

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL
PROCESO DE CO-COMPOSTAJE DE
LODOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA
AVÍCOLA DE CARNE CON RESIDUOS DE
LA INDUSTRIA OLEÍCOLA Y RESIDUOS
VEGETALES MUNICIPALES**

LUIS MANUEL TORRES GINÉS

2022

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL
PROCESO DE CO-COMPOSTAJE DE
LADOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA
AVÍCOLA DE CARNE CON RESIDUOS DE
LA INDUSTRIA OLEÍCOLA Y RESIDUOS
VEGETALES MUNICIPALES**

Vº Bº DIRECTOR

Concepción Paredes Gil

Vº Bº CODIRECTOR



Antonio Davó Sarrión

ALUMNO



Luis Manuel Torres Ginés



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza al alumno **D. Luis Manuel Torres Ginés**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Estudio de la evolución del proceso de co-compostaje de lodos procedentes de la industria avícola de carne con residuos procedentes de la industria oleícola y residuos vegetales municipales”, bajo la dirección de D^a. Concepción Paredes Gil, de la Universidad Miguel Hernández, y de D. Antonio Davó Sarrión, de la empresa Ecoindustria del Reciclado, S.L., debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 10 de septiembre de 2022

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos

Fdo.: Concepción Paredes Gil

TRIBUNAL	
FECHA:	
PRESIDENTE:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Luis Manuel Torres Ginés

Título: Estudio de la evolución del proceso de co-compostaje de lodos procedentes de la industria avícola de carne con residuos procedentes de la industria oleícola y residuos vegetales municipales

Title:

Director/es del TFM: Concepción Paredes Gil

Año: 2022

Titulación: Máster en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos

Tipo de proyecto: investigación

Palabras claves: biosólido, orujillo de oliva, ceniza de orujillo de oliva, poda urbana, compost, estabilización.

Keywords: biosolid, olive husk, ash of olive husk, municipal pruning, compost, stabilization

N.º citas bibliográficas: 22

N.º de planos:

N.º de tablas: 13

N.º de figuras: 15

N.º de anexos:

RESUMEN

En este trabajo se está realizando un experimento de co-compostaje de lodos procedentes de la industria avícola (LAV), con residuos de orujillo (OR), cenizas de orujillo (COR) y poda urbana (PU). Se fabricaron tres pilas con diferentes proporciones de los residuos anteriores en una planta de tratamiento de situada en Guadix, Granada. El objetivo del trabajo es estudiar el comportamiento de este tipo de residuos con respecto al compostaje, ya que es la mejor alternativa para su valorización, transformando los residuos orgánicos en productos fertilizantes de calidad agrícola. Se trata de un experimento que está durando más de 300 días y no ha concluido a la fecha de presentación de esta memoria. No obstante, en los resultados de las muestras analizadas, se puede observar la evolución de algunos parámetros físico-químicos, que indican que el proceso se está desarrollando adecuadamente, aunque está siendo muy largo debido a la naturaleza recalcitrante de los residuos utilizados, que contienen materia orgánica más difícilmente biodegradable.

ABSTRACT

In this work, a co-composting experiment of sludge from the poultry industry (LAV) is being carried out, with pomace residues (OR), pomace ashes (COR) and urban pruning (PU). Three batteries were manufactured with different proportions of the previous waste in a treatment plant located in Guadix, Granada. The objective of the work is to study the behavior of this type of waste with respect to composting, since it is the best alternative for its recovery, transforming organic waste into fertilizer products of agricultural quality. This is an experiment that is lasting more than 300 days and has not concluded at the date of presentation of this report. However, in the results of the analyzed samples, the evolution of some physical-chemical parameters can be observed, which indicate that the process is developing adequately, although it is taking a long time due to the recalcitrant nature of the waste used, which contains more difficult to biodegradable organic matter.

INFORME DE EVALUACIÓN DE INVESTIGACIÓN RESPONSABLE DE 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)

Elche, a 16 de junio del 2022

Nombre del tutor/a	Concepción Paredes Gil
Nombre del alumno/a	Luis Manuel Torres Ginés
Tipo de actividad	6. Actividad de investigación técnica (publicable y no aplican las opciones 7-11)
Título del 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)	Co-compostaje de lodos procedentes de la industria avícola de carne con residuos vegetales
Código/s GIS estancias	-
Evaluación Riesgos Laborales	No procede
Evaluación Ética	No procede
Registro provisional	220610210027
Código de Investigación Responsable	TFM.MGT.CPG.LMTG.220610
Caducidad	2 años

Una vez atendidas las observaciones/condiciones mencionadas en el informe adjunto del Servicio de Prevención de Riesgos Laborales, en caso de que las hubiera, se considera que el presente proyecto/contrato/prestación de servicios carece de riesgos laborales significativos para las personas que participan en el mismo, ya sean de la UMH o de otras organizaciones y, por tanto, es conforme.

La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: **Co-compostaje de lodos procedentes de la industria avícola de carne con residuos vegetales** ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: "TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)" y "Condiciones de prevención de riesgos laborales" (si procede). Es importante destacar que si la información aportada en dichos formularios no es correcta este informe no tiene validez.

Por todo lo anterior, **se autoriza** la realización de la presente actividad.

Atentamente,

Alberto Pastor Campos
Secretario del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Domingo L. Orozco Beltrán
Presidente del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Información adicional:

- En caso de que la presente actividad se desarrolle total o parcialmente en otras instituciones es responsabilidad del investigador principal solicitar cuantas autorizaciones sean pertinentes, de manera que se garantice, al menos, que los responsables de las mismas están informados.
- Le recordamos que durante la realización de este trabajo debe cumplir con las exigencias en materia de prevención de riesgos laborales. En concreto: las recogidas en el plan de prevención de la UMH y en las planificaciones preventivas de las unidades en las que se integra la investigación. Igualmente, debe promover la realización de reconocimientos médicos periódicos entre su personal; cumplir con los procedimientos sobre coordinación de actividades empresariales en el caso de que trabaje en el centro de trabajo de otra empresa o que personal de otra empresa se desplace a las instalaciones de la UMH; y atender a las obligaciones formativas del personal en materia de



prevención de riesgos laborales. Le indicamos que tiene a su disposición al Servicio de Prevención de la UMH para asesorarle en esta materia.

La información descriptiva básica del presente trabajo será incorporada al repositorio público de Trabajos fin de Grado y Trabajos Fin de Máster autorizados por la Oficina de Investigación Responsable de la Universidad Miguel Hernández en el curso académico 2020/2021. También se puede acceder a través de <https://oir.umh.es/tfg-tfm/>



Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. LA INDUSTRIA AVÍCOLA DE CARNE EN ESPAÑA	1
1.2. LA INDUSTRIA OLEÍCOLA EN ESPAÑA.....	10
1.2.1. <i>Producción de aceite de oliva y subproductos</i>	13
1.3. RESIDUOS VEGETALES URBANOS	15
1.4. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS	16
1.5. EL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	17
1.5.1. <i>Fases del proceso</i>	17
1.5.2. <i>Factores que intervienen en el proceso de compostaje</i>	19
1.5.3. <i>Tipos de sistemas de compostaje</i>	21
2. OBJETIVOS	22
3. MATERIAL Y MÉTODOS	23
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	23
3.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS INICIALES	25
3.1.2. MONTAJE DE LAS PILAS.....	28
3.1.3. PROGRAMACIÓN DE VOLTEOS Y MUESTREOS	29
3.1.4. <i>Desarrollo y seguimiento del proceso</i>	30
3.2. MÉTODOS ANALÍTICOS Y ESTADÍSTICOS	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS Y QUÍMICAS DE LAS MEZCLAS INICIALES	33
4.2. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA	38
4.3. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD.....	40
4.4. EVOLUCIÓN DEL PH	42
4.5. EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	43
4.6. EVOLUCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL	45
4.7. EVOLUCIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL	45
4.8. EVOLUCIÓN DE LA RELACIÓN C/N.....	46
4.9. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO EN GRASAS	47
5. CONCLUSIONES	50
6. BIBLIOGRAFÍA	51

1. Introducción

1.1. La industria avícola de carne en España

En el 2020, la industria cárnica ocupó el primer lugar de toda la industria de alimentos y bebidas en España, con una cifra de negocio de 27.959 millones de euros (**Tabla 1.1**), representando el 22,2% de la cifra de negocio total de todo el sector alimentario español. En el conjunto de la industria española, supone el 2,32 % del PIB total, el 16,2 % del PIB de la rama industrial y el 4,2 % de la facturación total de la industria española (ANICE, 2021). Se trata, por tanto, de una industria que genera gran cantidad de residuos, especialmente orgánicos, que son susceptibles de valorización.

Tabla 1.1. Datos económicos de la industria cárnica española. Fuente: Memoria Anual 2020 (ANICE, 2021). *mil. €: millones de euros.

Cifra total de negocio	27.959 *mil. €
Procesado y conservación de carne	12.913 mill. €
Procesado y conservación de volatería	3.800 mill. €
Elaboración de productos cárnicos y volatería	11.246 mill. €
Porcentaje sobre la cifra de negocios total del sector alimentario	22,2 %
Porcentaje sobre la facturación total de la industria española	4,17 %
Porcentaje de la facturación sobre el PIB total de España	2,32 %
Porcentaje de la facturación sobre el PIB industrial de España	16,20 %

En el año 2020 se sacrificaron $799,848 \times 10^3$ aves en España de las cuales unos $696,387 \times 10^3$ fueron pollos de engorde (**Tabla 1.2**) con una producción de carne de $1,4 \times 10^6$ toneladas (**Tabla 1.3**) (Anuario de Estadística, 2020). La producción de carne de pollo de engorde en Andalucía en 2020, fue de 324.495 toneladas, representando el

23,15 % del total de España (Anuario de Estadística, 2020). En Andalucía existen 759 granjas de producción de pollos de engorde (MAPA, 2020), de las que 200 de ellas surten de carne a las instalaciones de procedencia del lodo utilizado en el presente trabajo. Cataluña lidera en cuanto a número de aves sacrificadas, con un total de 189,837 10³, de las cuales 146.147 10³ fueron pollos de engorde. Detrás está Andalucía, con 158.250 10³ aves sacrificadas en total, de las cuales 143.244 10³ fueron pollos de engorde.

Tabla 1.2. Análisis autonómico del número de aves sacrificadas en 2020 (Miles).
Fuente: Anuario de Estadística 2020 (MAPA, 2021)

CCAA	Pollos de engorde	Gallinas	Otras aves	Total
Galicia	89.517	5.696	2.950	98.164
Asturias	-	-	-	-
Cantabria	-	-	-	-
País Vasco	d/c (1)	-	-	d/c (1)
Navarra	d/c (3)	d/c (1)	d/c	56.404
La Rioja	d/c (1)	-	-	d/c (1)
Aragón	288	-	d/c	3.213
Cataluña	146.147	2.215	41.475	189.837
Baleares	113	-	d/c	114
Castilla y León	58.226	76	d/c	59.751
Madrid	25.358	d/c (1)	d/c	25.444
Castilla-La Mancha	22.939	8.051	d/c	31.046

Valencia	81.624	15.463	377	97.465
Murcia	18.681	-	d/c	18.807
Extremadura	34.850	6.444	-	41.294
Andalucía	143.244	352	d/c	158.250
Canarias	6.530	398	-	6.927
ESPAÑA	696.387	38.787	64.675	799.848

d/c: Datos Confidenciales

d/c (1): Dato Confidencial cuya cifra representa < 2% de cabezas sacrificadas en España por categoría

d/c (2): Dato Confidencial cuya cifra representa entre el 2 y el 5 % de cabezas sacrificadas en España por categoría

d/c (3): Dato Confidencial cuya cifra representa entre el 5 y el 10 % de cabezas sacrificadas en España por categoría

d/c (4): Dato Confidencial cuya cifra representa entre el 10 y el 30 % de cabezas sacrificadas en España por categoría

Tabla 1.3. Análisis autonómico del peso de las canales de aves en 2020 (Toneladas).
Fuente: Anuario de Estadística 2020 (MAPA, 2021)

CCAA	Pollos de engorde	Gallinas	Otras aves	Total
Galicia	188.692,8	6.804,0	28.026,6	223.523,4
Asturias	-	-	-	-
Cantabria	-	-	-	-
País Vasco	d/c (1)	-	-	d/c (1)

Navarra	d/c (3)	d/c (1)	d/c	86.930,5
La Rioja	d/c (1)	-	-	d/c (1)
Aragón	712,4	-	974,0	1.686,4
Cataluña	268.458,8	5.838,5	85.991,3	354.956,9
Baleares	245,5	-	d/c	246,5
Castilla y León	114.963,4	172,2	11.499,4	126.635,0
Madrid	52.251,6	d/c (1)	d/c	52.414,8
Castilla-La Mancha	50.374,4	14.595,0	121,8	65.091,2
Valencia	167.241,1	28.651,5	2.789,7	198.682,3
Murcia	39.142,1	-	d/c	40.023,7
Extremadura	70.743,9	3.755,2	-	79.499,1
Andalucía	324.495,5	1.168,1	111.708,8	437.372,4
Canarias	11.720,1	453,3	-	12.173,4
ESPAÑA	1.401.408,6	66.612,4	239.796,7	1.707.997,7

d/c: Datos Confidenciales

d/c (1): Dato Confidencial cuya cifra representa < 2% de cabezas sacrificadas en España por categoría

d/c (2): Dato Confidencial cuya cifra representa entre el 2 y el 5 % de cabezas sacrificadas en España por categoría

d/c (3): Dato Confidencial cuya cifra representa entre el 5 y el 10 % de cabezas sacrificadas en España por categoría

d/c (4): Dato Confidencial cuya cifra representa entre el 10 y el 30 % de cabezas sacrificadas en España por categoría

1.1.1. Esquema de un matadero avícola

La cadena de producción de carne avícola, incluye los mataderos y las salas de despiece. En la **figura 1.1** se representa el esquema de producción de carne avícola desde el matadero hasta el despiece. Las operaciones realizadas en el matadero incluyen la recepción y espera de los animales, el secado en jaulas y colgado, el aturdimiento, el desangrado, el escaldado y el desplumado. Después se realizan operaciones de evisceración, las cuales incluyen el cortado de patas y cabezas, el lavado de las canales y operaciones de enfriamiento. Por último, en el despiece se clasifican y envasan las piezas.

