de fermentación. Esto indica que la proteólisis durante el ensilado fue limitada, lo cual es favorable, ya que evita pérdidas de nitrógeno y contribuye a mantener el valor nutritivo del ensilado.

El mayor aumento en el contenido de ácido láctico en el ETC se explicaría por su mayor contenido inicial de azúcares solubles y un pH más bajo, que facilitan una fermentación más rápida desde el inicio, reduciendo así el incremento porcentual en comparación con el ETP. En ambos ensilados, la mayor actividad de fermentación se observó entre los días 4 y 30, momento crítico en el que se establece la acidificación y se estabiliza el ensilado. Estos resultados muestran que, aunque los incrementos porcentuales sean diferentes, ambos materiales lograron una fermentación láctica efectiva, con valores finales de ácido láctico adecuados para la conservación del ensilado.

En conjunto, estos resultados evidencian un proceso de fermentación estable y eficiente en ambos ensilados, aunque con diferencias relacionadas con la composición inicial de los materiales. El ETC mostró un perfil fermentativo más favorable, con mayor producción de ácido láctico y un pH final más alto, a lo indicado en el apartado 2.4.1, aun así, son aspectos que suelen estar vinculados a una mejor calidad del ensilado y un mayor valor nutritivo para la alimentación animal (Kung et al., 2018).

En la tabla 5.1 se muestra el perfil de AGV de la fermentación de ambos ensilados. Durante el proceso de ensilado, se observó que el ácido acético en ambos ensilados fue aumentando progresivamente con valores en el ETP desde 4,20 hasta 27,5 g/kg MS, y en el caso del ETC desde 7,59 hasta 30,2g/kg MS. En el caso del ácido propiónico, fue, al contrario, su contenido fue disminuyendo a lo largo del tiempo (pese a un ligero aumento entre los días 0 y 4), con valores iniciales de 1,62 g/kg MS para ETP, y 4,85 g/kg MS para ETC, no detectándose a los 90 días en ninguno de los dos. En el caso del ETP, no se encontraron más AGV, pero, sin embargo, en el ETC se hallaron ligeras cantidades de ácido butírico logrando su máximo en el día 4 con 0,646 g/kg MS, y de ácido isovalérico, en el día 30 con 0,267 g/kg MS.

El contenido en ácido acético en ambos ensilados estuvo en el rango normal (1-3%), contenido que inhibe el desarrollo de levaduras contribuyendo a la estabilidad aeróbica del ensilado y constituye una señal de ausencia de fermentaciones indeseables por Enterobacterias, Clostridium o bacterias ácido heterolácticas (Kung et al., 2018). La ausencia de ácido propiónico a la apertura de los ensilados también indicaría la buena calidad del ensilaje en ambos tipos y la ausencia de clostridium. Además, no se detectaron ácidos isobutírico, butírico, isovalérico, ni valérico, lo que indica una fermentación predominantemente láctica con escasa actividad proteolítica o de fermentaciones indeseables (Kung et al., 2018; Makkar, 2016).

**Tabla 5.1** Evolución temporal de las concentraciones (g/kg materia seca) de ácidos grasos volátiles en ensilados mezcla tomate de destrío + paja y tomate de destrío + capota de almendra.

Item	Día				EEM <sup>1</sup>	P
	0	4	30	90		
<b>Ensilado tomate de destrío + paja</b>						
Acético	4,20 <sup>a</sup>	7,64 <sup>a</sup>	24,7 <sup>b</sup>	27,5 <sup>b</sup>	1,186	<0,001
Propiónico	1,62 <sup>ab</sup>	2,56 <sup>a</sup>	0,534 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0,500	0,005
Butírico	ND	ND	ND	ND	-	-
Isobutírico	ND	ND	ND	ND	-	-
Isovalérico	ND	ND	ND	ND	-	-
Valérico	ND	ND	ND	ND	-	-
Total AGV <sup>2</sup>	5,82 <sup>c</sup>	10,2 <sup>c</sup>	25,2 <sup>b</sup>	27,5 <sup>b</sup>	1,209	<0,001
<b>Ensilado tomate de destrío + capota de almendra</b>						
Acético	7,59 <sup>a</sup>	9,56 <sup>a</sup>	18,1 <sup>b</sup>	30,2 <sup>c</sup>	0,748	<0,001
Propiónico	4,85 <sup>a</sup>	4,87 <sup>a</sup>	1,42 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0,500	<0,001
Butírico	0,430 <sup>a</sup>	0,646 <sup>a</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0,0840	<0,001
Isobutírico	ND	ND	ND	ND	-	-
Isovalérico	0 <sup>a</sup>	0,133 <sup>a</sup>	0,267 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0,0391	0,001
Valérico	ND	ND	ND	ND	-	-
Total AGV <sup>2</sup>	12,9 <sup>c</sup>	15,2 <sup>c</sup>	19,7 <sup>b</sup>	30,2 <sup>a</sup>	0,84	<0,001

