



**UNIVERSITAS**  
*Miguel Hernández*



CIENCIAS AMBIENTALES  
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES



**“GESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
RESIDUOS MUNICIPALES MEDIANTE  
COMPOSTAJE”**

TRABAJO FIN DE GRADO  
JUNIO 2022

AUTOR: Miguel Antonio Gutiérrez Campillo  
DIRECTORAS: María Ángeles Bustamante Muñoz y María  
Dolores Pérez Murcia  
DEPARTAMENTO: Agroquímica y Medio Ambiente  
ÁREAS: Ingeniería Química y Edafología y Química Agrícola  
COIR: TFG.GCA.MÁBM/MDPM.MAGC.220614

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado bajo la supervisión de M.<sup>ª</sup> Ángeles Bustamante Muñoz y María Dolores Pérez Murcia, profesoras titulares del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, a quien les quiero agradecer la oportunidad de realizar mi trabajo final de grado y su atención, tiempo y dedicación.

También le quiero trasladar mi agradecimiento a todo el personal investigador del laboratorio, a Encarnación Martínez Sabater, a Marisol Pina Hernández, a José Antonio Sáez Tovar, a Zbigniew Emil Blesa Marco, a Luciano Orden y en especial a Cristina Álvarez Alonso por su paciencia, tiempo y enseñanzas a la hora de realizar mis prácticas de laboratorio.



**Título:** GESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS MUNICIPALES MEDIANTE COMPOSTAJE

**Resumen:** En los últimos años se está produciendo un notable incremento en la producción de residuos orgánicos, destacando en el caso de los residuos sólidos urbanos. Una de las formas de gestionar la fracción orgánica de recogida selectiva de los residuos municipales es mediante el compostaje. Este proceso biológico permite no sólo la gestión de estos residuos, sino también su valorización, ya que le concede un valor al convertirlo en un fertilizante orgánico con un potencial uso agrícola. Este trabajo estudia el caso concreto de la gestión mediante compostaje comunitario de la fracción orgánica procedente de la recogida selectiva de los residuos municipales del municipio de Carrícola (Valencia). Para ello, se ha realizado el seguimiento durante el proceso, así como se ha caracterizado a nivel físico-químico el producto final obtenido durante un ciclo de compostaje completo, para evaluar el desarrollo del proceso y la calidad del compost final.

**Palabras clave:** compost, fracción orgánica de residuos municipales, compostaje comunitario.

**Title:** MANAGEMENT OF THE MUNICIPAL SOLID WASTE ORGANIC FRACTION BY COMPOSTING.

**Abstract:** In recent years, there has been a notable increase in the production of organic wastes, especially in the case of solid urban waste. One of the ways of managing the organic fraction selectively collected of municipal waste is by composting. This biological process allows not only the management of this waste, but also its valorization, since it gives it a value by converting it into an organic fertilizer with a potential agricultural use. This work studies a case study of the management by community composting of the organic fraction from the selective collection of municipal waste in the municipality of Carrícola (Valencia). For this purpose, the process has been monitored and the final product obtained during a complete composting cycle has been characterized at a physico-chemical level in order to evaluate the development of the process and the quality of the final compost.

**Keywords:** compost, organic fraction of municipal waste, community composting.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Los residuos municipales.....	1
1.1.1. Definición y producción .....	1
1.1.2. Problemática asociada .....	2
1.2. Compostaje.....	3
1.2.1. Definición y fases .....	3
1.2.2. Condiciones necesarias para el proceso .....	6
1.2.3. Tipos de sistemas .....	8
1.2.4. Evaluación de la calidad del compost y marco legal.....	9
1.3. El compostaje comunitario.....	11
<b>2. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	12
2.1. Diseño y desarrollo experimental .....	12
2.1.1. Características de los residuos utilizados.....	13
2.1.2. Dispositivo de compostaje utilizado .....	14
2.2. Desarrollo experimental.....	15
2.3. Métodos analíticos .....	17
2.4. Métodos estadísticos .....	18
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	19
3.1. Evaluación de los factores relativos al propio proceso de compostaje .....	19
3.1.1. Perfil térmico.....	19
3.2. Evolución de los parámetros físico-químicos.....	20
3.2.1. pH y conductividad eléctrica.....	20
3.3. Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida.....	22
3.3.1. Evolución de la materia orgánica y las cenizas .....	22
3.3.2. Evolución del carbono orgánico total (COT) .....	23
3.3.3. Evolución del nitrógeno total (NT).....	24
3.3.4. Relación C/N.....	25
3.4. Madurez del compost: parámetros de humificación e índice de germinación.....	26
3.5. Calidad de los compost obtenidos. ....	28
<b>4. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN DE FUTURO</b> .....	29
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	30

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Los residuos municipales

#### 1.1.1. Definición y producción

Los residuos municipales engloban a los residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de comercios, industrias e instituciones (BOE, 2002). Por lo tanto, para definir que es un residuo municipal primero se debe definir que es un residuo doméstico, un residuo comercial y un residuo industrial. En primer lugar, un residuo se define como cualquier sustancia u objeto que su poseedor desecha o tenga la intención o la obligación de desechar (BOE, 2022). En segundo lugar, un residuo doméstico se define como residuo generado en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas, se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias (BOE, 2022). En tercer lugar, un residuo comercial está definido como residuos generado por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios (BOE, 2022). Por último, un residuo industrial está definido como residuo resultante de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre (BOE, 2022). La Tabla 1 muestra la cantidad generada en 2019.

**Tabla 1.** Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España en 2019. Fuente: MITECO (2022).

CANTIDAD DE RESIDUOS DE COMPETENCIA MUNICIPAL RECOGIDOS EN ESPAÑA. 2019						
Fuente	Código LER - RESIDUO	Generación	Reciclado	Compostaje	Vertido	Incineración
MITECO	20 03 01 Mezclas de residuos municipales	17.034.229	742.119	3.349.719	10.677.702	2.264.689
	20 01 01 Papel y cartón	1.287.418	1.287.418	0	0	0
	20 01 02 Vidrio	15.910	15.910	0	0	0
	20 01 08 Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	879.693	0	557.776	234.819	87.098
	20 02 01 Residuos biodegradables de parques y jardines	288.966	0	164.802	111.092	13.072
	15 01 06 Envases mezclados	827.965	526.606	0	249.984	51.375
	15 01 07 Envases de vidrio	889.076	889.076	0	0	0
	20 01 40 Residuos metálicos	21.887	21.855	0	32	0
INE	20 01 39 Residuos de plástico	39.506	30.803	0	6.286	2.417
	20 01 38 Residuos de madera	139.473	125.809	0	4.138	9.526
	20 01 10 Residuos textiles	47.258	29.781	0	14.590	2.886
	20 01 21 Equipos desechados	57.710	52.861	0	4.849	0
	20 01 23					
	20 01 35					
	20 01 36					
	20 01 33 Residuos de pilas y acumuladores	2.047	2.047	0	0	0
	20 01 34					
	20 03 02 Residuos de mercados	730.551	654.539	0	61.471	14.541
	20 03 07 Residuos voluminosos	0	0	0	0	0
20 02 02 Tierras y piedras de parques y jardines	0	0	0	0	0	
<b>TOTAL</b>		<b>22.261.690</b>	<b>4.378.825</b>	<b>4.072.296</b>	<b>11.364.964</b>	<b>2.445.604</b>
%			<b>19,7</b>	<b>18,3</b>	<b>51,1</b>	<b>11,0</b>

Los residuos domésticos están compuestos por varias fracciones, de ellas caben destacar los biorresiduos, el papel y cartón, los aparatos eléctricos y electrónicos, el vidrio, las pilas y baterías, los medicamentos, los envases ligeros, los aceites de cocina y la fracción textil y de calzado, entre otras. Por otra parte, un biorresiduo, es un residuo orgánico que ha sido generado en el ámbito del domicilio y o del comercio, que es de origen vegetal y/o animal, y que es susceptible de degradarse de forma biológica (MITECO, 2022). Los biorresiduos se pueden clasificar según su naturaleza o según la gestión que se hace de ellos. Siguiendo una clasificación de biorresiduos según su naturaleza, encontramos, los residuos orgánicos de origen alimentario y de cocina y los residuos vegetales o de fracción vegetal (FV), en cambio si los clasificamos atendiendo a la gestión de residuos orgánicos encontramos una separación entre fracción orgánica (FO), que está constituida entre otras elementos por restos de preparación de comida, alimentos en mal estado excedentes de alimentos y restos vegetales de pequeño tamaño y no leñosos procedentes de jardinería y poda, y la fracción de poda que está constituida por restos vegetales de jardinería y poda de mayor tamaño y tipo leñoso (MITECO, 2022).

**Tabla 2.** Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España por comunidades autónomas en 2019. Fuente: MITECO (2022).

	Reciclado procedente de recogida separada	Materiales Recuperado procedente del TMB de residuos mezclados	Compostado / Digestión anaerobia de FORS	Compostado / Digestión anaerobia en TMB	Incinerado	Vertido de rechazos	Vertido sin tratamiento previo	Total
C.A. Andalucía	427.824	182.876	38.891	803.508	0	2.354.501	350.038	4.157.638
C.A. Aragón	85.542	9.487	372	80.318	0	164.792	224.518	565.029
Principado de Asturias	84.792	0	17.323	0	0	12.930	373.870	488.915
C.A. Islas Baleares	148.774	319	42.112	7.148	484.728	48.342	132.977	864.401
C.A. Canarias	158.204	56.570	1.805	187.821	0	812.135	18.504	1.235.039
C.A. Cantabria	33.581	13.028	0	53.388	116.437	47.292	22.026	285.752
C.A. Castilla-La Mancha	101.751	33.680	0	251.647	0	525.560	21.471	934.108
C.A. Castilla y León	159.506	30.619	0	199.266	0	688.212	1.756	1.079.359
C.A. Cataluña	960.569	146.862	298.540	605.354	618.355	663.780	449.789	3.743.250
C.A. Extremadura	66.027	13.523	216	148.575	0	240.922	10.265	479.528
C.A. Galicia	147.420	41.207	9.246	55.556	571.196	320.517	40.679	1.185.822
C.A. La Rioja	28.469	3.903	557	60.747	0	44.522	0	138.198
C. de Madrid	436.315	36.496	20.545	174.986	377.533	557.595	1.066.697	2.670.168
Región de Murcia	90.522	27.887	0	129.340	0	479.075	38.021	764.844
C. Foral de Navarra	69.698	1.265	33.806	25.409	0	58.215	85.510	273.904
C.A. País Vasco	325.934	12.256	31.367	0	233.071	176.950	76.481	856.060
C. Valenciana	304.223	130.399	0	787.846	6.441	1.231.572	0	2.460.482
Ceuta	2.402	1.741	0	6.606	0	25.450	0	36.199
Melilla	5.154	0	0	0	37.841	0	0	42.996
<b>TOTAL</b>	<b>3.636.706</b>	<b>742.119</b>	<b>494.779</b>	<b>3.577.517</b>	<b>2.445.604</b>	<b>8.452.362</b>	<b>2.912.602</b>	<b>22.261.690</b>

### 1.1.2. Problemática asociada

Los residuos sólidos generados por los seres humanos, a nivel global, han ocasionado impactos ambientales negativos debido a que su gestión se ha realizado de manera incorrecta, y porque cada día aumentan, a causa del incremento de la población humana a nivel mundial, además también

influyen el tipo de hábitos de consumo que tenga cada persona. La mala gestión de los residuos municipales puede llegar a generar un impacto negativo en el medio ambiente.