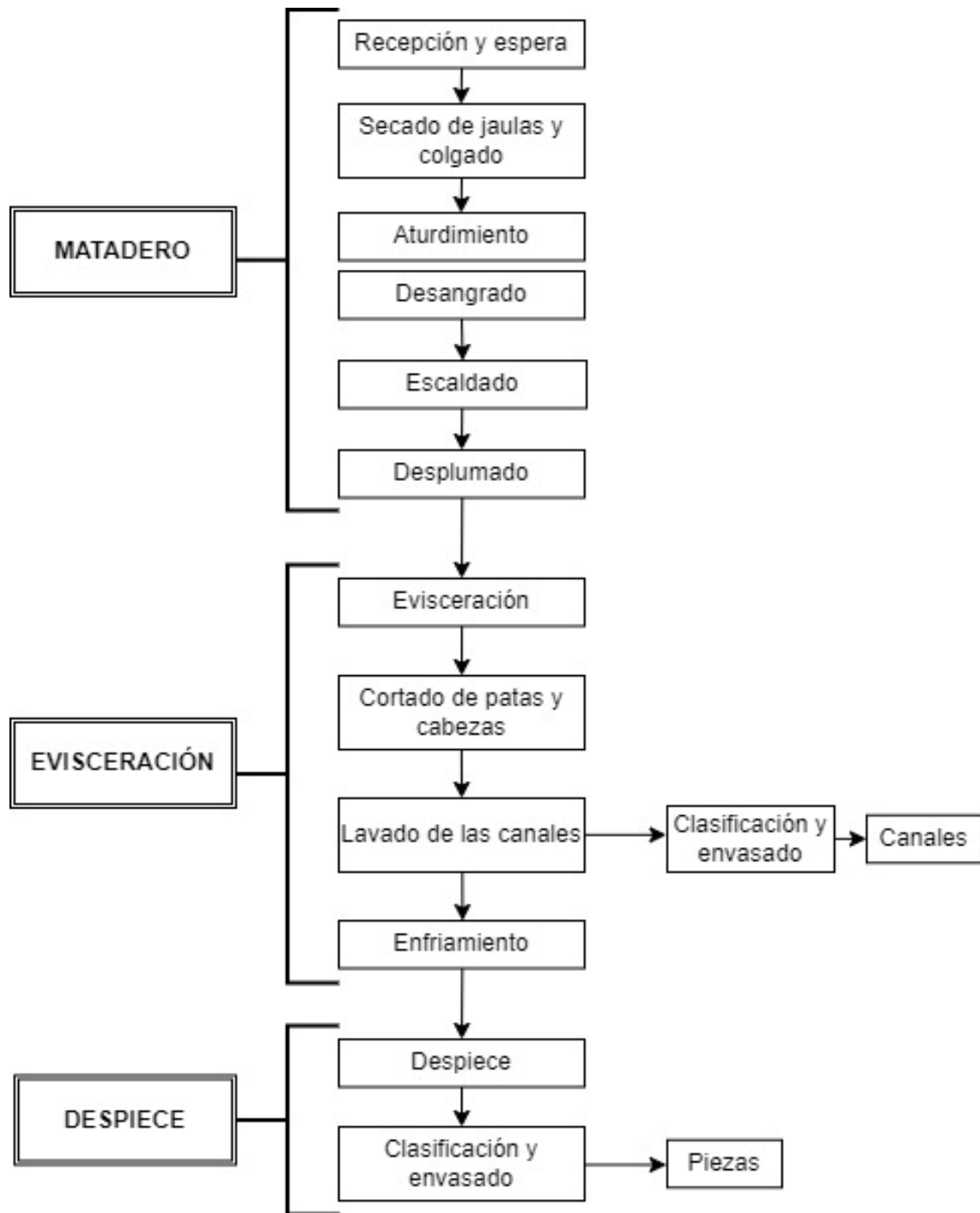


Figura 1.1. Esquema de matadero y sala de despiece. Fuente: Guía de Mejores Técnicas en Mataderos Avícolas (Canales y col., 2006)

1.1.2. Aspectos ambientales en los mataderos

Los aspectos ambientales a tener en cuenta en los mataderos avícolas, se recogen en la **tabla 1.4**. Cabe destacar que el gran volumen de agua consumido en estas instalaciones en los distintos procesos, hace que la gestión de las aguas sea el aspecto ambiental más relevante a tener en cuenta. Dentro de la gestión de las aguas, se incluye su tratamiento previo al vertido, en el cual se generan residuos sólidos orgánicos que es necesario gestionar adecuadamente.

Tabla 1.4. Aspectos ambientales y características a tener en cuenta en los mataderos de aves. Fuente: Guía de Mejores Técnicas en Mataderos Avícolas (Canales y col., 2006)

Aspecto ambiental	Operaciones	Características
Agua residual	Desangrado	Elevada carga orgánica, sólidos, grasas, restos de sangre, proteínas, microorganismos, fragmentos de plumas, excrementos y contenido intestinal, etc.
	Escaldado	
	Desplumado	
	Lavado de canales	
	Limpieza de equipos	
	Limpieza de jaulas, muelle de vivos y camiones	
Emisiones atmosféricas	Producción de calor	Gases de combustión
Residuos sólidos	Recepción y espera	Plumas, huesos y tejidos varios, vísceras no comestibles, animales no aptos, gallinaza, contenidos intestinales y lodos del tratamiento de aguas
	Desplumado	
	Evisceración	
	Tratamiento de aguas	
Consumo de agua	Escaldado	Consumo de agua para diversos fines
	Lavado de las canales	
	Limpieza de equipos	

	Limpieza de jaulas, muelle de vivos y camiones	
Consumo de energía	Escaldado Enfriamiento Cámaras de refrigeración	Térmica y/o eléctrica
Olores	Escaldado	Provocados por animales vivos, vertidos, residuos sólidos y tratamiento de subproductos

Emisiones de la industria avícola de carne

- Aguas residuales

En las industrias avícolas de producción de carne se genera una gran cantidad de agua residual procedente de las operaciones de limpieza, transporte, enfriamiento, etc. La generación de aguas es el aspecto más significativo a tener en cuenta en cuanto al control de emisiones, debido a la gran cantidad que se generan y a los riesgos ambientales que pueden derivarse de su incorrecta gestión. Las características de las aguas residuales de un matadero avícola, se pueden encontrar en la **tabla 1.5**. En las instalaciones productoras de carne avícola, se debe llevar a cabo la monitorización de las aguas residuales, para poder así controlar los valores máximos de concentración de los distintos parámetros químicos permitidos por la legislación. La **tabla 1.6** contiene los principales parámetros analizados en las aguas residuales, así como las principales fuentes.

Tabla 1.5. Características del agua residual de un matadero avícola. Fuente: Guía de Mejores Técnicas en Mataderos Avícolas (Canales y col., 2006)

Parámetros, unidades	Resultado
DBO, kg/t canal	2,43 - 43

DQO, kg/t canal	4 – 41
Nitrógeno, g/t canal	560 – 4652
Fósforo, g/t canal	26,2 – 700
Sólidos en suspensión, g/t canal	48 - 700

Tabla 1.6. Principales parámetros y fuentes de contaminación de las aguas residuales de un matadero. Fuente: Guía de Mejores Técnicas en Mataderos Avícolas (Canales y col., 2006)

Parámetros	Principales fuentes
Materia orgánica (DQO, COT)	Sangre, aguas de escaldado, gallinaza, contenidos estomacales, etc.
Sólidos en suspensión	Gallinaza, contenidos estomacales, pelos, restos de carne
Aceites y grasas	Aguas de escaldado, lavado de canales
Amonio y urea	Gallinaza, sangre
Fosfatos, nitrógeno y sales	Gallinaza contenidos estomacales, sangre, productos detergentes y desinfectantes
Detergentes y desinfectantes	Productos detergentes y desinfectantes

- Emisiones atmosféricas

Las emisiones atmosféricas generadas en la industria avícola de carne, se corresponden fundamentalmente con los gases de combustión generados en la sala de calderas, por lo que la concentración de gases contaminantes dependerá del tipo de caldera usada y de las condiciones de combustión. También existen otras emisiones difusas debidas a los sistemas de generación de fríos y a la manipulación de gallinaza, por las emisiones de metano, amoníaco y partículas. Los principales gases emitidos son CO, CO₂, NO, NO₂ y SO₂) (Canales y col., 2006).

- Generación de residuos

Debido a la cantidad generada, los órganos de los animales no destinados al consumo humano, son los residuos más importantes generados en los mataderos. Aunque se pueden considerar como residuo desde el punto de vista ambiental, son considerados como subproductos desde el punto de vista sanitario, según el Reglamento CE n.º 1774/2002 y sus modificaciones posteriores, donde se establecen tres categorías de subproductos. Además de los órganos, también es importante la generación de gallinaza por los problemas ambientales que pueden derivarse si no se gestiona correctamente. La sangre y las plumas también pueden ocasionar problemas si no se gestionan correctamente. Por último, los lodos de depuración generados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, pueden llegar a ser importantes y suponer un problema en cuanto a su gestión. Su elevada humedad hace necesario un tratamiento de deshidratación y su alta putrescibilidad obliga a su rápida gestión para prevenir la generación de olores. La opción más sencilla para gestionar los lodos de depuración, es el compostaje y su posterior utilización como enmiendas orgánicas, teniendo en cuenta los valores límite de metales pesados establecidos en la legislación (Canales y col., 2006).

1.2. La industria oleícola en España

La producción de aceite de oliva en España supone el 70 % de la producción de la UE y el 45 % de la mundial. El cultivo del olivar en España abarca 2,75 millones de

hectáreas, de las cuales el 93 % se destinan a la producción de aceite de oliva. Andalucía es la comunidad autónoma con mayores extensiones de cultivo destinado al olivar, con un 80 % del total, seguida de Castilla La-Mancha, con un 8 % y Extremadura, con un 4 % (MAPA, 2020).

Tabla 1.7. Superficie en hectáreas de cultivo ocupada por olivares destinados a almazaras por comunidad autónoma y porcentaje sobre el total de cada una. Fuente: Anuario de estadística 2020.

CCAA	Superficie ocupada (hectáreas)	Porcentaje de extensión de cultivo (%)
Galicia	275	0,01%
Asturias	-	-
Cantabria	-	-
País Vasco	365	0,01%
Navarra	7.752	0,32%
La Rioja	5.651	0,23%
Aragón	46.534	1,91%
Cataluña	109.315	4,49%
Baleares	8.416	0,35%
Castilla y León	7.601	0,31%
Madrid	26.585	1,09%
Castilla-La Mancha	373.619	15,34%
Valencia	93.276	3,83%

Murcia	21.815	0,90%
Extremadura	195.332	8,02%
Andalucía	1.538.263	63,17%
Canarias	328	0,01%
ESPAÑA	2.435.127	100%

El sector productor de aceite de oliva es muy importante en España, siendo también Andalucía la comunidad autónoma con la mayor producción, con 1.094.318 toneladas de aceite de oliva virgen y 48.711 toneladas de aceite de orujo (Anuario de Estadística, 2020).

Tabla 1.8. Producción en toneladas de aceite de oliva virgen, aceite de orujo y orujo sin desgrasar por comunidades autónomas. Fuente: Anuario de estadística 2020.

CCAA	Aceite de oliva virgen	Aceite de orujo	Orujo sin desgrasar
Galicia	41	-	-
Asturias	-	-	-
Cantabria	-	-	-
País Vasco	66	-	180
Navarra	4.036	345	17.552
La Rioja	2.447	-	9.420
Aragón	11.104	842	35.340
Cataluña	34.331	-	170.546

Baleares	626	-	-
Castilla y León	1.458	56	2.972
Madrid	6.437	-	25.748
Castilla-La Mancha	66.220	2.425	156.981
Valencia	23.916	313	83.528
Murcia	10.382	625	31.311
Extremadura	72.235	10.322	247.720
Andalucía	895.880	61.744	2.825.211
Canarias	54	-	-
ESPAÑA	1.129.192	76.672	3.606.509

1.2.1. Producción de aceite de oliva y subproductos

El proceso de extracción del aceite comienza con la recepción en las almazaras de la aceituna. Una vez pesada, se descarga en una tolva comunicada con una cinta que la transporta por la línea de limpieza para eliminar hojas y otras impurezas que puedan ir mezcladas con el fruto. Durante este proceso se generan residuos de hojas y ramas principalmente. Éstas pueden ser aprovechadas para servir de alimento al ganado, o bien gestionadas para servir como estructurante en el compostaje.

Después de la limpieza, se procede a la molienda y batido para generar una pasta. La molienda es la trituración de la aceituna con el fin de obtener el aceite contenido en la pulpa principalmente. Después de la molienda, se procede al batido con el objetivo de conseguir la ruptura de la emulsión aceite-agua y reunir las gotas de aceite (Jiménez A. y col. 1995).

Actualmente, en la mayoría de los casos, el proceso de obtención del aceite de oliva virgen, se realiza principalmente con sistemas llamados continuos, en los que se separan las fases aplicando la fuerza centrífuga a la masa de aceituna. Según el número de elementos separados obtenidos, se consideran sistemas de dos o tres fases. Los sistemas de dos fases son los que se utilizan generalmente, debido a la disminución en la generación de alpechín con respecto al sistema de tres fases. La **figura 1.2** representa el diagrama de flujo de ambos sistemas.