<sup>a, b, c</sup> Medias con distintos superíndices son diferentes (P<0,05)

<sup>1</sup>EEM: error estándar de la media. n = 4; <sup>2</sup>AGV: Ácidos grasos volátiles

Finalmente, tras el análisis de AGV, se realizó el análisis microbiológico del ensilado, en el que se detectaron levaduras en ambos silos. Sin embargo, sus niveles, inferiores a 6 log<sub>10</sub>UFC, no representan un riesgo significativo. Por otro lado, únicamente se encontraron mohos en el ETP, y en cantidades muy reducidas. En cuanto al resto de microorganismos, no se detectaron *Clostridium*, *Enterobacterias*, *Escherichia coli*, *Salmonella ni Staphylococcus coagulasa*+. Resultados que son indicativos de un proceso de ensilado exitoso y seguro para la alimentación animal (Kung et al., 2018).

#### 5.4. Fermentación ruminal in vitro de los ensilados

##### 5.4.1 Incubación in vitro de 24h.

En la Tabla 5.2 se muestran los datos de fermentación obtenidos en la incubación in vitro de 24h, lo que permitió evaluar la respuesta microbiana temprana ante la inclusión de los ETP y ETC, proporcionando información valiosa sobre su degradabilidad y valor nutritivo potencial en el rumen.

**Tabla 5.2** Parámetros fermentativos de la incubación in vitro 24h de los silos elaborados en la apertura final.

Item	Tomate de destrío + paja	Tomate de destrío + capota de almendra
Gas 24h fermentación (ml/g MS)	106	128
pH	7,15	7,18
N-NH <sub>3</sub>	0,630	0,572
Proporciones molares (mol/100 mol)		
Acético	65,8	61,6
Propiónico	22,5	26,3
Isobutírico	0,728	0,426
Butírico	8,44	10,2
Isovalérico	1,25	0,725
Valérico	1,21	0,862
Total AGV (mmol/g MS)	4,63	5,44
Acético/Propiónico	2,97	2,35

AGV: ácidos grasos volátiles

La producción de gas acumulado en el ETC fue de 128 ml/g MS y en el ETP 106 ml/g MS, lo que indica una mayor fermentabilidad y disponibilidad energética en el ETC (Menke & Steingass, 1988). Este resultado se correlaciona con una mayor producción total de AGV en la capota 5,44 mmol/g MS, reflejando una actividad microbiana ruminal más intensa y eficiente en la degradación de los carbohidratos fermentables presentes (Van Soest, 1994).

El pH a las 24h fue similar en ambos ensilados (7,15 para ETP y 7,18 para ETC), situándose dentro del rango óptimo para la actividad microbiana ruminal (Russell & Wilson, 1996), lo que indica que la fermentación no generó una acidificación excesiva que pudiera inhibir a los microorganismos del rumen.