Un ejemplo de mala gestión puede ser la acumulación de los residuos sobre suelos que no han sido aislados, esta falta de aislamiento genera una filtración de lixiviados que acaban llegando el agua subterránea que pudiera haber. Además de la contaminación del agua los lixiviados también contaminaran el suelo, generando su salinización, acidificación, erosión y pérdida de carbono orgánico.

Otro ejemplo de mala gestión de los residuos sería la no recogida de los gases de efecto invernadero que se desprenden de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos como son el metano, el dióxido de carbono o el óxido nitroso, la emisión de estos gases tienen como consecuencia la contaminación del aire. Otra forma de contaminación el aire que se genera por la mala gestión de los residuos es la generación de humo y polvo. Este humo y polvo se genera por el movimiento de carga y descarga de los residuos, y puede llegar a contener patógenos y gases tóxicos como el sulfuro de hidrogeno. Una de las principales consecuencias de la mala gestión de los residuos es la desaparición de los recursos naturales, este efecto de la mala gestión se reduciría de forma considerable si se reutilizaran y reciclaran los recursos utilizados de este modo se podría satisfacer las necesidades de la creciente población mundial

## **1.2. Compostaje**

### **1.2.1. Definición y fases**

El compostaje se puede definir como la degradación de residuos orgánicos debido a la acción de microorganismos que alteran la estructura molecular de los compuestos orgánicos. Otra forma de definir el compostaje también puede ser, como, una técnica mediante la cual se crean las condiciones necesarias para las que, a partir de los residuos orgánicos, los organismos descomponedores fabriquen un abono de elevada calidad (MITECO, 2022). El compost se define como abono de elevada calidad obtenido de la práctica del compostaje. Otra definición de compost puede ser como producto final del proceso de compostaje, formado por materia orgánica estabilizada con semejanzas al humus, inocuo y libre de sustancias fitotóxicas, cuya aplicación al suelo no provocará daños a las plantas, y que permitirá su almacenamiento sin posteriores tratamientos ni alteraciones. Para que un producto de compostaje se considere como compost debe de cumplir varios requisitos:

- Debe de ser un producto estabilizado: que se permite gracias a procesos biológicos.

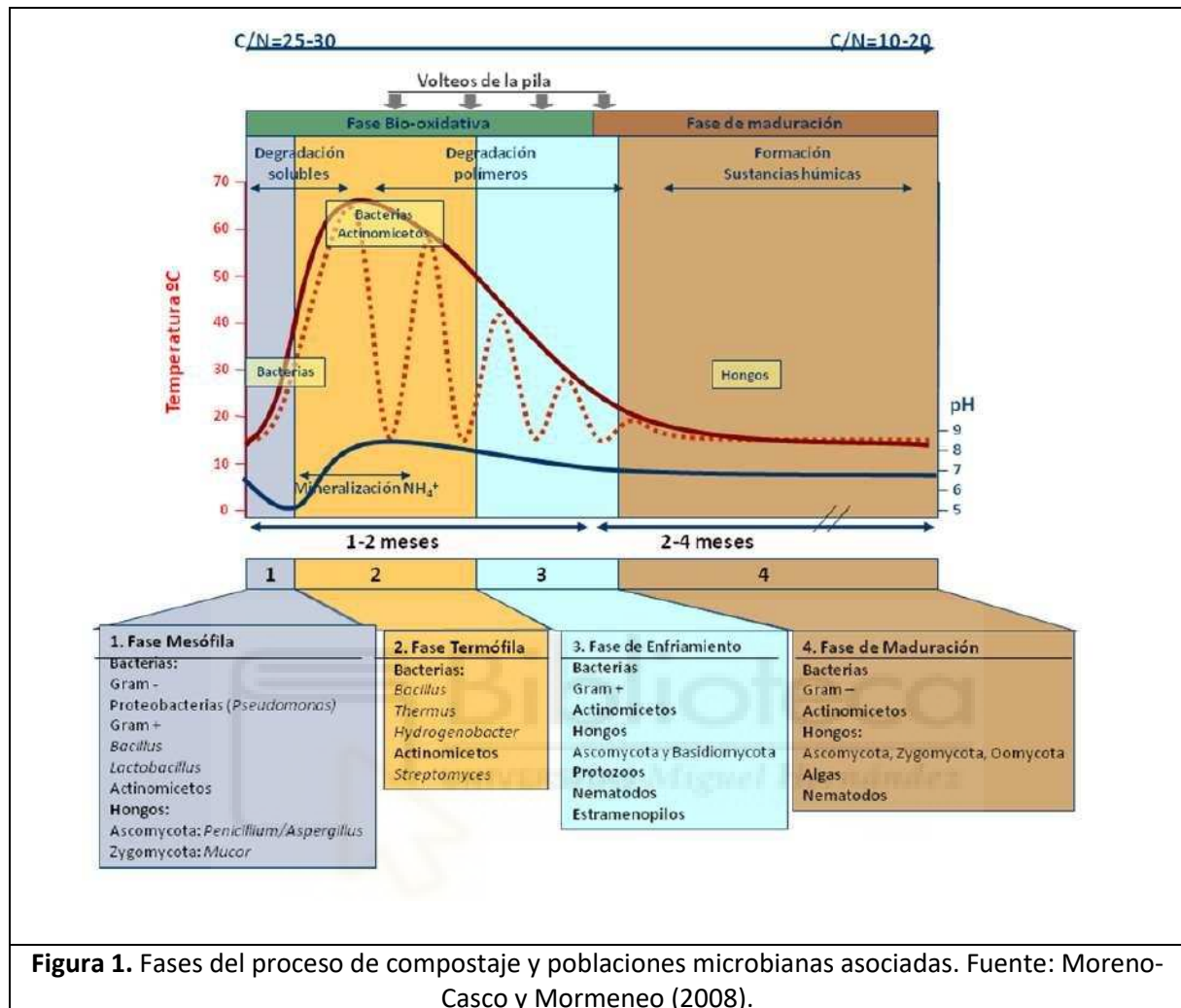
- Debe de ser un producto inocuo: es decir libre de organismos patógenos, esto se consigue teniendo en cuenta los parámetros de tiempo, competencia de la población de microorganismos no patógenos con los patógenos en la etapa termófila y la temperatura.
- Debe de haber superado una etapa inicial de descomposición: de este modo se permite la estabilización debido a la degradación inicial de compuestos orgánicos solubles y catabolitos orgánicos a compuestos más simples.
- Debe ser producto de un proceso de humificación: que se da en la fase de estabilización del producto y a continuación se da un proceso de mineralización.

Las etapas o fases de las que se consta el proceso de descomposición aeróbica o fase bio oxidativa del compostaje son las siguientes (González-Sierra, abril 2019):

- **Etapa mesofílica:** Abarca el rango desde la temperatura ambiente hasta los 45°C. El periodo de tiempo de incremento de temperaturas varía según como se ajusten los parámetros iniciales del proceso a sus valores óptimos, teniendo siempre en cuenta las necesidades de la materia orgánica a compostar. Al final de esta fase se generarán ácidos orgánicos.
- **Etapa termofílica:** esta etapa se da con temperaturas superiores a 45°C y hasta los 70°C, el límite superior está en esta temperatura debido a que a partir de ella aparecen limitaciones en la variedad de microorganismos que se encargan de la degradación de la materia orgánica, lo que influye en la eficiencia del proceso biológico.
- **Etapa de enfriamiento:** esta etapa se caracteriza porque en ella se da una disminución la actividad de los microorganismos termófilos, este hecho origina una disminución de la temperatura de la pila de compostaje hasta llegar casi a la temperatura ambiente, lo que promueve la reaparición de microorganismos mesófilos. Estos últimos serán los que dominaran el resto de la descomposición de las partes que son menos biodegradables de los residuos, esto ocurrirá hasta que la energía se agote.
- **Etapa de maduración:** se trata de una fase de enfriamiento lento que presenta una cantidad y diversidad excepcionalmente alta de microorganismo que se encargan de ella. El grado de madurez y de estabilidad que se quiera obtener en el compost es el que va a determinar la duración de esta fase. Esta etapa y en general el proceso de compostaje



finalizara cuando la temperatura del material compostado alcance la temperatura ambiente.



A parte de las etapas mencionadas anteriormente hay otras que son procesos que son dependientes de estas y se dan de forma simultánea:

- La descomposición bio-oxidativa: es un proceso exotérmico que se basa en la simplificación de la materia orgánica, durante este proceso la materia orgánica se degrada generando moléculas más sencillas de naturaleza orgánica e inorgánica. Este proceso tiene influencia en la actividad biológica de los microorganismos.
- La humificación o estabilización de la materia orgánica: es un proceso en el que se forman macromoléculas nuevas a partir de moléculas más sencillas que se obtienen en el proceso de descomposición o también a partir de las moléculas existentes en los materiales a compostar. Las macromoléculas que se obtienen son las denominadas

sustancias húmicas, estas macromoléculas se caracterizan por presentar gran resistencia a procesos de descomposición o simplificación.

### 1.2.2. Condiciones necesarias para el proceso

Para que el proceso de compostaje se desarrolle de la manera más óptima es necesario tener controlados varios factores que influyen de una manera u otra al metabolismo microbiano. Estos factores los podemos dividir en dos bloques (Navarrón, 2016):

- **Factores asociados a la naturaleza del sustrato:** son los factores que se deben de controlar al inicio del proceso de compostaje. Son los siguientes:
  - **Tamaño de partícula:** el tamaño óptimo lo encontramos entre 1 y 5cm. Este intervalo de tamaños es el óptimo debido a que las partículas deben ser lo suficientemente pequeñas como para permitir que este expuesta la mayor superficie posible a la acción microbiana, y ser lo suficientemente grande como para hacer posible el intercambio gaseoso, de esta forma se garantiza que la degradación de la materia orgánica se desarrolle en condiciones aerobias.
  - **Materia orgánica:** es el factor más destacable cuando se quiere determinar la calidad agronómica del suelo. Este factor suele ir descendiendo conforme se va mineralizando a lo largo del proceso de compostaje.
  - **Nutrientes:** la disponibilidad de elementos nutritivos define la utilidad agronómica de los residuos compostados. Esto es así debido a que los microorganismos solo son capaces de asimilar aquellos compuestos que tengan disponibilidad y estos son los compuestos más simples procedentes de la ruptura de moléculas más complejas. Para que los microorganismos se desarrollen y reproduzcan de forma adecuada son necesarias unas cantidades adecuadas de macronutrientes (C, N y P), cuya concentración ira en aumento conforme avance el proceso, a causa de la pérdida de materia orgánica en la masa que vaya a compostar.
  - **Relación C/N:** El máximo se encuentra en 20, según establece el RD 506/2013 ([última modificación Orden APA/104/2022](#)). Si la relación está por encima de este máximo, disminuirá la actividad biológica de los microorganismos y el proceso se ralentizará, pero si la relación C/N es muy baja se perderán los excesos de nitrógeno en forma amoniacal.
  - **Conductividad eléctrica (CE):** la naturaleza y la composición del material de partida, concretamente la concentración de sales y la formación de amonio o nitratos, son lo que va a determinar cómo va a ser la conductividad. Conforme se va desarrollando el proceso de

compostaje la conductividad tendera a aumentar debido a la mineralización de la materia orgánica, lo que genera un aumento de la concentración de nutrientes.

