

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA**  
**GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y AGROAMBIENTAL**



**COMPOSTAJE DE TRONCO PALMERA CON LODOS DE  
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS**

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre-2016

Autor: Luis Navarrón Izquierdo

Tutores: Aurelia Pérez Espinosa

M<sup>a</sup> Dolores Pérez Murcia



## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de los profesores Aurelia Pérez Espinosa y M<sup>a</sup> Dolores Pérez Murcia, a quienes me gustaría expresar mi agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio. Además de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que saliera de manera exitosa.

A los técnicos de laboratorio de la universidad, en especial a Mari Sol, por enseñarme a desenvolverme en el laboratorio y a realizar los experimentos pertinentes, de forma paciente y muy clara.



**Título:** COMPOSTAJE DE TRONCO PALMERA CON LODOS DE DEPURACIÓN DE AGUAS  
RESIDUALES URBANAS

**RESUMEN:**

En este trabajo, se desarrolla un procedimiento experimental con el objetivo de obtener la mejor relación de compostaje de lodos de depuradora de aguas residuales urbanas junto al tronco de palmera como agente estructurante. La optimización se basa en el análisis de las propiedades fisicoquímicas, químicas y biológicas durante el proceso y en los composts maduros. El proceso de compostaje se llevó a cabo en composteras móviles de 350 litros, con aireación natural y volteos periódicos. Durante el proceso se utilizó la temperatura y la humedad como indicadores de la evolución del proceso de compostaje durante los 86 días. Finalmente, la evaluación de la calidad del compost, permitió observar las cualidades higiénicas, agronómicas y fertilizantes de las mezclas estudiadas, y proponer la proporción de materiales más idónea para su desarrollo a mayor escala.

Palabras clave: Materiales Estructurantes, Lodo de Depuradora de Aguas Residuales Urbanas, Compostaje, Compost.

**Title:** PALM TREE TRUNK COMPOSTING WITH DEPURATING MUD OF URBAN WASTE WATER.

**ABSTRACT:**

In this investigation, it is developed an experimental procedure with the objective of getting the best relation between the mud composting of urban waste water with the palm tree trunk as structure agent. The optimization is based on the analysis of physicochemical, chemical and biological properties during the process and with mature compost. The composting process was carried out 350 litres, with nature aire and periodical turning over. During the process, the temperature and humidity were used as indicators of the compost process evolution along the 86 days. Finally, as a consequence of the evaluation of the compost quality, it was observed the hygienic, agronomic and fertilizer qualities of the studied mixtures in order to propose the best materials for its development.

Key words: structurant materials, depurating mood of urban waste water, composting, compost.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Residuos orgánicos</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Biomasa residual de Palmáceas</b>	<b>6</b>
1.2.1 Origen	6
1.2.2 Producción y destino	7
1.2.3 Características de los residuos de palmáceas	7
<b>1.3 Lodos de depuradora</b>	<b>8</b>
1.3.1 Origen	8
1.3.2 Características	9
1.3.3 Métodos de aprovechamiento y tratamiento	13
<b>1.4 Fundamentos del compostaje</b>	<b>13</b>
1.4.1 Definición y fases del proceso de compostaje	13
1.4.2 Condiciones para el proceso de compostaje	16
1.4.3 Sistemas de compostaje	18
1.4.4 Evaluación del grado de madurez de un compost	19
<b>1.5 Utilización del compost</b>	<b>23</b>
1.5.1 Uso como enmienda orgánica	23
1.5.2 Uso como sustrato de cultivo	24
1.5.3 Legislación medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo	25
<b>2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b>	<b>31</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Diseño experimental</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Dispositivo experimental.</b>	<b>38</b>
3.2.1. Características de los residuos utilizados	38
3.2.3. Dispositivo de compostaje utilizado	39

<b>3.3. Desarrollo experimental</b>	<b>39</b>
3.3.1. Cálculo y preparación	40
3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje	40
3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas	41
<b>3.4. Métodos analíticos</b>	<b>42</b>
<b>3.5. Métodos estadísticos</b>	<b>44</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>45</b>
4.1. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje	46
4.2. Evolución de la fracción hidrosoluble: pH, conductividad eléctrica y contenido en polifenoles	50
4.3. Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida	56
4.4. Macronutrientes y sodio	66
4.5. Parámetros indicativos de calidad del compost	69
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>73</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>76</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

---



## 1. INTRODUCCIÓN

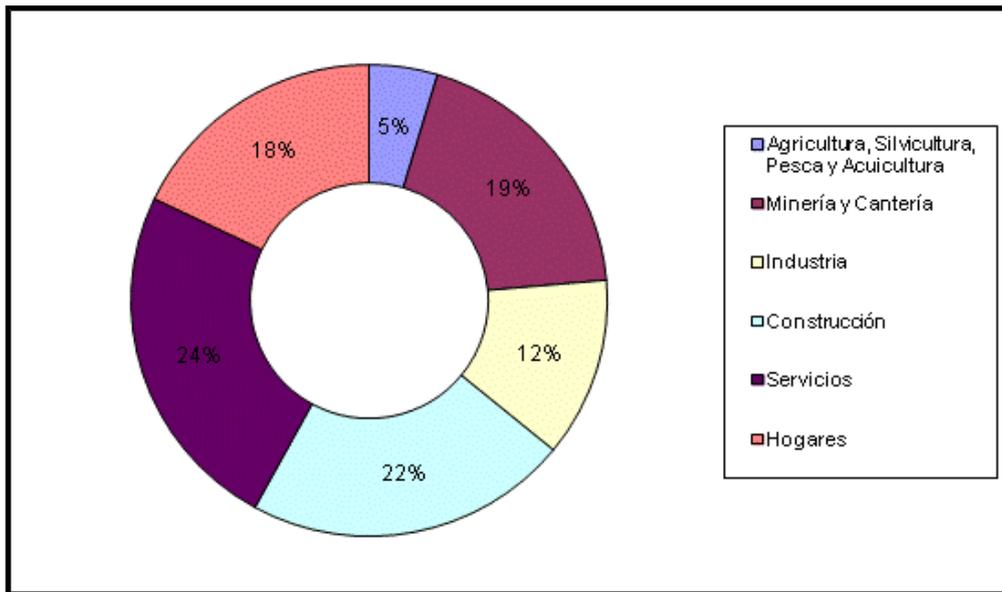
### 1.1 Residuos orgánicos

La generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental grave de las sociedades modernas. Así el abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores, y pueden provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana, pero si se gestionan adecuadamente se convierten en recursos con los beneficios de todo tipo que ello conlleva.

En Europa, la Directiva Marco de Residuos constituye el principal instrumento normativo para cambiar el enfoque de la gestión de los residuos, al centrar su objetivo en la prevención y el reciclado y reforzar el principio de jerarquía en las opciones de gestión de residuos. Siguiendo esta jerarquía, la prevención es la mejor opción de gestión seguida y en este orden, de la preparación para la reutilización, del reciclado, de otras formas de valorización (incluida la energética) y por último de la eliminación (el depósito en vertedero entre otras).

Posteriormente, y en el marco de la Estrategia 2020, “la Hoja de ruta hacia una Europa Eficiente en el uso de los recursos” recoge los objetivos y los medios para transformar la economía actual, basada en el uso intensivo de los recursos, en un nuevo modelo de crecimiento basado en el uso eficiente de los recursos. En este planteamiento, el reciclaje o la valorización material de los residuos, juegan un papel primordial.

La contribución de las distintas actividades a la generación de residuos en 2012 se presenta en la siguiente figura, donde podemos ver que los principales sectores que contribuyen a generar residuos son el sector servicios, la minería, la construcción y los hogares, en cantidades muy parecidas entorno al 20%.



**Figura 1.1:** Generación de residuos por actividad económica en 2012. Fuente EUROSTAT

La clasificación de los residuos no es única, una de las más tradicionales, es en función de los distintos sectores de producción:

- Primarios o de producción de materias primas, se engloban los residuos ganaderos como estiércoles y purines, residuos agrícolas (restos de cosechas, de poda, etc.)
- Secundarios o industriales, se generan una gran variedad de residuos orgánicos, tanto sólidos como líquidos, tan variados como las propias industrias que los generan. De especial interés son los residuos de la industria agroalimentaria, que generan residuos vegetales y residuos líquidos procedentes del procesado de frutas y verduras, lodos y aguas residuales procedentes de la transformación y procesado de los alimentos.
- Terciarios o de servicios: residuos domésticos (residuos sólidos urbanos), de limpieza y mantenimiento de jardines, y de la depuración de aguas residuales urbanas (lodos EDAR).

La actividad agraria genera residuos de tipologías muy diferentes en composición y cantidad y la separación de las explotaciones agrícolas hace que los residuos se encuentren muy dispersos en el territorio, de manera que el transporte a puntos de clasificación y almacenamiento constituyen las piezas claves que deben abordarse para mejorar la gestión de los residuos del sector agrario. La complejidad que supone para la mayoría de los productores agrarios que cada residuo que genera tenga unas normas específicas puede dificultar su gestión, por lo que hay que desarrollar estrategias específicas para el almacenamiento en las explotaciones de los distintos residuos generados, su correcta entrega, clasificación y almacenamiento intermedio, así como para el transporte a los lugares específicos de clasificación y almacenamiento. Para valorar la problemática en un caso concreto es necesario cuantificar los residuos y localizar a los gestores, adoptando en cada zona la solución más adecuada.

En la siguiente tabla se muestra el volumen generado para los residuos urbanos mayoritarios. De forma específica en la Directiva 2008/98/CE sobre residuos, lista una serie de definiciones necesarias a la hora de plantearse profundizar en el estudio de los residuos entre la que se encuentra como novedosa la de *Biorresiduo*: residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos, que como vemos en la tabla 1, se corresponden con las filas 2 y 3, dentro de los residuos urbanos.

**Tabla 1.1:** Estimación de residuos de naturaleza predominantemente orgánica.

Origen	Subsector	Generación (ton /año)
Urbano	Mezclas de residuos municipales <sup>5</sup>	18.808.667
	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes <sup>5</sup>	558.430
	Residuos biodegradables de parques y jardines <sup>5</sup>	392.480
	Lodos de depuración <sup>6</sup>	1.205.124

<sup>5</sup> MAGRAMA, ANUARIO DE ESTADÍSTICA 2011 (Datos 2010 y 2011), epígrafe 8.1.; <sup>6</sup> Elaboración propia a partir de los datos de producción de lodos obtenidos del Anuario de estadística del año 2010 referentes a la producción de lodos por CCAA y datos demográficos obtenidos del Instituto Nacional de estadística (INE).

En concreto, la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados indica expresamente respecto a los biorresiduos impulsar:

- a) La recogida separada de biorresiduos para destinarlos al compostaje o a la digestión anaerobia en particular de la fracción vegetal, los biorresiduos de grandes generadores y los biorresiduos generados en los hogares.
- b) El compostaje doméstico y comunitario.
- c) El tratamiento de biorresiduos recogidos separadamente de forma que se logre un alto grado de protección del medio ambiente llevado a cabo en instalaciones específicas sin que se produzca la mezcla con residuos mezclados a lo largo del proceso. En su caso, la autorización de este tipo de instalaciones deberá incluir las prescripciones técnicas para el correcto tratamiento de los biorresiduos y la calidad de los materiales obtenidos.
- d) El uso del compost producido a partir de biorresiduos y ambientalmente seguro en el sector agrícola, la jardinería o la regeneración de áreas degradadas, en sustitución de otras enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales.

Dentro de los residuos urbanos, *los lodos de depuradora* se definen como una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales. Son un residuo del sector terciario cuya producción va en aumento por el aumento en las últimas décadas de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Tienen una normativa específica, la Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. Su aplicación del principio de jerarquía de residuos a la gestión de los lodos de EDAR implica priorizar la aplicación al suelo, en segundo lugar emplear otras formas de valorización incluyendo la energética y, como última opción, la eliminación en vertedero.

El compostaje de residuos orgánicos como alternativa de valorización interesa, no solo porque reduce el volumen de estos residuos, sino también porque el compost obtenido puede utilizarse con fines agrícolas, recuperándose y aprovechándose así la materia orgánica y los nutrientes contenidos en dichos residuos.

## 1.2 Biomasa residual de Palmáceas

### 1.2.1 Origen

Se le denomina biorresiduos a los residuos orgánicos de origen vegetal y/o animal y restos vegetales procedentes de poda de vegetaciones públicas o privadas, susceptibles de degradarse biológicamente. En la Figura 1.2 se muestra la clasificación de los biorresiduos según MAGRAMA, 2016.



**Figura 1.2:** Clasificación de los biorresiduos (MAGRAMA, 2015).

Desde una perspectiva de la gestión de los residuos orgánicos domésticos están constituidos por las siguientes fracciones:

- **Fracción Orgánica (FO).** Cuando se recoge de forma separada se utiliza el término FORS (fracción orgánica de recogida separada). Está constituida por:
  - Restos de la preparación de la comida o manipulación y elaboración de los productos alimentarios, restos sobrantes de comida, alimentos en mal estado y excedentes alimentarios que no se han comercializado o consumido (separados de su envase o embalaje),
  - Fracción Vegetal en forma de restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso procedentes de jardinería y poda (ramos de flores mustios, malas hierbas, césped, pequeñas ramas de poda, hojarasca,

etc.). Esta fracción vegetal, considerada como similar a la FORS, puede gestionarse también “in situ” o de forma independiente a los restos de comida, según la configuración de los servicios de recogida y los niveles de generación.

- Poda: constituida por la Fracción Vegetal en forma de restos vegetales de jardinería y poda de mayor tamaño y de tipo leñoso. Por sus características requiere una gestión específica por cuestiones relacionadas con logística de recogida, el tratamiento y la temporalidad de generación (frecuencia y periodo).

### **1.2.2 Producción y destino**

La generación de restos de poda y de jardinería se debe, mayoritariamente, a las actividades de mantenimiento de las zonas verdes de espacio público. Su incorrecta gestión supone la pérdida de materia orgánica potencialmente valorizable en otros usos, por lo que resulta necesaria la introducción procesos que sean capaces de recuperar aquellos materiales, reintroduciéndolos en el ciclo productivo. La Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de la Generalitat, de Residuos de la Comunitat Valenciana, de conformidad con la normativa básica estatal, concretó las competencias que ostenta la Generalitat, tanto sobre la producción y gestión de los residuos, como en lo relativo a la planificación. Con el objetivo de reducir la emisión de gases de efecto invernadero originados por la eliminación de residuos en vertederos, se establece la implantación de la recogida separada de los biorresiduos con el objeto de fomentar su separación en origen y su tratamiento en las plantas de valorización para la obtención de un compost de calidad.

### **1.2.3 Características de los residuos de palmáceas**

La poda de estas especies representa una gran cantidad de biomasa por hectárea y año ya que son un cultivo con una elevada importancia a nivel ambiental, paisajístico, económico y cultural, con una creciente presencia en la UE y especialmente en España. Además existen parajes, como palmerales, y entornos protegidos de palmeras debido a su singularidad y riqueza en muchas áreas de Europa y especialmente en España.

Según diversas estimaciones, en Europa existen entre 20 y 100 millones de palmeras de la especie *Phoenix* y entre 10-20 millones de la especie *Washingtonia robusta*, de las que el 40% se ubican en España. Considerando una producción promedio de biomasa por poda de 5 kg anuales, obtenemos una producción de biomasa residual (mayoritariamente depositada en vertederos) cercana a 200.000 toneladas, sin considerar la biomasa residual adicional asociada a los especímenes afectados por la plaga del picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*).

En muchos casos, se recurre a la quema controlada o incontrolada de los residuos como técnica de gestión de residuos más barata. Esta situación produce emisiones de GEI, directas e indirectas y varios impactos en el medio ambiente y la salud humana.

### **1.3 Lodos de depuradora**

#### **1.3.1 Origen**

Los lodos se definen como una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales. El RD 1310/1990 define los *lodos de depuración* (LD) como los lodos residuales salidos de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas, urbanas o de aguas residuales de composición similar a las anteriores citadas, así como los procedentes de fosas sépticas y de otras instalaciones de depuración similares utilizadas el tratamiento de aguas residuales. Constituyen un material semisólido, heterogéneo, cuya composición es muy variable y está determinada por las características del agua residual a tratar, por los procesos de depuración y por el tratamiento al que se somete.

### 1.3.2 Características

Los lodos se caracterizan por ser un residuo extremadamente líquido (más de un 95% de agua). Su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual inicial y de las características técnicas de los tratamientos llevados a cabo en las aguas residuales. Los tratamientos del agua concentran la contaminación presente en el agua, y por tanto, los lodos contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Algunas de ellas con valor agronómico (materia orgánica, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor cantidad calcio (Ca), magnesio (Mg) y otros micronutrientes esenciales para las plantas) y otras con potencial contaminante como los metales pesados: cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), patógenos y contaminantes orgánicos, por lo que es necesario una caracterización exhaustiva antes de su reciclaje o valorización.

El aprovechamiento de la materia orgánica contenida en los lodos a través de su reciclaje en los suelos permite, por una parte, mejorar su productividad, fertilidad y por tanto la calidad de los suelos y por otra, eliminar de forma racional los residuos (conversión de Residuos en Recurso). La caracterización de la composición de los lodos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales supone determinar parámetros agronómicos, patógenos, contaminantes orgánicos y metales pesados, tal y como se indica en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2:** Parámetros agronómicos, patógenos y contaminantes orgánicos para caracterizar de la composición de los lodos.