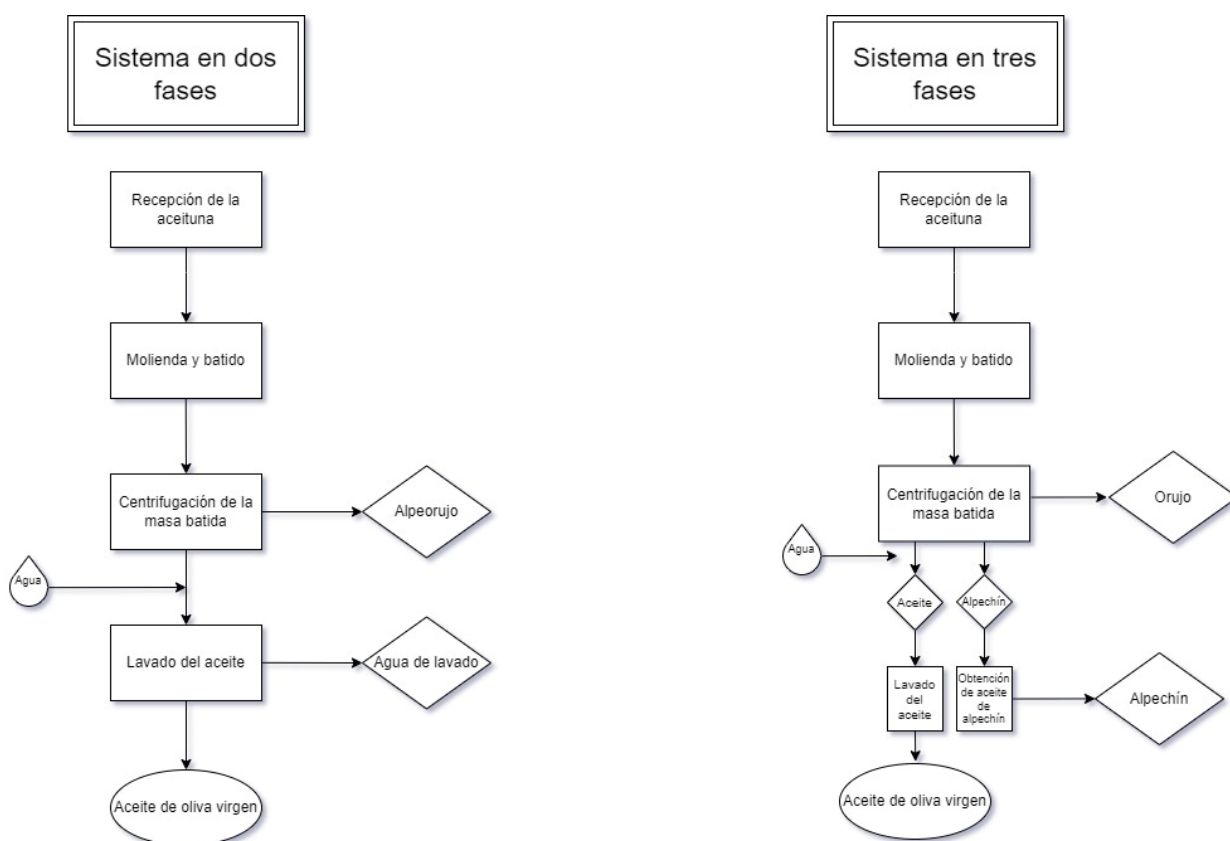


Figura 1.2. Diagramas de extracción del aceite en dos y tres fases. Fuente: Jiménez Márquez y col., 1995.

En el sector oleícola de extracción de aceite de oliva se obtienen diferentes subproductos y residuos, tales como el orujillo de oliva. La valorización principal de este residuo es la energética mediante su combustión, originándose de este proceso otro residuo, como son las cenizas de orujillo y el material que no se ha llegado a procesar, compuesto por restos de orujillo y otros residuos orgánicos del proceso de limpieza.

1.3. Residuos vegetales urbanos

La ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, define biorresiduo como: “residuo biodegradable vegetal de hogares, jardines, parques y del sector servicios, así como residuos alimentarios y de cocina procedentes de hogares, oficinas, restaurantes, mayoristas, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, entre otros, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos” (MITECO, 2022).

Los biorresiduos pueden dividirse en 2 tipos, según su naturaleza:

- Fracción orgánica: residuos orgánicos de origen alimentario y de cocina.
- Residuos vegetales o Fracción Vegetal (FV), procedentes de zonas verdes y de vegetación. A su vez dentro de la FV, se puede dividir en 2 según su tamaño y tipo, distinguiendo entre fracción vegetal de pequeño tamaño (hojarasca, césped, pequeñas ramas, etc.) y restos de poda, los cuales se constituyen por restos vegetales de mayor tamaño, de tipo leñoso y tienen características que hacen que necesiten una gestión específica según la frecuencia y periodo de generación, logística y tratamiento. (MITECO, 2020).

La FV procedente del mantenimiento de parques y jardines municipales, está clasificada en el listado de códigos LER con el 20 02 01 “residuos biodegradables de parques y jardines”. Estos residuos son biodegradables y susceptibles de emplearse en el proceso de compostaje. En el año 2019 se generaron en España 879.693 toneladas de residuos de este tipo y en Andalucía 24.202 toneladas, según datos de las comunidades autónomas (MITECO, 2019). Una buena opción para aprovechar este tipo de residuos, puede ser el compostaje. La parte de mayor tamaño y más leñosa de la FV, durante su preparación se realiza un tratamiento mecánico de trituración para poder incorporarlos al proceso de compostaje. Las instalaciones de gestión de residuos orgánicos, suelen contar con maquinaria especializada para el triturado de los restos de poda.

Tabla 1.9. Recogida selectiva de residuos por comunidad autónoma (t) en el año 2019.

Fuente: memoria anual de generación de residuos de competencia municipal 2019, MITECO.

CCAA	22 01 01 / 15 01 01	20 01 02	20 01 08	20 02 01	15 01 06	15 01 07	TOTAL
	Papel/ cartón	Vidrio	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	Residuos biodegradables de parques y jardines	Envases mezclados	Envases de vidrio	
Andalucía	121.130	0	75.039	24.202	103.371	109.126	432.868
Aragón	28.507	1.760	372	7.124	21.904	18.789	78.455
Asturias	42.471	69	5.936	19.262	14.354	17.344	99.436
Baleares	49.047	83	29.959	27.801	38.403	42.887	188.180
Canarias	48.375	84	777	30.670	27.975	44.265	152.146
Cantabria	5.710	341	0	2.211	6.830	12.085	27.177
Castilla La Mancha	30.088	2.207	67	2.918	24.938	22.887	83.105
Castilla y León	48.289	0	0	4.877	28.824	50.879	132.868
Cataluña	405.667	9.048	447.245	53.497	184.923	194.281	1.294.661
Ceuta	1.273	0	0	39	338	33	1.683
Comunidad de Madrid	139.642	331	170.509	58.126	173.780	114.212	656.600
Comunidad Foral de Navarra	26.266	0	20.108	9.481	21.360	17.396	94.611
Comunidad Valenciana	78.781	669	55.712	29.458	61.855	88.622	315.098
Extremadura	31.622	0	248	0	13.876	9.487	55.233
Galicia	41.067	0	42.897	3.198	28.630	48.384	164.175
La Rioja	8.417	0	557	0	5.892	9.153	24.019
Melilla	3.679	0	0	0	0	395	4.074
País Vasco	153.648	945	21.657	12.208	50.012	62.455	300.925
Región de Murcia	23.740	373	5.237	0	20.702	26.395	76.447
TOTAL	1.287.418	15.910	876.319	285.072	827.965	889.076	4.181.760

1.4. Gestión de los residuos orgánicos

La gestión de los residuos orgánicos, tanto de la industria avícola de carne, como de los residuos procedentes del proceso de obtención del aceite de oliva y los generados en el mantenimiento de parques y jardines municipales, debe pasar por la disminución del impacto ambiental y su valorización. Una de las alternativas más económica y eficaz para el aprovechamiento de estos residuos es el compostaje, obteniéndose productos con alto valor, como enmiendas de suelos y fertilizantes.

Los lodos procedentes de la industria avícola de carnes son ricos en nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo (Chiarelto y col., 2021). Al tener estos lodos una elevada humedad es necesario co-compostarlos con residuos vegetales que aporten la porosidad necesaria para que el proceso de compostaje se realice de forma adecuada y también, aporten potasio, nutriente que se encuentra en bajo contenido en los lodos procedentes de la industria avícola de carne (Chiarelto y col., 2021).

Una buena opción para co-compostar estos lodos, puede ser utilizando los residuos vegetales procedentes de la industria oleícola, además de otros residuos vegetales, como poda procedente de parques y jardines municipales. Dentro de los residuos procedentes de la industria oleícola, es muy interesante destacar el orujillo, el cual se utiliza principalmente para valorización energética. Se trata de un residuo rico en grasas, en potasio y en calcio. Presenta valores de pH alcalinos, debido probablemente a la presencia de cenizas. En este experimento, este residuo desempeña un papel muy importante, debido principalmente a su contenido en grasas.

1.5. El proceso de compostaje

El compostaje es la transformación biológica y la estabilización de la materia orgánica de un sustrato, gracias a la actividad microbiana, que genera energía en forma de calor (**figura 1.3**). Este calor permite alcanzar una fase termófila en la que los microorganismos degradan el sustrato orgánico hasta estabilizarlo, consiguiendo un producto libre de patógenos y de semillas.

Se trata de una técnica conocida desde que se conoce la agricultura, aunque ha sido en las últimas décadas cuando se ha implantado de manera industrial en la sociedad. El compostaje es una solución económica y sencilla para la gestión de los residuos orgánicos. Al ser una opción a la gestión de los residuos orgánicos, se evita de esa manera la incineración o el vertido, con mayores impactos ambientales.

Un proceso de compostaje bien controlado y aplicado a los materiales adecuados, reduce el contenido en humedad, el peso y el volumen de los residuos y, además, resulta de él un producto estabilizado con alto valor agronómico (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008).

1.5.1. Fases del proceso

- Se constituye por dos fases consecutivas, de descomposición y maduración. Durante la fase de descomposición, se produce la degradación de la materia orgánica por poblaciones de hongos, bacterias y actinomicetos. Se trata de un proceso que necesita de oxígeno para llevarse a cabo, produciéndose reacciones exotérmicas. El aumento de temperatura favorece el crecimiento de

microorganismos llamados termófilos, que crecen a temperaturas superiores a 40° C. Es característico en la fase de descomposición que las temperaturas termófilas se mantengan durante periodos de tiempo largos, dependiendo de la naturaleza del sustrato. Si esto se consigue y se mantiene el tiempo suficiente, se asegura la destrucción de patógenos y semillas contenidas en el sustrato. Al comienzo de la fase de descomposición, se presenta una etapa mesófila, en la que los microorganismos degradan la materia orgánica más lábil, provocando un ligero aumento de la temperatura y la generación de ácidos orgánicos que, generalmente, disminuyen el pH. Después comienza la etapa termófila, en la que las temperaturas aumentan por encima de 40° C. Hasta los 60° C, la descomposición la realizan los hongos, sin embargo, a partir de esa temperatura, los hongos se inactivan y la degradación la llevan a cabo actinomicetos y bacterias con esporas. A medida que avanza el proceso, se van consumiendo todas las biomoléculas, como azúcares, lípidos y proteínas. Se consumen también los ácidos orgánicos, que provocan un aumento en el pH, hasta estabilizarse. Por último, en la etapa final de la fase de descomposición, se observa una disminución de la temperatura, debido a que la materia más fácilmente biodegradable se ha agotado. En este momento comienzan a degradarse las fracciones de hemicelulosa, celulosa y lignina, más difícilmente biodegradables.

- En la fase de maduración, se produce la biopolimerización de moléculas complejas y estables. La temperatura en esta fase disminuye por debajo de los 40° C y el sustrato es colonizado por microorganismos mesófilos, hasta conseguir en unos pocos meses un producto final estabilizado y parcialmente humificado, el compost. El pH también se estabiliza en esta fase y los actinomicetos adquieren un papel importante, siendo los productores de ácidos húmicos y de antibióticos, que evitan la proliferación de bacterias y patógenos.

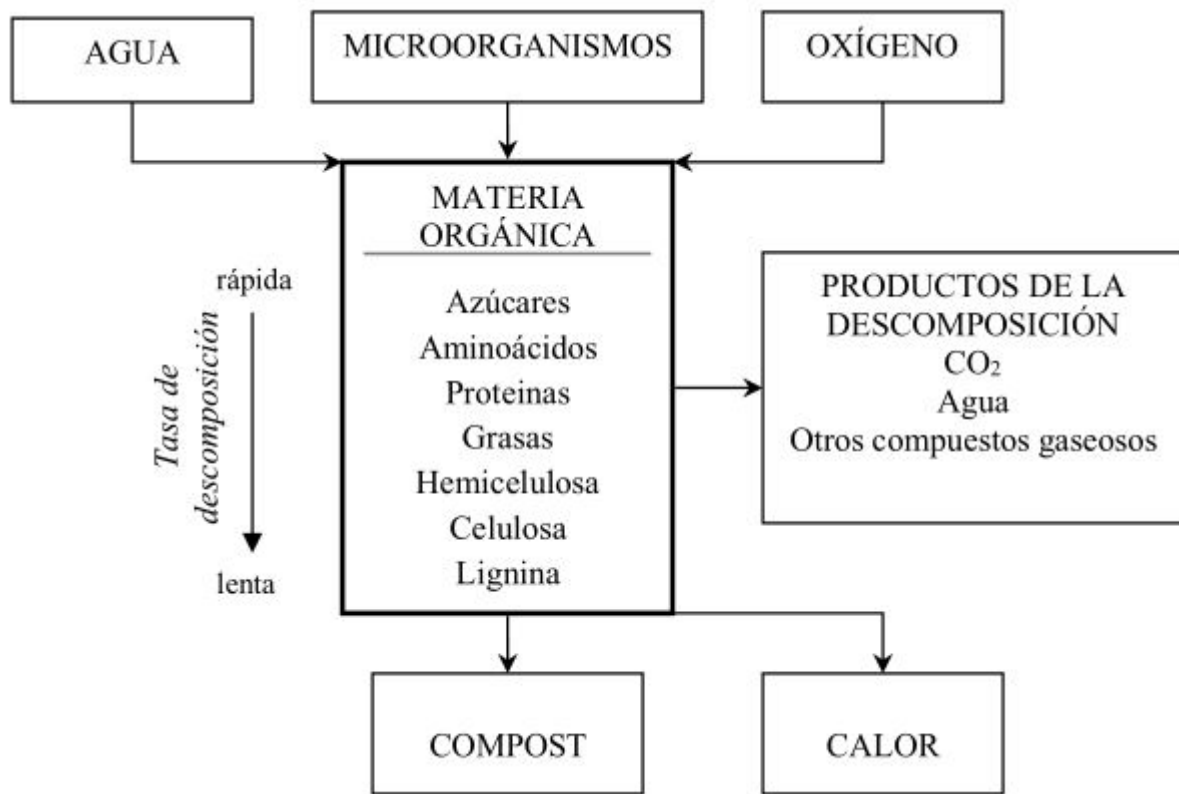


Figura 1.3. Esquema del proceso de compostaje. Fuente: Moreno Casco y Moral Herrero (2008).

1.5.2. Factores que intervienen en el proceso de compostaje

En un proceso de compostaje, son los parámetros relativos a la naturaleza del sustrato, para conseguir valores correctos al inicio del proceso. Estos parámetros incluyen nutrientes, humedad, relación C/N y C/P, tamaño de partícula, materia orgánica y conductividad eléctrica (Madejón y col., 2001). Además de éstos, también hay que tener en cuenta los parámetros de seguimiento, es decir, los que deben medirse y controlarse durante todo el proceso para que sean los adecuados (Jeris y col., 1973). Los parámetros de seguimiento, son los siguientes:

- Temperatura: la temperatura juega un papel fundamental en el compostaje. Durante la fase de descomposición, la temperatura aumenta debido al aumento de la actividad microbiana. Además, es el parámetro más fácil de medir, ya que se puede obtener de manera instantánea. Un aumento de la temperatura indica

un aumento de la actividad microbiana, lo que quiere decir que el proceso se está desarrollando adecuadamente. Además, también se utiliza para considerar la etapa en la que se encuentra el proceso y si se ha conseguido una higienización de la mezcla compostada. Se ha comprobado que pequeños cambios en la temperatura afectan más a las poblaciones microbianas que pequeños cambios en la humedad, el pH o la relación C/N (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008).