- pH: en general se pueden compostar materiales entre una pH de 3 y de 11, pero un rango de pH que evita la afectación de los microorganismos es el que está entre 6 y 8.
- **Factores de seguimiento**: estos factores se deben medir durante el proceso de compostaje para así asegurar que se vaya desarrollando de forma adecuada.
  - Temperatura: como ya se mencionó en el apartado anterior, el proceso de compostaje se divide en varias etapas que vienen marcadas por la temperatura que va presentando la materia a compostar, con ello podemos saber el nivel de degradación que presentara la materia orgánica en cada etapa.
  - Humedad: es la variable más importante debido a que la presencia de agua es indispensable para satisfacer las necesidades fisiológicas de los microorganismos, para el transporte de sustancias solubles que sirvan de alimento y para el transporte de desechos de las reacciones del compostaje. El rango óptimo de humedad se encuentra entre 50 y 70%. Por debajo de un 30% se producirá una disminución de la actividad y por encima de un 70% se producirá un desplazamiento del aire en los espacios libres lo que generará anaerobiosis y malos olores y con ello una desaceleración del proceso.
  - pH: nos indicara si en algún momento se producen condiciones anaerobias por falta de aireación. Existen tres fases en el proceso, la primera tiene lugar en la fase mesofílica, donde el pH experimentara una disminución por la liberación de ácidos orgánicos procedentes de la actividad de los microorganismos sobre la materia orgánica. En la siguiente fase se produce una alcalinización del medio por la aparición de amoniaco que procede de la descomposición de las proteínas y por la pérdida de los ácidos orgánicos. En la última fase el pH tendera a la neutralidad por la generación de compuestos húmicos. Si las condiciones son adecuadas los valores de pH oscilaran entre 7 y 8.
  - Aireación: la aireación es importante en el proceso de compostaje debido a que los microorganismos que permiten este proceso son aerobios. Si la aireación fuera inadecuada los microorganismos anaerobios sustituirían a los aerobios y se generarían malos olores, en cambio sí existe una excesiva aireación el material sufrirá un enfriamiento y los microorganismos reducirán su actividad metabólica.

### 1.2.3. Tipos de sistemas

Los sistemas de compostaje se pueden clasificar atendiendo a la disposición (en pilas o contenedores), a su manejo (dinámico o estático), a su antigüedad de utilización (sistemas tradicionales o modernos) o a su grado de tecnificación. El sistema de compostaje que mayor antigüedad tiene es el sistema mediante **pilas al aire libre**. Este sistema requiere de más cantidad de espacio que otros sistemas, pero en cambio no necesita de la existencia e instalaciones específicas además de ser capaz de tratar mayores volúmenes de restos orgánicos. En este tipo de sistemas a los restos de alimentos se les suele añadir un estructurante que favorece la aireación de la pila y permite el control de la humedad. Además, para que el proceso ocurra de manera óptima, sobre todo en ausencia de volteos, es necesario un buen mezclado de los restos orgánicos. Otro sistema destacable sería el de **tabique y silo abiertos**, en los que el material orgánico se amontona entre dos o tres paredes que pueden ser de madera, ladrillos o paja (Storino, 2016-2017). También caben mencionar otros sistemas como el sistema **de pozas, zanjas o trincheras** (depósito de restos orgánicos en zanjas excavadas en el suelo, en estos sistemas se debe tener en cuenta el tipo de suelo para colocar aislantes para evitar contaminación) o la utilización de **sacos de malla transpirable**, además de las diversos **modelos comerciales de composteras** de madera o plástico para uso doméstico (Storino 2016-2017).



**Figura 2.** Tipos de sistemas de compostaje (Storino, 2016, 2017).

#### 1.2.4. Evaluación de la calidad del compost y marco legal

La calidad del compost va a tener una mayor o menor relevancia según el uso que se le vaya a dar al compost. En el caso de que compost se vaya a utilizar como sustrato para cultivos en semilleros o contenedores, la calidad del compost cobra mucha importancia, en cambio, si su uso va a ser la aplicación directamente al suelo, la calidad del compost resulta menos importante.

Hay varios aspectos destacables que van a afectar la calidad del compost:

- **Material inicial**: el material inicial influirá en la calidad del compost final.
- **Proceso de compostaje**: en el proceso de compostaje es necesario que se hayan alcanzado temperaturas superiores a 60°C, de este modo el producto final estará libre de semillas de malas hierbas y patógenos.
- **Almacenamiento de producto final**: el lugar de almacenamiento final del compost producto debe de estar en unas condiciones mínimas de calidad, de este modo se pueden evitar condiciones anaeróbicas que pueden generar malos olores y productos tóxicos.

El grado de madurez también es un factor importante en lo referente a la calidad del compost. El uso de un compost con un grado de madurez inadecuado puede generar diversos efectos adversos, entre ellos destaca:

- Descenso del contenido de oxígeno a nivel radicular
- Con relación C/N alta, bloqueo del nitrógeno del suelo
- Incremento en exceso de la temperatura del suelo
- Acumulación de sustancias fitotóxicas
- Aparición de microorganismos patógenos

En la actualidad no existe una normativa específica del proceso del compostaje. Los aspectos relacionados con el compostaje se regulan a nivel europeo por la Directiva 2018/851 del parlamento europeo de del consejo esta directiva sustituye a la Directiva 2008/98/CE del parlamento europeo y del consejo. A nivel nacional todo aquello relacionado con el compostaje se regula por la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular que incorpora la Directiva 2018/851, la ley de 2022 sustituye a la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados.

A nivel europeo también se debe de tener en cuenta el Reglamento 2019/1009 del parlamento europeo y del consejo del 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. Además de las normativas antes mencionadas también cabe destacar la norma europea EN 13432:2000 sobre los requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. También es importante mencionar la lista europea de residuos aprobada en el año 2000 (última modificación Decisión de la Comisión 2014/955/UE). Para determinar a un producto como compost se deben tener en cuenta los requisitos del RD 506/2013 del 28 de junio, sobre productos fertilizantes (última modificación Orden APA/104/2022) (Tabla 3).

**Tabla 3.** Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto como compost según RD 506/2013 (última modificación Orden APA/104/2022).

Parámetro	RD 506/2013		
Materia orgánica mínima (%)	35		
Humedad máxima (%)	40		
C/N	<20		
Metales pesados (mg/kg m.s.):	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	n.d.	n.d.	n.d.
Cobre	70	300	400
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
Selenio	-	-	-
Arsénico	-	-	-
Molibdeno	-	-	-
Flúor	-	-	-
Contaminantes orgánicos			
Polifenoles (% p/p)	0,8		
Furfural (% p/p)	0,05		
Microorganismos			
Salmonella sp.	Ausente en 25g de compost		
E. Coli	<1000NMP/g		
Partículas (%)	90 (≤25 mm)		
Impurezas (%)	No puede contener		
Gravas y piedras (%)	No puede contener		
n.d.: no detectable según el método oficial; NMP: número más probable			

Por otra parte, la normativa básica en materia de sustratos de cultivo y las normas necesarias de coordinación con las comunidades autónomas se establece en el *RD 865/2010, del 2 de julio, sobre sustratos de cultivo* (con su última modificación la Orden PRA/1943/2016, de 22 de diciembre). Este RD define y clasifica los sustratos de cultivo que pueden utilizarse en agricultura, jardinería y paisajismo, puesto que deben reunir unos requisitos relativos a su composición, envasado, características e identificación, que garanticen una eficacia a nivel agronómico y no produzcan efectos nocivos sobre el agua, suelo, flora, fauna o el ser humano. Este RD clasifica los compost de residuos orgánicos dentro del “*Grupo 1: productos orgánicos como sustrato de cultivo o componente de los mismos*” e indica las especificaciones y las declaraciones obligatorias y opcionales establecidas en el Anexo I del RD 865/2010, modificado por la Orden PRA/1943/2016, de 22 de diciembre, para este tipo de compost.

### **1.3. El compostaje comunitario**

En primer lugar, es necesario matizar la distinción entre compostaje municipal/comunal y el compostaje comunitario (o colectivo). El primero, consiste en la utilización de la técnica del compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos que se generan en una localidad, barrio, municipio, etc. En el caso del compostaje comunitario, se puede decir que es una técnica de compostaje en origen, para que los biorresiduos generados por varias personas, familias o generadores sean tratados de forma conjunta en un módulo, dentro de un espacio común de destino.

Los residuos sólidos municipales suponen una problemática si no se realiza una adecuada gestión, debido a su efecto nocivo sobre la salud y el medio ambiente. Principalmente los efectos adversos se generan debido a la falta de responsabilidad de las instituciones que generan los residuos, a las autoridades municipales, a los servicios de aseo en los procesos de disposición final y por último a los ciudadanos al no separar los residuos en la fuente.

El compostaje comunitario, es capaz de solucionar parte del problema de los residuos municipales, en concreto el generado por los biorresiduos que se pueden valorizar mediante este proceso, obteniendo de este modo un producto valioso para su utilización en jardinería municipal o el reparto entre las personas que participen. Esta iniciativa permite que en el reciclaje de residuos orgánicos participen aquellas personas que por no cumplir los requisitos no puedan optar al compostaje doméstico. Como se ha mencionado antes, no existe ninguna norma específica para el proceso de compostaje en general, ni para el compostaje comunitario en particular, este hecho puede tener efectos adversos debido a que sin normativa específica existen aspectos concernientes al

compostaje que sin regularización son capaces de afectar al medio ambiente. A pesar de esto cabe destacar en el ámbito de la Comunidad Valenciana las órdenes:

- ORDEN 18/2018, de 15 de mayo, de la Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural, por la que se regulan las instalaciones de compostaje comunitario en el ámbito territorial de la Comunitat Valenciana.
- ORDEN 4/2022, de 24 de marzo, de la Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, que regula el agrocompostaje de proximidad para la gestión sostenible de los restos agrícolas, ganaderas, silvícolas y agroforestales en el ámbito territorial de la Comunidad Valenciana.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Diseño y desarrollo experimental

En este trabajo experimental se plantea como objetivo principal el estudio de la fracción orgánica de los residuos municipales que se valorizara mediante compostaje comunitario. El compostaje se realizó con la fracción orgánica de los residuos del municipio de Carrícola (Valencia). El proceso de compostaje se realizó mediante la elaboración de una pila en hilera al aire libre a la que se le realizaron volteos periódicos para así obtener un producto estabilizado y altamente humificado. Para este estudio se realizaron diversas fases:

- **Fase 1:** Identificación inicial de los residuos utilizados para compostar.
- **Fase 2:** Establecimiento de la mezcla a compostar.
- **Fase 3:** Desarrollo de un sistema de compostaje en hilera, que contara con ventilación natural y volteos periódicos.
- **Fase 4:** Análisis de las características físico-químicas, químicas y biológicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso y del producto final (compost).