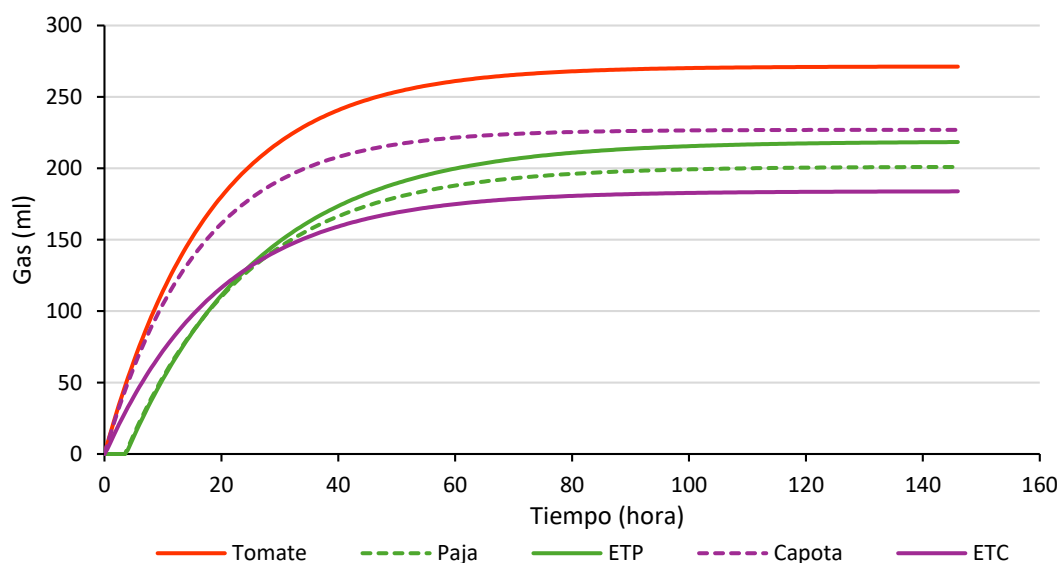
En el ETP, el contenido de N-NH<sub>3</sub> alcanzó 0,630 mmol/L, probablemente reflejando un patrón particular de liberación de amoníaco durante la fermentación, relacionado con la elevada fibra que ralentiza el proceso fermentativo (Van Soest, 1994). La composición molar de los AGV mostró un predominio de ácido acético (65,8%), un patrón característico de fermentación ruminal que favorece la síntesis de lípidos (Bergman, 1990). El ácido propiónico representó el 22,5%, indicando un potencial energético y gluconeogénico relevante (Van Soest, 1994). Los ácidos butírico, isobutírico, isovalérico y valérico aparecieron en pequeñas cantidades, reflejando la fermentación de proteínas y aminoácidos ramificados y contribuyendo a la diversidad fermentativa (Bergman, 1990). La relación acético/propiónico fue de 2,97, sugiriendo una fermentación orientada a la

producción de ácidos grasos de cadena larga, favoreciendo la producción de grasa (Russell & Wilson, 1996).

Por otro lado, en el ETC, el contenido de N-NH<sub>3</sub> alcanzó 0,572 mmol/L, asociado a la liberación de amoníaco durante la fermentación en un entorno con mayor disponibilidad de carbohidratos fermentables, lo que podría limitar la actividad proteolítica (Van Soest, 1994). La composición molar de los ácidos grasos volátiles presentó un predominio de ácido acético (61,6%), manteniendo el patrón típico de fermentación ruminal para la síntesis de lípidos (Bergman, 1990). El ácido propiónico se situó en 26,3%, lo que indica un potencial energético y glucogénico significativo (Van Soest, 1994). Los ácidos butírico, isobutírico, isovalérico y valérico aparecieron en concentraciones bajas, reflejando la fermentación de proteínas y aminoácidos ramificados (Bergman, 1990). La relación acético/propiónico fue de 2,35, mostrando una fermentación con orientación más glucogénica, y por tanto generando mayor contenido energético (Russell & Wilson, 1996).

En resumen, la fermentación ruminal in vitro mostró que ambos ensilados son adecuados para la alimentación animal, aunque el ETC da lugar a una mayor fermentabilidad y valor energético, debido a su alto contenido en carbohidratos fermentables. Por su parte, el ETP muestra una mayor liberación de amoníaco, lo que podría influir en el manejo nutricional para optimizar la eficiencia ruminal y el balance proteico (Menke & Steingass, 1988; Van Soest, 1994).

#### 5.4.2 Cinética de la fermentación ruminal de los ensilados



**Figura 5.11** Evaluación fermentativa de los alimentos y los ensilados durante 144h. ETP: Ensilado de tomate de destrío + paja; ETC: Ensilado de tomate de destrío + capota de almendra.