Parámetros Agronómicos	Parámetros Microbiológicos	Contaminantes orgánicos*	Metales pesados
pH	<i>Escherichia coli</i>	AOX	Cadmio
Conductividad	<i>Salmonella spp</i>	LAS	Cromo
Carbono total	Coliformes totales	DEHP	Níquel
Materia orgánica oxidable	Coliformes fecales	NPE	Mercurio
Nitrógeno total		PAH	Plomo
Relación C/N		PCB	Zinc
P total		PCDD/F	Cobre
P asimilable		PBDE	
Ca total			
Ca asimilable			
Mg total			
Mg asimilable			
K total			
K asimilable			
Fe total			
Fe asimilable			
Na asimilable			

\*AOX: compuestos orgánicos halogenados; LAS: sulfonatos de alquilbenceno lineales; DEHP: di(2-ethylhexil)-ftalato; NPEs: nonilfenol y nonilfenoletoxilados; PAHs: hidrocarburos aromáticos policíclicos; PCBs: bifenilos policlorados; PCDD/Fs: dioxinas y furanos; PBDEs: difenil éteres bromados.

Para aplicar una adecuada gestión medioambiental de los lodos de depuradora, es necesario conocer algunas de sus características físicas y químicas, como:

- **Materia orgánica:** poseen niveles relativamente altos, presentando la mayoría de los lodos contenidos superiores al 50 % sobre materia seca. Este hecho, permite valorizar los lodos de depuradora como abono orgánico, aunque debe tenerse en cuenta la diferencia de estabilidad de esta materia orgánica, según el origen de los lodos.
- **pH:** representa la acidez o basicidad del lodo en una suspensión lodo-agua. La naturaleza de los lodos varía entre ligeramente ácido y ligeramente básico.
- **Salinidad:** el contenido es muy variable de unos lodos a otros, pudiendo encontrar niveles de conductividad eléctrica entre 1 - 9 dS/m, dependiendo de la cantidad de sales que presente el agua residual y del tratamiento a que se ha sometido el lodo. El riesgo potencial de salinización de suelos derivado de la aplicación agrícola de lodos residuales adquiere mayor importancia cuando estos residuos han sido tratados con productos floculantes como tricloruro de hierro, cloruro de calcio, etc., ya que en tales casos pueden presentarse problemas de toxicidad en cultivos sensibles a cloruro.
- **Nutrientes:** los contenidos en nitrógeno y fósforo, les confiere un importante valor fertilizante. Además, constituyen una fuente importante de otros elementos esenciales para las plantas como calcio, magnesio, potasio y micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, zinc y boro).
- **Metales pesados:** el contenido en metales pesados de los lodos constituye la principal limitación de sus aplicaciones agrícolas por los riesgos de toxicidad para plantas, animales y seres humanos.

La Tabla 1.3, muestra los valores medios de parámetros físicos y químicos de lodos de diferentes depuradoras (82) del sureste español. Además, incluye los valores de desviación estándar y el rango de variación correspondientes a un total de 337 muestras analizadas durante el periodo 2001-2006.

**Tabla 1.3:** Composición media de los lodos de depuradora del sureste español.

Parámetro	Unidad	Valor medio *	Desviación estándar	Rango de variación
pH extracto 1:10	--	6,54	0,45	3,92 - 7,73
CE extracto 1:10	dS m <sup>-1</sup>	2,37	1,75	0,50 - 12,1
Matéria orgánica total	%	53,0	10,59	14,0 - 74,80
Nitrógeno (N)	%	4,74	1,42	1,16 - 8,40
Carbono orgánico total	%	33,0	6,12	12,0 - 46,27
Relación C/N	-	5,80	2,33	1,90 - 20,40
Fósforo (P)	%	0,94	0,32	0,24 - 2,35
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	2,10	0,74	0,19 - 5,38
Potasio (K)	%	0,33	0,18	0,08 - 1,27
Potasio (K <sub>2</sub> O)	%	0,39	0,21	0,09 - 1,52
Calcio (Ca)	%	7,60	3,71	1,01 - 25,40
Calcio (CaO)	%	10,6	5,18	1,41 - 35,50
Magnesio (Mg)	%	0,79	0,65	0,01 - 5,17
Magnesio (MgO)	%	1,30	1,08	0,02 - 8,58
Sodio (Na)	%	0,26	0,39	0,02 - 4,66
Hierro (Fe)	mg kg <sup>-1</sup>	12914	24068	14 - 150549
Cobre (Cu)	mg kg <sup>-1</sup>	427	467	26 - 4912
Manganeso (Mn)	mg kg <sup>-1</sup>	129	90,7	29 - 836
Cinc (Zn)	mg kg <sup>-1</sup>	941	1429	152 - 24634
Cadmio (Cd)	mg kg <sup>-1</sup>	8,12	16,1	1,0 - 189
Níquel (Ni)	mg kg <sup>-1</sup>	50,5	121	2,0 - 1500
Plomo (Pb)	mg kg <sup>-1</sup>	137	109	4,0 - 1119
Cromo (Cr)	mg kg <sup>-1</sup>	544	3139	2,0 - 32662
Mercurio (Hg)	mg kg <sup>-1</sup>	0,92	0,95	0,1 - 7,0

\* valores sobre materia seca. Fuente: Perez, M.D. y Moreno, J. 2008. Capítulo 21. Residuos urbanos. Casos prácticos. Ed: Compostaje. Moreno, J. y Moral, R. Ed. Mundi-Prensa.

### 1.3.3 Métodos de aprovechamiento y tratamiento

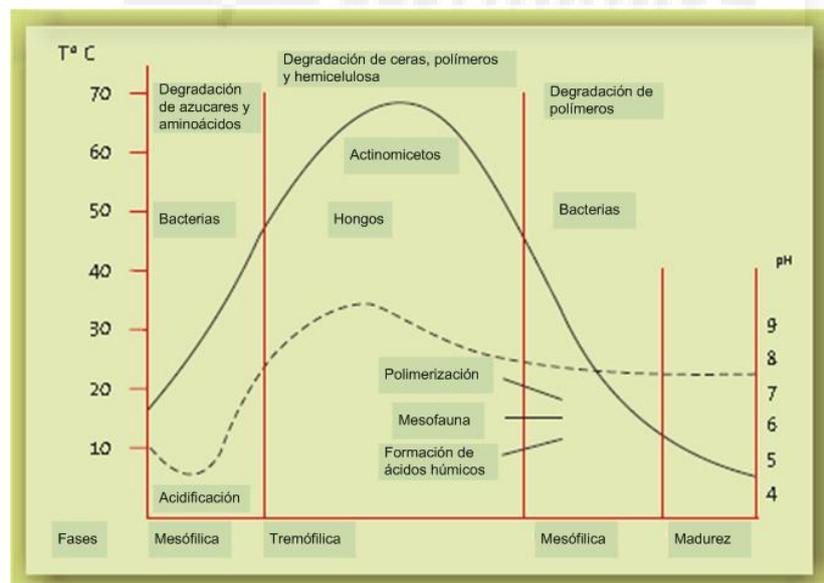
Por su composición en materia orgánica y nitrógeno, los lodos se presentan como un valioso recurso agrícola. Otras vías de gestión de lodos incluyen la incineración en instalaciones específicas para ello o co-incineración en cementeras, así como su deposición en vertederos.

Dado que los lodos son materiales homogéneos y limpios, libres de impropios, pueden tratarse mediante compostaje con pre y post-tratamientos mínimos. El pretratamiento consiste fundamentalmente en la mezcla del lodo con materiales estructurales o enmiendas para corregir su composición, y el post-tratamiento suele reducirse a un tamizado para separar el estructurante del compost obtenido.

## 1.4 Fundamentos del compostaje

### 1.4.1 Definición y fases del proceso de compostaje

El compostaje, es una técnica mediante la cual se crean las condiciones necesarias para las que a partir de residuos orgánicos los organismos descomponedores fabriquen un abono de elevada calidad. Podemos diferenciar cuatro etapas o fases en el proceso:



**Figura 1.3:** Evolución de la temperatura y pH durante el proceso de maduración.

(Laos, 2003; Mustin, 1987)

- a) Fase Mesofílica: en esta etapa abundan las bacterias hemofílicas y hongos mesofílicos. El número de actinomicetos permanece es relativamente bajo. Debido a la actividad metabólica de todos estos microorganismos la temperatura aumenta hasta unos 40°C, el pH disminuye desde un valor neutro hasta 5.5-6 debido a la descomposición de lípidos y glúcidos en ácidos pirúvicos y de proteínas en aminoácidos, lo que favorece la aparición de hongos mesofílicos más tolerantes a las variaciones del pH y humedad. En esta etapa la relación C/N es de especial importancia ya que el carbono aportara la energía a los microorganismos y el nitrógeno es esencial para la síntesis de nuevas moléculas, por ello la relación debe estar entorno 30, si superamos esta proporción la actividad biológica disminuye, mientras que proporciones superiores de N provocan el agotamiento rápido del oxígeno, y la pérdida del exceso en forma de amoníaco, tóxico para la población bacteriana o por lixiviados. La humedad y ventilación del compostador son esenciales para maximizar la actividad microbiana y por consiguiente el proceso en general. La primera se debe mantener siempre entorno 40 – 60 %, ya que el agua distribuye los nutrientes por la masa (C, N, P, K, B, Ca, Mg, Na, etc.). La ventilación debe ser adecuada sobre todo en las tres primeras etapas y con residuos densos y ricos en N, pero nunca excesiva. Si la selección inicial del residuo no fue adecuada o su área superficial es muy reducida debido a que el tamaño de las partículas es excesivamente grande o pequeño, la ventilación formará caminos preferenciales quedando otras zonas en ausencia de oxígeno.
- b) Fase Termofílica: la temperatura continua ascendiendo hasta llegar a valores de 75°C, las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos mueren o permanecen en estado de dormancia mientras que las bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos termofílicos encuentran su óptimo, generando incluso más calor que los mesófilos. La degradación de los ácidos obtenidos en la etapa anterior provoca el incremento del pH pasando desde 5.5 hasta 7.5 donde permanecerá casi constante hasta el final del proceso, el color del compost se pone más oscuro paulatinamente y el olor original se comienza a sustituir por olor a tierra. Es en esta etapa cuando comienza la esterilización del residuo debido a

las altas temperaturas, la mayoría de las semillas y patógenos como E.Coli mueren al estar sometidos durante días a temperaturas superiores a 55°C.

- c) Fase mesofílica o de Enfriamiento: una vez que los nutrientes y energía comienzan a escasear, la actividad de los microorganismos termofílicos disminuye, consecuentemente la temperatura en la pila desciende desde los 75°C hasta la temperatura ambiente, provocando la muerte de los anteriores y la reaparición de microorganismos mesofílicos al pasar por los 40-45°C, estos dominarán el proceso hasta que toda la energía sea utilizada.
- d) Fase de maduración: la temperatura y pH se estabilizan, si el pH es ácido nos indica que el compost no está aún maduro, los actinomicetos adquieren especial importancia en la formación ácidos húmicos y son frecuentemente productores de antibióticos que inhiben el crecimiento de bacterias y patógenos, mientras que los macroorganismos tales como nemátodos, rotíferos, escarabajos, lombrices etc., incrementan su actividad desempeñando la función de remover, excavar, moler, masticar y en general romper físicamente los materiales incrementando el área superficial de estos para permitir el acceso de los microorganismos. El color del producto final debe ser negro o marrón oscuro y su olor a tierra de bosque, además ya no debemos reconocer los residuos iniciales.

Algunos compostadores poseen sistema de volteo. Este ayuda a mantener la concentración de oxígeno, porosidad, temperatura y humedad uniforme en toda la pila de residuos ya que, los materiales próximos a la superficie tienden a recibir mayor aporte de oxígeno pero alcanzan menos temperatura, mientras que los materiales del interior poseen menor porosidad debido a la presión de los materiales que les rodean y alcanzan mayor temperatura y humedad. En este caso, el volteo se realizó a mano.

### 1.4.2 Condiciones para el proceso de compostaje

Las variables más importantes que afectan al proceso de compostaje se pueden clasificar en dos tipos:

- Parámetros de seguimiento: aquellos que se han de medir durante todo el proceso, para que sus intervalos se encuentren en los parámetros considerados correctos en cada fase del proceso.

- Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato: aquellos que se han de medir y adecuar a su valor correcto al inicio del proceso.

#### 1. Parámetros de seguimiento:

- *Temperatura*: es el síntoma más claro de la actividad microbiana, y por lo tanto del inicio del proceso de compostaje, ya que una vez colocado el material que se va a compostar, si las condiciones son adecuadas, crecen los microorganismos y se genera calor aumentando la temperatura. La evolución de la temperatura representa muy bien el proceso de compostaje, pues se ha comprobado que pequeñas variaciones de temperatura afectan más a la actividad microbiana que pequeños cambios de la humedad, pH o C/N.
- *Humedad*: la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos. La humedad de la masa de compostaje debe ser tal que permita la circulación tanto del oxígeno, como de otros gases producidos en la reacción. La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%, por debajo del 30% la actividad biológica decrece y por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libre existentes entre las partículas produciéndose anaerobiosis.
- *pH*: inicialmente la acidez es la propia de los productos a compostar. Durante la fase inicial se produce una disminución debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciendo la liberación de ácidos orgánicos. En la segunda fase se produce una progresiva alcalinización del producto debido a la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas. Por último en la tercera el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos.

- *Aireación*: es imprescindible para el buen desarrollo del compostaje asegurar la presencia de oxígeno, ya que una aireación excesiva provoca el enfriamiento de la masa y por lo tanto la disminución de la actividad microbiana. El nivel de oxígeno es óptimo entre los valores del 18-20 %.

## 2. Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato:

- *Tamaño de partícula*: cuanto más triturado esté el material, es decir mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción. Las dimensiones consideradas óptimas, generalmente, son entre 1 y 5 cm.
- *Relación C/N*: el intervalo teórico óptimo de C/N para el compostaje de un producto es de 25-30. Valores por encima de 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso. Si por el contrario los valores son menores a 25, se produce pérdida de nitrógeno en forma amoniacal.
- *Nutrientes*: La utilidad de un compuesto para ser compostado reside en la disponibilidad de los elementos nutritivos de contenga. Entre los elementos que componen el sustrato destacan el C, N y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. Además existen otros nutrientes presentes en menor cantidad, micronutrientes, que tiene un papel fundamental en la síntesis de enzimas, metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte.
- *Materia orgánica*: es el principal factor para determinar la calidad agronómica del compost.
- *Conductividad eléctrica*: está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración en sales. La dosis de compost que puede añadirse a un suelo debe ser proporcional a la CE del compost debido a que un exceso en la salinidad del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas.

### 1.4.3 Sistemas de compostaje

La clasificación más común se realiza en función del aislamiento del material a compostar con respecto al exterior, en cuyo caso se tendrán: sistemas abiertos, semi-cerrados y cerrados.

- *Sistemas abiertos*: la forma de amontonamiento del material en este tipo de plantas es muy variado (pilas, mesetas, zanjas, etc.), así como los sistemas de manipulación de éste. Se utilizan principalmente sistemas dinámicos, ya sea por medio de volteadoras o con maquinaria inespecífica (palas mecánicas), también se utilizan métodos estáticos con sistemas de aireación pasiva o forzada, aunque son menos frecuentes.
- *Sistemas semi-cerrados*: en este tipo de sistemas todas las operaciones se realizan dentro de una nave cubierta y cerrada. El sistema más conocido es el de las “trincheras” en las que el material se coloca entre muretes longitudinales y es volteado por distintos procedimientos.
- *Sistemas cerrados*: el material a compostar no está nunca en contacto directo con el exterior, sino a través de un sistema de conductos y turbinas, lo que facilita el tratamiento de los olores generados en la fermentación.

En este tipo de sistemas las distintas variables (humedad, composición, temperatura, pH, etc.) pueden ser registrados, controladas, y optimizadas. Esto conlleva una degradación más rápida y completa con un mínimo de impacto ambiental en las instalaciones.

#### 1.4.4 Evaluación del grado de madurez de un compost

Desde el punto de vista práctico se entiende como un compost maduro un material térmicamente estabilizado. La aplicación agrícola de un compost sin un adecuado grado de madurez, puede ocasionar efectos negativos muy graves, como:

- ✓ Originar una disminución del contenido de oxígeno a nivel de las raíces.
- ✓ Si la relación C/N es alta, se produce un bloqueo de nitrógeno en el suelo.
- ✓ Excesivo aumento de la temperatura del suelo.
- ✓ Acumulación de sustancias fitotóxicas.
- ✓ No se produce la eliminación de microorganismos patógenos.