#### **Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar**

Para establecer una estrategia de compostaje es necesario conocer cuál es la naturaleza y el origen de los residuos que se han utilizado como materiales iniciales para el proceso de compostaje. Los materiales de origen utilizados fueron dos, uno nombrado como ingrediente 1 que consistía en FORS (fracción orgánica de recogida separada de residuos municipales) y otro como ingrediente 2, compuesto mayoritariamente por restos de poda y hojas, y minoritariamente por compost de otras pilas previas ya seco y estiércol de burro.



## **Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar**

La mezcla a compostar debe de tener ciertas características a nivel físico, físico-químico y químico para que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada. Con respecto a la elaboración de las pilas de compostaje es necesario que la mezcla inicial tenga una adecuada humedad, porosidad y relación C/N.

## **Fase 3: Desarrollo de un sistema de compostaje mediante en hilera, que contara con ventilación natural y volteos periódicos.**

El sistema de compostaje que se desarrolló atendiendo a las condiciones de temperatura, aireación y humedad de la mezcla inicial. Estas condiciones se controlaron a través de sondas de temperatura, volteadoras y sistemas de riego.

## **Fase 4: Análisis de las características químicas, físico-químicas y biológicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso y del producto final obtenido (compost).**

En las muestras de los materiales iniciales fueron determinados parámetros físico-químicos, como el pH y la conductividad eléctrica y parámetros químicos, como el contenido en C y N totales, la relación C/N, el contenido en macro y micronutrientes, así como en metales pesados. A continuación, se estudió la evolución que tuvo la mezcla a lo largo del proceso de compostaje, desde el inicio del proceso hasta que se obtuvo el compost maduro, mediante el estudio de los distintos parámetros indicativos del proceso que a continuación se detallan:

- Asociados al propio proceso de compostaje: humedad, temperatura y aireación.
- Asociados a la evolución de la materia orgánica: materia orgánica total y cenizas, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación entre el carbono orgánico total.
- Asociados a evolución de los parámetros físico-químicos y la fracción hidrosoluble: pH, CE.

Así como en los compost finales se determinaron parámetros relacionados con la madurez, estabilidad del compost (índices de humificación e índice de germinación) y su valor agronómico (contenido en nutrientes).

### **2.1.1. Características de los residuos utilizados**

Los materiales de origen utilizados fueron la FORS (fracción orgánica de recogida separada de residuos municipales) y una mezcla de restos de poda y hoja mayoritariamente, junto con compost de otras pilas ya seco y estiércol de burro. La proporción de ingredientes en la pila fueron los siguientes

respecto a peso fresco: 82,7% de FORS + 17,3% mezcla de podas, hojas, estiércol de burro. Las principales características de los residuos utilizados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Características de los materiales iniciales utilizados en la mezcla de compostaje.

	Ingrediente 1	Ingrediente 2
<b>Materia</b>	<b>FORS</b>	<b>Estructurante:</b> Restos de poda, hojas, compost de otras pilas ya seco y estiércol de burro
<b>Humedad (%)</b>	7,7	6,4
<b>pH</b>	3,3	6,5
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	62,2	73,9
<b>Materia orgánica total (%)</b>	35,0	41,5
<b>Carbono orgánico total (%)</b>	1,4	2,1
<b>Nitrógeno total (%)</b>	25,9	20,6
<b>Relación C/N</b>	6,3	3,8
<b>P (g/kg)</b>	11,0	15,9
<b>K (g/kg)</b>	2,5	4,3
<b>Na (g/kg)</b>	24,9	14,1
<b>Cu (mg/kg)</b>	39,1	35,4
<b>Zn (mg/kg)</b>	30,6	36,4
<b>Cr (mg/kg)</b>	0,1	0,1
<b>Cd (mg/kg)</b>	8,6	3,5
<b>Ni (mg/kg)</b>	3,9	4,0
<b>Pb (mg/kg)</b>	7,7	6,4

FORS: fracción orgánica de recogida selectiva de residuos municipales.

### 2.1.2. Dispositivo de compostaje utilizado

El proceso de compostaje llevado a cabo para la realización de este estudio se ha desarrollado en la planta isla de compostaje de Carrícola, situada en la localidad de Carrícola (Valencia).



**Figura 3.** Vista de la planta de compostaje de Carrícola, en la imagen de la izquierda se distingue la volteadora utilizada.

El material acumulado en unas composteras previas (utilizadas para el acopio de los residuos) se homogeneizó mediante volteo y se conformó la pila utilizándose una volteadora tipo BACKHUS A30. La pila se montó en hilera al aire libre con unas dimensiones aproximadas de 6,5 x 2,8 x 1,2 m (longitud x ancho x alto). Posteriormente se regó con agua de la red. Por otro lado, para el control de la humedad y la temperatura se contaba tanto de riego por aspersión como de sondas de temperatura. Los riegos de las pilas se realizaron de forma periódica a lo largo de todo el proceso de compostaje. La finalidad de estos riegos fue mantener una humedad superior al 40% y así evitar la inhibición de la actividad microbiana. En cuanto al control de la temperatura mediante sondas, se utilizaron 4 sondas conectadas a un *data logger* (HOBO®U12) que registra de forma continua y se colocaron equidistantes a lo largo de la pila de compost a una profundidad de 50 cm. El suministro de aire se garantizó gracias a volteos periódicos que permitieron el mantenimiento de la actividad microbiana e ir controlando el proceso de degradación de la materia orgánica. Una vez finalizada la etapa bio-oxidativa, cuando la temperatura tras un volteo no aumentó y fue similar a la ambiental, se dejó madurar la pila en reposo, por un periodo de 31 días.

## 2.2. Desarrollo experimental

A continuación, se detallan todos los procesos y pasos seguidos a la hora de llevar a cabo el proceso compostaje, su seguimiento analítico a lo largo del tiempo del ensayo, así como los procesos

previos para la preparación de la mezcla que se va a compostar. Para ello, se describe este desarrollo experimental en varios pasos:

**a. Cálculo y preparación de la mezcla a compostar: elaboración de la pila de compostaje**

En un principio, para realizar este experimento, se planteó como objetivo alcanzar una relación C/N entre 20 y 30 en la mezcla inicial. Para ello se calcularon las cantidades a mezcla de cada residuo mediante las siguientes expresiones:

Ecuación 1:  $P = A + B$

$$(A * \% C_A * \% MS_A) + (B * \% C_B * \% MS_B)$$

Ecuación 2:  $C/N = \frac{\quad}{\quad}$

$$(A * \% N_A * \% MS_A) + (B * \% N_B * \% MS_B)$$

Donde:

P = Peso total de la pila, en kg.

A = Peso del ingrediente A, en kg.

B = Peso del ingrediente B, en kg.

MS = Materia seca.

Una vez establecidos los componentes que conforman la pila de compostaje, se procedió al muestreo de los residuos para su posterior caracterización inicial, a su pesado mediante báscula analítica y a su homogeneización en tandas utilizando una máquina homogeneizadora. Tal como se ha indicado previamente, la proporción de ingredientes en la pila fueron los siguientes respecto a peso fresco: 82,7% de FORS + 17,3% mezcla de podas, hojas, estiércol de burro. La pila de compost se formó acumulando por capas el material orgánico y terminando con el resto de material vegetal. Una vez dispuesto todo el material en cada pila, se procedió a realizar un primer volteo para permitir condiciones iniciales del compost lo más homogeneizadas posibles. Se formó una pila longitudinal que en su fase inicial tenía un tamaño de 6,5 m de longitud, unos 2,8m de ancho y 1,2 m de altura y presentaba un volumen de 8,85m<sup>3</sup>, una densidad de 0,279 kg/l y un peso de 2469,15 kg. Para llevar a cabo este proceso se utilizó el volquete auto-cargable (Dumper) con un volumen de volquete de 720 L. La pila tuvo como fuente de humedad inicial, así como para los riegos posteriores, agua potable procedente de la red de abastecimiento del término municipal de Carrícola (Valencia), siendo estos riegos realizados una vez a la semana durante la etapa termófila y cada 15 días durante el resto del

proceso, siempre intentando mantener una humedad superior al 40%. Además, se hicieron coincidir estos riegos con el volteo de la pila, utilizando una volteadora BACKHUS A30.

#### **b. Seguimiento del proceso de compostaje**

Una vez conformada la pila, se realizó un seguimiento del proceso de compostaje basado fundamentalmente en el control de la aireación, humedad y temperatura. La fase bio-oxidativa se dio por concluida una vez se alcanzó una temperatura próxima a la del ambiente y se comprobó que no surgió una reactivación tras el volteo. La fase bio-oxidativa tuvo una duración de 125 días. A continuación, se quitaron las sondas de temperatura y pasó la volteadora de forma que la pila quedara con poca altura. Finalmente, se dejó madurar durante 31 días.

#### **c. Muestreo del material y volteos**

La pila fue muestreada para cada etapa del proceso de compostaje, formando cada muestra a partir de un número representativo de submuestras, 7 en este caso, tomadas en diferentes puntos de la pila, considerando todo el perfil, desde la parte superior hasta la parte inferior de esta y a 3 profundidades diferentes. De este modo, aseguramos que la muestra final tomada fuese representativa de la totalidad del material en el momento de la recogida. Este muestreo se realizó tal y como se indica en la Directiva 77/535/CEE, modificada por la Directiva 87/566/CEE (Métodos Oficiales de Análisis en la Unión Europea, 1998), sobre métodos de toma de muestras y de análisis de abonos.

### **2.3. Métodos analíticos**

- **Preparación de la muestra:** Las muestras tanto de compost como de residuos iniciales se secaron a 60°C y a continuación fueron molidas mediante un molino a través de una malla de 0,5 mm de luz. Una vez molidas, se secaron a 105°C y se conservaron en desecador de vacío.
- **Humedad original:** Se toma como humedad, el porcentaje de agua presente en el compost, por diferencia de pesadas entre material húmedo y seco a 105°C.
- **Pérdida de peso por calcinación (cenizas):** En el compost y en los residuos utilizados, se toma como "materia orgánica" la pérdida de peso por calcinación a 430 °C. Se determinó siguiendo el método de Navarro y col. (1993). La pérdida de peso se indica como porcentaje respecto a peso de muestra seca.

- **Medida del pH:** El pH se mide mediante extracción previa de la muestra con agua destilada en una proporción 1:10 y agitación durante 2 h, seguidamente se mide el valor de pH mediante un pH-metro.
- **Conductividad eléctrica:** Se obtiene a partir del extracto anterior, que se centrifuga y se filtra con papel de filtro, a continuación, se miden los valores de la conductividad mediante un conductímetro.
- **Carbono orgánico total y nitrógeno total:** Se realiza quemando la muestra a 1020°C en un analizador elemental (Navarro y col., 1991).
- **Carbono extraíble:** Se realiza mediante extracción de la muestra con hidróxido sódico y determinación del carbono extraído en un analizador elemental (Sánchez-Monedero y col., 1996).
- **Fraccionamiento y determinación del C ácidos húmicos y ácidos fúlvicos:** Se realiza mediante precipitación de los ácidos húmicos a pH 2 en el extracto de C extraíble y posterior determinación del C extraído en un analizador elemental (Sánchez-Monedero y col., 1996).
- **Mineralización de la muestra:** Digestión nítrico-perclórica de las muestras según el método recomendado descrito por Bustamante y col. (2008).
- **Fósforo total, macro y micronutrientes:** Se determinaron en el extracto de mineralización mediante medida por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).
- **Índice de germinación (IG):** El índice de germinación fue determinado usando semillas de berro (*Lepidium sativum L.*) mediante el método descrito por Zucconi y col. (1985).