- Humedad: se trata de un factor fundamental en el proceso de compostaje, ya que, si no hay agua, las enzimas no pueden solubilizarse y el proceso de degradación se retrasa, hasta llegar incluso a detenerse. La humedad debe encontrarse en un rango óptimo para que el proceso se desarrolle adecuadamente. El exceso de humedad puede hacer que el agua ocupe los poros, desplazando al aire y creando condiciones anóxicas dentro de la pila. Si se crean condiciones anaerobias, puede retrasarse el proceso y producirse gases que producen malos olores y emisiones no deseadas. Durante el proceso de compostaje, se debe encontrar el equilibrio entre el aire y el agua en cuanto a la ocupación de los espacios libres dentro de la pila. El rango de humedad adecuado depende de cada tipo de residuo, pero se considera adecuada una humedad entre el 50 % y el 70 % (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008).
- pH: este factor tiene también una influencia sobre la actividad microbiana y sobre la dinámica del nitrógeno. La actividad microbiana y la degradación de la materia orgánica, hacen que se genere amoníaco, como consecuencia de la amonificación del nitrógeno orgánico. La solubilización del amoníaco provoca que los niveles de pH aumenten (Sánchez-Monedero y col., 2001).
- Aireación: el compostaje es un proceso aerobio que necesita tener las condiciones adecuadas de oxígeno en el interior de la pila. La concentración de oxígeno disminuye desde el exterior hacia el interior de la pila (Ekinci y col., 2004). La aireación supone una variable operativa muy importante ya que es la que más costes supone en maquinaria o sistemas de aireación. Una aireación insuficiente en la pila puede provocar zonas anaerobias en el interior, generando malos olores y retrasando el proceso.

1.5.3. Tipos de sistemas de compostaje

La manera más común de clasificar las tecnologías utilizadas en el compostaje, es a en función de la aireación del proceso. Se basan en el aislamiento con el exterior de las mezclas a compostar. De esta manera se clasifican en abiertos, semi-abiertos y cerrados. Según esta clasificación, existen varios tipos de sistemas de compostaje, los cuales se pueden clasificar a su vez según su nivel de control de las variables de proceso.

Los sistemas abiertos más simples consisten en las tradicionales pilas estáticas pasivas, las cuales autorregulan la temperatura mediante la difusión molecular, el viento y la convección del calor. Suelen ser de bajo coste y no requieren de tecnología complicada para su operación. En este caso es más difícil controlar variables tan influyentes en el proceso como las condiciones meteorológicas de la zona. Dentro de los sistemas abiertos, puede haber varios grados de sofisticación que mejoran la operatividad del proceso al controlar mayor número de variables.

En los sistemas semi-cerrados, se suele disponer de grandes naves cubiertas y cerradas con sistemas de extracción de gases hacia el exterior, normalmente tratados con un biofiltro. En general se consigue un mejor control de las variables en el proceso de compostaje que en los sistemas abiertos.

En cuanto a los sistemas cerrados de compostaje, son los más sofisticados. El material no está en contacto con el exterior directamente, sino a través de un sistema de conductos y turbinas. Estos sistemas facilitan el control de todas las variables, así como evitan la generación de malos olores. Se trata de sistemas que han permitido mejorar las tecnologías de compostaje. Éstos son los más sofisticados en comparación con los anteriores, pero también son los que requieren mayores costes económicos (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008).

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fu estudiar la evolución del proceso de co-compostaje de diferentes proporciones de lodo de la industria avícola de carne, con orujillo de oliva, cenizas de orujillo y poda urbana, poniendo especial interés en la degradación del orujillo de oliva, puesto que se trata de un residuo abundante y difícilmente biodegradable, aunque puede aportar buenas propiedades agronómicas al producto final. Como objetivos secundarios se estudió la evolución de parámetros importantes como indicativos de un adecuado desarrollo del proceso de compostaje, tales como, la temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total, relación C/N y grasas. Este último parámetro se estudió su evolución para conocer la degradación de este componente mayoritario en la composición del lodo avícola y responsable de parte de su baja biodegradabilidad.

3. Material y Métodos

3.1. Diseño experimental

Descripción de la planta de tratamiento de residuos

El experimento se diseñó para ser realizado en una planta de tratamiento de residuos propiedad de Ecoindustria del Reciclado, S.L., situada en el municipio de Guadix, Granada. El Complejo Ambiental de Guadix cuenta con varias plantas de tratamiento de distintos residuos: una planta de RCD, donde se tratan residuos procedentes de obras y se aprovechan para fabricar áridos reciclados, una planta de tratamiento de residuos no peligrosos, en la que se trata plástico, madera y cartón y una planta de neumáticos fuera de uso (NFU). Además, se dispone de una planta de compostaje donde se tratan diversos residuos orgánicos, pero su actividad se centra en el compostaje de lodos de depuradora urbana (EDARu) (**figura 3.1.**). El proceso de elaboración del compost en esta planta comienza con la recepción de los residuos orgánicos, los cuales son pesados en una báscula, se examinan visualmente y se envían a la planta de compostaje, para su descarga sobre una losa de hormigón impermeabilizada y con pendiente hacia una balsa de lixiviados.

En la planta de compostaje también se reciben restos de poda agrícola y de parques y jardines municipales. Estos residuos se utilizan como estructurante para el compostaje de los lodos. Dentro de la planta de compostaje, hay una zona destinada a la trituración de los restos de poda, debido a que en muchas ocasiones es necesario adecuarlos al tamaño óptimo. Los restos vegetales se acopian cerca de una zona de mezclado, donde se realiza la primera mezcla con lodos utilizando una pala cargadora. Posteriormente, la mezcla se traslada a la zona de fermentación aireada, donde se va construyendo una pila. Una vez formada la pila, se voltea con volteadora autopropulsada para conseguir la homogeneización de la mezcla. La mezcla con lodo de EDARu y poda se mantiene sobre las calles con ventilación forzada de 20 a 30 días, dependiendo de la temperatura y posteriormente pasan a la zona de maduración, donde se mantienen durante otros dos meses y se alcanzan las condiciones de humedad para afinarlo posteriormente a 25 mm antes de su comercialización.

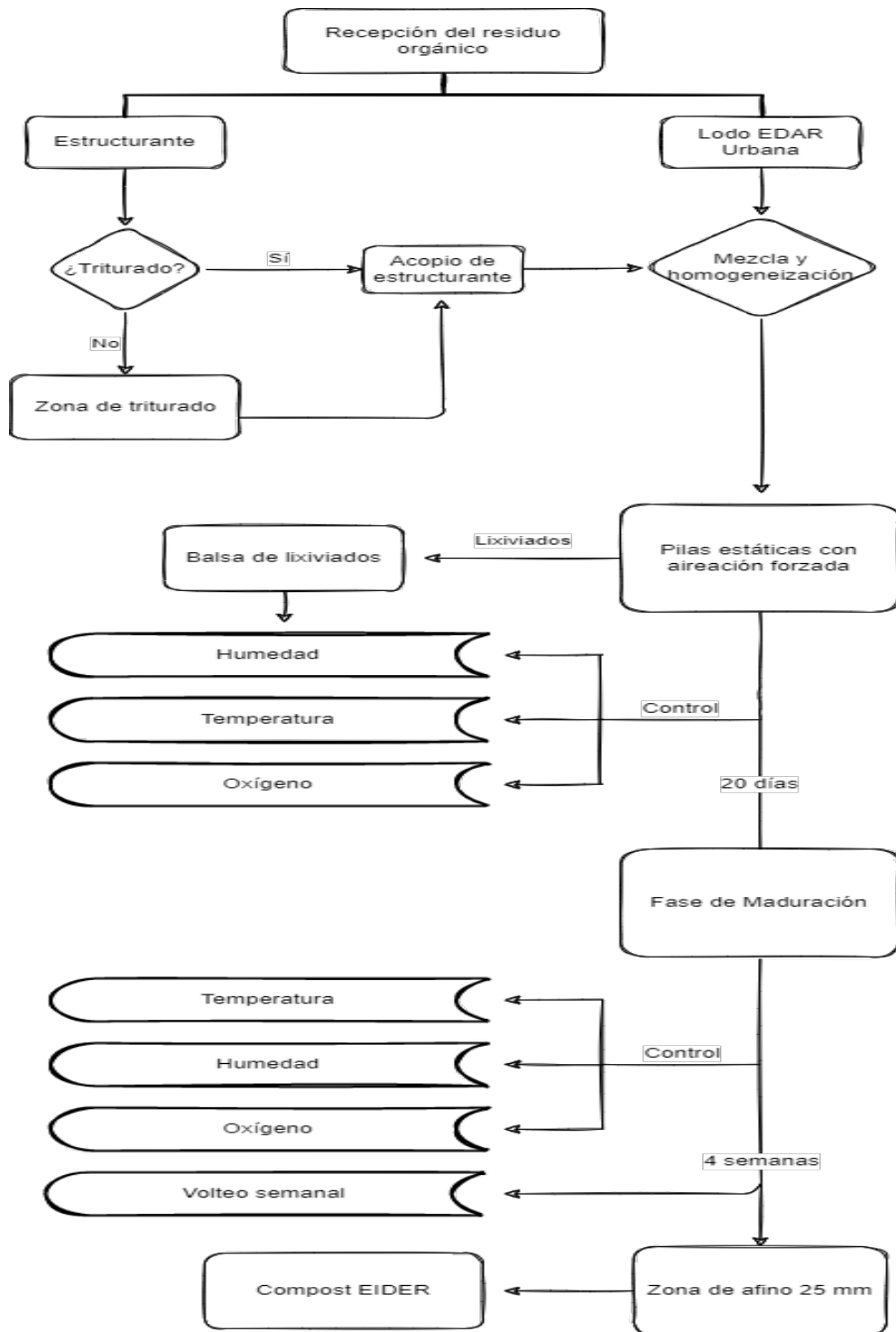


Figura 3.1. Diagrama de compostaje de lodos de depuradora urbana en planta de compostaje de EIDER. Fuente: elaboración propia

En esta planta de compostaje se han elaborado tres pilas de compostaje con distintas proporciones en volumen de distintos residuos: un lodo procedente de una industria avícola de carne (LAV), orujillo de oliva (OR), cenizas de orujillo (COR) y poda urbana (PU). Los materiales iniciales se eligieron diferentes a los que habitualmente se compostan (lodos EDARu y residuos vegetales) debido a la generación de estos residuos en el entorno de la planta de compostaje y que actualmente se están recibiendo para su gestión. Esta planta recibe a diario lodos procedentes de una industria avícola de carne cercana, la cual es muy importante económicamente en la Comarca de Guadix. También, se reciben grandes cantidades de residuos vegetales, como son los residuos procedentes de la extracción del aceite de oliva (orujillo y cenizas de orujillo). El sistema de compostaje que se eligió fue de pila móvil con aireación por volteos, no empleándose las infraestructuras destinadas a las pilas estáticas con aireación forzada, debido a que antes de realizar este proceso a nivel industrial se quiso probar a nivel semi-industrial para ver si era adecuado.

El experimento se dividió en varias fases:

1. Caracterización de los residuos iniciales.
2. Montaje de tres pilas con distintas proporciones de residuos.
3. Previsión de muestreos y volteos periódicos a lo largo del proceso.
4. Seguimiento del proceso mediante el control de la temperatura y las analíticas realizadas

3.1.1. Caracterización de los residuos iniciales

En los materiales iniciales y en las muestras obtenidas durante el proceso de compostaje se han determinado los valores del pH, de la conductividad eléctrica (CE) y los contenidos de humedad, materia orgánica (MO), nitrógeno total NT, carbono orgánico total (COT) y de macronutrientes, tales como el fósforo, el potasio, el calcio y el magnesio y se ha calculado la relación C/N según los métodos analíticos descritos por Idrovo-Novillo y col. (2018), detallados en el próximo apartado de 3.2 Métodos analíticos y estadísticos. Todos los análisis se han realizado por triplicado.

La **tabla 3.1.** muestra los resultados obtenidos de los principales parámetros fisicoquímicos de los residuos iniciales. Una vez analizados, se dimensionaron las pilas

utilizando diferentes proporciones y poder estudiar así su comportamiento, ya que se trata de residuos difícilmente biodegradables.

- Lodo avícola: este residuo se genera como consecuencia de las actividades de la industria alimentaria de pollo de carne y está compuesto por restos orgánicos de los animales, agua de lavado de las instalaciones y sangre. El agua se hace pasar por una depuradora previamente a su vertido y los lodos resultantes son los utilizados para hacer el presente experimento. Este residuo tiene un porcentaje de humedad cercano al 80 %, por lo que se hace necesario mezclarlo con otros residuos para equilibrar el contenido en humedad. También se trata de un residuo adecuado para el compostaje, debido a su alto contenido en materia orgánica (83,2 %).
- Orujillo de oliva: Este residuo se genera en la fase final de la valorización energética del orujillo y está compuesto por restos de éste que no se han llegado a degradar por combustión, además de restos procedentes de la limpieza en las instalaciones de valorización energética y restos de cenizas. Estos residuos destacan por su contenido en potasio, calcio y magnesio, debido al hueso de la aceituna. Presentan un pH alcalino (9,32) debido a la presencia de cenizas resultantes de la combustión.
- Cenizas de orujillo: proceden de la combustión del orujillo en plantas de valorización energética y se han incluido en este experimento por su alto contenido en potasio, el cual puede enriquecer el producto final. Sin embargo, hay otros parámetros de este residuo que podrían perjudicar el proceso de compostaje, como el pH tan elevado (11,03) y su alta conductividad (25,10 dS m⁻¹), por ello su proporción en la pila debe de ser pequeña.
- Restos de poda: en cuanto a los restos de poda, también son entradas frecuentes en esta planta. Se tiene una entrada fija de restos de poda procedentes de jardines y parques municipales. Además, de manera estacional se producen entradas de hoja de olivo, restos de poda de almendro, de olivo y restos de poda de álamo. Para este experimento se han utilizado restos de poda urbana.