Los métodos propuestos para la evaluación del grado de madurez pueden agruparse en cinco tipos según la naturaleza del parámetro que se evalúan:

1. Parámetros sensoriales de la madurez: solo dan una idea aproximada del grado de madurez del compost, pero puede ser suficiente para una aplicación práctica en plantas de compostaje.
  - A. Temperatura: es un reflejo de la actividad metabólica de los microorganismos, por lo que es un buen indicador del final de la fase bio-oxidativa ya que la curva de temperatura se estabiliza definitivamente síntoma de que el compost ha adquirido cierta madurez.
  - B. Color: durante el proceso tiene lugar, de manera gradual, el oscurecimiento del material a medida que va madurando llegando a presentar un color pardo oscuro, debido a la formación de grupos cromóforos y a la síntesis de melanoidinas.
  - C. Olor: los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco, aminas y en general ácidos orgánicos, que producen malos olores. El olor desagradable producido por estos compuestos desaparece con la maduración del producto.
2. Evolución de parámetros de la biomasa microbiana: determinan el grado de estabilidad biológica del material. Pueden distinguirse cuatro tipos de métodos
  - A. Respirometría: emplean el estudio de la respiración del compost (absorción de oxígeno o desprendimiento de anhídrido carbónico). Es la técnica más fiable para ser considerada como indicador de madurez para todo tipo de

- residuos. Se considera maduro un compost cuando no consume más de 40 mg de oxígeno por Kg de materia seca en una hora, tras haberlo incubarlo durante 3 días (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1989).
- B. Parámetros bioquímicos de la actividad microbiana: están basados en la identificación de la microflora específica y en el estudio de enzimas indicadores de la actividad celular en cada fase del compostaje.
- C. Análisis de constituyentes fácilmente biodegradables: Morel y col. (1985) indican que el parámetro que caracteriza en mayor medida el estado de maduración del compost es la relación entre el carbono orgánico total y el porcentaje de carbohidratos solubles en agua caliente.
3. Estudio de la materia orgánica humificada: estudios deducen que la naturaleza de los compuestos húmicos extraídos del compost se corresponde, en parte, con el mismo tipo de compuestos sintetizados en las fases iniciales de humificación.
- A. Carbono extraíble: numerosos autores han propuesto la riqueza total en C húmico como índice de madurez dado que en residuos agrícolas y estiércoles normalmente se observa un incremento en la riqueza de C húmico. Pero en el caso de compostaje de RSU y lodos el C húmico total permanece constante durante todo el proceso. Iglesias Jiménez y Pérez García (1992b, 1992c). Por lo tanto el porcentaje de C húmico total no puede considerarse como un índice adecuado de humificación de materia orgánica.
- B. Ratio AH/AF: durante el compostaje de residuos no existe una auténtica síntesis de nuevas sustancias húmicas sino que lo que ocurre es un incremento paulatino de la tasa de polimeración (incremento de la fracción de AH) por transformación reestructuración y condensación de sustancias que se pueden adscribir a AF (tipo fulvoácidos). Por lo que podemos decir que la fracción de AH se forma paulatinamente a partir de la fracción de AF. (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1992b y 1992c). Por lo tanto el ratio AH/AF puede considerarse como índice de humificación y constituye un parámetro importante para deducir el grado de madurez del compost.

#### 4. Indicadores químicos de la madurez

- A. Ratio C/N fase sólida: es el criterio utilizado tradicionalmente para establecer el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica, siendo necesario un valor cercano a 30 en el material inicial y menor de 20 como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poincelot 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) o menor de 15 (Juste, 1980).
- B. Ratio C/N fase acuosa: mediante el estudio de los cambios bioquímicos a lo largo del compostaje en extractos en agua es posible deducir el estado de maduración del compost. Disminuye paulatinamente desde valores entre 30-40 hasta 5-6, y diversos autores proponen este parámetro como indicador absoluto de madurez.
- C. Carbono orgánico soluble en agua (Cw): numerosos autores han propuesto, como alternativa a la reacción C/N tanto en fase sólida como acuosa, la determinación del Cw como simple índice de madurez, ya que siempre se observa un descenso paulatino durante el compostaje, hasta una práctica esterilización. Sin embargo los valores límites propuestos varían considerablemente, dependiendo del material inicial
- D. Capacidad de intercambio catiónico: aumenta progresivamente a medida que progresa la humificación de la materia orgánica, ya que el incremento del grado de polimerización provoca un aumento considerable de la superficie específica de las macromoléculas húmicas y un aumento progresivo de grupos carboxilos aunque en menor medida. Posteriormente este incremento de la CIC ha sido descrito por numerosos autores en todo tipo de residuos y por lo tanto ha sido aceptado universalmente como criterio de madurez e indirectamente como criterio de humificación de materiales orgánicos (Roig y col., 1988).
- E. Ratio  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$ : Finstein y Miller (1985) definen el concepto de madurez en términos de nitrificación y escriben que cuando en el proceso de compostaje aparecen cantidades apreciables de nitratos y/o nitritos se puede considerar que el compost está suficientemente maduro, ya que durante la fase termófila la nitrificación está prácticamente inhibida.

- F. Presencia de compuestos reductores: la presencia de compuestos tipo amoníaco o sulfhídrico, característicos de un potencial redox inadecuado, es indicativa, al igual que el pH ácido, de procesos anaerobios y muestran que los residuos se encuentran aún en período de intensa descomposición. Por lo que la presencia de estos compuestos indica inmadurez del compost.
5. Métodos biológicos: son los ensayos más fiables, ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectados por los métodos anteriores.
- A. Método de germinación: propuesto por Sphon (1978), Zucconi y col., (1981), aunque el más generalizado es éste último que utiliza semillas de *Lepidium sativum* y que calcula un índice de germinación que combina el porcentaje de germinación y la longitud media de las raíces.
- B. Método de crecimiento: supone la evaluación del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el maíz y la cebada.

En función de estos métodos, se puede tener la idea del grado de dificultad que supone la determinación del índice de madurez universal y extrapolable a todos los materiales compostables. La elección de uno u otro será en función del tipo de residuo a evaluar y de las condiciones económicas en las que se vaya a realizar el estudio. Sin embargo, cualquier metodología utilizada ha de seguir unas pautas que garanticen su adecuación para la evaluación del grado de madurez de un compost, como son:

- a. Estar basados en la evaluación de parámetros determinables por técnicas analíticas objetivas, sencillas, rápidas y reproducibles.
- b. No ha de verse afectada su reproducibilidad por manipulaciones y preparaciones previas.

En general la calidad del producto dependerá principalmente de los materiales de origen y de las condiciones de temperatura, humedad y aireación que existan durante el proceso.

## 1.5 Utilización del compost

A la hora de valorizar un compost en agricultura, primeramente se debe establecer de forma clara cuál es el uso que se le pretende dar. Los destinos más usuales son:

- Como enmienda orgánica: en agricultura y jardinería.
- Como sustrato de cultivo: en mezcla con otros materiales.

Cuando se va a utilizar un compost, es necesario conocer su composición química, necesaria para evaluar la idoneidad de ese compost elegido para un determinado uso y establecer las estrategias de gestión oportunas. Es necesario garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal o en la mejora de las características del suelo cumplan con dos requisitos fundamentales:

- Eficacia agronómica.
- Ausencia de efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

La valorización agrícola de los diferentes compost puede realizarse mediante diferentes vías entre los que cabe diferenciar su uso como enmienda orgánica y sustrato de cultivo. Para cada uno de estos usos (Martínez, 1995) hay que saber de forma específica los factores más determinantes de su eficacia, tanto los derivados de las características del compost como los asociados a la zona en la que se vaya a utilizar así como los requerimientos de los cultivos o vegetación. También se deberá tener en cuenta el marco legislativo y normativa aplicable en cada caso.

### 1.5.1 Uso como enmienda orgánica

Este uso pretende incrementar el contenido en sustancias húmicas del suelo como enmienda de corrección en suelos pobres o de mantenimiento en rotaciones o producciones agrícolas con balance húmico negativo (Urbano, 2002), así como la mejora general de la fertilidad física, química y biológica con secuencia del aumento del nivel de sustancias húmicas. El uso de un compost bien elaborado como enmienda orgánica disminuye el uso de fertilizantes inorgánicos y hace que parte del carbono que contiene la materia orgánica del compost se fije al suelo, por lo que es de sumo interés conocer tanto el contenido en materia orgánica total del compost, como su contenido en materia orgánica resistente (MOR) que rendirá sustancias húmicas al

suelo y utilizar compost que tengan un contenido de nitrógeno orgánico y mineral bajo, y así evitar la contaminación por nitratos. Además, se ha observado un descenso progresivo de los niveles de materia orgánica lo que provoca paulatinamente una disminución de la fertilidad y un aumento de la erosionabilidad (Favoiono y Hogg, 2008).

Los programas de enmienda orgánica y/o de corrección en los sistemas agrícolas se ejecutan generalmente a largo plazo, y consisten en realizar un conjunto de aplicaciones que permitirán un adecuado ajuste de las dinámicas biológicas y de fertilidad del suelo.

### **1.5.2 Uso como sustrato de cultivo**

El uso del compost en el cultivo sin suelo obliga a un alto nivel de exigencias en cuanto a la calidad de estos productos, ya que unas características físicas, químicas o biológicas inapropiadas podrían hacerlo inútil como sustrato. Este sistema es una forma de valorización de este producto mucho más reciente que las tradicionales como enmienda orgánica o fertilizante orgánico.

Para los cultivos sin suelo cuyo objetivo comercial es la puesta en el mercado de plantas en contenedor, se requiere de sustratos físico y químicamente activos (Lemaire y col., 2003), que retengan agua y que posean capacidad de intercambio catiónico.

Este sistema es utilizado para la multiplicación por semillas y esquejes de plantas hortícolas, frutícolas o especies forestales, y para la producción de plantas en contenedor para su uso principal en jardinería y paisajismo.

Las principales debilidades que presentan muchos composts en relación con su uso como componente de sustrato de cultivo se podrían corregir mejorando el proceso de compostaje. Las actuaciones se pueden dirigir tanto a:

1. Materias primas:
  - 1.1. Co-compostando materiales básicos con otros ácidos (disminuye el pH) y disminuye la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco.
  - 1.2. Utilizando materias primas poco salinas

- 1.3. Utilizando materias primas con bajo contenido en sustancias fitotóxicas.
2. Proceso de compostaje:
  - 2.1. Reduciendo el tamaño de las partículas de los materiales de partida o del producto final mediante afinado o criba.

No obstante, el objetivo principal se basa en realizar un buen compostaje, tanto en la fase de descomposición como en maduración, produciendo un compost estable y maduro (Bernal y col., 1998 y 2009).

### **1.5.3 Legislación medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo**

El compost, independientemente de la fuente inicial de residuos y materia orgánica a compostar, presenta infinidad de usos desde el punto de vista agrario. Se utiliza como fuente de enmienda orgánica de los suelos cultivados y suelos disgregados, así como para el mantenimiento del nivel húmico, recuperación de suelos improductivos, y como sustrato hortícola para el cultivo de plantas.

El uso de materiales orgánicos como los compost en la elaboración de los sustratos de cultivo permite además del anclaje y crecimiento de la planta, intervenir en su alimentación. Por ello, es importante definir las características físicas, químicas y biológicas de los sustratos de cultivo y establecer normativas que garanticen su uso sin riesgos para la salud humana.

El **Real Decreto 506/2013** de junio, sobre productos fertilizantes, los clasifica dentro del “*Grupo 6. Enmiendas Orgánicas*” el **compost** producido a partir de residuos biodegradables, como “producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente”.

En la **Tabla 1.4**, se exponen los requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013.

**Tabla 1.4:** Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013.

Parámetro	Real Decreto 506/2013		
<b>Mat. Orgánica total (%)</b>	35		
<b>Humedad máxima (%)</b>	40		
<b>C/N</b>	< 20		
<b>N inorgánico máximo (% N total)</b>	15		
<b>Metales pesados</b>	Clase A	Clase B	Clase C
<i>(mg/kg m.s.):</i>			
Cadmio	0,7	2	3
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	nd	nd	nd
Cobre	70	300	400
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
<b>Contaminantes orgánicos</b>			
Polifenoles (% p/p)	0,8		
Furfural(% p/p)	0,05		
<b>Microorganismos</b>			
<b>Salmonella spp</b>	Ausentes en 25 g de compost		
<i>E. coli</i>	<1000 MPN/g		
<b>Semillas de malas hierbas</b>	-		
<b>Partículas (%)</b>	90 (25mm)		
<b>Impurezas (%)</b>	No puede contener		
<b>Gravas y piedras (%)</b>	No puede contener		

nd: no detectable según método oficial; MPN: número más probable; **Clase A:** Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A. **Clase B:** Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B. **Clase C:** Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna C.

Los compost se clasificaran atendiendo a su contenido en metales como A, B ó C, añadiéndose: “contenido en metales pesados inferior a los límites autorizados para esta clasificación”. Además, deberá declararse el contenido en cobre (Cu) y zinc (Zn) cuando sobrepasen los límites máximos correspondientes a la clase A (70 y 200 mg/kg de materia seca, respectivamente).

Respecto a la valorización del compost como sustrato de cultivo, en el **Real Decreto 865/2010** de 2 de julio, modificado por el Real Decreto 1039/2012, de 6 de julio, sobre sustratos de cultivo, se definen y tipifican todos aquellos productos denominados como sustratos, con el fin de garantizar que los que se llegan al mercado sean agrónomicamente eficaces y que eviten posibles efectos nocivos en el agua, el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

Los compost de residuos orgánicos, entre ellos los elaborados con residuos urbanos, quedarían dentro del “*grupo 1: productos orgánicos como sustratos de cultivo o componentes de los mismos*”. Las especificaciones y las declaraciones obligatorias y opcionales establecidas en el anexo I del RD 865/2010 para este tipo de compost, se muestran en la **Tabla 1.5**.

**Tabla 1.5:** Características de los compost como sustratos de cultivo o componente de los sustratos de cultivo, según el RD 865/2010.

Denominación tipo de producto	Descripción	Especificaciones	Declaraciones obligatorias	Declaraciones opcionales
Compost	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), de materiales orgánicos biodegradables del Anexo V, bajo condiciones controladas	- Materia orgánica sobre materia seca > 20% (m/m)	-Principales componentes (mas del 10% (v/v) ordenados en orden decreciente de porcentaje.  - Materia orgánica sobre materia seca. - Conductividad eléctrica, CE. - pH - Cantidad en volumen	- Densidad aparente seca. - Volumen de aire - Volumen de agua 1, 5 y 10 KPa - Materia seca - Espacio poroso total - Granulometría

En el Anexo VI del RD 865/2010 se establecen asimismo los límites máximos de microorganismos y metales pesados en los sustratos de cultivo, **Tablas 1.6 y 1.7** respectivamente.

**Tabla 1.6:** Niveles máximos de microorganismos en sustratos de cultivo de origen orgánico, anexo VI RD 865/2010.

Microorganismo	Nivel máximo
Salmonella	Ausente en 25 g de producto elaborado
<i>Listeria monocytogenes</i>	Ausente en 1 g de materia bruta (únicamente para cultivos cuya producción se consuma en crudo).
<i>Escherichia coli</i>	< 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.
Enterococcaceae	Entre $10^4$ y $10^5$ número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.
<i>Clostridium perfringens</i>	Entre $10^2$ y $10^3$ número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.

**Tabla 1.7:** Niveles máximos de metales pesados en sustratos de cultivo, anexo VI RD 865/2010.

Parámetro	Clase A	Clase B
Cadmio (mg/kg)	0,7	2
Cobre (mg/kg)	70	300
Níquel (mg/kg)	25	90
Plomo (mg/kg)	45	150
Zinc (mg/kg)	200	500
Mercurio (mg/kg)	0,4	1,5
Cromo (total) (mg/kg)	70	250
Cromo (VI) (mg/kg)	0,5	0,5

En lo concerniente a Europa, la Comisión Europea en 2014 publicó el informe final sobre el “*Fin de la Condición de Residuo*” (FdR) para residuos biodegradables que han sido sometidos a un tratamiento biológico de compostaje o digestión. Los requisitos de calidad propuestos para compost en informe FdR se presentan en la

**Tabla 1.8.**

**Tabla 1.8** Propuesta de los requerimientos de calidad del compost. Posibles parámetros y valores límite de los requisitos de calidad mínima del producto. Informe “Fin de la condición de residuos” (Comisión Europea, 2014).

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Contenido mínimo en materia orgánica</b>	15 % m.s.
<b>Estabilidad mínima</b>	- Índice respirométrico máximo: 25 mmol O <sub>2</sub> /kg M.O. /h según EN 16087-1 - Rottegrade III, IV o IV(test de autocalentamiento, temperatura máxima 30 °C por encima de la ambiental) según EN 16087-2
<b><i>Salmonella spp</i></b>	Ausentes en 25 g
<b><i>E. Coli</i></b>	1000 CFU/g m.f.
<b>Contenido límite de impurezas macroscópicas</b>	< 0,5% en peso sobre m.s. en vidrio; Metal y plástico>2mm
<b>Semillas viables y propágulos de plantas</b>	2 semillas viables/litro de compost
<b>Metales pesados y Contaminantes orgánicos</b>	mg/kg m.s.
Cd	1,5
Cr	100
Cu	200
Hg	1
Ni	50
Pb	120
Zn	600
PAHs <sub>16</sub>	6

m.s.: materia seca; m.f.: materia fresca; CFU: unidades formadoras de colonias.