#### 2.4. Métodos estadísticos

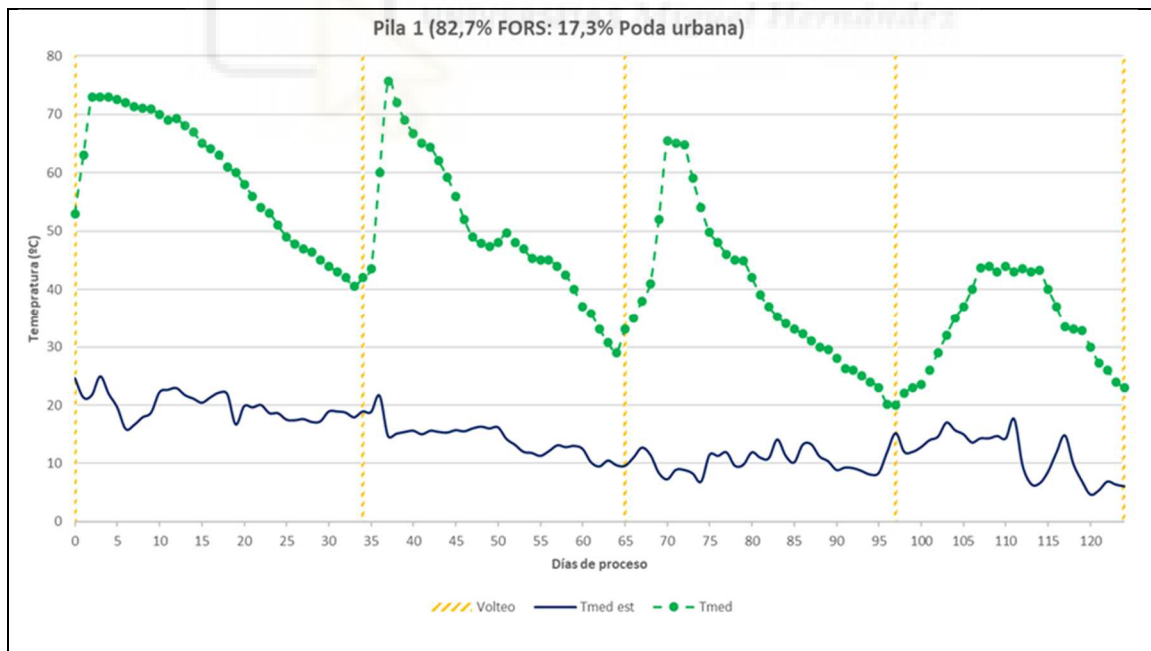
Para el tratamiento estadístico aplicado a los datos obtenidos se utilizó un análisis estadístico ANOVA de una sola vía. Mediante este tratamiento estadístico se pudo observar si la evolución a lo largo del proceso de compostaje fue significativa. En los parámetros en los que la evolución del proceso fue significativa, se realizó el contraste post-hoc de la diferencia mínima significativa (DMS o sus siglas LSD en inglés).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Evaluación de los factores relativos al propio proceso de compostaje

##### 3.1.1. Perfil térmico

En la Figura 4 se muestra la evolución de la temperatura de la pila durante el proceso de compostaje con respecto a la temperatura ambiente, así como los volteos realizados. En el proceso de compostaje, el incremento de la actividad de los microorganismos incrementa la temperatura debido a los procesos metabólicos que se producen, por ello se utiliza la temperatura como un indicador de la actividad microbiana. Por tanto, se puede considerar que la evolución de este parámetro es importante como una herramienta fundamental de interpretación y control del propio proceso de compostaje. En la Figura 4 se aprecia el efecto que tiene los volteos realizados generando picos de temperatura que corresponden con aumentos de actividad microbiana, que con el tiempo va disminuyendo hasta que se realiza otro volteo. Esta evolución de la temperatura permite verificar el criterio establecido a nivel europeo como requisito que permite asegurar la correcta higienización de la mezcla (European Commission, 2014), debido a que se garantiza la eliminación de posibles microorganismos patógenos. La duración de la fase bio-oxidativa de la pila fue larga (125 días).

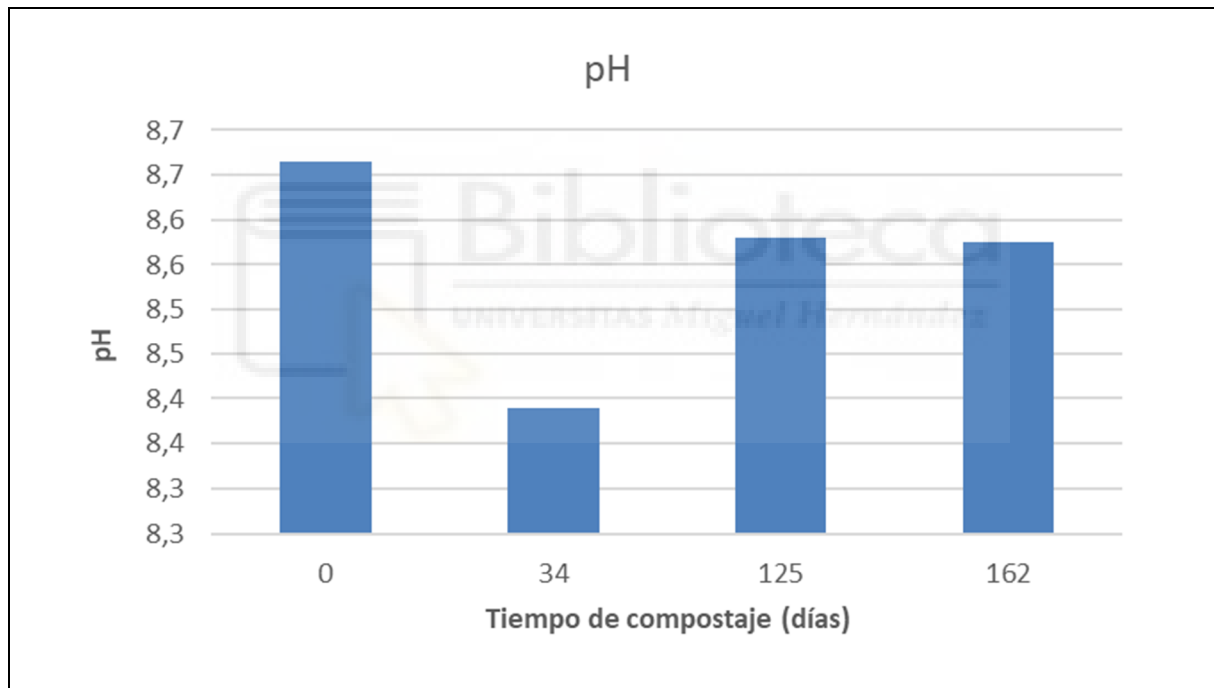


**Figura 4.** Perfil térmico de la pila de compostaje objeto de estudio respecto a la temperatura ambiente. En líneas verticales se indican los volteos realizados.

### 3.2. Evolución de los parámetros físico-químicos

#### 3.2.1. pH y conductividad eléctrica

El pH es otro de los parámetros indicativos de la evolución del proceso de compostaje, que generalmente sufre diversas variaciones a lo largo del proceso, durante la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos (Bueno y col, 2008). En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero, 2001). Y en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón. La Fig. 5 muestra su evolución durante el proceso.



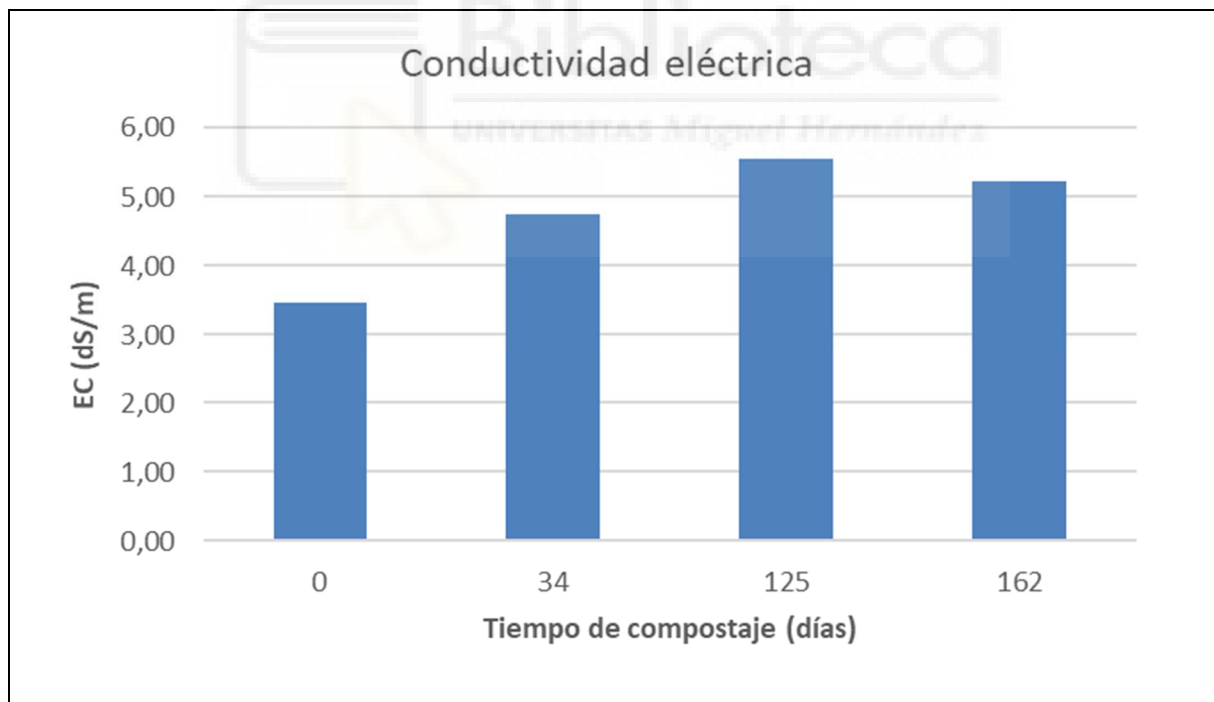
**Figura 5.** Evolución de pH en el proceso de compostaje ( $LSD_{pH} = 0,01$ ). (LSD: diferencia mínima significativa).