Tabla 3.1. Características físico-químicas y químicas de los residuos iniciales

Parámetros¹	Lodo industria avícola	Orujillo oliva	Cenizas de orujera	Restos de poda
Humedad (%)	79,20	15,30	9,50	4,70
pH	7,00	9,32	11,03	7,10
Conductiv. eléctrica (dS m⁻¹)	2,08	6,31	25,10	1,54
Carbono Orgánico Total (%)	48,20	18,55	7,88	52,70
Materia Orgánica Total (%)	83,2	31,9	13,6	90,8
Nitrógeno Total (%)	1,49	0,60	0,22	1,05
Relación C_{OT}/N_T	32,3	30,9	36,9	47,9
Fósforo (g kg¹)	0,58	0,56	2,12	0,23
Potasio (g kg¹)	0,04	42,83	126,69	1,12
Calcio (g kg¹)	0,79	135,48	128,70	2,04
Magnesio (g kg¹)	0,11	15,26	27,98	0,39
Hierro (g kg¹)	11,18	1,43	10,49	-
Cadmio (mg kg¹)	Nd	Nd	Nd	-
Cobre (mg kg¹)	52	38	170	-
Níquel (mg kg¹)	27	Nd	83	-
Plomo (mg kg¹)	Nd	Nd	Nd	-
Zinc (mg kg¹)	76	217	90	-
Mercurio (mg kg¹)	Nd	Nd	Nd	-
Cromo (mg kg¹)	50	Nd	98	-

¹Datos expresados sobre muestra seca; Nd: no detectado; -: no determinado

3.1.2. Montaje de las pilas

Una vez obtenidos los resultados de los residuos iniciales, se fabricaron las pilas. La masa de las pilas en un principio era de unos 3.000 kg, con dimensiones aproximadas de 3 m de base, 2 m de altura y 2 m de ancho. Se optó por un compostaje en pilas ventiladas con volteo.

Las pilas se prepararon utilizando una pala cargadora para transportar los residuos al lugar de experimentación y utilizando el volumen de la cuchara para calcular las proporciones en volumen, indicadas en la **tabla 3.2**. De esta manera los residuos quedaron mezclados parcialmente. Para conseguir una mezcla óptima se utilizó una máquina giratoria dotada con una pinza bivalva para facilitar la mezcla de los residuos. La **figura 3.2** muestra una fotografía de las pilas inicialmente. De izquierda a derecha, se pueden ver las pilas 3, 2 y 1.

Tabla 3.2. Composición de las pilas experimentales, expresadas en % v/v

	Lodo de la industria avícola	Orujillo de oliva	Cenizas del orujillo de oliva	Poda urbana
Pila 1	15	30	5	50
Pila 2	10	40	5	45
Pila 3	25	40	5	30



Figura 3.2. Imagen de las pilas inicialmente.

3.1.3. Programación de volteos y muestreos

Los volteos se programaron al inicio del experimento para hacerse cada 15 días en los primeros meses y luego 1 vez al mes en las etapas posteriores, o cuando la temperatura estuviese por debajo de 50 ° C, coincidiendo con los días de muestreo. La **figura 3.3.** muestra la máquina que se ha utilizado para realizar los volteos, durante uno de ellos. Los muestreos se programaron para hacerlos los días en los que se volteaba, para asegurar así la homogeneización de las pilas y la representatividad de las muestras.

El muestreo de cada pila se ha realizado tomando siete submuestras de siete puntos diferentes de la pila para obtener una única muestra compuesta a partir del método del cuarteo. Las muestras se han secado y molido a un tamaño inferior de 0,5 mm, para su posterior análisis.

El primer muestreo se realizó a los 15 días del montaje de las pilas, aunque en esta ocasión no se realizó el volteo. El primer volteo se realizó en el día 32 del proceso, coincidiendo esta vez con el segundo muestreo realizado.



Figura 3.3. Imagen de maquinaria volteando las pilas experimentales.

3.1.4. Desarrollo y seguimiento del proceso

El principal parámetro controlado durante el proceso, ha sido la temperatura, la cual ha sido medida a diario durante cinco días seguidos cada semana mediante la toma de 6 datos en cada pila, para después calcular la temperatura media, con un termómetro portátil con lanza de 1 m de longitud. También se anotó el valor de la temperatura ambiente a la hora de tomar las temperaturas en las pilas, mediante una estación meteorológica instalada en el recinto.

El control de la temperatura también sirvió para decidir los volteos durante el proceso de compostaje. Cuando se observaba que la temperatura media de las pilas disminuía por debajo de 50 ° C.

También se ha controlado la humedad a partir de los resultados analíticos obtenidos, ya que en algunas etapas del proceso se encontraba demasiado baja. Se ha añadido agua de pozo con una manguera cuando se ha considerado oportuno. La **figura 3.4.** muestra una imagen de un operario de la planta regando las pilas. En otras ocasiones se ha aprovechado el volteo para regar las pilas, con el objetivo de conseguir una mejor humectación en el interior, y más suponiendo que las grasas contenidas en los residuos, pueden crear una capa hidrófoba que impida la penetración del agua al interior de las pilas.



Figura 3.4. Imagen de operario regando las pilas

Los muestreos se realizaron en los días 16, 32, 45, 60, 88, 116, 156, 200 y 312 de compostaje, todos ellos correspondientes a la fase biooxidativa. Está siendo un experimento largo debido a la naturaleza de los residuos, al contener fracciones difícilmente biodegradables, como materiales muy lignificados y grasas.

3.2. Métodos analíticos y estadísticos

Para la caracterización de los residuos del orujillo de oliva y las cenizas de orujillo, así como de las muestras obtenidas a lo largo del proceso, se ha contado con la ayuda del Dr. Germán Tortosa Muñoz y la Estación Experimental del Zaidín (CSIC). El lodo avícola y los restos de poda se analizaron anteriormente en un laboratorio local de Guadix. Los métodos analíticos empleados para determinar las características de los residuos iniciales y la evolución de los principales parámetros del proceso de compostaje son los descritos por Idrovo-Novillo y col. (2018) y son detallados a continuación. Todos los análisis se han realizado por triplicado.

Preparación de la muestra. Las muestras se secaron en una estufa a 105 ° C para quitarles el contenido en humedad. Posteriormente se molieron y tamizaron a 0,5 mm. Una vez molidas y tamizadas se conservaron en un desecador de vacío hasta su análisis.

Humedad. Se toma como humedad el porcentaje de agua con respecto a muestra húmeda, por diferencia de pesadas entre material húmedo y seco. Para ello, se pesaron de 5-10 g de muestra fresca en un vaso de precipitados. Se calentó a 105°C durante 12 horas. Se dejó enfriar en un desecador y se pesó. La pérdida de peso se da como humedad, expresando el resultado como porcentaje respecto a peso de muestra húmeda.

Materia orgánica. Se toma como "materia orgánica" la pérdida de peso por calcinación a 430°C. Para ello, se pesaron de 1-3 g de muestra en un crisol de peso conocido. Se calcinó por espacio de 24 horas a 430°C, se dejó enfriar en un desecador y se pesó. El contenido de materia orgánica se expresa en porcentaje respecto de muestra seca.

pH. El pH se midió pesando 3 gramos de la muestra en un tubo falcón, posteriormente se adicionó 30 ml de agua destilada (suspensión acuosa 1:10

sólido/líquido), se agitó por 2 horas y se dejó sedimentar. Finalmente se midió el pH en el líquido sobrenadante de la suspensión acuosa con un pH-metro. Esta diferencia de potencial es función lineal de la actividad de los iones hidrógeno presentes en la muestra problema a una temperatura dada.

Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica de un extracto acuoso es la aptitud que presenta éste para transmitir la corriente eléctrica. Se determinó sobre una suspensión acuosa 1:10 sólido/líquido, preparada como se ha descrito anteriormente, después esta suspensión se centrifugó por 4 minutos a 1000 rpm, se filtró el líquido sobrenadante en el tubo falcón y se midió la conductividad con un conductímetro.

Carbono orgánico total y nitrógeno total. Se determinaron mediante un analizador elemental C/N.

Macro y micronutrientes y metales pesados. Estos elementos se midieron en disoluciones adecuadas del extracto de digestión nítrica perclórica anteriormente obtenida, mediante un espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-óptico) modelo Varian ICP 720-ES previa digestión ácida por microondas.

Fósforo total. Se determinó por medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato molibdato amónico obtenido sobre una fracción del extracto de mineralización obtenido de la digestión ácida por microondas de la muestra.

Grasas. Se determinaron mediante extracción con disolvente lipófilo. La grasa libre se calculó mediante extracción directa, sin digestión previa. Se utilizó hexano para la extracción de la muestra, se destiló y se pesó el residuo secado. La grasa se calcula con la diferencia de peso inicial y final.

Respecto a los métodos estadísticos empleados, se calculó la desviación del estándar de los datos obtenidos en el triplicado realizado en cada análisis y el intervalo de confianza para un $\alpha = 0,05$ de los datos obtenidos, lo cual se reflejó en las tablas y en las figuras mediante las barras de error.

4. Resultados y Discusión

4.1. Características físico-químicas y químicas de las mezclas iniciales

En la **tabla 4.1.** se muestran las características físico-químicas y químicas de las mezclas iniciales de los residuos para conformar las pilas de este experimento.

pH

El pH influye en la dinámica de los procesos microbianos, al limitar el crecimiento de hongos y bacterias. Generalmente, durante la primera etapa mesófila se produce un descenso del pH debido a la producción de ácidos orgánicos por parte de los microorganismos, al degradar la materia orgánica más lábil. También puede ocurrir el descenso brusco del pH la creación dentro de la pila de condiciones anaerobias, que harían que se formasen ácidos orgánicos (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008). Durante el proceso se observa una tendencia ascendente, lo que se considera normal en la evolución de la fase biooxidativa del proceso, debido probablemente a la degradación de compuestos de carácter ácido tales como grupos fenólicos y carboxílicos, y a la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos a amoníaco (Paredes y col., 2000).

En este caso se parte de un pH ligeramente alcalino en los tres casos. La pila 2 presenta valores más altos (8,25) que las otras 2, probablemente debido a la menor proporción de lodo avícola, residuo con el menor valor de este parámetro (**Tabla 3.1**). El intervalo óptimo de pH para los hongos se encuentra entre 5,5 y 8 y para las bacterias entre 6 y 7,5, generalmente (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008). Por lo tanto, el valor inicial de pH de las pilas estudiadas fue adecuado para el comienzo del proceso de compostaje.

Tabla 4.1. Caracterización de los principales parámetros físico-químicos y químicos de las mezclas iniciales (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

Parámetros	P1	P2	P3
Humedad (%)	38,7 ± 1,3	30,4 ± 1,9	37,7 ± 3,1
pH	7,55 ± 0,01	8,25 ± 0,05	7,64 ± 0,04
CE (dS/m)	4,53 ± 0,14	4,20 ± 0,05	4,63 ± 0,16
Carbono total (%)	32,90 ± 1,84	28,15 ± 0,49	37,25 ± 0,07
Carbono orgánico total (C _{OT}) (%)	26,1 ± 2,0	20,4 ± 1,6	27,0 ± 0,7
Nitrógeno total (N _T) (%)	1,52 ± 0,13	1,08 ± 0,03	1,76 ± 0,14
Relación C _{OT} /N _T	17,2 ± 0,2	18,9 ± 0,9	15,4 ± 0,8
Contenido graso (%)	4,98 ± 0,15	1,81 ± 0,13	7,51 ± 0,14
Fósforo (g kg ¹)	0,57 ± 0,12	0,45 ± 0,06	0,79 ± 0,03
Potasio (g kg ¹)	23,2 ± 3,1	23,5 ± 2,2	23,3 ± 0,4
Calcio (g kg ¹)	84,0 ± 26,4	83,1 ± 11,1	70,2 ± 4,3
Magnesio (g kg ¹)	21,8 ± 7,3	22,6 ± 4,8	15,6 ± 0,4
Sodio (g kg ¹)	4,37 ± 0,83	4,74 ± 0,59	3,81 ± 0,06
Cadmio (mg kg ¹)	Nd	Nd	Nd
Cobre (mg kg ¹)	43 ± 10	43 ± 4	47 ± 1
Níquel (mg kg ¹)	27 ± 3	36 ± 2	23 ± 1
Plomo (mg kg ¹)	6 ± 3	10 ± 2	8 ± 1
Zinc (mg kg ¹)	97 ± 14	74 ± 11	143 ± 7
Mercurio (mg kg ¹)	Nd	Nd	Nd
Cromo (mg kg ¹)	40 ± 5	54 ± 0	48 ± 4

Nd: no detectado

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es un parámetro a tener en cuenta en el uso agrícola del compost, ya que una elevada salinidad puede inhibir el crecimiento de los cultivos. Está determinada por la naturaleza de los materiales de partida, debido a la concentración de sales en ellos, pero también, en menor medida por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Sanchez-Monedero, 2001).

Normalmente suele aumentar a lo largo del proceso debido a la mineralización de la materia orgánica y al aumento de la concentración relativa de iones, debida a la pérdida de peso. Sin embargo, en otras ocasiones puede verse una tendencia descendente en los valores de CE, que puede deberse a fenómenos de lixiviación durante los riegos, o a por la lluvia en el caso que las pilas se encuentren al aire libre.

No se observan diferencias significativas en los valores de partida de conductividad, los tres se mantienen en torno a 4,5 dS/m, valores que en principio se consideran altos para la obtención de compost con un contenido salino no muy elevado.

Contenido en carbono y macronutrientes (N, P, K)

La evolución del contenido en carbono orgánico (COT) está directamente relacionada con la evolución de la materia orgánica durante el proceso de compostaje. El contenido en materia orgánica suele disminuir durante el proceso de compostaje, debido a la degradación y a la mineralización. La materia orgánica se considera el factor principal para determinar la calidad agronómica de un compost. La normativa establece que el contenido mínimo de materia orgánica para un compost, debe ser del 35 % (Real Decreto 506/2013).

En la pila 1, se parte de un porcentaje de COT del 26,1 %, en la pila 2 del 20,4 % y en la pila 3 del 27,0 %. Se observa que los valores de las pilas 1 y 3 son más similares entre sí que el valor de la pila 2. Esto probablemente se deba a la mayor proporción de lodo avícola en ambas pilas, siendo este residuo uno de los que mayor contenido de MO y COT presentó (**Tabla 3.1.**).