En la Figura 5 se presentan las cinéticas de fermentación promedio para las muestras de alimentos: paja, capota y tomate, así como para los ETP y ETC. En la Tabla 5.3 se muestran los parámetros de la modelización y la comparación entre los alimentos paja y capota con sus respectivos ensilados.

Los datos parecen indicar que la PPG del ETP fue superior al ETC, siendo en el caso del ETC inferior ( $P=0,014$ ) al de la capota sola y no habiendo diferencias entre la paja y su ensilado ( $P=0,427$ ). La tasa de producción de gas “c” fue similar para ambos ensilados y no hubo diferencias respecto a los alimentos solos. En cuanto al tiempo de latencia (Lag), fue superior para el ETP y tampoco hubo diferencias entre los ensilados y los alimentos solos. Por el contrario, el RMPG fue inferior para el ETP, y entre el ETC y la capota solo se observó una tendencia a ser mayor ( $P=0,061$ ). El tomate mostró una mayor fermentación que el resto de los ensilados o alimentos ( $PPG = 271\text{ml/g MS}$ ;  $c = 0.055\%/h$ ;  $Lag = 0$  y  $RMPG = 10.7\text{ ml/h}$ )

La menor PPG del ETC vs la capota sola podría atribuirse al mayor contenido de azúcares solubles en la capota fresca (16,5%, Tabla 1) en comparación con su ensilado (17,0%, Figura 5.6). Durante el proceso de ensilaje, se consumió una proporción considerable de estos azúcares, tanto los propios de la capota como los aportados por el tomate, reduciendo así el contenido de sustrato fácilmente fermentable.

En el caso de la paja y el ETP, esta diferencia no se observó, probablemente porque los azúcares solubles en el ensilado provenían principalmente del tomate, y fueron consumidos durante el proceso de ensilaje. Por ello, el contenido final de azúcares solubles fue similar entre la paja y su ensilado, lo que explica la ausencia de diferencias en los parámetros de fermentación.

**Tabla 5.3** Parámetros de cinética de los alimentos y sus ensilados.

Item	Paja	ETP	EEM	P	Capota	ETC	EEM	P	Tomate
PPG (ml/g MS)	201	219	33,7	0,427	227	184	13,3	0,014	271
c (%/h)	0,0482	0,0434	0,0150	0,749	0,0620	0,0504	0,0104	0,233	0,0545
Lag (h)	3,55	3,69	0,926	0,918	0	0,301	0,1357	0,215	0
RMPG (ml/h)	4,77	4,62	0,492	0,849	9,72	6,42	1,13	0,061	10,7
EM (MJ/kg MS)	7,06	7,37	0,256	0,361	9,26	8,21	0,155	0,0176	11,3

PPG: producción potencial de gas; c: ritmo fraccional de producción de gas; Lag: tiempo necesario para que se inicie la producción de gas; RMPG: ritmo medio de producción de gas; EM: energía metabolizable; ETP: ensilado de tomate de destrío + paja; ETC: ensilado de tomate de destrío + capota de almendra.

Respecto a la EM de los ensilados se observa una notable variabilidad entre los alimentos y sus combinaciones. La paja presentó el valor más bajo (7,06 MJ/kg MS), confirmando su carácter de forraje fibroso y limitado aporte energético (FEDNA, 2019). La adición de tomate (ETP) consiguió elevar ligeramente su valor hasta 7,37 MJ/kg MS, debido a los azúcares y compuestos fermentables presentes, como se comenta previamente. La capota de almendra mostró un contenido energético superior (9,26 MJ/kg MS), de acuerdo con estudios que indican su riqueza en carbohidratos y compuestos bioactivos (Recalde et al., 2023). No obstante, al ensilarse con tomate (ETC) su valor se redujo a 8,21 MJ/kg MS, en gran parte por efecto de la mezcla y pérdidas asociadas a la elevada humedad, como señalan Borreani et al. (2018). Finalmente, el tomate de destrío, evaluado de forma individual, presentó la EM más elevada (11,3 MJ/kg MS), aunque su elevada humedad puede dificultar su aprovechamiento directo, lo que justifica su uso combinado con otros subproductos.