Los resultados obtenidos para el pH (Figura 5), nos indican como este parámetro se ve influido por el tiempo de compostaje. Podemos observar cómo los valores de pH fueron ligeramente básicos, con valores ligeramente superiores a 8. Cada grupo de microorganismos tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad microbiana se produce a pH 6,0-7,5 y la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de entre 5,8 a 7,2 (Román y col, 2013). En la figura 5 se puede apreciar una notable disminución de pH cuando ha pasado un tiempo de compostaje de 34 días, esta disminución se debe como ya se ha explicado anteriormente a la acción



de los microorganismos sobre la materia orgánica esto genera la aparición de ácidos orgánicos que causan esa acidificación. En los días 125 y 162 se aprecia un aumento de pH que indica una alcalinización a causa de la pérdida de los ácidos orgánicos y a la generación de amoníaco precedente de la descomposición de las proteínas.

Por otra parte, la conductividad eléctrica es un parámetro que generalmente aumenta a lo largo del proceso de compostaje, debido a la mineralización de la materia orgánica y de la concentración relativa de iones dada por la pérdida de peso de la pila. Si, por el contrario, se observa un descenso de la CE durante el proceso de compostaje, puede ser causado por falta de control de la pérdida de sales solubles por lixiviación, provocada por los riegos o por la lluvia si el proceso se realiza al aire libre (Paredes y col., 2001). En la pila se observa que la CE va aumentando a lo largo del proceso de compostaje (Fig. 6). Esto es debido a la mineralización de la materia orgánica y la liberación de iones durante la degradación (Paredes y col. 2001; Bustamante y col., 2008). Según Lasaridi y col. (2006), el valor de CE en un compost no debe superar los 3 dS/m para no provocar efectos adversos.



**Figura 6.** Evolución de la conductividad eléctrica en el proceso de compostaje ( $LSD_{CE} = 0,34$ ). (LSD: diferencia mínima significativa)

Elevados valores de CE podrían reducirse a través de mezclas con otros materiales y/o lavando el compost con agua de riego en las primeras etapas del proceso (Cáceres y col., 2015). En las mezclas

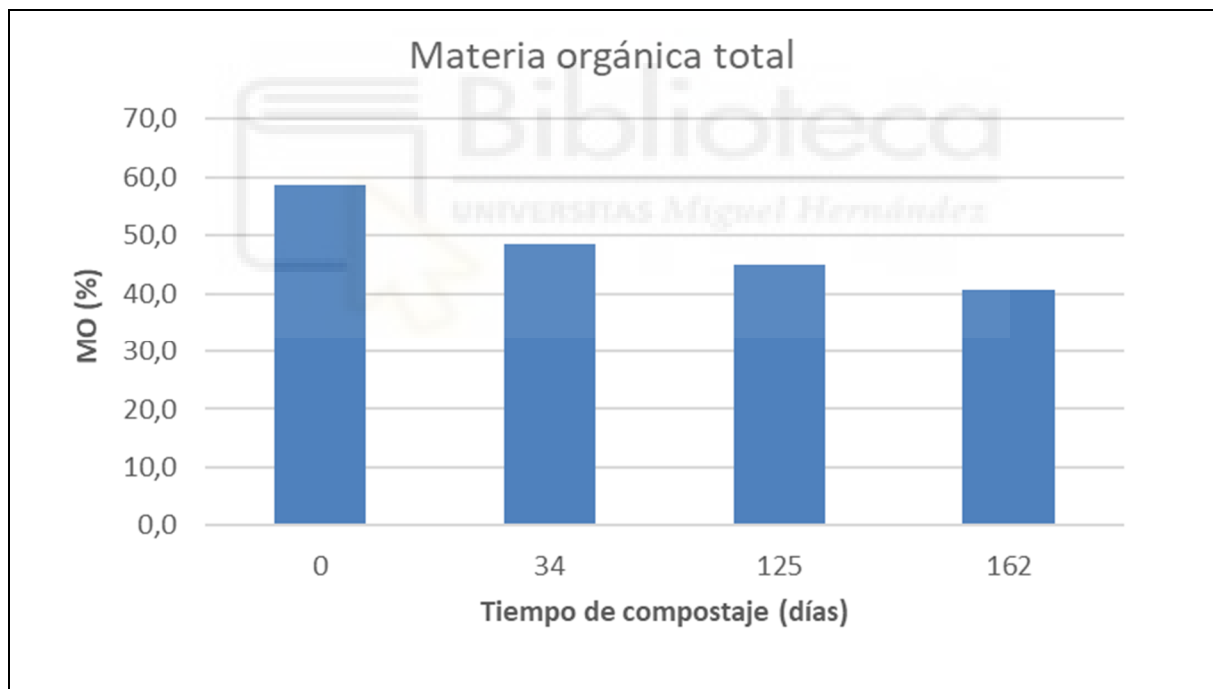
estudiadas, la CE de los compost finales superó dicho valor, incluso ya desde el inicio, aunque al no ser un valor muy elevado los compost podrían ser usados como enmienda orgánica.

### 3.3. Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida

El estudio de la evolución de la totalidad de la materia orgánica y de su fracción sólida nos informa sobre la intensidad de la actividad microbiana que determina como va a progresar el proceso de compostaje (Alvarez,2020).

#### 3.3.1. Evolución de la materia orgánica y las cenizas

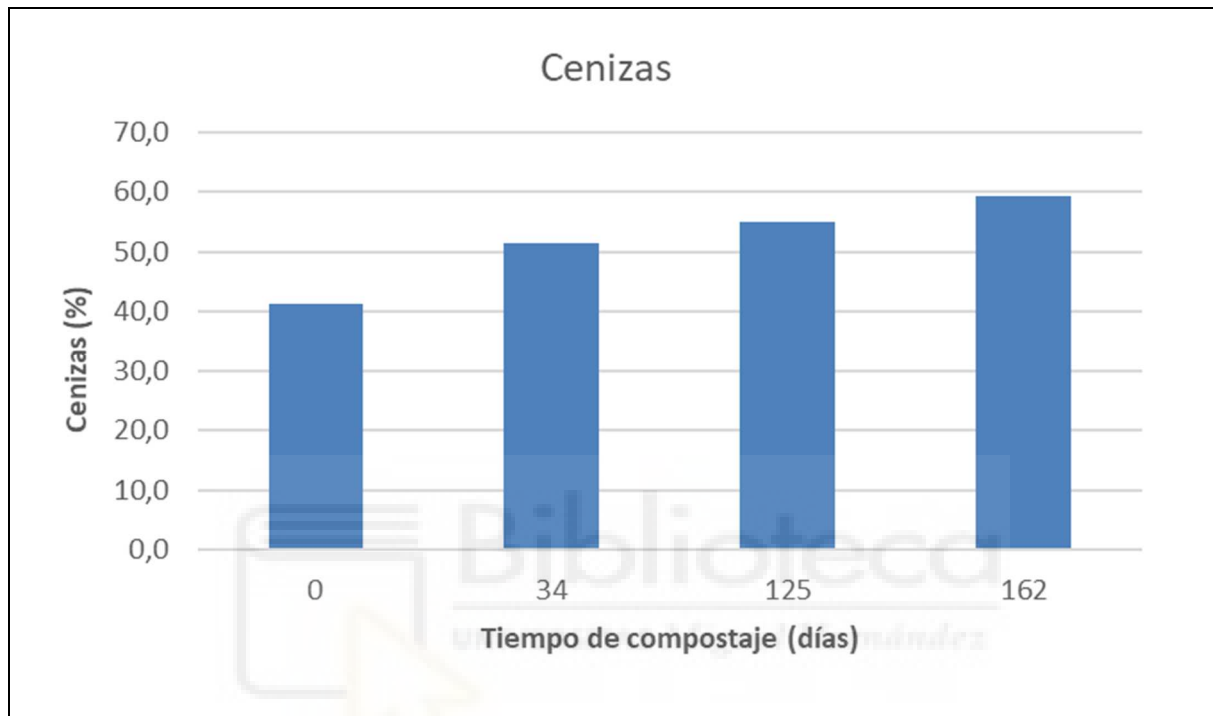
En la Figura 7 se puede apreciar como los valores de MO de la muestra disminuyen como consecuencia de la mineralización que producen los microorganismos sobre la mezcla. La naturaleza de la mezcla, más o menos orgánica, viene indicada por el porcentaje de materia orgánica (MO) presente en el compost.



**Figura 7.** Evolución de la concentración de materia orgánica total en el proceso de compostaje. (LSD = 1,10) (LSD: diferencia mínima significativa)

La concentración de MO durante el proceso de compostaje debe ir disminuyendo debido a la descomposición que ocurre durante la etapa bio-oxidativa (Bustamante y col., 2008). El contenido final del compost en MO dependerá de su degradabilidad, de su valor inicial, así como de la transformación que hayan sufrido sus componentes a lo largo del proceso.

Se observa cómo durante la fase bio-oxidativa del proceso de compostaje, la pérdida de materia orgánica es más acusada, debido a la intensa actividad microbiana que caracteriza esta etapa, donde se produce una mayor degradación y mineralización de la MO presente. Cabe mencionar que los valores de MO en los compost finales son superiores al mínimo establecido en la legislación para compost (MO  $\geq$ 35%, RD 506/2013, última modificación Orden APA/104/2022).

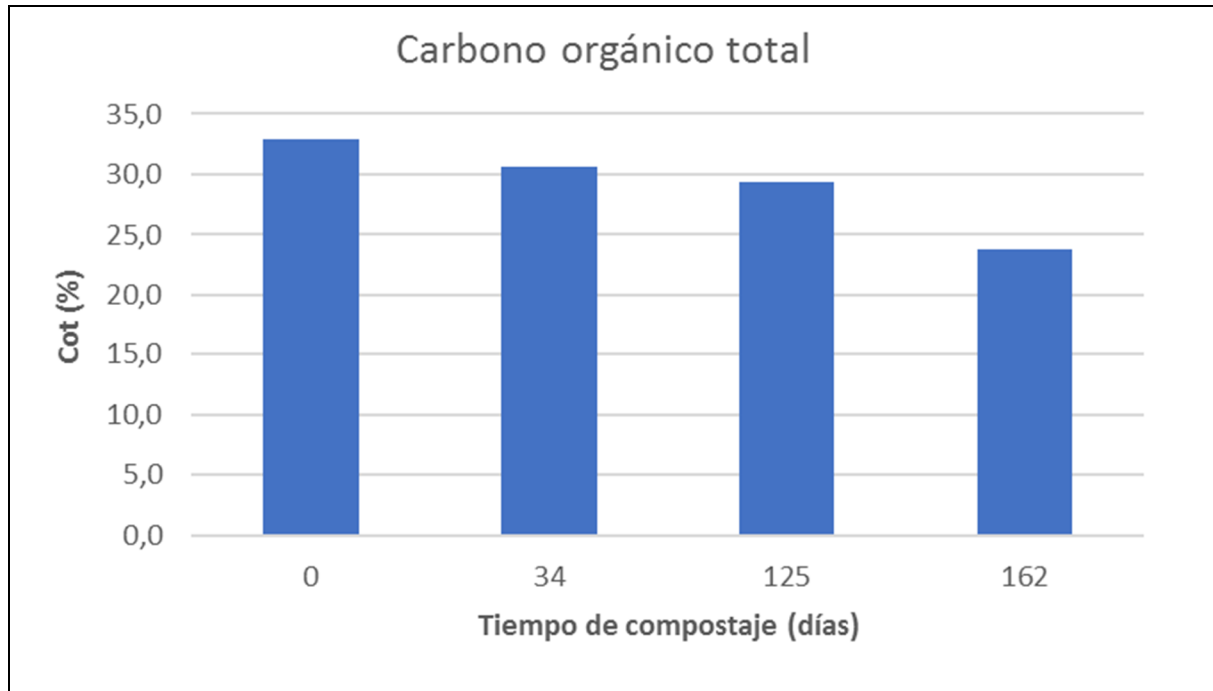


**Figura 8.** Evolución de la concentración de cenizas durante el compostaje. (LSD = 1,10) (LSD: diferencia mínima significativa)

Por otro lado, el proceso degradativo que sufre la materia orgánica se prolonga hasta el final de la etapa bio-oxidativa donde se generan compuestos inorgánicos cuya concentración relativa se ve incrementada por la pérdida de peso relativo de la masa. En todas las mezclas de compostaje se observó un claro incremento en el contenido de cenizas, esto se debe a los procesos de mineralización que vienen asociados al proceso de compostaje, siendo ese incremento más intenso durante la etapa termófila.