El nitrógeno se considera el principal nutriente para decidir los materiales de partida para elaborar un compost, ya que se considera también nutriente prioritario en la agricultura. La concentración de las diferentes formas de nitrógeno y su evolución

durante el compostaje, depende de los materiales de partida que aportan el nitrógeno a la mezcla y de su tasa de degradación de la materia orgánica, que hace que aumente la concentración relativa de nutrientes (Sánchez-Monedero, 2001).

Se parte de valores de nitrógeno total de 1,52 %, 1,08 % y 1,76 % para las pilas 1, 2 y 3, respectivamente. Se observa que la pila 2 contiene menor porcentaje de nitrógeno total, debido probablemente a que lleva menor proporción de LAV, que en este caso es el residuo de la mezcla que aporta mayor porcentaje de nitrógeno (**Tabla 3.1.**).

En cuanto al contenido en fósforo, las tres pilas presentan valores iniciales bajos. Destaca el contenido en potasio de las tres pilas, partiendo de valores superiores a 23 g/kg, debido principalmente al OR y a las COR, los cuales son residuos ricos en potasio (**Tabla 3.1.**).

Metales pesados

El contenido en metales pesados de un compost puede resultar limitante a la hora de su aplicación en agricultura. El Real Decreto 506/2013 establece en su Anexo V los límites de concentración de los metales pesados en compost, clasificándolos en tres clases (**Tabla 4.2.**).

Según el contenido en metales pesados de las muestras iniciales, las pilas 1 y 2 no conseguirán un compost con la clasificación de clase A, debido a que la concentración de níquel en ellas supera los 25 mg/kg. Las concentraciones del resto de metales están por debajo de los límites máximos establecidos para esta clasificación. Sin embargo, la pila 3 presenta valores iniciales de metales pesados por debajo de los límites establecidos para clasificar un compost como de clase A. Se tendrá que ver cómo evolucionan las pilas para determinar el contenido de metales pesados en los compost finales, ya que la concentración de estos metales aumenta durante el proceso de compostaje debido a la pérdida de masa de la mezcla de compostaje (Bernal et al., 2017).

Tabla 4.2. Clasificación de los compost y fertilizantes orgánicos según el Anexo V del RD 506/2013, sobre productos fertilizantes

Límites de concentración para sólidos: mg/kg materia seca			
Metal pesado	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo	70	250	300

4.2. Evolución de la temperatura

La temperatura es el parámetro más utilizado para el seguimiento del proceso de compostaje, ya que se trata de una medida muy sencilla de tomar y que da mucha información sobre la etapa en la que se encuentra el proceso. El aumento de la temperatura por encima de los 40° C, indica que el proceso se encuentra en la etapa termófila. La disminución de la temperatura es indicativa de un descenso en la actividad microbiana y, por tanto, se puede deducir gracias a ella cuando el proceso necesita de aireación, de humedad, o de otros factores que permitan a los microorganismos desarrollarse adecuadamente. La temperatura también puede indicar cuándo termina la fase biooxidativa, cuyo final se detecta cuando la temperatura de la pila se mantiene próxima a la temperatura ambiente después de un volteo.

En la **figura 4.1** se puede observar la evolución de las temperaturas medias, obtenidas a partir de 6 valores tomados a diario durante cinco días seguidos cada semana, junto con los valores de temperatura media ambiental y los días que se voltearon las pilas. Se puede observar un mismo patrón, en el que los volteos se realizan cuando la temperatura disminuye y después aumenta rápidamente en los días posteriores como consecuencia de la homogeneización del material y el suministro de oxígeno mediante el volteo. Esto da la posibilidad a los microorganismos a activarse de nuevo, aumentando así la temperatura de la pila rápidamente debido a las reacciones exotérmicas de la degradación microbiana de la MO. Se realizaron 9 volteos durante la fase termófila. Se observa una mayor disminución de la temperatura cuando los volteos son más espaciados en el tiempo, como puede verse a partir del volteo 5. También se observó relación entre las temperaturas medias y la temperatura ambiente de cada día, con una disminución de la temperatura de las pilas cuando la temperatura ambiente bajó.

En las tres pilas se han mantenido temperaturas $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante más de siete días. De este modo, se han conseguido los requerimientos europeos sobre higienización de compost (Reglamento (UE) 2019/1009).

En la pila 1 se observó un rápido incremento de la temperatura, con una fase mesófila inicial corta, de apenas 6 días. Al octavo día la pila superó los 60°C y mantuvo temperaturas superiores durante 122 días. Esta pila tuvo una temperatura media máxima de $68,7^{\circ}\text{C}$ en el día 51 del proceso. La fase termófila se podrá dar por finalizada pronto porque la temperatura está próxima a 40°C .

En la pila 2 también se observó un rápido incremento de la temperatura, alcanzando la fase termófila a los 6 días, tras una corta fase mesófila. En este caso no fue hasta el día 33 del proceso hasta el que se alcanzaron temperaturas $>60^{\circ}\text{C}$, las cuales se prolongaron con valores superiores durante 118 días. El valor de temperatura medio máximo alcanzado fue de $71,5^{\circ}\text{C}$, en los días 289 y 290 del proceso. En este caso las temperaturas se mantienen $>50^{\circ}\text{C}$ en el día 325 del proceso, por lo que la fase termófila no puede darse por concluida.

En cuanto a la pila 3, la fase mesófila se prolongó durante más tiempo, alcanzando la fase termófila en el día 12 del proceso. Al igual que la pila 1, se superaron los 60°C en el día 33 del proceso. Las temperaturas $>60^{\circ}\text{C}$ se mantuvieron durante 134 días,

siendo también la pila en la que se han alcanzado temperaturas más altas. El máximo valor de temperatura media obtenido fue de 73,1°C en el día 229 del proceso. Esta pila destaca por haber mantenido temperaturas >70° C durante 24 días. En este caso también se mantiene la temperatura >50° C en el día 325 del proceso.

En los tres casos se puede ver una fase termófila muy larga, y especialmente en la pila 3, se han alcanzado y mantenido temperaturas muy altas. Las pilas 2 y 3 están teniendo una fase termófila más larga que la pila 1. Esto podría deberse a la mayor proporción de OR en la mezcla inicial. Este residuo contiene una cantidad mayor de compuestos orgánicos recalcitrantes, como consecuencia que está compuesto principalmente de restos lignocelulósicos del hueso de oliva que no se ha combustionado durante la valorización energética de este residuo.

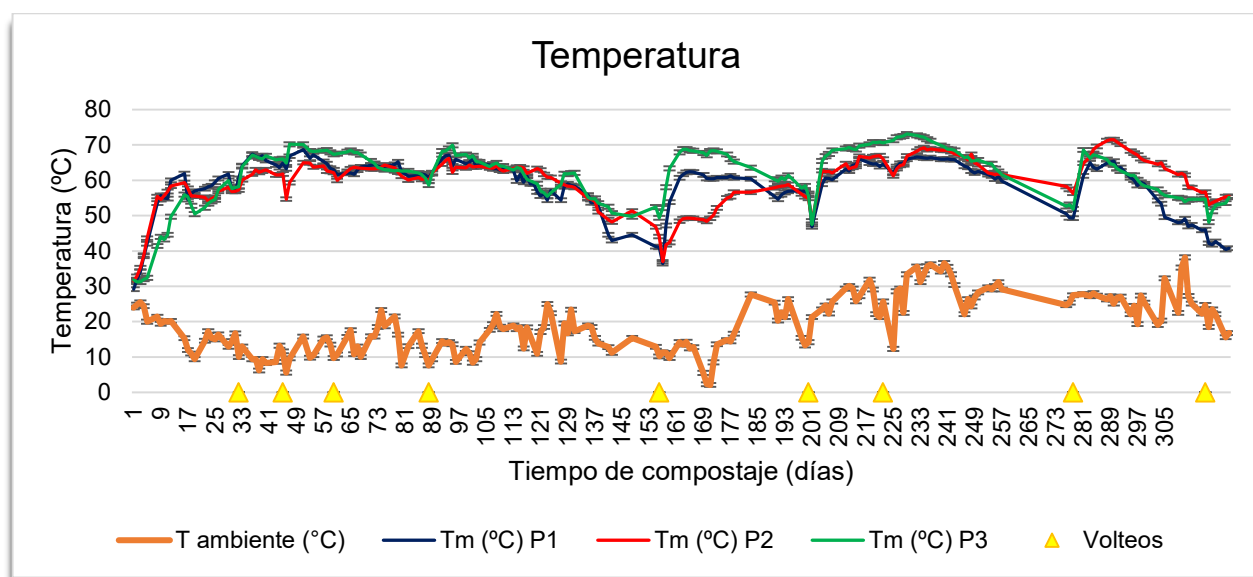


Figura 4.1. Evolución de las temperaturas medias en las pilas y de la temperatura ambiente. Los triángulos amarillos indican los días de los volteos. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.3. Evolución de la humedad

En la **figura 4.2** se puede observar la evolución de la humedad desde el primer muestreo en las tres pilas, indicando los días de los volteos. A pesar que las condiciones de humedad no hayan sido las deseables para un proceso de compostaje, la fase

termófila se ha mantenido en el tiempo, lo que indica que la actividad biológica no ha disminuido.

Al ser el compostaje un proceso biológico de descomposición, es necesaria la presencia de agua para permitir un desarrollo adecuado de la actividad microbiana. En el medio acuoso es donde se produce la solubilización de las enzimas que permiten la degradación de la materia orgánica.

Las tres pilas parecen seguir el mismo patrón en cuanto a la evolución de la humedad. En general tiene una tendencia descendente, hasta llegar a valores por debajo del 20 % en el último muestreo. No obstante, hay que tener en cuenta que los datos de humedad se utilizaban también para aportar agua en los casos que se consideró oportuno. Otras veces se han humedecido las pilas con agua de pozo y otras, han recibido aporte de agua de lluvia. Los tramos ascendentes de la gráfica de humedad, coinciden con periodos lluviosos.

El contenido en humedad de las pilas se ha mantenido en valores bajos para el desarrollo adecuado del compostaje (humedad 40-60 %; Moreno Casco y Moral Herrero, 2008). Hay que tener en cuenta que el proceso se ha llevado a cabo durante meses lluviosos de primavera y que las pilas se han humedecido en distintas ocasiones para aumentar la humedad, aunque se ha hecho de manera insuficiente. Además, el contenido de grasas del lodo avícola podría reducir la capacidad de absorción del agua aportada y favorecer el que se alcanzaran temperaturas altas y durante un tiempo prolongado, como se ha comentado anteriormente, provocando la disminución del contenido en humedad. Kuroda y col. (2022) observaron que el incremento de la adición de aceite residual de cocina a estiércol vacuno aumentó la temperatura de la pila y con ello se redujo la humedad durante el proceso de compostaje de estos residuos.

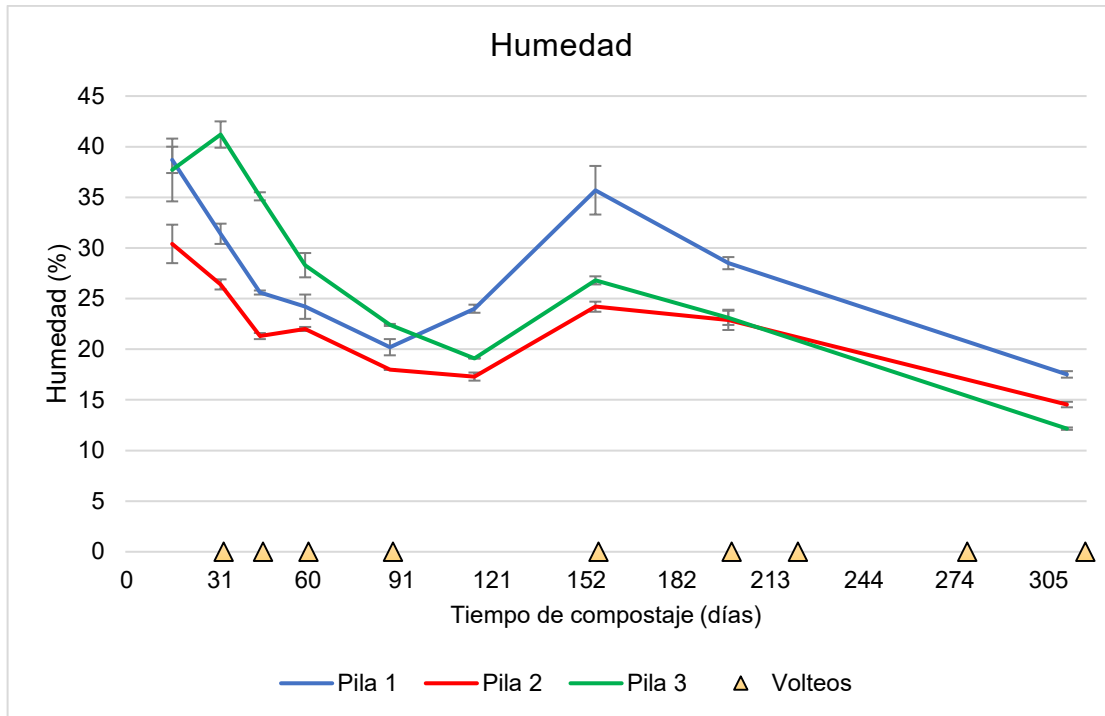


Figura 4.2. Evolución de la humedad en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.4. Evolución del pH

En la **figura 4.3** se observa la evolución del pH durante los distintos muestreos. La pila 1 partió de un valor de 7,55 de pH. Después se observa una ligera disminución en el segundo muestreo, probablemente a la generación de ácidos orgánicos por la degradación de la materia orgánica más lábil durante las primeras fases del proceso. A partir de este muestreo se observa una tendencia ascendente en el valor de pH, hasta llegar al valor máximo de 9,73 en el muestreo 8. En el caso de la pila 2, se parte de un valor de pH de 8,25. Se vuelve a observar en esta pila un descenso en el muestreo 2 del valor de pH, hecho que probablemente vuelva a relacionarse con la formación de ácidos orgánicos. A partir de este muestreo, se observa una tendencia ascendente en el valor, hasta llegar a su máximo en el muestreo 9, donde alcanzó el valor de 9,64. Finalmente, para la pila 3, se parte de un valor de pH de 7,64 y, al igual que en las otras 2, se observa una ligera acidificación en los muestreos 2 y 3, para después aumentar hasta el valor

máximo de 8,97, alcanzado en el noveno muestreo. En general, las tres pilas tuvieron patrones de comportamiento similares en cuanto a pH, observándose en los tres casos su disminución debido a la formación de ácidos orgánicos en las primeras etapas del proceso. Después de esta reducción los valores de pH aumentaron debido a la degradación del nitrógeno orgánico y de compuestos de carácter ácido (Paredes y col., 2000). Durante los últimos muestreos se observó cómo fue estabilizándose, aunque el proceso aún no ha concluido. El pH no fue un factor limitante para el compostaje de estos residuos, ya que durante este proceso la actividad microbiana es adecuada en el rango de pH de 5,5-9,0 (Onwosi y col., 2017).