En el informe FdR, se establece también una serie de requerimientos para el proceso de compostaje basados en el mantenimiento de una serie de temperaturas durante un periodo de tiempo determinado a lo largo del proceso (a continuación se exponen los requerimientos para compost que no contengan subproductos de origen animal):

- ▶  $T \geq 65^{\circ}\text{C}$ , 5 días
- ▶  $T \geq 60^{\circ}\text{C}$ , 7 días
- ▶  $T \geq 55^{\circ}\text{C}$ , 14 días



## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

---



## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVO

El aumento de la generación de residuos orgánicos, en las últimas décadas es evidente y especialmente en algunos sectores, como el sector terciario donde se encuentran residuos de tipo urbano que debido al obligado cumplimiento de diferentes reglamentaciones y directrices vigentes, se están generando en gran cantidad como los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales. Además el mantenimiento de parques y jardines también ocasiona importantes cantidades de restos de poda de distintas especies, muchas de ellas con caracteres estacional que es preciso gestionar adecuadamente para evitar problemas ambientales.

Una de las prioridades de la política de medio ambiente de la UE es precisamente la gestión de los residuos generados en los distintos sectores. Éstos no sólo son una fuente potencial de contaminación cuando no se gestionan correctamente, sino que pueden llegar a ser un valioso recurso especialmente si se valorizan a través del compostaje, para su posterior empleo en el sector agrícola.

Además, los suelos de nuestra zona se caracterizan por ser deficientes en materia orgánica debido a las características climáticas siendo suelos fácilmente degradables. La incorporación de residuos orgánicos al suelo es una de las prácticas que puede contribuir a la mejora agrícola y ambiental del medio edáfico.

El compostaje como alternativa para el reciclado y aprovechamiento de los residuos permite además obtener compost, recuperándose y aprovechándose así la materia orgánica y los nutrientes contenidos en dichos residuos.

El objeto principal de este ensayo es el estudio de la viabilidad del uso de residuos de palmáceas como agente estructurante en el proceso de compostaje mediante pila móvil, con lodos de depuradora procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas. Para ello, se establecen los siguientes objetivos concretos:

- Desarrollo de un sistema de compostaje mediante compostera móvil, empleando distintos porcentajes de la mezcla a compostar.
- Control de los parámetros temperatura y aireación como indicadores de la evolución del proceso de compostaje.
- Estudio de la evolución de características fisicoquímicas y químicas de las distintas mezclas de residuos a lo largo del proceso de compostaje así como del producto final obtenido (compost).



## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

---



### **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

#### **3.1 Diseño experimental**

En este trabajo experimental se plantea como objeto principal el estudio de la valorización por co-compostaje mediante pila móvil con ventilación natural y por volteos periódicos, de lodos de depuración de aguas residuales y del residuo de origen vegetal, tronco de palmera, procedente del arranque de palmeras en el municipio de Elche, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido. Para conseguir el objetivo principal del presente trabajo, se han ensayado 4 pilas en composteras móviles de 350 litros (C1, C2, C3, C4), a base de lodos de depuradora urbanos y de material vegetal (tronco de palmera) que fue homogeneizado y troceado a un 1 cm. Para ello, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en 4 fases:

Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.

Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.

Fase 3: Desarrollo de un sistema de compostaje por pila móvil.

Fase 4: Análisis de las características físico-químicas y químicas de los materiales durante el proceso de compostaje y del producto final obtenido.

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

Conocer las características de los residuos que van a intervenir en el proceso de co-compostaje es básico para establecer con posterioridad una estrategia de compostaje adecuada en función de la tipología de estos materiales. En nuestro ensayo se caracterizaron los siguientes materiales:

- ✓ **Lodo EDAR:** el lodo EDAR utilizado se origina en tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso biológico de fangos activos, de doble etapa, con nitrificación-desnitrificación y tratamiento terciario con desinfección por U.V. El lodo fue estabilizado mediante digestión anaerobia y el biogás producido se emplea en la cogeneración de energía eléctrica para consumo de la instalación.
  
- ✓ **Tronco de Palmera:** se trata de restos vegetales provenientes del arranque de palmeras en el municipio de Elche, este material está siendo abundante durante los últimos años debido a la plaga del picudo rojo. El tronco de palmera al ser un material muy fibroso es perfecto como estructurante, y su elevada C/N la hace ideal para ser compostado con materiales con baja relación C/N como los lodos.

#### Muestreo de los materiales iniciales:

El material utilizado para la elaboración de las mezclas que se incorporan a cada compostera se ha recogido del acopio que se disponía en la planta de compostaje COMPOLAB ubicada en la EPSO.

Cada material se muestreo por separado tomando submuestras a diferentes alturas y profundidades del montón de acopio para obtener una muestra representativa, que se homogeneizó para obtener una muestra final, mediante el método del cuarteo, para su análisis que se realizó por triplicado.

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

El proceso de compostaje necesita que la mezcla a compostar posea una serie de características adecuadas a nivel físico, físico-químico y químico que van a condicionar el proceso. Por eso, a la hora de elaborar la pila de compostaje se necesita obtener como mezcla inicial que posea una adecuada humedad, porosidad y relación C/N.

### **Fase 3: Desarrollo del sistema de compostaje en compostera móvil**

Una vez establecida la mezcla con las condiciones óptimas iniciales en función de nuestros objetivos, se desarrolla el sistema de compostaje en compostera móvil de 350 litros, donde se controlan las condiciones de entorno a nivel de aireación, temperatura y humedad en las que deberá estar comprendida la mezcla a compostar en el sistema. La aireación se controla mediante volteos periódicos vaciando la compostera y procediendo a la mezcla de sus materiales y la temperatura con sondas incorporadas en la propia compostera.

### **Fase 4: Análisis de las características fisicoquímicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso así como del producto final obtenido (compost).**

En las muestras de los materiales iniciales se determinaron los siguientes parámetros analíticos:

- Humedad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- Nitrógeno total
- Carbono hidrosoluble
- Polifenoles solubles
- Contenido de P, K y Na

Se estudia la evolución de la mezcla a lo largo de todo el proceso, desde el inicio hasta la obtención del compost maduro. Esto se hace mediante el estudio de diferentes parámetros indicativos del proceso:

- ✓ Evolución de la temperatura de las pilas
- ✓ Asociados a la evolución de la materia orgánica: materia orgánica, carbono orgánico, pérdida de la materia orgánica y relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total.

- ✓ Asociados a la evolución de contenidos nutrientes como NPK y de Na en el compost, de interés para la nutrición vegetal nivel agronómico.
- ✓ Asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble: pH y conductividad eléctrica.
- ✓ Asociados a la madurez del compost: capacidad de intercambio catiónico e índice de germinación.

### 3.2 Dispositivo experimental.

#### 3.2.1. Características de los residuos utilizados

Las características de los materiales utilizados en el proceso de co-compostaje ensayado se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Características de los materiales utilizados como ingredientes en las composteras.

Parámetro	Lodo EDAR	Tronco Palmera
Humedad (%)	78,3	18,1
pH	6,83	6,74
CE (dS/m)	4,80	6,59
MO (%)	47,5	83,2
Corg (%)	31,1	40,4
Nt (%)	4,23	1,95
C/N	6,45	20,7
Polifenoles (mg/kg)	4861	971
P (g/kg)	6,70	0,20
Na (g/kg)	5,46	15,6
K (g/kg)	5,05	31,4

\*CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; Corg: Carbono orgánico total; Nt: nitrógeno total.

### 3.2.3. Dispositivo de compostaje utilizado

El proceso de compostaje se ha desarrollado en la Escuela Politécnica de Orihuela (EPSO) de la UMH, en unos dispositivos comerciales diseñados para tal fin (composteras domésticas) situados en la planta de compostaje COMPOLAB de la EPSO.

Las composteras están fabricadas en polietileno de alta densidad y resistente a los rayos ultravioletas, tienen doble pared termo-aislante y una capacidad de 350 litros, color verde, con dimensiones 70 x 70 x 85 cm de altura y un peso de 9 Kg, tienen un sistema de ventilación natural para garantizar la degradación de la materia orgánica en condiciones aeróbicas. El suministro de aire se realiza mediante unos orificios situados en diferentes lugares de las composteras.



**Figura 3.1.** Detalle de la realización del ensayo y de las composteras.

### 3.3. Desarrollo experimental

A continuación se comentarán todos los procesos y pasos seguidos para la realización del proceso de compostaje, su seguimiento analítico a lo largo del tiempo de ensayo, así como los procesos previos para la preparación de la mezcla a compostar. Podemos distinguir 3 etapas:

1. Preparación de las mezclas a compostar.
2. Seguimiento del proceso de compostaje.
3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas.

### 3.3.1. Cálculo y preparación

Uno de los requisitos es que las mezclas tengan una relación C/N entre 20 y 35, rango ideal para el buen desarrollo del proceso. Para ello se calcularon las cantidades necesarias a mezclar (Lodo (EDAR) + (Tronco de palmera)) para alcanzar dicho objetivo. En la Tabla 3.2, se expone la proporción de cada componente en la mezcla.

**Tabla 3.2.** Proporciones de materiales en las pilas de compostaje EDAR, en peso seco.

Compost	% Lodo EDAR	% Tronco Palmera	% Cáscara Almendra
C1	59,2	39,8	1
C2	39,5	59,5	1
C3	32,5	66,5	1
C4	20	79	1

Una vez establecidos los porcentajes de mezcla de los residuos sujetos a compostaje, se procedió al muestreo de los residuos, para su posterior caracterización, a su pesado mediante báscula analítica y homogeneización. Se realizaron tandas de mezcla hasta alcanzar el peso deseado de mezcla inicial. El proceso de elaboración se realizó según la siguiente secuencia: se pesaba la parte proporcional de los materiales residuales teniendo en cuenta los porcentajes de cada uno de ellos en la mezcla y se homogeneizaba la mezcla, se revolvió durante unos cinco minutos cada una de las submezclas y se le incorporaba una cantidad de agua equivalente a 30 litros por cada tanda.

### 3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje

1. Una vez llenas las composteras se realizó un seguimiento del proceso, fundamentalmente basado en el control de la temperatura y aireación.
2. Las composteras se muestrearon a los 0 días (inicio de compostaje), a los 16, 36 y 56 días (final de biooxidativa) y a los 86 días (final de maduración).
3. Se realizaron 2 volteos a los 15 y 35 días, con la finalidad de homogeneizar el material y reactivar la temperatura de las pilas.

4. La fase biooxidativa del compostaje se consideró finalizada cuando la temperatura se igualó a la del ambiente y no hubo reactivación tras el volteo (día 56).
5. Los compost se dejaron madurar durante un periodo de 1 mes.
6. Finalmente el compost obtenido se tamizó para obtener un producto homogéneo.

### **3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas**

1. Cada muestra de compostaje se formó a partir de 3 sub-muestras tomadas de sitios diferentes de la pila, considerando todo el perfil (desde la parte superior hasta la parte inferior de la pila).
2. Las muestras se secaron al aire y se molieron a 0,5 mm para su análisis.
3. Las composteras se muestrearon a los 0 días (inicio de compostaje), a los 16, 36, 56 días (final de biooxidativa) y a los 86 días (final de maduración).
4. Las pilas se voltearon dos veces a los 15 y 35 días desde el inicio. Los volteos se realizaron vaciando completamente las composteras, homogeneizando y volviendo el material de nuevo a su interior.
5. En los materiales iniciales se analizó la humedad, el pH y la conductividad eléctrica, la materia orgánica, carbono orgánico total, polifenoles, nitrógeno total, fósforo, sodio y potasio. Todos los análisis se realizaron por triplicado.
6. En las muestras de compostaje se determinó el pH y la conductividad eléctrica en el extracto acuoso 1:10 (w/v), materia orgánica, carbono orgánico total y el nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico, fosforó, sodio, potasio y también se determinó el índice de germinación (IG). Todos los análisis se realizaron por triplicado.

### 3.4. Métodos analíticos.

#### Preparación de la muestra

Las muestras vegetales se secan en estufa de aire forzado a 60 °C y las muestras de lodo a 105 °C. Posteriormente se muelen y tamizan a través de una malla de 0,5 mm de luz. En el caso de las muestras de compost, una vez secas a 105 °C se muelen en un molino y se tamizan a través de una malla de 0,5 mm de luz.

#### ✓ **Humedad original**

Se toma como humedad el porcentaje de agua con respecto a muestra húmeda, por diferencia de pesadas entre material húmedo y seco a 105°C.

#### ✓ **Pérdida de peso por calcinación**

En lodos, se toma como “materia orgánica” la pérdida de peso por calcinación a 540°C, una vez extraídas mediante lavados sucesivos con ácido clorhídrico, sustancias de naturaleza inorgánica presentes en el lodo, tales como sales amónicas, carbonatos, fosfatos, etc. La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca (MAPA, 1994).

En los residuos vegetales y compost, se toma como “materia orgánica” la pérdida de peso por calcinación a 430 °C. Se determina según el método de Navarro y col. (1993). La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca.

#### ✓ **Medida del pH**

El pH se mide sobre la suspensión acuosa obtenida por agitación mecánica durante 2 horas de la proporción 1:10, sólido/líquido. La medida se realiza con un pH-metro.

#### ✓ **Conductividad eléctrica**

Se determina sobre la suspensión acuosa anterior, previamente centrifugada y filtrada, con un conductímetro.

✓ **Capacidad de Intercambio Catiónico**

Se realiza una limpieza de la muestra mediante varios baños de agua, dejando la muestra sin cationes, posteriormente se satura con Bario y se determina mediante un blanco.

✓ **Carbono orgánico total y nitrógeno total**

Se realiza quemando la muestra a 1020°C en un analizador elemental (Navarro y col., 1991).

✓ **Polifenoles**

Se determinan los polifenoles solubles mediante extracción acuosa en relación 1:20 mediante la modificación del método Folin (Beltrán y col., 1999).

✓ **Mineralización de la muestra**

Se prepara la mezcla con una digestión nítrico-perclórica y tras el paso por el bloque digestor se enrasa y almacena.

✓ **Fósforo total**

Se determina por medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato molibdato amónico (Kitson y Mellon, 1994), obtenido sobre una fracción del extracto de mineralización.

✓ **Sodio y potasio**

Estos elementos se midieron en disoluciones adecuadas del extracto de mineralización, mediante fotómetro de llama.

✓ **Índice de germinación (IG)**

El índice de germinación (IG) fue determinado usando semillas de *Lepidium sativum* L. (Zucconi et al., 1985). Se determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y longitud de las raíces de semillas *Lepidium sativum* L., incubadas en un extracto acuoso de compost.

### 3.5. Métodos estadísticos.

El tratamiento estadístico aplicado a los datos obtenidos se realizó mediante un análisis estadístico multivariante de doble vía donde se estudiaron las diferencias entre tratamientos plantados, considerando:

- ✓ El tiempo de compostaje como primera variable estadística (t= 0, t= 16, t= 36, t= 56 y t= 86 días).
- ✓ La dosis de participación del tronco de palmera en la formulación de la mezcla a compostar como segunda variable de análisis estadístico (39,8%, 59,5%, 66,5% y 79% del ingrediente palmera).

En los casos de que la F-ANOVA mostró cierta significación, se empleó la prueba Tukey-b como prueba post-hoc para evaluar las diferencias entre medias específicas, mostrándose en los resultados mediante el empleo de letras para una probabilidad del 95% ( $P < 0,05$ ).



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

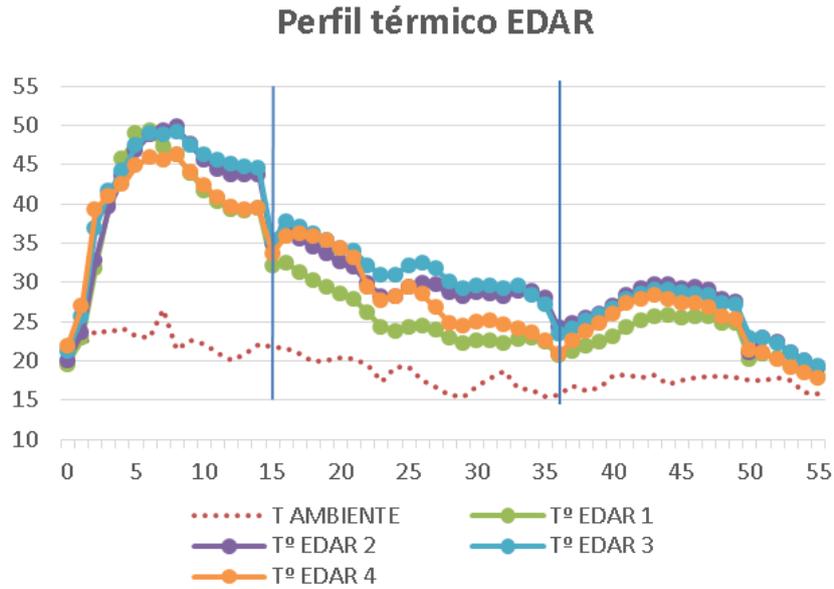
### 4.1. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje

La temperatura es el parámetro más utilizado para seguir la evolución del proceso de compostaje, ya que su medida es directa e instantánea y puede hacerse de manera continua. La temperatura de la pila es el reflejo de la actividad microbiana que determina el proceso y, por tanto, su seguimiento permite detectar cualquier posible alteración del mismo. De este modo, una disminución de este parámetro será indicativo de un descenso en la actividad microbiana, que puede deberse a la falta de aireación, a un contenido insuficiente de agua o a la escasez de elementos nutritivos en el medio, mientras que un aumento de temperatura debe interpretarse como un buen desarrollo del proceso aeróbico.