### 3.3.2. Evolución del carbono orgánico total (COT)

El contenido en carbono orgánico total también se ve afectado por el proceso de mineralización que sufre la mezcla a lo largo del compostaje, algo similar a lo que ocurre en proceso de degradación llevado a cabo por los microorganismos que disminuía el contenido en MO. En la fig. 9 se observa la evolución de este parámetro con el proceso de compostaje.



**Figura 9.** Evolución del carbono orgánico total en el proceso de compostaje. (LSD =3,62). (LSD: diferencia mínima significativa).

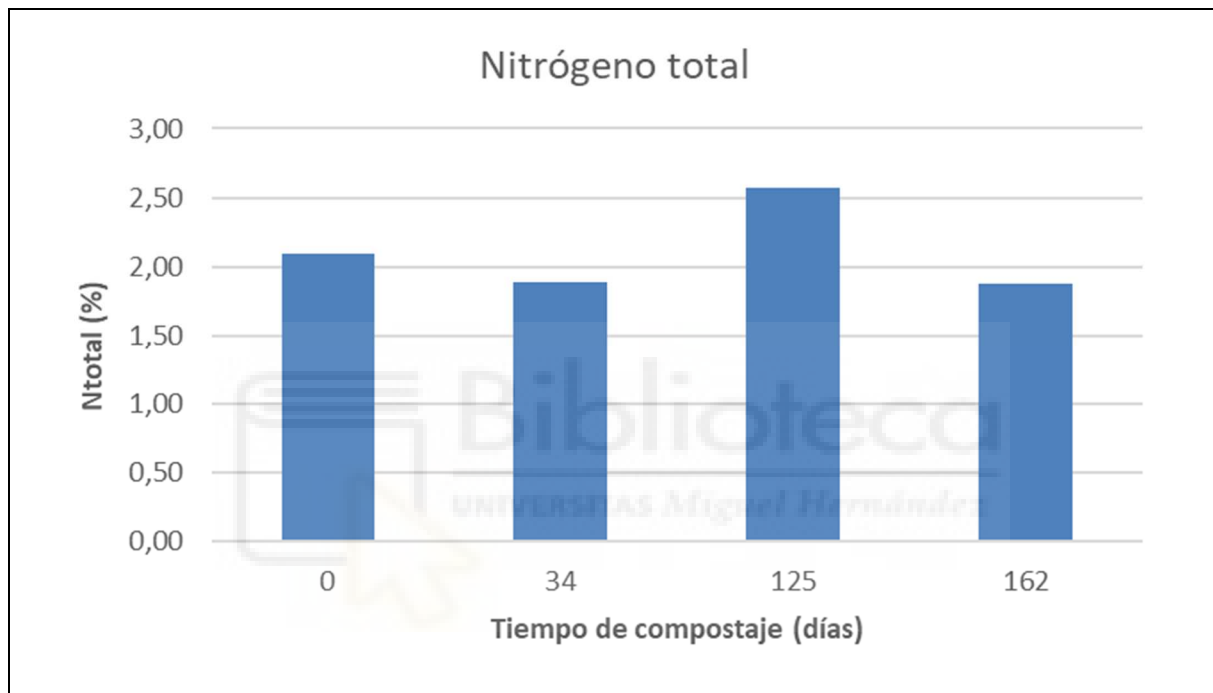
Como se ha mencionado anteriormente, se observa un mayor descenso de COT durante la fase bio-oxidativa, asociada al incremento de la actividad microbiana en esta etapa y a la mineralización sufrida durante todo el tiempo que dura el proceso de compostaje (Bustamante y col., 2008). Según el factor de conversión entre COT y MOT descrito por Van Bemmele (Navarro y col, 1993), los valores de COT en los compost son altos, incluidos los datos de la muestra final que, a pesar de presentar el valor más bajo, supera el límite de establecido por la legislación en lo correspondiente a enmiendas orgánicas compostadas según el Real Decreto 506/2013, última modificación Orden APA/104/2022.

### 3.3.3. Evolución del nitrógeno total (NT)

El nitrógeno es uno de los macronutrientes fundamentales para la nutrición vegetal, debido a ello si la finalidad del compost es para uso agrícola, es importante minimizar las pérdidas de este elemento. A lo largo del proceso de compostaje, tenemos una serie de procesos que hacen que el contenido de nitrógeno en la pila inicial disminuya ya sea por lixiviación o por volatilización. La pérdida de materia orgánica y la reducción de la masa que se quiere compostar provoca que las especies nitrogenadas inorgánicas y orgánicas sufran un efecto concentración (Alvarez, 2020). Este efecto se genera cuando al final del proceso de compostaje, el nitrógeno está más concentrado debido a esa reducción en la masa de la pila. Es debido a esto, que el contenido en nitrógeno se vaya incrementando

a lo largo del proceso de compostaje debido en gran parte a un efecto concentración, a causa de la pérdida de peso de la pila por degradación de materia orgánica, además de la posible fijación biológica de nitrógeno (Paredes y col., 2002).

En la Figura 10 se puede observar que el contenido en NT en general aumentó a lo largo del proceso de compostaje, pese al ligero descenso observado al final del proceso, siendo el incremento general debido al efecto de concentración, debido a la pérdida de peso de la pila por la degradación de materia orgánica y a la posible fijación biológica de nitrógeno (Bustamante y col., 2008).

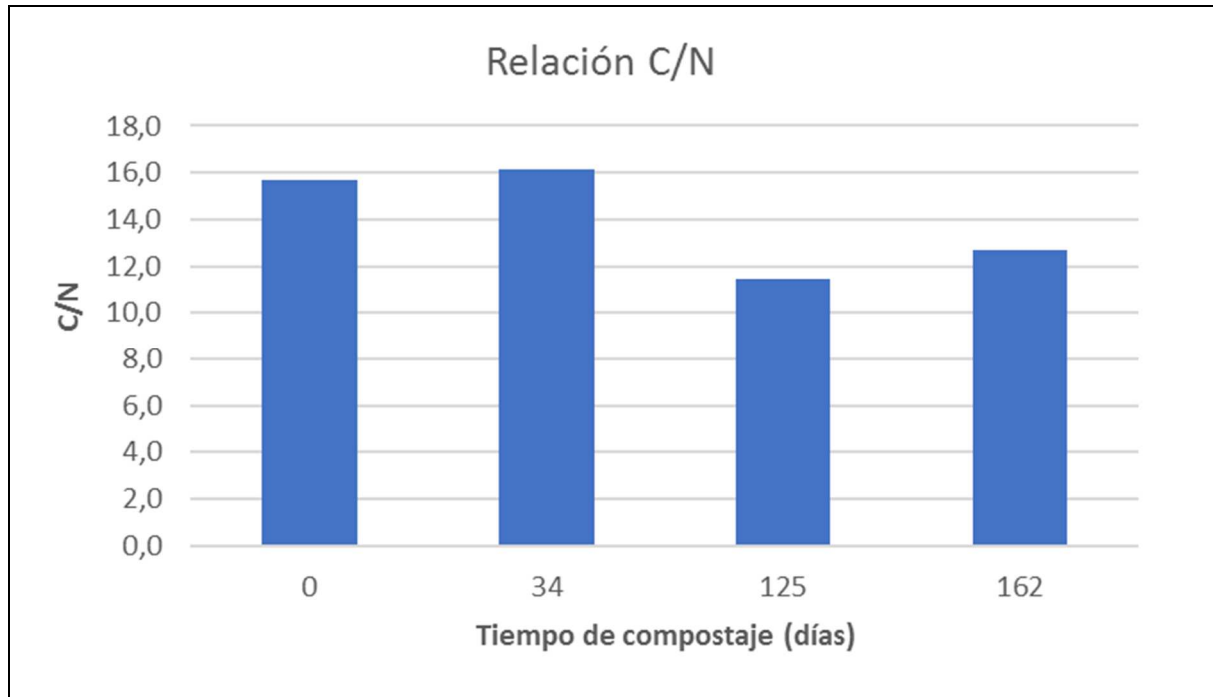


**Figura 10.** Evolución de la concentración de nitrógeno total durante el proceso de compostaje. (LSD = 0,22). (LSD: diferencia mínima significativa).

#### 3.3.4. Relación C/N

Uno de los índices que más se utiliza para estudiar la evolución de la materia orgánica durante el proceso de compostaje es la relación del carbono orgánico respecto al nitrógeno total (C/N) de la muestra. Esto es así debido a que este índice representa la pérdida de carbono orgánico, a consecuencia de la mineralización de la materia orgánica, mientras que por otro lado mide el aumento de la concentración de nitrógeno a causa de la pérdida de peso.

En la pila estudiada se observa una disminución del C/N, coincidiendo con la etapa bio-oxidativa donde se produce una mayor degradación de la materia orgánica. Además, también se puede observar en la Figura 11 que los valores se mantienen por debajo de 20, nivel de C/N máximo recomendable para un producto se utilizara como compost, según establece el RD 506/2013.



**Figura 11.** Evolución de la relación C/N en el proceso de compostaje. (LSD = 0,38). (LSD: diferencia mínima significativa).

Pero cabe mencionar, que la relación C/N no puede ser empleada como un índice de madurez único, a causa de que este parámetro puede variar mucho en función cuales sean los materiales de partida, siendo más útil para el seguimiento de la evolución de la pila durante el compostaje, que para indicar el grado de madurez alcanzado por el compost obtenido.