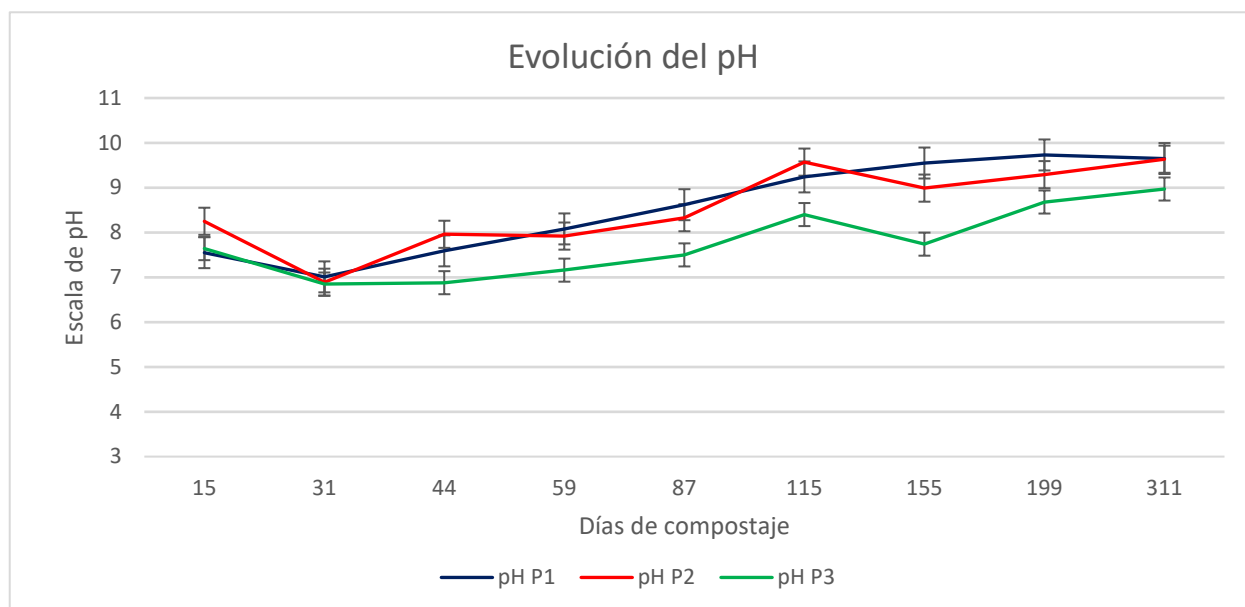


Figura 4.3. Evolución del pH en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.5. Evolución de la conductividad eléctrica

En cuanto a la CE de la pila 1, se parte de un valor de 4,53 dS/m (**Figura 4.4.**). Entre el muestreo 1 y el muestreo 2 se observa un aumento de la CE hasta los 5,59 dS/m, que puede estar relacionado con la mineralización de la materia orgánica y el efecto de concentración causado por la pérdida de masa (Onwosi y col., 2017). A partir

del muestreo 2, se observa una tendencia descendente hasta el muestreo 8, para después volver a aumentar en el muestreo 9. En el caso de la CE de la pila 2 parte de un valor de 4,2 dS/m, valor muy parecido a la pila 1. En este caso sigue una tendencia ascendente hasta el cuarto muestreo, alcanzando el valor máximo de 5,11 dS/m, a partir del cual comienza a disminuir. Para la pila 3, se partió de un valor de 4,63 dS/m, el más alto de las 3 pilas. En este caso el valor máximo para la CE se tomó en el segundo muestreo, para después descender hasta el sexto muestreo y luego volver a aumentar en el séptimo.

Respecto a la evolución general de la CE, también presentan patrones similares en las tres pilas. Todas partieron de valores relativamente altos de salinidad (CE > 3 dS/m), debido a la presencia de OR y de COR, principalmente. La pila 3 fue la que alcanzó valores máximos, en los muestreos 2 y 3. La alta salinidad se mantuvo durante la mayor parte del proceso, como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica, que provoca a su vez un aumento en la concentración de nutrientes. Sin embargo, en los últimos muestreos se observa una reducción de este parámetro con respecto a los valores iniciales, probablemente debido a la pérdida de sales disueltas en agua por procesos de lixiviación provocados por los riegos o la lluvia.

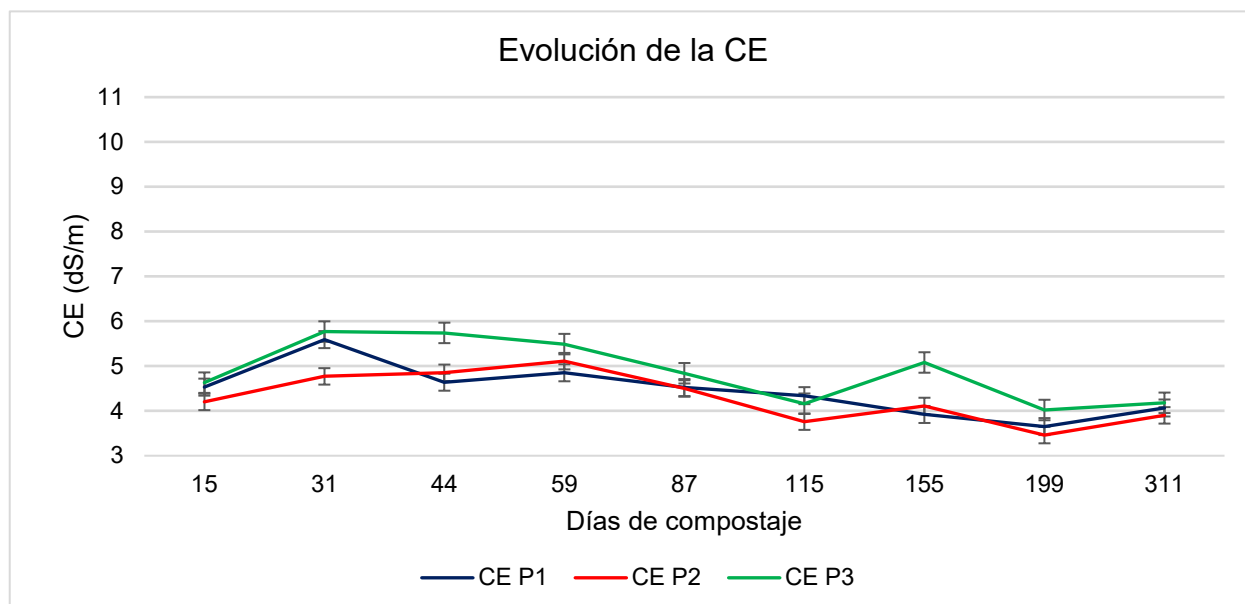


Figura 4.4. Evolución de la conductividad eléctrica en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU;

Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.6. Evolución del carbono orgánico total

En cuanto a la evolución del carbono orgánico total (**figura 4.5**), no se ha visto la típica reducción durante el proceso, debido probablemente a la presencia de materia orgánica recalcitrante en los residuos, tales como grasas y compuestos lignocelulósicos, así como debido a que los muestreos no fueron muy representativos del total de la masa a compostar, como consecuencia del tamaño de la pila (3.000 kg).

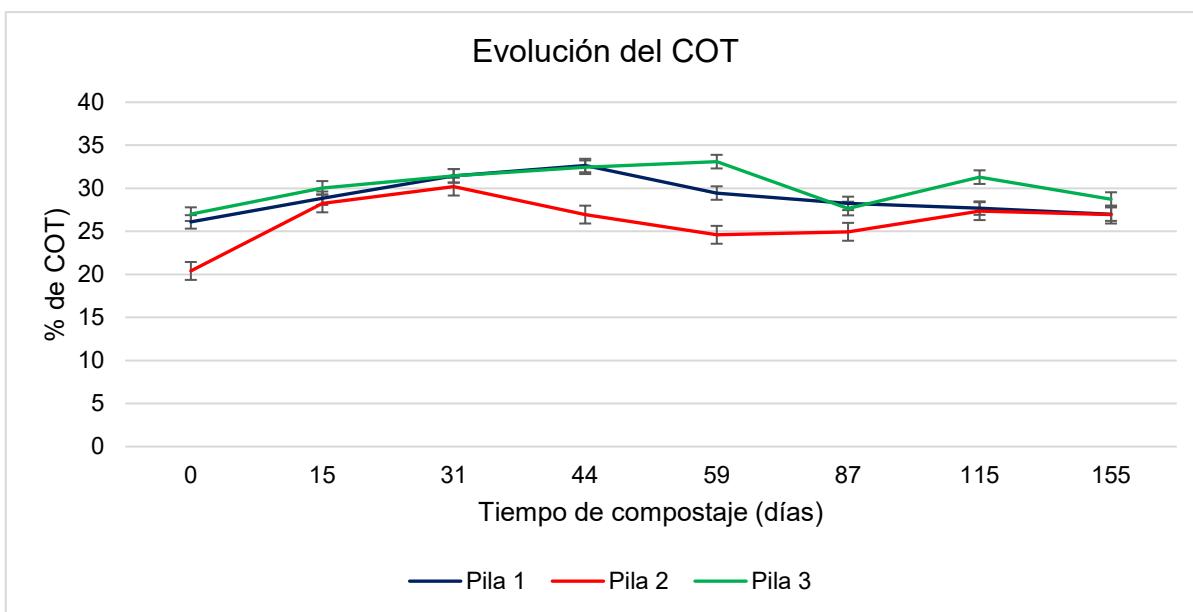
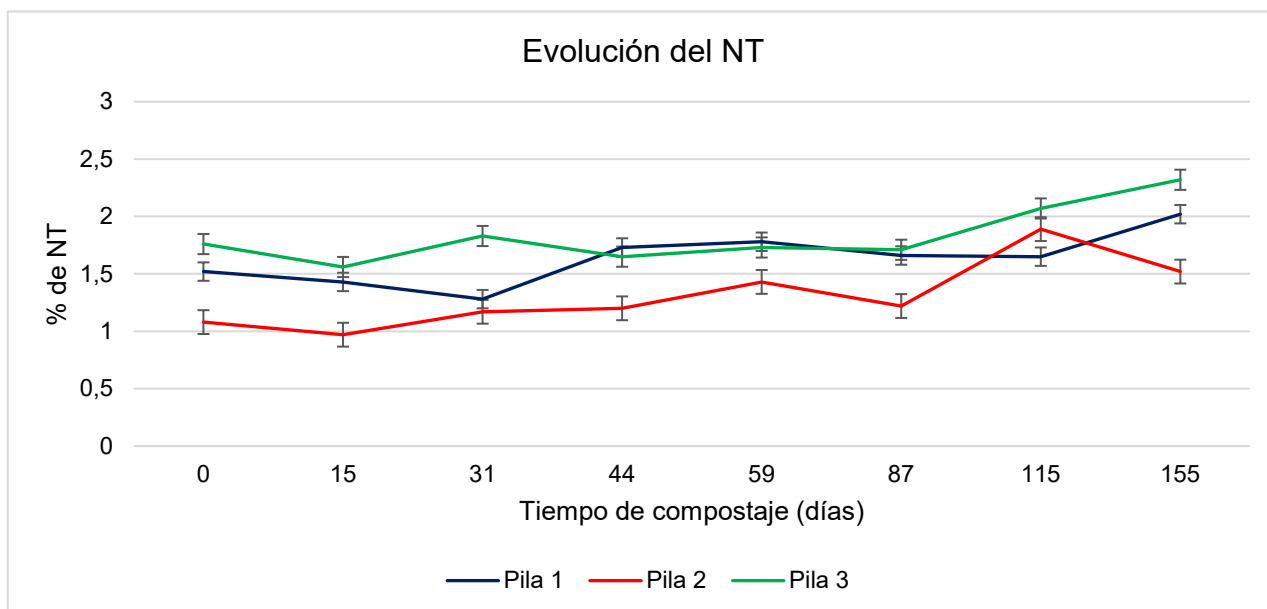


Figura 4.5. Evolución del COT en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.7. Evolución del nitrógeno total

En general, este nutriente aumentó durante el proceso de compostaje en todas las pilas en relación con los valores iniciales (**figura 4.6**). Durante el proceso la

concentración de nitrógeno aumenta debido a la concentración por la pérdida de masa de la mezcla de compostaje, siempre que se hayan controlado las pérdidas de este elemento por volatilización, emisión y lixiviación (Bernal y col., 2017). Las pilas que



contienen mayor proporción de lodo avícola (pilas 1 y 3), son las que presentan mayor contenido en nitrógeno, siendo esto un aspecto positivo a tener en cuenta con respecto al valor fertilizante del producto final.

Figura 4.6. Evolución del NT en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.8. Evolución de la relación C/N

En la **figura 4.7**, se representa la evolución de la relación C/N a lo largo del proceso de compostaje. En este caso se muestra una tendencia descendente, provocada principalmente por el aumento del NT, ya que la habitual reducción del COT no se ha observado en este proceso, como se ha comentado en los apartados anteriores. En las pilas 1 y 2 se han alcanzado valores de la relación COT/NT por encima de 25 en las primeras etapas del proceso, para después descender a medida que avanza el proceso. En cambio, en la pila 3 se observan valores más bajos de esta relación al principio del

proceso y la reducción significativa a partir del muestreo 6. En el caso de estas pilas el valor final de la relación C/N que se alcance no será indicativo de la madurez del compost, ya que los valores iniciales de esta relación estuvieron por debajo del valor máximo para considerar un buen grado de madurez de un compost (relación C/N < 20; Bernal y col. (2009)). Por ello, solo se podrá estudiar la evolución de este parámetro para ver si el proceso de compostaje se ha desarrollado de forma adecuada.