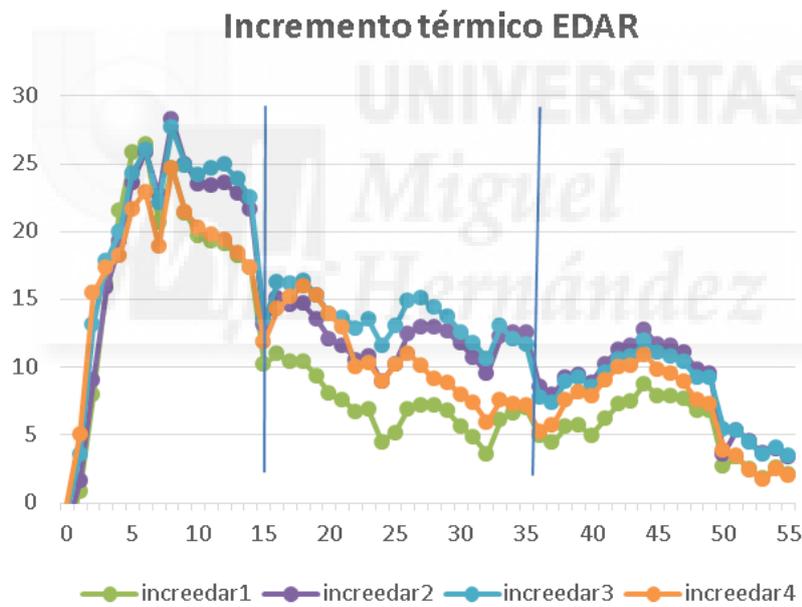
El compost atraviesa diferentes fases, que suelen repetirse con cada volteo realizado. Después de cada volteo, se produce normalmente un aumento de temperatura, asociado a la fermentación del material externo de la pila. Esto es debido a la reactivación de los microorganismos que disponen de nuevos principios inmediatos para su metabolismo al homogeneizar la masa mediante el volteo, procedentes de la capa superficial y de la zona cercana a la ventilación de la pila y que prácticamente no habían sido degradados a causa de la escasa humedad de los materiales en la zona periférica de la pila, o por el enfriamiento de la masa al aplicar la ventilación no se puede llevar a cabo (Stentiford y col., 1985). Estas secuencias de variación de temperatura generan cada vez un menor incremento de temperatura debido a la presencia cada vez menor de materia orgánica de fácil descomposición, que es en la que se basa el aumento de microorganismos no especializados.

En la **Figura 4.1**, se muestra la evolución de la temperatura de cada una de las composteras, durante el proceso de compostaje de las mezclas, la temperatura ambiental, así como los días en los que se realizaron los volteos a la pila.

En la **Figura 4.2**, se muestra el incremento térmico experimentado, una vez restada la temperatura ambiental de la temperatura de la compostera.



**Figura 4.1.** Evolución de la temperatura de cada una de las mezclas durante el proceso de compostaje.



**Figura 4.2.** Incremento térmico experimentado por las mezclas respecto a la temperatura ambiente.

Las 4 pilas presentaron un perfil térmico muy parecido al inicio del experimento (Figura 1A), independiente del porcentaje de ambos materiales utilizado en su preparación. Todas las pilas alcanzaron temperaturas termófilas (>40°C) durante los primeros días. Tras el primer volteo (día 15) todas las pilas mostraron un aumento de la Tª, excepto la pila elaborada con menor porcentaje (39,5 %) de TP (Pila C1). Sadik y col. (2012) también observaron un mayor aumento en la temperatura con el aumento

de la proporción de TP en mezclas preparadas con diferentes materiales ricos en N a fin de regular el ratio C/N de la mezcla.

Según se observa en la **Figura 4.1**, la fase biooxidativa de los procesos de compostaje C2, C3 y C4 se prolongó durante 55 días y para el C1 28 días, momento en que los procesos verificaron un diferencial sostenido durante unos 10 días de menos de 10°C, entre la temperatura promedio de la compostera y la temperatura ambiental y no hubo reactivación de la temperatura tras el volteo.

Todas las composteras iniciaron la fase termófila a los 3 días de iniciado el compostaje, (**Figura 4.1**). La mayor proporción de estructurante tronco de palmera en las pilas no influyó en el tiempo de reactivación de las pilas. En todas las pilas, a los 8 días se experimentan los mayores incrementos térmicos, siendo sus valores superiores para las pilas C2 y C3, con proporciones intermedias de tronco de palmera de 59,6 y 66,7 %, respectivamente (**Figura 4.2**).

Los diferentes volteos realizados sirvieron para homogeneizar la masa, suministrar oxígeno al proceso y reactivar así el proceso microbiano, al disponer de nuevo de compuestos orgánicos fácilmente biodegradables (Stentiford et al., 1985). Se realizaron 2 volteos en cada una de las pilas. Después del primer volteo (15 días) las temperaturas continuaron descendiendo de forma paulatina, especialmente para la pila C1, dándose por concluida su fase biooxidativa a los 28 días. Se realizó un volteo más a los 35 días observándose ligeros incrementos de la temperatura de la mezcla respecto de la ambiental, dándose por concluida la fase biooxidativa de los composts C2, C3 y C4 a los 55 días.

En la **Tabla 4.1** se muestran los datos del índice exotérmico (EXI) durante la fase biooxidativa, la temperatura (T) máxima y mínima y el número de días con fase termófila. El índice exotérmico (EXI) se calcula sumando el incremento diario de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiente, durante el periodo de fase biooxidativa.

**Tabla 4.1.** Índice exotérmico (EXI), T máxima y mínima promedio del proceso y nº de días con fase termófila ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ).

	C1	C2	C3	C4
<b>EXI (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	516	708	747	616
<b>EXI/día biooxidativa</b>	9,4	12,9	13,6	11,2
<b>T max (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	49,4	49,8	49,2	46,2
<b>T min (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	17,9	19,2	19,3	17,9
<b>días <math>&gt; 40^{\circ}\text{C}</math></b>	8	11	12	9

EXI= índice exotérmico; incremento diario de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiente, durante el periodo de fase biooxidativa

En la pila C1, la temperatura máxima del proceso fue de  $49,4^{\circ}\text{C}$  que se alcanzó a los 6 días de proceso, el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 8 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de  $516^{\circ}\text{C}$ , el más bajo de todas las pilas ensayadas. En la pila C2, la temperatura máxima del proceso fue de  $49,8^{\circ}\text{C}$ , el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 11 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de  $708^{\circ}\text{C}$ . En la pila C3, la temperatura máxima del proceso fue de  $49,2^{\circ}\text{C}$ , el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 12 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de  $747^{\circ}\text{C}$ . En la pila C4, la temperatura máxima del proceso fue de  $46,2^{\circ}\text{C}$ , el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 9 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de  $616^{\circ}\text{C}$ .

Así, en las pilas C2 y C3, la etapa termófila se alargó más en el tiempo y el índice exotérmico acumulado durante la etapa biooxidativa fue mayor, respecto a las composteras C1 y C4.

Los requisitos europeos en materia de saneamiento de compost, establecen más de dos semanas a  $T > 55^{\circ}\text{C}$  (Comisión Europea 2014) y a la Agencia de Protección Medio ambiental de Estados Unidos (EPA, 2003), considera que para una correcta higienización del material las pilas de compost deben mantener durante 15 días, o al menos durante 5 días consecutivos, una temperatura superior a  $55^{\circ}\text{C}$ . Las mezclas elaboradas no llegaron a cumplir estos requisitos de higienización. Esto es

especialmente crítico en mezclas en las que intervienen lodos EDAR por el posible riesgo de contaminación microbiológica del compost y su incorporación a la cadena trófica.

En el perfil térmico de las composteras 2, 3 y 4, se alcanzaron temperaturas máximas similares a las alcanzadas por Bustamante y col. (2013) en un ensayo de compostaje de similares características (compostera de 350 l) con fase sólida del digerido obtenido tras la digestión anaerobia de purín de cerdo mediante su co-compostaje con diferentes agentes estructurantes.

#### 4.2. Evolución de la fracción hidrosoluble: pH, conductividad eléctrica y contenido en polifenoles

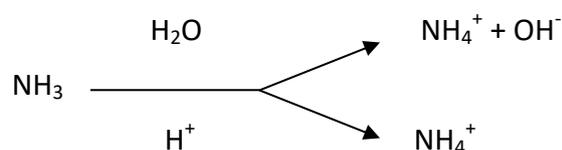
##### *pH*

La variación del pH a lo largo del compostaje se ha tomado en muchas ocasiones como un parámetro indicativo de la evolución del proceso. Generalmente, el pH disminuye en las primeras horas o días del proceso debido a la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, procedentes de la descomposición de las fracciones más lábiles de la materia orgánica. Posteriormente se observa un aumento del pH, como consecuencia de la degradación de compuestos con grupos carboxílicos y fenólicos, de carácter ácido, y la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos a amoníaco (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1991), el cual se protonará durante el proceso de amonificación para formar amonio. Esta protonación puede resultar de la reacción del agua con el  $\text{NH}_3$  para formar  $\text{NH}_4\text{OH}$ , con producción de iones  $\text{OH}^-$ , ó de la protonación directa con el consumo de un ión  $\text{H}^+$  del medio (Reuss y Johnson, 1986), contribuyendo de esta manera a la subida del pH, tal y como se muestra en las siguientes reacciones:

##### Descomposición

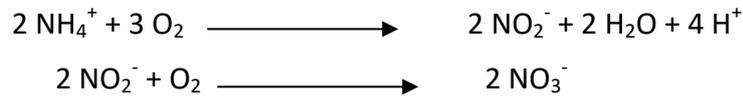


##### Amonificación



Por último, el pH disminuye, ya que los procesos de degradación no son tan intensos y se produce la nitrificación del amonio originado en la etapa anterior, que conlleva la liberación de iones  $H^+$  (Gagnon y col., 1993), tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones:

Nitrificación.



Los resultados obtenidos para el pH se detallan en la Tabla 4.2 y la Figura 4.3 que muestran la evolución del pH durante el proceso en cada compostera y la influencia de la proporción de materiales iniciales, respectivamente.

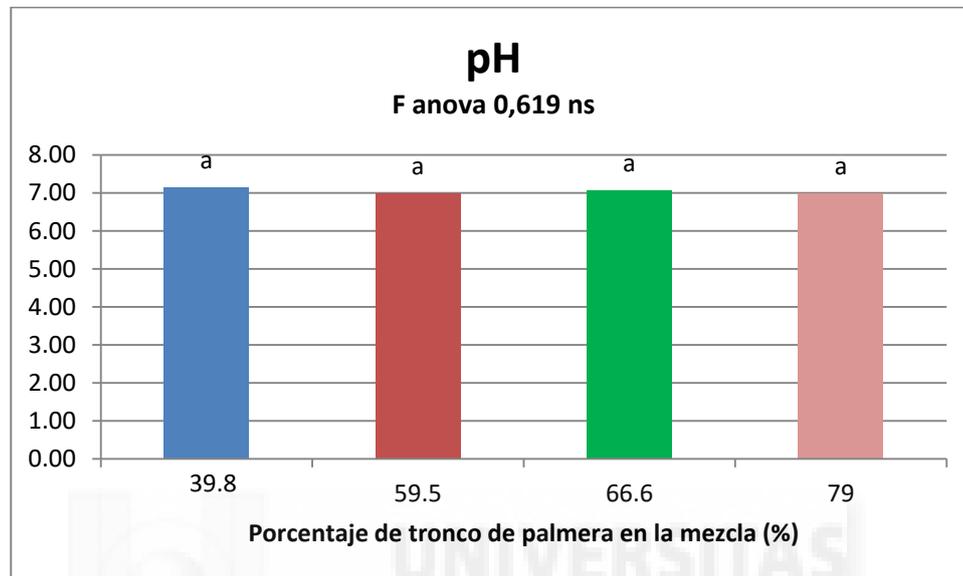
**Tabla 4.2.** Valores medios de la evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto al pH.

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
pH	7,12 a	6,93 a	7,24 a	7,31 a	7,08 a	ns
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
pH	6,98 a	6,77 a	7,25 a	6,83 a	7,11 a	ns
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
pH	6,90 a	6,84 a	7,30 a	7,29 a	7,08 a	ns
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
pH	6,86 a	6,75 a	7,20 a	7,11 a	7,06 a	ns

Las mezclas con mayor proporción de lodo EDAR presentaron inicialmente valores de pH cercanos a la neutralidad. Según Rynk (1992) la acidez inicial podría influir en el desarrollo de la actividad termófila, evitando que se alcancen temperaturas elevadas durante esta fase. En las pilas estudiadas, no se apreciaron variaciones significativas del pH a lo largo del proceso de compostaje.

La variación de la proporción de tronco de palmera en las mezclas, no influyó en la evolución del pH durante el proceso (Figura, 4.4).

El pH en los composts obtenidos se situó dentro del rango adecuado para su uso agrícola (6,0-8,5) (Hogg y col., 2002).



**Figura 4.4.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el pH.

#### **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica (CE) generalmente se incrementa a lo largo del proceso como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica y de la concentración relativa de iones debida a la pérdida de peso, pero esto ocurre siempre que el compostaje se efectúe controlando la pérdida de sales solubles por lixiviación, debida a riegos o lluvia si el proceso se realiza al aire libre. Algunas veces puede producirse un descenso de la CE durante el proceso, lo que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa, provocados por una humectación excesiva de la misma o por la lluvia, si el proceso se realiza al aire libre (Paredes y col, 2001).

La evolución de los valores de la conductividad eléctrica (CE) en las pilas ensayadas se expone en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.5, se muestra la influencia del porcentaje de tronco de palmera en la evolución de dicho parámetro.

La conductividad eléctrica fue alta al inicio de los procesos, con valores superiores a 4,9 dS/m. La alta CE de los residuos de tronco de palmera ha sido determinante en los altos valores de CE de las pilas. Se observa que la conductividad eléctrica en los compost elaborados se incrementa conforme avanza el tiempo de compostaje, debido a la degradación de la materia orgánica, como consecuencia de la producción de compuestos inorgánicos y la concentración relativa de iones de la pila por pérdida de masa de la pila (Paredes et al., 2000). Las pilas C2 y C3, experimentaron un incremento mayor de la CE, durante el proceso, siendo el compost C3 el más salino, con una CE final de 9,86 dS m<sup>-1</sup>.

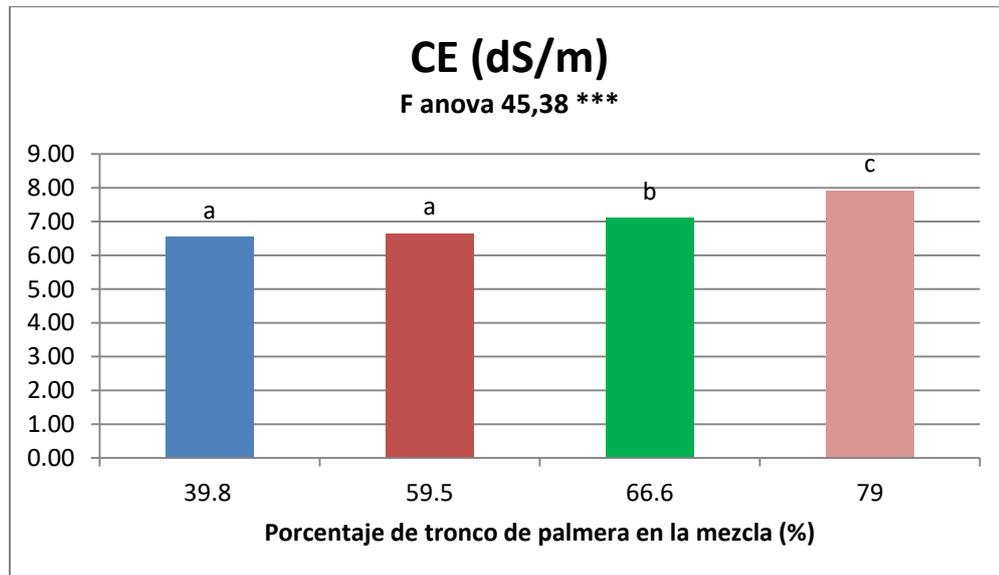
Los compost incrementaron su CE durante la fase de maduración de forma significativa, Bustamante y col. (2008) también observaron incrementos en la CE de pilas elaboradas con residuos vitivinícolas en la fase final del proceso que atribuyó a la volatilización de amoníaco y la precipitación de sales minerales.

**Tabla 4.3.** Valores medios de evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto a la conductividad (dS/m).

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
CE (dS m <sup>-1</sup> )	4,91 a	6,05 b	5,87 b	7,66 c	8,19 c	***
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
CE (dS m <sup>-1</sup> )	5,35 a	5,62 a	6,80 b	6,39 b	9,05 c	***
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
CE (dS m <sup>-1</sup> )	6,12 b	6,30 b	5,53 a	7,67 c	9,86 a	***
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
CE (dS m <sup>-1</sup> )	6,55 a	7,27 b	8,04 c	8,50 c	9,19 d	***

La conductividad eléctrica del compost es un parámetro a tener en cuenta en su uso agrícola. La adición de compost con elevada salinidad a los suelos agrícolas podría inhibir la germinación de semillas (He y col., 1995; Hargreaves y col., 2008) e incrementar la conductividad eléctrica de los suelos donde se aplican. No obstante, la conductividad eléctrica desciende pasado el tiempo después de la aplicación,

posiblemente por la toma de nutrientes por parte de las plantas y por la lixiviación de éstos (Zhang y col., 2006).