#### 3.4. Madurez del compost: parámetros de humificación e índice de germinación

El proceso de humificación consiste principalmente en la biosíntesis mediante los procesos de condensación y polimerización de dichas unidades de bajo peso molecular, principalmente aromáticas, en compuestos húmicos, durante la fase de madurez (Bustamante y col., 2008). En general, los materiales frescos contienen bajos niveles de ácidos húmicos y altos de ácidos fúlvicos. A medida que se produce el compostaje, el contenido en ácidos húmicos aumenta y el de fúlvicos tiende a disminuir. Por esta razón, el creciente nivel de ácidos húmicos se ha considerado como grado de humificación y madurez de un compost (Bustamante y col., 2008). Entre los principales índices clásicamente utilizados para evaluar el nivel de humificación en los sustratos durante el compostaje y en los compost destacan:

a) Relación de humificación ( $RH = C_{ex}/COT \times 100$ ) (Roletto y col., 1985): Evalúa el porcentaje del carbono orgánico total transformado en compuestos húmicos.

b) Índice de humificación (IH =  $C_{ah}/C_{OT} \times 100$ ) (Roletto y col., 1985): Evalúa la evolución de la materia orgánica no humificada hacia compuestos húmicos.

c) Porcentaje de ácidos húmicos (Pah =  $C_{ah}/C_{ex} \times 100$ ) (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992): Evalúa el porcentaje de carbono total extraíble transformado en compuestos húmicos.

d) Relación de polimerización:  $C_{ah}/C_{af}$  (Roletto y col., 1985): Evalúa el grado de transformación de la fracción fúlvica en húmica.

En la Tabla 5 se muestran los principales parámetros estudiados asociados a la madurez y estabilidad del compost, estudiados en el compost final y comparados con los valores límite establecidos en la bibliografía. Estos parámetros muestran que el compost obtenido presentó un adecuado grado de madurez y estabilidad, con valores para todos los índices de humificación estudiados dentro de los rangos y límites establecidos por diversos autores (Roletto y col., 1985); Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992). Adicionalmente también mostraron ausencia de fitotoxicidad, indicado por alto valor obtenido para el índice de germinación (IG > 60%) (Zucconi y col., 1981).

**Tabla 5.** Principales características relacionadas con la madurez en el compost final

Parámetro	Compost	Límite establecido
Cext (%)	7,20	--
Cfulv (%)	1,73	--
Chum (%)	5,46	--
RH (%)	21,9	> 7% <sup>a</sup>
IH (%)	16,6	> 3,5% <sup>a</sup>
Pah (%)	75,9	> 62% <sup>b</sup>
Cah/Caf	3,15	> 1 <sup>a</sup>
IG (%)	95,6	> 60% <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Roletto y col. (1985); <sup>b</sup> Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992); <sup>c</sup> Zucconi y col. (1981). COT: carbono orgánico total; Cextr: carbono extraíble; Chum: carbono de ácidos húmicos; Cfulv: carbono de ácido fúlvicos; RH: relación de humificación; IH: índice de humificación; Pah: porcentaje de ácidos húmicos; Cah/cah: relación de polimerización. IG: índice de germinación.

### 3.5. Calidad de los compost obtenidos.

En la Tabla 6 se muestran las principales características a nivel agronómico en el compost final. El compost obtenido presentó un pH ligeramente básico, mientras que la conductividad eléctrica superó el valor de 3 dS/m establecido por Lasaridi y col. (2006) como límite para obtener un compost de calidad, pero como los valores no fueron excesivamente superiores a este valor puede ser utilizado como enmienda orgánica. El compost final también mostró un alto contenido en materia orgánica, siendo el valor superior al mínimo del 35% fijado por la legislación española para compost (RD 506/2013 de fertilizantes última modificación Orden APA/104/2022). También mostró contenidos medios de nitrógeno, entorno al 2%, debido al uso mayoritario de la FORS, un residuo cuyo contenido en nitrógeno puede variar por su alta heterogeneidad. Respecto al contenido de otros macronutrientes (P y K), todos los compost mostraron adecuados contenidos para su uso agrícola. En relación al contenido en micronutrientes, los contenidos fueron adecuados, sin alcanzar contenidos problemáticos en el caso del Cu y Zn, al ser muy bajos respecto a los valores límite fijados en el RD 506/2013 de fertilizantes (70 mg/kg para Cu y 200 mg/kg para Zn en la clasificación A, la más restrictiva respecto a los metales pesados).

**Tabla 6.** Principales características del compost final.

Parámetro	Compost final
pH	8,6
Conductividad eléctrica (dS/m)	5,23
Materia orgánica total (%)	40,6
N total (%)	1,88
Relación C/N	12,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg)	0,93
K (g/kg)	8,86
Na (g/kg)	3,53
Fe (mg/kg)	3265
Cu (mg/kg)	34,5
Mn (mg/kg)	170
Zn (mg/kg)	78,6



#### 4. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN DE FUTURO

Las principales conclusiones que se han obtenido, teniendo en cuenta los objetivos planteados, son las siguientes:

- El proceso de compostaje de la fracción orgánica de recogida selectiva de los residuos municipales estudiados se ha mostrado como un tratamiento viable para gestionar y proporcionar un valor añadido a este tipo de residuos. Así, no sólo se consigue gestionar el residuo, sino también asignar un nuevo uso a algo que se iba a desechar e iba a depositarse en vertederos o cualquier otra práctica que no contemple la posibilidad de utilizarlos como nuevo recurso.
- El diseño establecido para la mezcla de compostaje permitió un correcto desarrollo del proceso de compostaje, con una adecuada duración de la fase termófila, alcanzando temperaturas altas (> 55°C) durante más de dos semanas, lo que aseguró la higienización de la pila.
- El compost final mostró unas buenas propiedades físico-químicas y químicas, con un destacable contenido nutriente (NPK y micronutrientes), así como un adecuado grado de madurez y ausencia de fitotoxicidad, lo que garantizan su calidad agronómica para su uso como enmienda orgánica en suelos agrícolas.

Los resultados que se han obtenido en este estudio plantean la posibilidad de realizar nuevos diseños de compostaje que se basen en el uso de residuos municipales para su adecuada gestión y valorización, además del estudio de características adicionales del compost final obtenido que puedan suponer un valor añadido para el posterior uso en huertos urbanos, escolares o huertos privados, permitiendo aumentar su potencial como fertilizante y/o enmienda orgánica, lo que supone su integración completa en el marco de la economía circular.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C. 2020.** Valoración de residuos de la industria agroalimentaria mediante compostaje. Departamento de agroquímica y medio ambiente. Grado en Ciencias Ambientales. Universidad Miguel Hernández.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). Ley 7/2022,** de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-5809>
- Boletín Oficial del Estado (BOE). Ley 34/2007,** de 25 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmosfera. URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-19744>
- Boletín Oficial del Estado (BOE). Real Decreto 506/2013,** de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. URL: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540). Última modificación: Orden APA/104/2022, de 11 de febrero (Ref. BOE-A-2022-2621).
- Bueno, P., Diaz, M., Cabrera, F. 2008.** Factores que afectan al proceso de compostaje. Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica. Universidad de Huelva. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), CSIC.
- Bustamante, M.A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F.C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M.P., Moral, R. 2008.** Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, Vol.72, 4: pp. 551-557.
- Cáceres, R., Coromina, N., Malinska, K., Marfà, O. 2015.** Evolution of process control parameters during extended co-composting of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media. *Bioresource Technology*, 179: 398-406.
- Ciavatta, C., Vittori, L., Sequi, P. 1988.** A first approach to the characterization of the presence of humified materials in organic fertilizers.
- Compostaje doméstico y comunitario.** Gestión de los residuos. Mancomunidad comarca de pamplona.Pamplona. URL: <http://www.mcp.es/residuos/gestion-de-residuos/compostaje-domestico-y-comunitario>
- Diario oficial de la Comunidad Valenciana (DOGVA).** ORDEN 18/2018, de 15 de mayo, de la Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural, por la que se regulan las instalaciones de compostaje comunitario en el ámbito territorial de la Comunitat Valenciana.

**Diario oficial de la Comunidad Valenciana (DOGVA).** ORDEN 4/2022, de 24 de marzo, de la Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, que regula el agrocompostaje de proximidad para la gestión sostenible de los restos agrícolas, ganaderas, silvícolas y agroforestales en el ámbito territorial de la Comunidad Valenciana.

**Daños medioambientales de una mala gestión de los residuos orgánicos.** Genia bioenergy.Valencia.

URL: <https://geniabioenergy.com/dano-medioambientales-de-una-mala-gestion-de-los-residuos-organicos/>

**European Commission. 2014.** End-of-waste criteria for biodegradable waste subject to biologic treatment (compost and digestate), EC JRC 87124.

**Gonzalez-Sierra, R., Arizmendiarieta, J., Puyuelo, B., Irigoien, I., Nohales, G. 2019.** “A Practical Guide for Local Management of Biowaste”. Community Composting. Zero Waste Europe Guides/01

**Iglesias, E., Pérez, V. 1992.** Determination of maturity indices for city refuse composts. Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.

**Kitson, R.E., Mellon, M.G. 1944.** Colorimetric determination of P as a molybdovanadate phosphoric acid. Ind. Eng. Chem. Anal. Ed., 16, 379-383.

**Lasaridi, K., Protopapa, I., Kotsou, M., Pilidis, G., Manios, G., Kyriacoua, A. 2006.** Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance. Journal of Environmental Management, 80: 58-65.

**Lax, A., Roig, A., Costa, F. 1986.** A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. Plant and soil, 94:349-355.

**MITECO, 2022.** Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Manual de compostaje.URL:[https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24\\_tcm30-185556.pdf](https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24_tcm30-185556.pdf)

**MITECO, 2022.** Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico. Flujos de residuos. Residuos domésticos. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/Default.aspx>

**Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A. y Bernal, M.P. 1991.** An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. Commun. Soil Sci.Plant Anal., 22, 2137-2144.

- Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A.; García, D. 1993.** Relationships between organic- matter and carbon contents of organic wastes. *Biosource Technology*, 44: 203-207.
- Navarron, L. 2016.** “Compostaje de tronco de palmera con lodos de depuración de aguas residuales urbanas”. Trabajo final de grado. Universidad Miguel Hernández.
- Paredes, C., Bernal, M.P., Roig, A., Cegarra, J. 2001.** Effects of olive mil wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes. *Biodegradation*, 12, 225- 234.
- Paredes, C., Bernal, M.P., Roig, A., Cegarra, J. 2002.** Biodegradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology* 85, 1-8.
- Puerta, S.M. 2004.** Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1),56-65. [fecha de Consulta 11 de abril de 2022]. ISSN: 1794-4449. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511009>.
- Roletto, E., Barberis, R., Consiglio, M., Jodice, R. 1985.** Chemical parameters for evaluating compost maturity.
- Roman, P., Martinez, M., Pantoja, A. 2013.** Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Oficina de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Martínez-Pardo, C., Cegarra, J., Paredes, C. 1996.** A microanalysis method for determining total organic carbon in extracts of humic substances. Relationships between total organic carbon and oxidable carbon. *Biores. Technol.*, 57 (3): 291-295.
- Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., 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. *Biores. Technol.*, 78 (3): 301-308.
- Storino, F. 2017.** “Compostaje Centralizado de Residuos Orgánicos Domiciliarios a Pequeña Escala”. Memoria de tesis doctoral. Universidad pública de Navarra.
- Zucconi, F., Monaco, A., Forte, M. 1985.** Phytotoxins during the stabilization of organic matter. En: *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Ed.: J.K.R. Gasser. Elsevier. Barking. pp. 73-85.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., DeBertolli, M. 1981.** Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle* 22: 54–57. NFY Tam, S Tiquia.