## 5.6. Implicaciones prácticas, económicas y sostenibilidad

### 5.6.1 Comparación de los ensilados estudiados con otros utilizados en otras dietas

A continuación, se presenta una comparación de los valores de EM de los ETP y ETC con otros ensilados comúnmente utilizados en la alimentación de rumiantes.

**Tabla 5.4** Comparación de la energía metabolizable (EM) de distintos ensilados con los estudiados.

Item	Ensilado de maíz	Ensilado de alfalfa	Ensilado de hierba	Ensilado de tomate de destrío + paja	Ensilado de tomate de destrío + capota de almendra
EM (MJ/kg MS)	10,5	8,40	6,70-7,50	7,36	8,20

Comparando los valores de EM, el ensilado de maíz presenta el contenido más elevado (10,5 MJ/kg MS), seguido por el ensilado de alfalfa (8,40 MJ/kg MS). El ETC (8,20 MJ/kg MS) se sitúa en un rango intermedio, mientras que el ETP (7,36 MJ/kg MS) muestra un valor más bajo, aunque comparable al del ensilado de hierba (6,7–7,5 MJ/kg MS) (FEDNA, 2019). Como se mencionó anteriormente, la diferencia en la disponibilidad energética entre ambos se explica en parte por su composición química y los cambios ocurridos durante el ensilaje. En el caso del ETC, pese a que la capota contiene un elevado nivel de azúcares solubles, gran parte de estos son consumidos por las BAL durante la fermentación, reduciendo la disponibilidad de sustratos fácilmente degradables en el rumen y limitando su aporte real de EM (McDonald et al., 1991; Kung et al., 2018). En el ETP, aunque la incorporación del tomate aumenta ligeramente el contenido de azúcares respecto a la paja sola, el nivel final sigue siendo bajo debido a su alto contenido en fibra insoluble y reducido aporte de carbohidratos de rápida fermentación (Van Soest, 1994).

En consecuencia, si bien estos ensilados pueden aprovecharse por su disponibilidad local y bajo coste, pero no sustituyen de manera completa a ensilados de mayor valor energético como el maíz o la alfalfa, siendo recomendable combinarlos con forrajes o concentrados más energéticos para cubrir los requerimientos nutricionales de animales de alta producción.

## 5.6.2 Evaluación económica del ETC

Para evaluar la viabilidad económica de incorporar el ETC en la alimentación de ovinos lecheros, se calculó el coste de las dietas considerando el precio relativo de los forrajes. El precio del heno de alfalfa se fijó en 170 €/t, mientras que el valor del ETC se determinó como un porcentaje variable de este precio, lo que permitió identificar el nivel a partir del cual su inclusión dejaba de generar un ahorro significativo frente al uso exclusivo de heno de alfalfa.

**Tabla 5.5** Alimentos, composición química y contenido energético de dietas de ovino de leche: control y con inclusión (10 y 20%) de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra.

Item	Dieta		
	ETC0	ETC10	ETC20
<b>Ingredientes (% materia fresca)</b>			
HENO ALFALFA	45,0	35,0	25,0
Silo de tomate de destrío + capota de almendra	-	10,0	20,0
Maíz	10,0	12,0	10,0
Cebada	16,0	12,0	12,0
Harina Soja 44	6,00	6,00	4,00
DDGS	9,00	14,0	20,0
Pulpa de remolacha	12,0	8,5	6,5
Carbonato cálcico	0,50	0,50	0,50
Jabón cálcico	0,50	1,00	1,00
Premezcla VIT MIN y NaCl	1,00	1,00	1,00
<b>Composición química (% materia fresca)</b>			
Materia seca	92,0	85,0	79,0
Cenizas	6,25	6,54	6,77
Proteína bruta	15,6	15,5	15,5
Fibra neutro detergente	34,6	33,3	33,3
Fibra ácido detergente	18,4	18,1	18,3
Extracto etéreo	3,38	4,43	5,31
UFL (/kg materia seca)	0,90	0,90	0,90

ETC: ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; LETC0: dieta control para ovino lechero, con 0% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; LETC10: dieta para ovino lechero, con 10% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; LETC20: dieta para ovino lechero, con 20% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; UFL: unidades forrajeras leche.