**Figura 4.5.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la CE.

Los composts maduros obtenidos presentaron valores altos de CE (8,19-9,86 dS/m) lo cual supone una limitación para su uso como enmendante orgánico, por la posibilidad de inducir salinidad en el suelo y toxicidad en los cultivo, y especialmente como sustrato o componente de sustrato de cultivo (Rynk 1992).

Según Lasaridi y col. (2006), el valor de conductividad eléctrica que un compost debe tener para no provocar efectos adversos no ha de superar los 3 dS/m. En todos los compost elaborados se supera dicho valor desde el inicio.

La elevada CE podría 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., 2014).

### **Contenido en polifenoles**

Los polifenoles se encuentran prácticamente en todos los materiales vegetales, se componen básicamente de ácidos fenólicos que incluyen benzoato y derivados hidroxycinamato y flavonoides. Los compuestos fenólicos merecen especial atención debido a su repercusión sobre la inhibición de la

germinación de semillas, sobre la inmovilización del nitrógeno del suelo (Bustamante et al., 2007) y por su efecto antimicrobiano (Scalbert, 1991) que puede inhibir y limitar el proceso de compostaje. La evolución de los polifenoles solubles durante el proceso de compostaje es un parámetro a tener en cuenta en su uso agrícola, ya que están relacionados directamente con las propiedades fitotóxicas de los materiales a compostar.

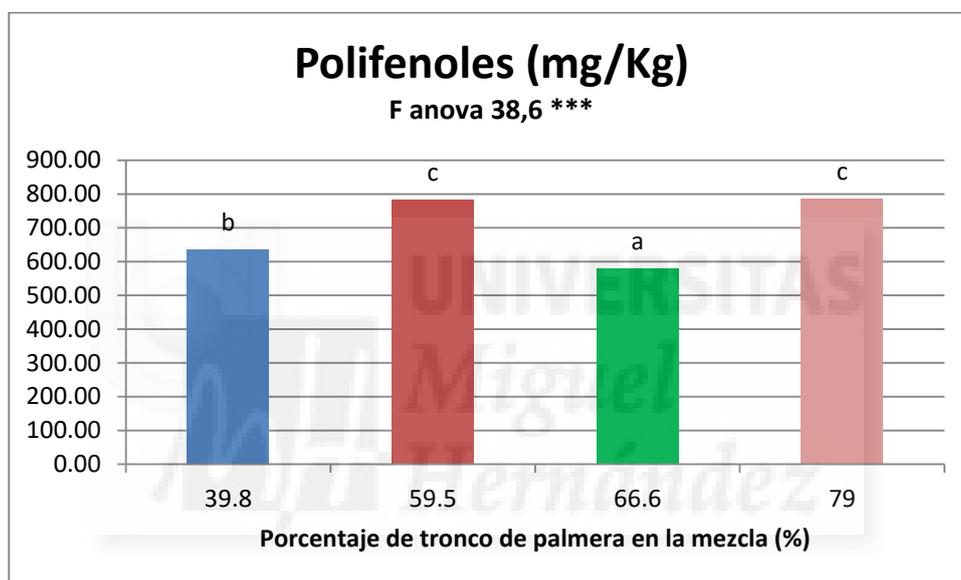
Los valores de la concentración de polifenoles obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.6 que muestran cómo la proporción del estructurante tronco palmera ha influido en el contenido de polifenoles.

En cuanto a la evolución de polifenoles, se ve que con el paso del tiempo el contenido va descendiendo, se puede observar también que en el día 56 hubo un pequeño repunte en las pilas 2 y 4 esto puede deberse a que durante la degradación de polifenoles complejos, se generan polifenoles más simples, que son posteriormente también degradados. Por otro lado, vemos que el aumento del ingrediente tronco palmera, no muestra una tendencia clara en la evolución del contenido de polifenoles (4.6).

**Tabla 4.4.** Valores medios de evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto a los polifenoles mg/Kg.

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
Polifenoles	1212 d	590 c	461 ab	404 a	516 bc	***
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
Polifenoles	1234 d	1102 c	484 a	615 b	479 a	***
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
Polifenoles	1084 b	552 b	403 a	385 c	478 d	***
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
Polifenoles	1381 c	662 b	532 a	644 b	718 b	***

En la Tabla 4.6, se muestra como, en general, el mayor descenso en la concentración de polifenoles en las pilas se da en las primeras fases o etapas del proceso de compostaje, debido a la gran actividad inicial que llevan a cabo las poblaciones microbianas encargadas de degradar estos compuestos tan complejos, hasta finalmente obtener una concentración constante que puede estar relacionada con la madurez del compost. La disminución de los compuestos de naturaleza fenólica durante el proceso de compostaje se debe al predominio de las vías degradativas y de polimerización frente a la liberación al medio acuoso de sustancias fenólicas (Saviozzi y col., 1987).



**Figura 4.6.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de polifenoles hidrosolubles.

En todos los compost los valores finales están por debajo a 1000 mg/kg de polifenoles solubles, aunque ligeramente superiores a los obtenidos por Bustamante y col. (2008) en compost de residuos vitivinícolas.

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

El estudio de la evolución de la materia orgánica en su conjunto y de su fracción sólida nos proporciona información acerca de los procesos que ocurren durante el compostaje y de la mayor o menor intensidad de la actividad microbiana durante el progreso del mismo.

### ***Materia orgánica***

El porcentaje de materia orgánica presente en el compost, es indicativo de la naturaleza, más o menos orgánica que tiene la pila. En teoría, la tasa de materia orgánica debe ir descendiendo debido a la descomposición que ocurre en la etapa bio-oxidativa. El contenido final de materia orgánica (MO) en el compost dependerá del valor inicial, de su degradabilidad y de la transformación que hayan sufrido sus componentes durante el proceso. Es un parámetro importante porque en el caso de aplicarse al suelo incide de forma global en todas sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) y en caso de utilizarse como sustrato la MO incidirá sobre sus propiedades físicas, siendo indispensable además conocer su estabilidad. Pérdidas considerables de MO durante la fase de bio-oxidativa indica la estabilidad relativa alcanzada por los productos después de la etapa de bio-oxidativa.

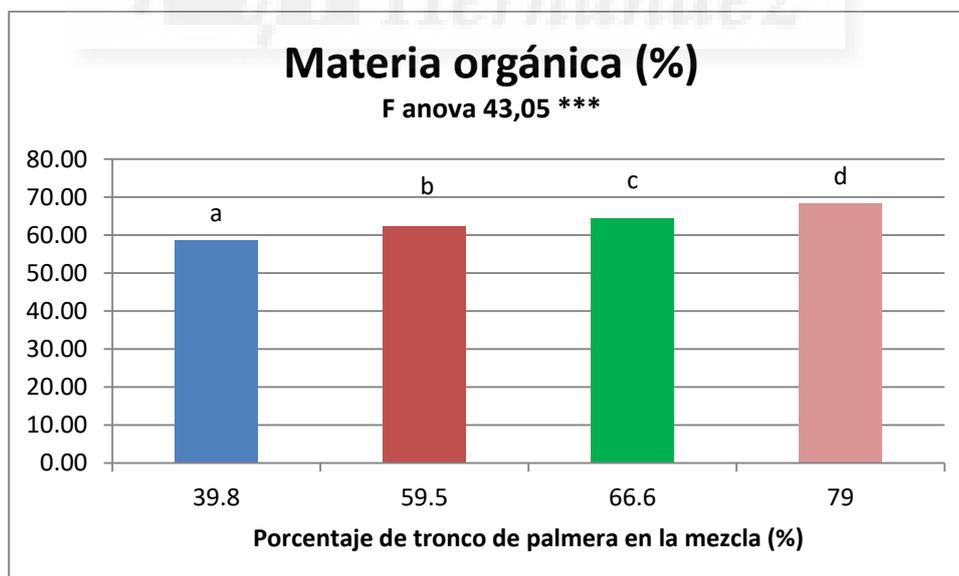
Los valores de la materia orgánica analizados durante el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.7 y en la Figura 4.5 se muestra la influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el contenido de MO.

A lo largo de todo el proceso se observa una disminución de la cantidad de MO presente en el compost, como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso. Esta pérdida, en general, es más acusada durante los primeros días de compostaje, coincidiendo con la fase termófila, la intensa actividad microbiana en esta etapa, promueve una mayor degradación y mineralización de la MO presente. Esto no fue así en el caso de la pila 1 que no perdió MO de forma acusada hasta el final, posiblemente debido a un menor aumento de temperatura al inicio del proceso. Por otro lado se puede ver como la cantidad de MO aumenta con el aumento en la concentración del estructurante tronco de palmera (Figura 4.7).

**Tabla 4.5.** Valores medios de la evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto a la materia orgánica.

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
MO (%)	59,7 a	59,7 a	59,3 a	58,5 a	56,6 a	ns
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
MO (%)	68,6 d	64,1 c	62,2 bc	59,5 ab	56,7 a	***
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
MO (%)	72,9 c	68,0 b	63,1 a	59,4 a	58,8 a	***
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
MO (%)	75,6 d	70,8 c	67,6 bc	65,8 ab	62,6 a	***

Los contenidos de materia orgánica son también comparables con los contenidos de MO obtenidos por Bustamante y col. (2013) en compost utilizando la fracción sólida del digerido de purín porcino con diferentes agentes estructurantes. Estos valores son superiores a los establecidos en la legislación para compost (MO ≥ 35%) (RD 506/2013).



**Figura 4.7.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de MO.

### ***Pérdida de materia orgánica***

Las pérdidas de materia orgánica (MO) reflejan la evolución sufrida por la mezcla de residuos estudiada. Éstas se calcularon a partir del contenido de cenizas inicial ( $X_1$ ) y en el punto de estudio ( $X_n$ ), de acuerdo con la ecuación de Viel y col. (1987):

$$\text{Pérdidas MO (\%)} = 100 - 100 \left[ \frac{X_1 (100 - X_n)}{X_n (100 - X_1)} \right]$$

Esta ecuación representa el porcentaje de materia orgánica perdida con respecto a la cantidad inicial, para ello se considera que el contenido de cenizas a lo largo del proceso es constante y de este modo se evita el efecto concentración provocado por las pérdidas de peso de la pila debidas a la degradación de la materia orgánica.

Los valores de pérdida de materia orgánica obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.6 y en la Figura 4.8 muestran como la proporción del ingrediente tronco palmera inicial ha afectado a la pérdida de MO.

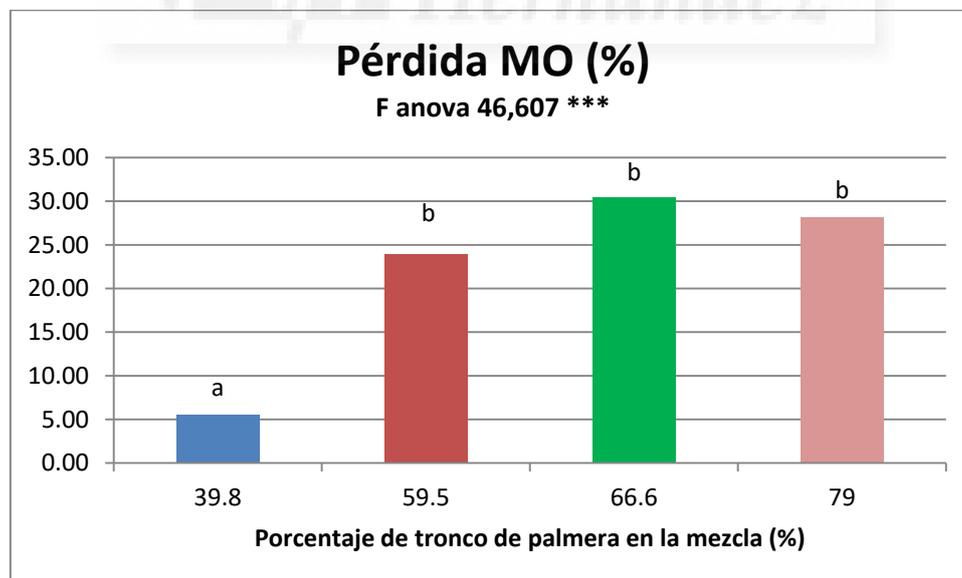
Debido a los procesos de degradación, como consecuencia de la actividad microbiana, se produce una pérdida de MO, siendo esta más acusada durante la fase termófila, tras esto los compuestos más sencillos se han degradado y la pérdida de MO va disminuyendo. El factor tiempo ha sido decisivo en la evolución de éste parámetro. En la Figura 4.8, se observa que la compostera con menor cantidad del estructurante tronco de palmera (C1) la cantidad de materia orgánica perdida es muy baja, mientras que en la pilas C2, C3 y C4 con una mayor proporción de tronco muestra una pérdida mayor de MO.

Al final de proceso, se alcanzaron pérdidas de MO entre el 20% y el 30% para los compost C2, C3 y C4 y de un 5% para el compost C1. Las pérdidas considerables de MO durante la fase bio-oxidativa indica la estabilidad relativa alcanzada por los productos después de esta etapa y puede ser utilizado como un indicador de la tasa de compostaje

Cáceres y col. (2014) observaron mayores pérdidas de materia orgánica en el compostaje de residuos vegetales y fracción sólida de estiércoles al aumentarse la proporción de restos vegetales en la pilas.

**Tabla 4.6.** Evolución de la pérdida de MO de las pilas durante el proceso de compostaje.

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
Pérdida MO (%)	0,0 a	0,8 a	5,0 b	7,8 c	14,0 d	***
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
Pérdida MO (%)	0,1 a	20,6 b	26,5 bc	32,7 c	40,1 d	***
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
Pérdida MO (%)	0,2 a	23,1 b	37,1 c	45,5 d	46,8 d	***
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
Pérdida MO (%)	0,2 a	23,9 b	33,3 c	37,9 cd	46,0 d	***



**Figura 4.8.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la pérdida de MO total.

### **Carbono orgánico total**

Del mismo modo que el contenido de materia orgánica y el contenido de carbono orgánico disminuyen a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

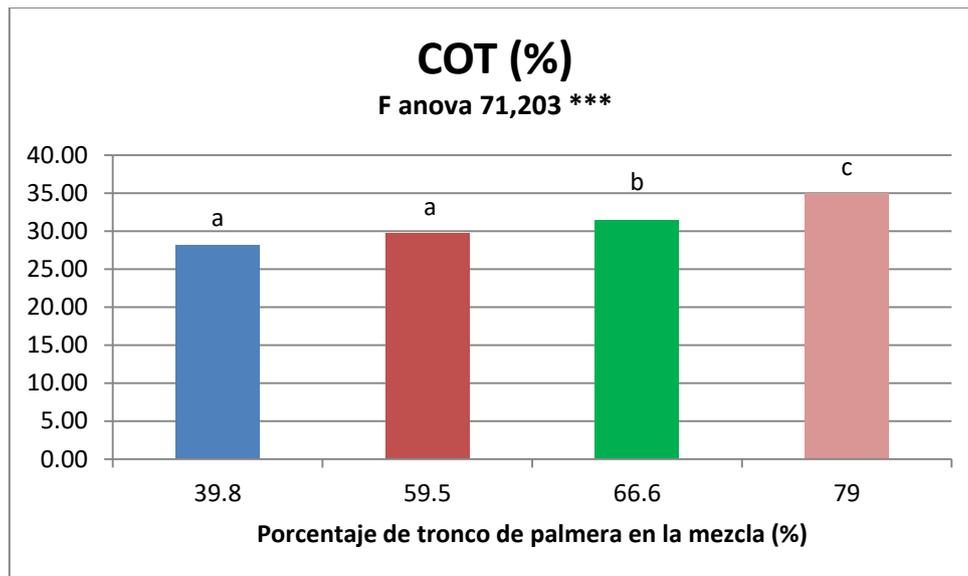
Los valores de carbono orgánico total (COT) obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en la Tabla 4.7 y en la Figura 4.9 con respecto a la proporción de ingrediente tronco palmera en el contenido de carbono orgánico.

**Tabla 4.7.** Evolución del carbono orgánico total (COT) de las pilas durante el proceso de compostaje.

<b>Muestreo (días)</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>36</b>	<b>56</b>	<b>86</b>	<b>ANOVA</b>
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
COT (%)	28,9 a	28,5 a	28,4 a	26,9 a	28,4 a	ns
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
COT (%)	30,3 a	30,7 a	29,1 a	29,6 a	28,7 a	ns
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
COT (%)	34,2 b	31,6 ab	31,2 ab	30,8 a	29,7 a	*
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
COT (%)	39,6 c	35,8 b	32,9 a	33,1 a	33,2 a	***

La diferente concentración de ingredientes ha marcado diferencias, aumentando el porcentaje de COT con la presencia de más tronco palmera.