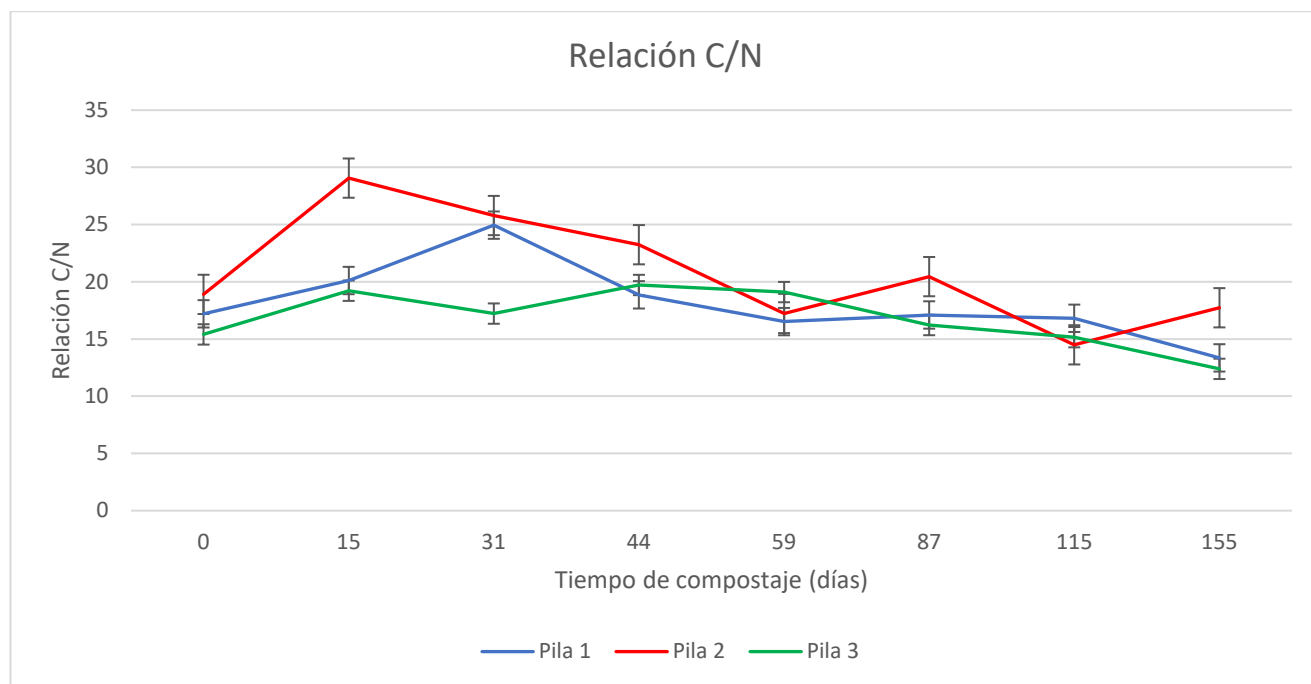


Figura 4.7. Evolución de la relación C/N en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

4.9. Evolución del contenido en grasas

En la **figura 4.8** se representa el porcentaje de grasas en tres de las muestras recogidas. Como puede observarse, se parte de un contenido significativo en grasas, siendo mayor en la pila 3, seguida de la pila 1 y en la pila 2 hubo el menor contenido de grasas. Este contenido inicial de grasas estuvo relacionado con el porcentaje de lodo avícola de las pilas. La pila 3 fue la que mayor porcentaje tuvo de este residuo y con ello, mayor contenido inicial de grasas. Las aguas residuales procedentes de la industria cárnica avícola presentan contenidos altos de grasas y aceites procedentes de las

operaciones de aguas de escaldado y lavado de canales y estos compuestos grasos pasan a los lodos de depuración, resultantes de su tratamiento (Canales y col., 2006). A lo largo del proceso se observa una disminución paulatina del contenido en grasas. Esta puede ser otra posible causa que explique que este trabajo se esté desarrollando en más tiempo. El contenido en grasas en la pila de compostaje, hace que se genere un medio hidrófobo, que dificulta la solubilización de las enzimas que producen los microorganismos para la degradación de los compuestos orgánicos. Esto también hace que la absorción de agua durante las lluvias y los riegos sea menos eficiente, como puede observarse en los valores de humedad que han estado por debajo del 40% en la mayor parte de los tres procesos de compostaje (**Figura 4.2**). Guidoni y col. (2021) también observaron que el compostaje de lodos procedentes de la industria cárnica con residuos vegetales es un proceso que requiere mucho tiempo, con una etapa termófila muy alargada, donde se alcanzaron temperaturas muy altas (70 °C), tal y como ocurrió en las pilas estudiadas.

La pila 1 parte de un valor de casi un 5 % de grasas y se observa en el muestreo 5 cómo ha disminuido hasta menos del 2 %. En el muestreo 9 se observa un valor de 0,1 %, lo que indica que se están degradando las fracciones lipídicas de la mezcla.

La pila 2 es la que menor porcentaje en grasas presentó, partiendo de un valor menor del 2 %. Sin embargo, se observa en esta pila una disminución más lenta, ya que hasta el muestreo 9 se observa disminución al 0,3 %.

La pila 3 presenta el valor más alto en cuanto al contenido en grasas, partiendo de un 7,5 %. Se observa una disminución drástica en el muestreo 5, hasta un 4 %. En el muestreo 9 el contenido en grasas se encuentra al 0,6 %.

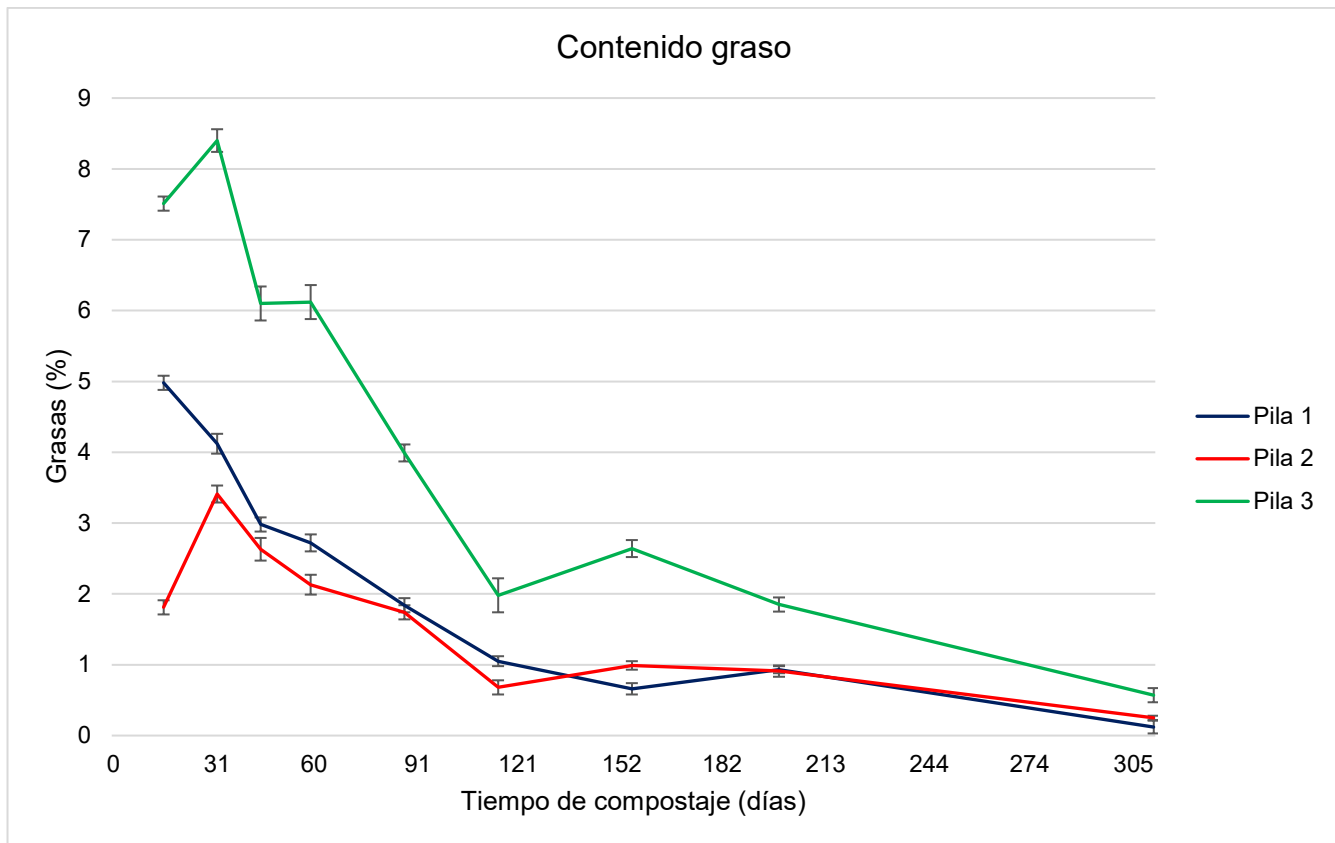


Figura 4.8. Evolución del contenido en grasas en los distintos muestreos realizados a las pilas estudiadas. (Pila 1: 15% LAV + 30% OR + 5 % COR + 50% PU; Pila 2: 10% LAV + 40% OR + 5 % COR + 45% PU; Pila 3: 25% LAV + 40% OR + 5 % COR + 30% PU)

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos hasta ahora permiten indicar que el compostaje parece una opción adecuada para el tratamiento conjunto de residuos procedentes de la industria cárnica y de la industria extractora de aceite de oliva, contribuyendo la poda urbana a unas adecuadas características físicas, que están permitiendo que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada. El progreso del compostaje ha sido apropiado debido a que se han alcanzado altas temperaturas termófilas rápidamente en todas las pilas y se han mantenido durante el tiempo suficiente para asegurar la higienización de los residuos iniciales. El incremento de la proporción del lodo avícola ha contribuido al mayor contenido de nitrógeno en las pilas estudiadas, favoreciendo esto el valor fertilizante del compost que se obtendrá finalmente. Sin embargo, el empleo incrementado de este residuo también ha aumentado el contenido de grasas, que podría ser una de las causas de la prolongación en el tiempo el proceso de compostaje. El contenido de grasas procedentes de los lodos avícolas y la fracción orgánica recalcitrante presente en los residuos de la industria oleícola empleados pueden ser los factores principales de este alargamiento del proceso de compostaje. Por ello, dentro de las mezclas de residuos empleadas podría ser la más adecuada la de la pila 1 (15% lodo avícola + 30% orujillo de oliva + 5 % cenizas de orujillo de oliva + 50% poda municipal), cuya fase termófila está empezando acabar. Esta pila contiene menor proporción de orujillo de oliva, con materia orgánica recalcitrante, y tiene una proporción media de las empleadas de lodo avícola, con alto contenido de grasas y notables contenidos de nitrógeno. De este modo, en esta pila el tiempo de compostaje será menor y se conseguirá un compost con un valor fertilizante notable.

6. Bibliografía

- ANICE, 2021. Asociación Nacional de Industrias de la Carne de España. file:///C:/Users/tsi/Downloads/Memoria_202162.pdf (fecha de consulta: 30/05/2022)
- Anuario de Estadística, 2020. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2020/default.aspx> (fecha de consulta: 30/05/2022).
- Bernal, M.; Alburquerque, J.; Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. *Bioresour. Technol.* 100, 5444-5453.
- Bernal, M.P; Sommer, S.G.; Chadwick, D.; Qing, C.; Guoxue, L.; Michel Jr., F.C., 2017. Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. *Adv. Agron.* 144: 143-233.
- Canales, C., Pascual, A., Morera, J.L., Santamaría, M.A., Colmenares, M., Martín, A., Sánchez, P., Ortuño, R., Núñez, A., Ruíz, B., Rodrigo, A., Collado, F., 2006. Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector matadero y de los transformados de pollo y gallina. Ed. Centro de publicaciones Secretaria General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 198 pp.
- Chiarelto, M., Pires Salcedo Restrepo, J.C., Lorin, H.E.F., Damaceno, F.M., 2021. Composting organic waste from the broiler production chain: A perspective for the circular economy. *J. Clean. Prod.* 329, 129717.
- Ekinci, K., Keener, H. M. y Elwell, D. L., 2004. Effects of aeration strategies on the composting process: Part I. Experimental studies. *Trans. ASAE.* 47(5),1697-1708.
- Guidoni, L.L.C., Martins, G.A., Guevara, M.F., Brandalise, J.N., Lucia Jr., T., Gerber, M.D., Corrêa, L.B., Corrêa, E.K., 2021. Full-scale composting of different mixtures with meal from dead pigs: process monitoring, compost quality and toxicity. *Waste Biomass Valor.* 12, 5923-5935.
- Idrovo-Novillo, J., Gavilanes-Terán, I., Angeles Bustamante, M., Paredes, C., 2018. Composting as a method to recycle renewable plant resources back to the ornamental plant industry: Agronomic and economic assessment of composts. *Process Saf. Environ. Protect.* 116, 388-395.
- Jeris, J. S. y Regan, R. W. 1973. Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting. Part II, *Compost Sci.* 14 (March-April), 8-15.
- Jiménez, A; Hermoso, M. y Uceda, M., 1995. Elaboración del aceite de oliva virgen mediante sistema continuo en dos fases. Influencia de diferentes variables del proceso en algunos parámetros relacionados con la calidad del aceite. Estación experimental de Olivicultura y Elaiotécnica, Mengíbar, Jaén.
- Kuroda, K.; Tanaka, A.; Furuhashi, K., Fukuju, N. 2022. Effect of waste cooking oil addition on ammonia emissions during the composting of dairy cattle manure. *Anim Biosci.* 35(7),1100-1108.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), 2020. El sector de la avicultura de carne en cifras. Principales Indicadores Económicos. https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/estadisticas/indicadoreseconomicossectoravicoladecarne2020/parapublicar_tcm30-419674.pdf (fecha de consulta: 30/05/2022).
- Ministerio Para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO). Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.
- Ministerio Para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, 2020. Biorresiduos. (Fecha de acceso 8/9/2022). <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/biorresiduos/>
- Moreno Casco, J, Moral Herrero, R., 2008. Compostaje. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 572 p.

- Onwosi, C.O.; Igbokwe, V.C.; Odimba, J.N.; Eke, I.E.; Nwankwoala, M.; Iroh, I.N.; Ezeogu, L.I., 2017. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *J. Environ. Manage.* 190, 140-157.
- Paredes, C., Roig, A., Bernal, M. P., Sánchez-Monedero, M. A., Cegarra, J., 2000. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biology and Fertility of Soils.* 32, 222-227.
- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado.* 164, 51119-51207.
- Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) nº 1069/2009 y (CE) nº 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) nº 2003/2003. *Diario Oficial de la Unión Europea.* L 170, 1- 114.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig A., Paredes, C. y Bernal, M. P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures.
- Tsiodra C., Stathakis E., Vlysidis A., Vlyssides A., 2018. Development of a dynamic model for the degradation of fats, oils and greases during co-composting of olive mill solid and liquid wastes. *Fresenius Environmental Bulletin.* 27, 4900-4903.