La inclusión del ETC en dietas para ovino lechero permitió evaluar su efecto sobre el coste de alimentación manteniendo la composición química y energética de las raciones. Como se observa en la Tabla 5.5, la sustitución parcial del heno de alfalfa por ETC consiguió no alterar los niveles de proteína ni de energía, asegurando que todas las dietas fueran isoproteicas e isoenergéticas (Makkar, 2016; Van Soest, 1994). Esto evita que los

costes puedan incrementarse de forma significativa con aportes adicionales de mayor precio para equilibrar la ración.

**Tabla 5.6** Precios y ahorro de dietas de ovino de leche: control y con inclusión (10 y 20%) de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra.

Item	Dieta		
	LETC0	LETC10	LETC20
Precio del ETC (% del precio del heno de alfalfa; €/t)			
40%	235	230 (4,86)	207 (28,3)
50%	235	232 (3,16)	222 (12,7)
60%	235	233 (1,16)	226 (9,25)
70%	235	235 (0)	229 (5,85)

ETC: ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; LETC0: dieta control para ovino lechero, con 0% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; LETC10: dieta para ovino lechero, con 10% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra; LETC20: dieta para ovino lechero, con 20% de ensilado de tomate de destrío + capota de almendra.

El análisis económico, presentado en la Tabla 5.6, muestra que el ahorro por tonelada de dieta depende, como es lógico, del precio asignado al ETC respecto al del heno de alfalfa fijado. Con una inclusión del 10% de ETC, el ahorro osciló entre 0 y 4,86 €/t, mientras que con un 20% de sustitución, el beneficio económico alcanzó hasta 28,3 €/t con un precio del ETC equivalente al 40% del heno, disminuyendo progresivamente a medida que el valor del ensilado se aproximaba al del heno (5,85 €/t al 70%). Estos resultados permiten establecer el rango de precios en el que la incorporación de ETC sigue siendo rentable, considerando que la sustitución deja de ser significativa cuando el ahorro por tonelada es cercano a 3 €/t, ya que valores inferiores suelen quedar dentro de la variabilidad habitual de los precios de mercado y de la composición nutricional de los forrajes, lo que no compensa los posibles costes y riesgos asociados a la sustitución (FAO, 2011; Recalde et al., 2023). Este tipo de análisis contribuye a evaluar la viabilidad económica de la utilización de subproductos agroindustriales en la alimentación de rumiantes.

### 5.6.3 Enfoque sostenible de los ensilados

La elaboración de ensilados a partir de tomates de destrío representa una estrategia de aprovechamiento de subproductos con alto potencial para mejorar la sostenibilidad de los

sistemas ganaderos. Este enfoque se alinea con los principios de la bioeconomía circular, que promueve la reincorporación de materiales residuales en la cadena productiva, reduciendo así la presión sobre los recursos naturales y las emisiones asociadas a su eliminación (FAO, 2013; European Commission, 2018).

El uso de materiales absorbentes de origen local, como la capota de almendra, y la paja de cereal, residuos agrícolas de amplia disponibilidad, añade un valor adicional desde el punto de vista ambiental. Por un lado, se evita la quema o el abandono de estos subproductos, lo que contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la degradación del suelo (FAO, 2013; European Commission, 2018). Por otro lado, se reduce la dependencia de forrajes comerciales y piensos concentrados, lo que repercute en una menor huella de carbono asociada al transporte y procesamiento de insumos externos (Herrero et al., 2013; Makkar, 2016).

Desde el punto de vista socioeconómico, esta práctica fomenta la economía local, ya que promueve el uso de materias primas disponibles en la propia zona de producción, reduciendo costes logísticos y minimizando el impacto de las fluctuaciones en el precio y la disponibilidad de insumos externos sobre la actividad de la explotación (FAO, 2011; Recalde et al., 2023). En contextos de sequía o limitaciones en la producción de forrajes tradicionales, el ensilado de tomate con materiales absorbentes puede actuar como recurso estratégico para mantener la oferta de alimento durante todo el año (Álvarez et al., 2015).