El tiempo de compostaje no ha influido en la evolución del COT, en el caso de las pilas C1 y C2. Para las pilas C3 y C4, el mayor descenso de COT se aprecia en la fase biooxidativa, debido a la mayor actividad microbiana en esta etapa, no encontrándose prácticamente cambios en el contenido de COT durante la etapa de madurez. Los valores de COT en los compost finales son altos, variando entre un 28% para la pila C1 y un 33% para la pila C4.



**Figura 4.9.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el contenido de carbono orgánico total.

### ***Nitrógeno total***

El nitrógeno es un nutriente esencial para la vida vegetal cuya toma, por parte de las plantas, se produce en su forma inorgánica. Los contenidos de nitrógeno en un residuo fresco o compostado de naturaleza orgánica condiciona su capacidad fertilizante. El nitrógeno se encuentra tanto en forma orgánica como en forma inorgánica, aunque mayoritariamente es la forma orgánica la que está presente en los residuos orgánicos.

A lo largo del proceso de compostaje, se produce una descomposición de la materia orgánica y, por tanto, también de su fracción nitrogenada, siendo de esperar que durante el proceso de compostaje el nitrógeno orgánico se irá transformando, paulatinamente, en especies inorgánicas. Estas especies inorgánicas, en un cierto porcentaje, se pueden perder por lixiviación con la fase líquida o por volatilización a la atmósfera (liberación de amoníaco). Así pues, tenemos una serie de procesos que hacen que el contenido de nitrógeno presente en la pila inicial pueda verse disminuido. Sin embargo, la pérdida de materia orgánica que se produce a lo largo del compostaje, traducida por tanto en una reducción en el peso de la masa a compostar, hace que las especies nitrogenadas, tanto orgánicas como inorgánicas, experimenten el llamado “efecto concentración”, es decir, al final del proceso de compostaje, a pesar

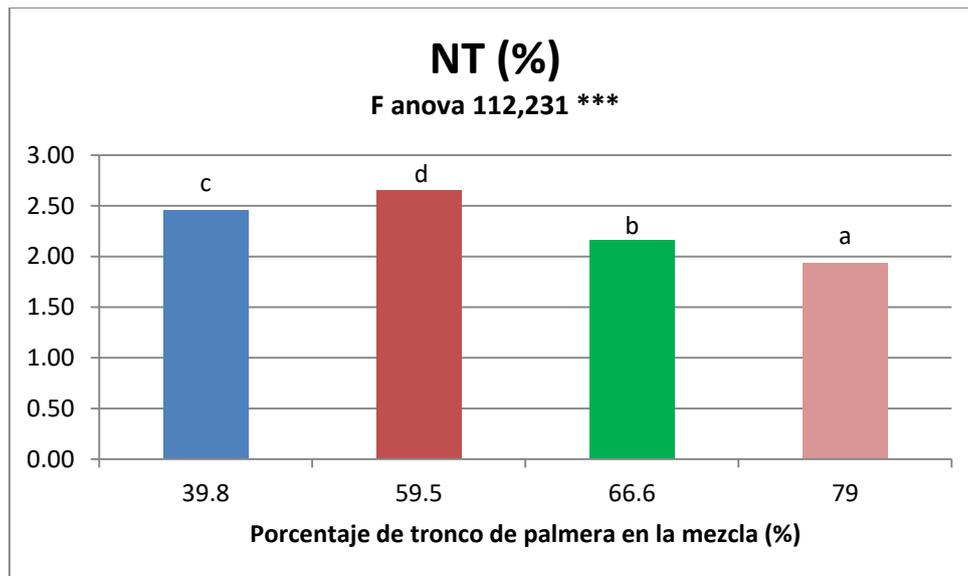
de que se pierde nitrógeno, éste estará más concentrado en el compost final debido a esa reducción en la masa de la pila comentada anteriormente. Por tanto, el contenido en nitrógeno aumenta durante el proceso de compostaje probablemente debido a un efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de materia orgánica, además de la posible fijación biológica de nitrógeno (Paredes y col., 2002).

Los valores de nitrógeno total (NT) obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.8 y en la Figura 4.10 que muestran como la proporción de materiales iniciales han afectado a la concentración de NT.

En la tabla 4.8, se observa que el aumento en la proporción de ingrediente tronco palmera ha disminuido el contenido inicial de NT en las pilas ensayadas. El tiempo de compostaje ha influido en la evolución de este parámetro fundamentalmente en las pilas C3 y C4. Los valores de N total en los compost han variado entre 2,0 % en C4 y 2,9 % en C2, siendo inferiores a los encontrados en compost elaborados con digeridos de residuos ganaderos (Bustamante y col., 2012) y a otros materiales utilizados frecuentemente como enmendantes de suelos, tales como residuos agroindustriales o estiércoles (Bustamante y col., 2010). El residuo tronco de palmera utilizado en las pilas aporta un contenido bajo de nitrógeno.

**Tabla 4.8.** Evolución del Nitrógeno Total (NT) de las pilas durante el proceso de compostaje.

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
NT (%)	2,4 a	2,5 a	2,4 a	2,4 a	2,7 b	**
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
NT (%)	2,5 a	2,3 a	2,6 ab	2,9 b	2,9 b	*
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
NT (%)	1,7 a	1,7 a	2,5 b	2,5 b	2,4 b	***
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
NT (%)	1,4 a	2,1 b	2,1 b	2,0 b	2,0 b	***



**Figura 4.10.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de NT.

#### ***Relación carbono orgánico total/nitrógeno total***

La relación carbono orgánico total / nitrógeno total (COT/NT) de la muestra sólida es uno de los índices más utilizados para estudiar la evolución de la materia orgánica durante el compostaje, ya que por un lado, representa la pérdida de carbono orgánico, como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica, mientras que por otro, mide el aumento de la concentración de nitrógeno debido a la pérdida de peso. Como resultado se obtiene una disminución de este parámetro, cuyos valores al final del proceso son prácticamente constantes, causados por la estabilización de la materia orgánica.

La importancia de esta relación está en que, para que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada, se considera que el material de partida debe de tener una relación COT/NT entre 25-35 (Jhorar y col. 1991). También es sabido que una relación  $C_{ot}/N_T$  demasiado elevada limita la cantidad de nitrógeno disponible para el crecimiento celular a expensas de la materia orgánica, lo que conduce a la inactivación o ralentización del proceso; mientras que lo contrario acelera inicialmente el crecimiento microbiano y la descomposición de la materia orgánica. Esto último, sin embargo, agotaría rápidamente las reservas de oxígeno, dando lugar a condiciones de

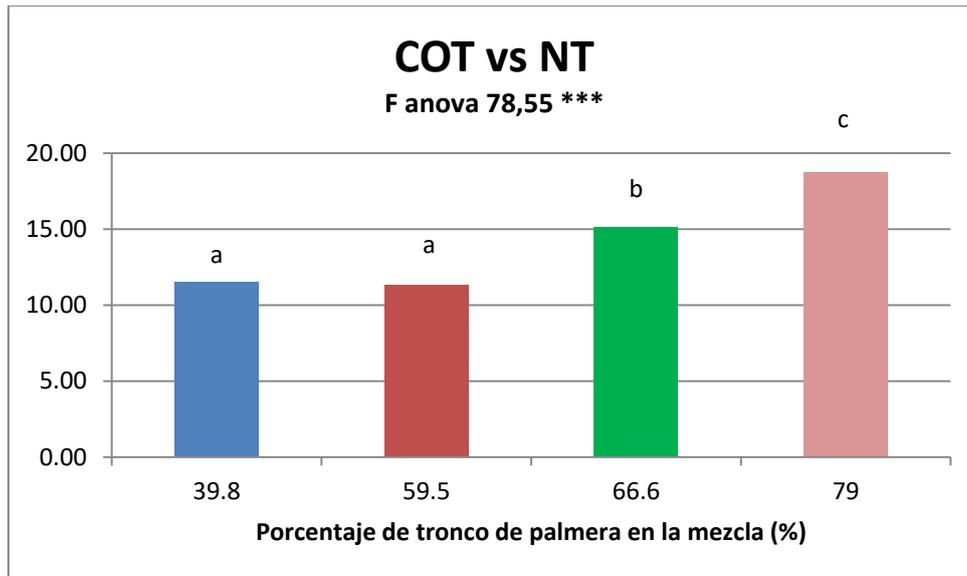
anoxia. El exceso de nitrógeno además conduce a pérdidas de nitrógeno en lixiviados (nitrato) o en gases (amoníaco).

Los valores de relación carbono orgánico total/nitrógeno total (COTvsNT) obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.9 y en la Figura 4.11 muestran como la proporción de materiales iniciales han afectado a la relación COT/NT.

Iglesias Jiménez y Pérez García (1992), para compost de RSU y Bernal y col., (1988) para compost de diversos orígenes, establecen como criterio más seguro de madurez del compost una relación COT/NT inferior a 12. En la legislación española se sugiere valores de dicha relación inferiores a 20 en los compost (BOE, 2013). Según estas consideraciones el compost C1 y C2, tendrían un grado de madurez adecuado, sin embargo, los valores iniciales de esta relación ya eran iguales al valor de referencia (12) para el compost maduro, por lo que este parámetro no puede ser indicativo de la madurez de estas pilas, para estas mezclas ensayadas.

**Tabla 4.9.** Valores medios de la evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto a la fracción COT/NT.

Muestreo (días)	0	16	36	56	86	ANOVA
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>						
COT/NT	12,2 b	11,6 ab	12,0 ab	11,1 ab	10,7 a	*
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>						
COT/NT	12,0 bc	13,2 c	11,2 ab	10,2 a	9,9 a	***
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>						
COT/NT	20,2 b	18,3b	12,4 a	12,5 a	12,3 a	***
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>						
COT/NT	27,9 b	17,4 a	15,7 a	16,3 a	16,2 a	***



**Figura 4.11.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco de palmera en la relación COT/NT.

#### 4.4. Macronutrientes y sodio

##### *Contenido de fósforo, potasio y sodio*

El P desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano. Al igual que el contenido de nitrógeno, el contenido del resto de nutrientes (P y K) y de Na aumenta durante el proceso de compostaje probablemente debido a un efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de MO.

Los contenidos de fósforo, potasio y sodio (P, K y Na) obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en la Tabla 4.10 y en la Figura de la 4.12, se observa influencia de la proporción de materiales iniciales en el contenido de P, K y Na de las pilas ensayadas.

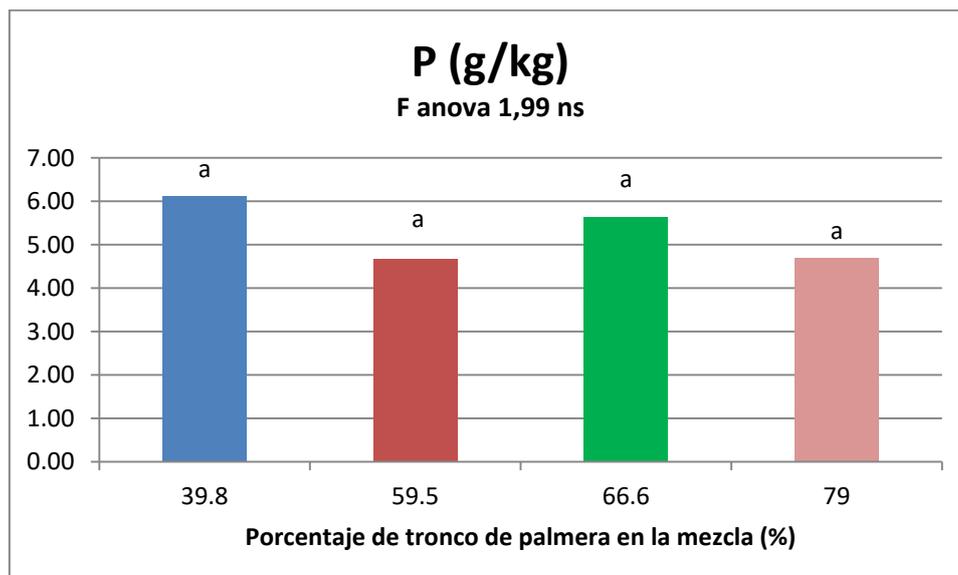
En general, se observa que a mayor presencia del estructurante tronco palmera no muestra una tendencia clara en los contenidos de P, aumentando en general los de K y Na.

Durante el tiempo de compostaje el contenido de K se ha incrementado en todas las pilas, el contenido de P ha aumentado en todas, salvo en la pila C1, y el contenido de Na ha aumentado en la C2 y C4, de forma significativa.

La presencia de sodio en los materiales orgánicos no es deseable debido a su esencialidad para las plantas así como por el impacto negativo de este catión en las propiedades físicas del suelo potencialmente enmendado.

**Tabla 4.10.** Valores medios de la evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto a P, K, Na.

Tiempo de compostaje (días)	P (g/kg)	K (g/kg)	Na (g/kg)
<b>Compostera C1: 59,5% L : 39,5% TP:1% A</b>			
0	6,1	17,2	10,1
86	6,2	18,9	10,9
<b>Compostera C2: 39,5% L : 59,5% TP : 1% A</b>			
0	4,1	18,2	10,1
86	5,3	30,3	14,8
<b>Compostera C3: 33% L : 66% TP : 1% A</b>			
0	5,2	23,3	12,3
86	6,1	28,3	12,3
<b>Compostera C4: 20% L : 79% TP : 1% A</b>			
0	4,1	28,7	12,6
86	5,3	31,8	13,2



**Figura 4.12.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de P.

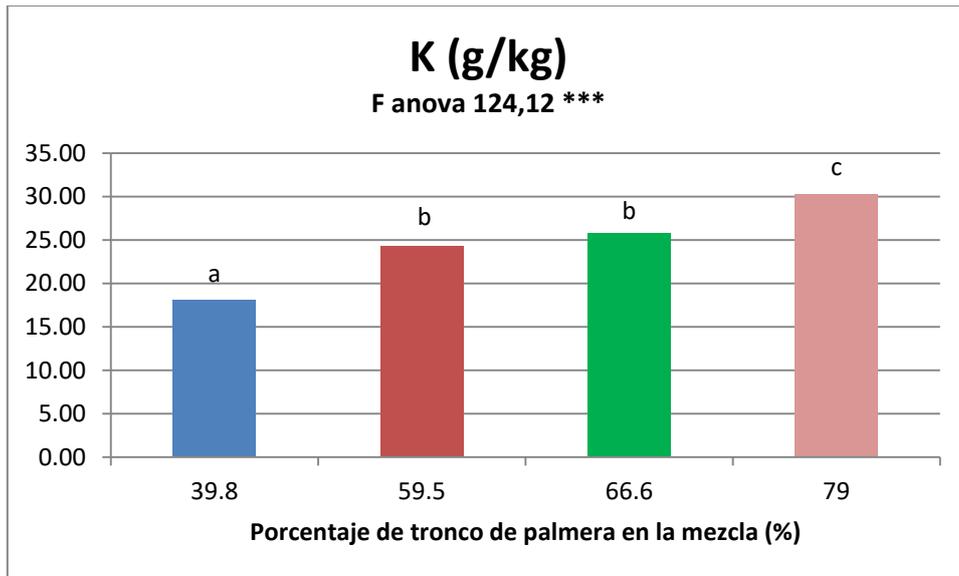


Figura 4.13. Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de K.

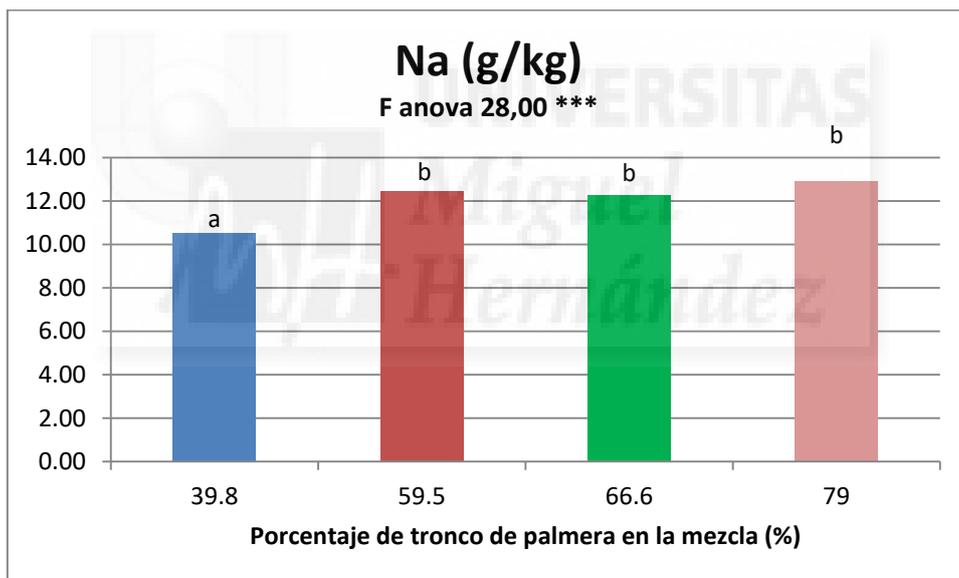


Figura 4.14. Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de Na.