Asimismo, la integración de estos ensilados en las dietas de rumiantes contribuye al cumplimiento de las directrices europeas en materia de sostenibilidad y gestión de residuos, y se enmarca dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 12 “Producción y consumo responsables”. En consecuencia, su aplicación no solo responde a necesidades nutricionales, sino que también constituye una medida efectiva para avanzar hacia sistemas agroganaderos más eficientes, sostenibles y ambientalmente responsables (Makkar, 2016).

## **6.- CONCLUSIONES**

1. El ensilaje de tomate con paja de cereales o capota de almendra constituyen una alternativa técnica y ambientalmente viable para la alimentación de rumiantes, cuyo potencial se ha evaluado in vitro, contribuyendo además a la economía circular y a la reducción del desperdicio agroalimentario.
2. Como consecuencia del proceso de ensilaje se produjo un incremento pasivo del contenido en PB, FND y FAD y EE (solo en ETC) como consecuencia de la fermentación de los azúcares solubles.
3. Ambos tipos de ensilado presentan características adecuadas de pH, ácido láctico y AGV que garantizan su estabilidad y capacidad para ensilar. Además, ambos tipos de ensilados presentaron un perfil de fermentación ruminal in vitro adecuado.
4. La inclusión de 10% de ETC en dietas para ovino lechero es rentable si su precio es menor al 60% del heno de alfalfa; incluyendo un 20% de ETC su precio puede alcanzar hasta el 70% y seguir siendo rentable.
5. La inclusión del ETC en dietas para ovino lechero favorece la sostenibilidad al reducir residuos y dependencia de insumos externos, enmarcándose en la bioeconomía circular y reforzando la eficiencia de los sistemas ganaderos.

## 7.- BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, S., Fresno, M., & Méndez, P. 2015. Ensilado de desrío de tomate para la alimentación caprina. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, La Laguna. [http://www.icia.es/icia/GanAfrica/Ensilado\\_Tomate.pdf](http://www.icia.es/icia/GanAfrica/Ensilado_Tomate.pdf) Consultado: 25/08/2025.

Álvarez, S., Martínez-Fernández, A., & Méndez, P. 2020. Ensiling potential of fresh tomato waste with dehydrated beet pulp and cereal straw as additives. *Anim. Nutr. Feed Technol.*, 20: 381–392. <https://doi.org/10.5958/0974-181X.2020.00034.7>

AOAC. 2005. Official methods of analysis, 18th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

Bergman, E. N. 1990. Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiol. Rev.*, 70: 567–590. <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.2.567>

Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., & Muck, R. E. 2018. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *J. Dairy Sci.*, 101: 3952–3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>

Callejo Ramos, A. 2018. Conservación de forrajes: Henificación y ensilado. Tesis doctoral, Universidad de León, León.

Chávez-Mendoza, C., & Sánchez, E. 2017. Bioactive compounds and antioxidant activity in different types of tomatoes. *Food Chem.*, 216: 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.061>

Correddu, F., Caratzu, M. F., Lunesu, M. F., Carta, S., Pulina, G., & Nudda, A. 2023. Grape, pomegranate, olive, and tomato by-products fed to dairy ruminants improve milk fatty acid profile without depressing milk production. *Foods*, 12: 865. <https://doi.org/10.3390/foods12040865>

De Evan, T., Bach, A., & Alvir, M. R. 2020. Métodos de incubación in vitro para la evaluación de la fermentación ruminal. *J. Anim. Sci.*, 98: 1–12. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa134>

Dupuis, I., & Álvarez, S. 2015. *Evaluación de subproductos agroalimentarios para la alimentación animal en Canarias: análisis geográfico, de viabilidad y desarrollo metodológico*, Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Tenerife, Spain.

European Commission. 2018. A sustainable bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society and the environment. Updated Bioeconomy Strategy, Bruselas. <http://doi.org/10.2777/478385>

FAO. 2011. Manual de ensilado para pequeños y medianos productores. FAO, Roma.

FAO. 2013. Sustainable food systems: Concept and framework. FAO, Roma. <http://www.fao.org/3/i3004e/i3004e.pdf> Consultado: 12/08/2025.

FEDNA. 2019. Tablas de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos en España, 3ª ed., Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal, Madrid.

Feedipedia. 2020. Feedipedia: Animal feed resources information system. INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org> Consultado: 11/08/2025.

Goering, H. K., & Van Soest, P. J. 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications), USDA Agricultural Handbook No. 379, Washington, DC.

Herrero, M., Thornton, P. K., Gerber, P., & Reid, R. S. 2013. Livestock and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-167: 779–782. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.083>

Heyko, D. 2025. Valoración del ensilado como método de conservación de la capota de almendra. Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

INRA. 2018. INRA feeding system for ruminants 2018, Wageningen Academic Publishers, Wageningen.

Kung, L., Shaver, R. D., Grant, R. J., & Schmidt, R. J. 2018. Silage review: Interpretation of chemical, microbial and organoleptic components of silages. *J. Dairy Sci.*, 101: 4020-4033. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14006>

Makkar, H. P. S. 2016. Feed evaluation: Principles and methods to determine the nutritive value of feeds for ruminants, FAO Animal Production and Health Guidelines No. 9, FAO, Roma. <http://www.fao.org/3/a-i5840e.pdf> Consultado: 15/08/2025.

- Marcos, C. N., de Evan, T., Molina-Alcaide, E., & Carro, M. D. 2019. Nutritive value of tomato pomace for ruminants and its influence on in vitro methane production. *Animals*, 9: 343. <https://doi.org/10.3390/ani9060343>
- MAPA. 2019. Producción de cereales y subproductos en España: informe anual de indicadores. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA. 2020. Producción de tomate de destrío en España: informe anual de indicadores. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA. 2022. El cultivo de almendro en España: datos y análisis del sector. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA. 2023. Avance de superficies y producciones agrícolas 2023. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Menke, K. H., & Steingass, H. 1988. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Anim. Res. Dev.*, 28: 7–55.
- McDonald, P., Henderson, A. R., & Heron, S. J. E. 1991. *The biochemistry of silage*, 2nd ed., Chalcombe Publications, Marlow.
- Muck, R. E. 2010. Silage microbiology and its control through additives. *Rev. Bras. Zootec.*, 39(suppl spe): 183–191. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300021>
- Ørskov, E. R., McDonald, I. 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J Agric Sci*, 92: 499-503. <https://doi.org/10.1017/S0021859600063048>
- Recalde Garcete, A., Benítez, M., de Evan, T., & Carro, M. D. 2023. Capota de almendra y alimentación animal: Una contribución a la economía circular. XV Congreso de Estudiantes de Ciencia, Tecnología e Ingeniería Agronómica. Universidad Politécnica de Madrid. <http://portalcientifico.upm.es/es/ipublic/item/10335691> Consultado: 17/08/2025.
- Recalde Garcete, A. M. 2025. Evaluation of almond hulls as an alternative ingredient for ruminant feeding. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

- Robertson, J. B., Van Soest, P. J. 1981. The detergent system of analysis and its application to human foods. *J Nutr*, 111: 136-140. <https://doi.org/10.1093/jn/111.1.136>
- Russell, J. B., & Wilson, D. B. 1996. Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH? *J. Dairy Sci.*, 79: 1503–1509.
- Samarasinghe, K., Fon, F. N., & Yiridoe, E. K. 2019. Evaluation of silage fermentation characteristics using aqueous extracts and buffer systems. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 32: 205–213. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0208>
- Santos Lara, W. R. 2025. Valoración nutritiva de diferentes variedades de destrío de tomate para la alimentación de rumiantes. Trabajo Final de Máster, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., & France, J. 1994. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 48: 185–197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)
- Van Soest, P. J. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant*, 2nd ed., Cornell University Press, Ithaca.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.*, 74: 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Weatherburn, M. W. 1967. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. *Anal. Chem.*, 39: 971–974. <https://doi.org/10.1021/ac60252a045>
- Yemm, E. W., Willis, A. J. 1954. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochem J*, 57: 508-514. <https://doi.org/10.1042/bj0570508>