## 4.5. Parámetros indicativos de calidad del compost

### *Índice de germinación*

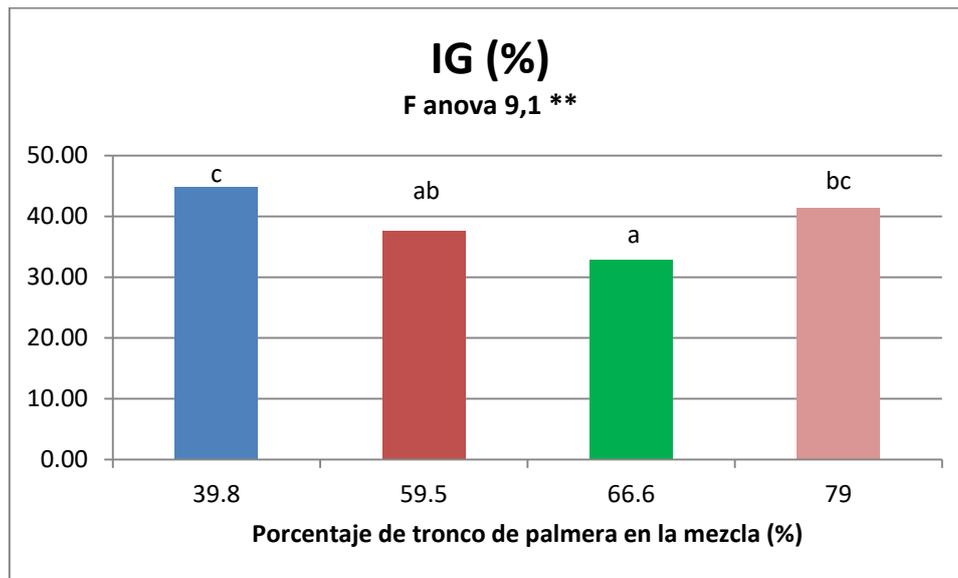
El índice de germinación (IG) de semillas es un método biológico que proporciona información precisa y real sobre el grado de madurez alcanzado por un compost. En este estudio, se ha utilizado el IG, propuesto por Zucconi y col. (1981), que consiste en la incubación de semillas de *Lepidium sativum* L., durante 24 horas a 27° C, sobre extracto acuoso del compost. Según éste método el compost está maduro cuando  $IG > 50$ . Se trata de un bioensayo muy sensible a los efectos inhibidores de las fitotoxinas (fenoles, ácidos grasos, amoníaco, etc, resultantes de los procesos de mineralización de la materia orgánica).

En la Tabla 4.11 se muestran los valores del índice de germinación obtenidos en el proceso de compostaje de las 4 pilas ensayadas.

Solo las pilas C1 y C2, mostraron valores aceptables de IG, superiores al 50%, valor mínimo establecido en la bibliografía que indica que un compost está maduro y que no va a producir daños sobre las plantas una vez que se les aplique como fertilizante, lo cual indica una reducción significativa de la fitotoxicidad en el caso de dicho compost.

**Tabla 4.11.** Valores medios de la evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto al índice de germinación.

Muestreo (días)	0	86
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>		
IG (%)	23,5	66,0
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>		
IG (%)	25,2	50,0
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>		
IG (%)	40,9	25,0
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>		
IG (%)	40,0	42,8



**Figura 4.15.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco de palmera con respecto al índice de germinación.

#### **Capacidad de cambio catiónico**

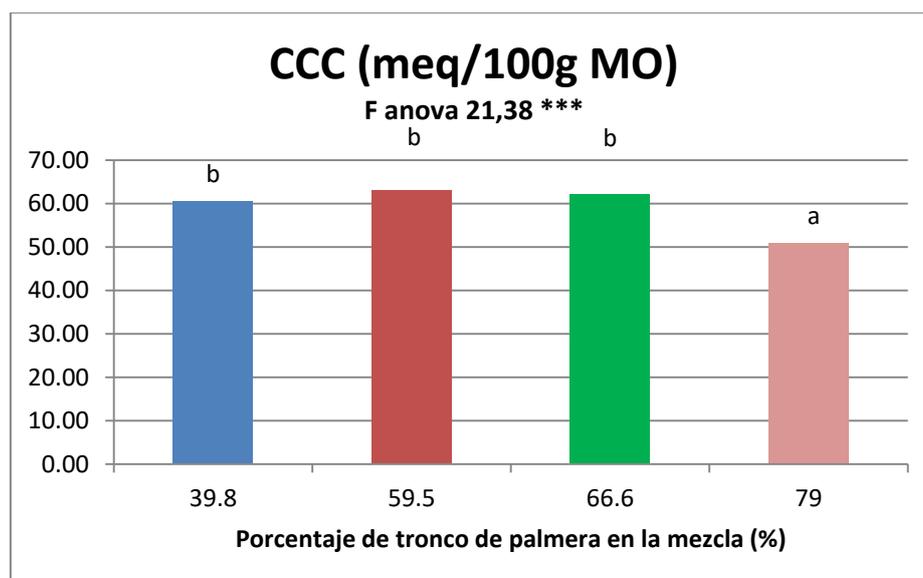
La capacidad de cambio catiónico es un parámetro indicativo del proceso de compostaje y del grado de humificación de los materiales orgánicos durante el compostaje, así como de la calidad del material final obtenido. Diversos autores (Harada e Inoko (1980) e Iglesias Jiménez y Pérez García (1992)) han estudiado la evolución de este parámetro, observando que la capacidad de cambio catiónico en compost aumentaba conforme progresaba el proceso hasta alcanzar un valor estable, concluyendo que si éste se sitúa en el rango de CCC > 60-67 meq/100g sobre materia orgánica en compost elaborado con residuos sólidos urbanos, indicaba que el compost estaba maduro. El grado de humificación de la materia orgánica en el suelo, al igual que ocurre en el compostaje de residuos orgánicos, está estrechamente relacionado con la capacidad de intercambio catiónico, aumentando progresivamente a medida que la humificación de la materia orgánica progresa. Este incremento de la CCC ha sido aceptado universalmente como criterio de madurez e indirectamente como criterio de “humificación” de materiales orgánicos (Roig y col, 1988).

En la Tabla 4.12 se muestran los valores de la capacidad de cambio catiónico (CCC) obtenidos en el proceso de compostaje de las 4 pilas ensayadas. En la Figura 4.15 se muestra la influencia del incremento de la proporción del ingrediente tronco de palmera en los valores de CCC.

En los compost estudiados aumenta el valor de CCC durante el proceso como consecuencia de la humificación de la materia orgánica. El aumento en las pilas de la cantidad de estructurante tronco de palmera induce al inicio una menor capacidad de cambio catiónico, en los compost finales al aumentarse la presencia de tronco palmera. No obstante, las cuatro pilas alcanzaron un alto nivel de madurez de acuerdo con los valores mínimos de CCC establecido por diversos autores.

**Tabla 4.12.** Valores medios de la evolución de las Composteras C1, C2, C3 y C4 con respecto a la capacidad de intercambio catiónico.

Muestreo (días)	0	80
<b>Compostera C1: 59,2 % Lodo EDAR + 39,8 % TP</b>		
CCC (meq/100g MO)	30,0	91,3
<b>Compostera C2: 39,5 % Lodo EDAR + 59,5 % TP</b>		
CCC (meq/100g MO)	48,8	77,3
<b>Compostera C3: 32,5 % Lodo EDAR + 66,5 % TP</b>		
CCC (meq/100g MO)	37,0	87,4
<b>Compostera C4: 20% Lodo EDAR + 79 % TP</b>		
CCC (meq/100g MO)	30,6	71,1



**Figura 4.16.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco de palmera en la capacidad de cambio catiónico.



## 5. CONCLUSIONES

---



## 5. Conclusiones

En este experimento, se han ensayado diferentes proporciones de lodo EDAR, procedente de la depuración de aguas residuales urbanas, y tronco de palmera triturado como agente estructurante, dentro de un proceso de optimización de las condiciones de co-compostaje y se ha observado lo siguiente:

- ✓ En general, las mezclas de residuos ensayadas no fueron adecuadas para conseguir el incremento de temperatura necesario para asegurar la higienización de los compost obtenidos, que se establecen en más de dos semanas a  $T > 55^{\circ}\text{C}$  (Comisión Europea 2014) o mantener durante 15 días, o al menos durante 5 días consecutivos, una temperatura superior a  $55^{\circ}\text{C}$  (EPA, 2003). Este resultado es esperable por condiciones intrínsecas del proceso de co-compostaje pero también en función de la escala a la que se desarrolló el experimento (compostera de 350L) que no genera un balance térmico muy positivo, comparado con la disipación de calor.
- ✓ La duración del proceso bioxidativo se estableció en 56 días para todas las composteras salvo para la mezcla con mayor proporción de lodos C1 (59,2%), que se acortó a la mitad con respecto al resto. El índice exotérmico definido como sumatorio del incremento diario de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiente, durante el periodo de fase bioxidativa fue mayor en las pilas C2 y C3 con proporciones de lodos de 39,5 y 32,5 %, respectivamente, pero en general fue bajo ya que no se llegaron a alcanzar en ningún caso temperaturas superiores a los  $50^{\circ}\text{C}$ . Aunque es posible que este comportamiento térmico de las muestras también esté relacionado con la dificultad de realizar mezclas realmente homogéneas con los materiales ensayados, la principal razón parece residir en la inexistencia de unas condiciones óptimas para el desarrollo del co-compostaje, potencialmente debido a la disponibilidad de niveles adecuados de C y N en forma biodisponible, que hace a los procesos más largos y menos exotérmicos, especialmente en escenarios de materiales estructurantes muy lignificados.

- ✓ Sin embargo, y a pesar de ello, la degradación de materia orgánica se situó en 14,0; 40,1; 46,8 y 46,0 % para las mezclas con 39,8; 59,5; 66,5 y 79 % de tronco de palmera, con una reducción considerable para la proporción de lodo más alta 59,2%, posiblemente debido a una menor porosidad de la mezcla con bajo contenido de agente estructurante (TP). La mayor presencia de tronco de palmera en las pilas indujo en los compost finales un mayor contenido de materia orgánica total aunque todos ellos presentaron valores finales superiores al 50%.
- ✓ Por otra parte, todos los compost propuestos alcanzaron valores finales (en compost maduro) de pH compatibles con el crecimiento vegetal, así como contenidos de materia orgánica y valores de la relación  $C_{ot}/N_T$  dentro de los límites establecidos por la legislación para compost. En adición, la evolución de la capacidad de intercambio catiónico (CCC) indicó la humificación de la materia orgánica, al aumentar a lo largo del proceso de compostaje. El aumento del contenido de lodo en la mezcla y, por tanto, menor presencia del estructurante tronco de palmera produjo un aumento de la concentración de macronutrientes (N y P) en los compost obtenidos.
- ✓ Finalmente, todos los compost presentaron un contenido de sales muy alto (conductividad eléctrica en torno a 8-9 dS/m), lo cual limitará su empleo agrícola. Los compost 1 y 2 elaborados con la mayor proporción de lodo (59,2 y 39,5%, respectivamente) no presentaron efectos fitotóxicos, según el índice de germinación.
- ✓ Los resultados obtenidos permiten establecer que la mezcla más adecuada es la C2 con proporciones de 39,5% de lodo EDAR y 59,5% de tronco de palmera, debido a su mejor termofilia, adecuada evolución de la materia orgánica, alcanzándose un adecuado nivel de madurez, alto contenido de nitrógeno y ausencia de fitotoxicidad. El desarrollo de este proceso a mayor escala sería necesario para verificar los resultados y asegurar la adecuada higienización.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---



## 6. BIBLIOGRAFÍA

**Barrena, R., Gea, T., Ponsá, S., Ruggeieri, L., Artola, A., Font, X., Sánchez, A. 2011.** Categorizing Raw Organic Material Biodegradability Via Respiration Activity Measurement: A Review. *Compost Sci. Util.*, 19: 105-113.

**Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A. y Cegarra, J. 1998.** Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technol.* 63, 91-99.

**Bernal, M.P., Gondar, D.M. 2008.** Producción y gestión de residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. En: Moreno casco, J. y Moral, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa. Madrid.

**Boletín Oficial del Estado (BOE).** Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1990-26490>

**Boletín Oficial del Estado (BOE).** Real Decreto 1039/2012, de 6 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2012-10153](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2012-10153)

**Boletín Oficial del Estado (BOE).** Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. [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)

**Bustamante, M.A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F.C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M.P., Moral, R. 2008.** Co-composting distillery wastes with animal manure: Carbon and nitrogen transformations and evaluation of compost stability. *Chemosphere* 72, 551557.

**Bustamante, M.A., Albuquerque, J.A., Restrepo, A.P., de la Fuente, C., Paredes, C., Moral, R., Bernal, M.P. 2012.** Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture. *Biomass Bioenergy* 43, 26-35.

**Bustamante, M.A.; Restrepo, A.P.; Albuquerque, J:A; Pérez-Murcia, M.D.; Paredes, C. Moral, R. Bernal, M.P. 2013.** Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Journal of Clean Production*, 47: 61-69.

**Cárdenas, R.R. y Wang, L.K. 1980. Composting process.** En: *Handbook of Environmental Engineering*. Vol. II. The Human Press. New York. pp. 269-327.

**Chen, Y. e Inbar, Y. 1993.** Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. En: *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*. Ed.: H.A.J. Hoitink y H.M. Keener. Renaissance Publications. Ohio. pp. 551-600.

**Fassbender, H.W. 1972.** *Química del suelo*. Ed. Turrialba. Costa Rica.

**Felipó 2001** *De Residuo a Recurso*, 2015

**Gagnon, B., Rioux, C. y Chagnon, J. 1993.** Evolution of chemical composition and microbial activity during storage of compost-based mixes. *Compost Science and Utilization*, 1 (3), 15-21.

**García, C., Hernández, T., Costa, F. y Ayuso, M. 1992.** Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Commun Soil Sci. Plant Anal.*, 23 (13 y 14), 1501-1512

**Golueke, C.G. 1981. Principles of biological resource recovery. BioCycle, 22, 36-40.** **Harada, Y. e Inoko, A. 1980.** The measurement of the cation-exchange capacity of composts for estimation of degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26, 127-134.

**Harada, Y., Inoko, A., Tadaki, M. e Izawa, T. 1981.** Maturing process of city refuse compost during piling. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 27, 357-364.

**Hargreaves, J.C.; Adl, M.S.; Warman, P.R. 2008.** A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123: 1

**Hogg, D., J. Barth, E. Favoino, M. Centemero, V. Caimi, F. Amlinger, W. Devliegher, W. Brinton, and S. Antler. 2002.** Comparison of compost standards within the EU,

North America, and Australasia: Main report. Banbury, UK: Waste and Resources Action Programm

**Hue, N.V. y Liu, J. 1995.** Predicting compost stability. *Compost Science and Utilization*, 3 (2), 8-15.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1989.** Evaluation of city refuses compost maturity: a review. *Biol. Wastes*, 27, 115-142.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1991.** Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 45-60.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1992 a.** Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some "humification" indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 243-257.

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

**Jann, G.J., Howard, D.H. y Salle, A.J. 1959.** Method for the determination of completion of composting. *Appl. Microbial.*, 7, 271-275.

**Jenkinson, D.S. y Ladd, J.N. 1981.** Microbial biomass measurement in soil: measurement and turnover. En: *Soil Biochemistry* (vol. 5). (Eds.) Paul, E.A., Ladd, J.N. Marcel Dekker, New York.

**Jhorar, B. S., Phogat, V y Malik, E. (1991).** Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil.*, 5: 307-

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

**Labrador-Moreno, J. 1996.** La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación-Mundi- Prensa. Madrid.

**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.

**MAGRAMA (2015).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Lodos de depuración de aguas residuales (Acceso 17/12/2014). <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/#para8> (Acceso Octubre 2014)

**MAGRAMA (2015).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Anuario Lodos su procedencia y Destino. (2012). <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-deestadistica/2012/default.aspx> (Acceso Noviembre/2014)

**MAGRAMA (2015).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España. <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/lodos.aspx>

**Manios, V.I.; Tsikalas, P.E y Siminis, H.I (1987).** Phytotoxicity of olive tree leaf compost. En: *Compost: Production, Quality and Use*. Ed: M, de Bertoldi, MP., Ferranti, P., L'Hermitte y F., Zucconi. Elsevier. Barking. Pp. 296- 301.

**M.A.P.A, 1994.** Métodos oficiales de análisis. Volumen III. Ed. Secretaría Técnica General, Madrid

**Morel, J., Jacquin, F., Guckert, A. y Barthel, C. 1979.** Contribution a la détermination de test de la maturité des composts urbains. C.R. Contrat, 75-124. Ministère de l'Environnement et Du Cadre Vie E.N.S.A.I.A. Nancy, 32 pp.

**Moreno, C. y Moral, Herrero, R. 2008.** Compostaje. -Mundi- Prensa. Madrid.

**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-

**Navarro Pedreño, J., Moral, R., Gómez, I. y Mataix, J. 1995.** Residuos orgánicos y agricultura. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Alicante.

**ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero,** por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Disponible en: [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-3285](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-3285)

**Paredes, C., Bernal, M.P., Cegarra, J. y Roig, A. 2002.** Bio-degradation of olive mill wastewatersludge by its co-composting whit agricultural wastes. *Bioresource Technology* 85,1-8.

**Poincelot, R.P. 1974.** A scientific examination of the principles and practice of composting. *Compost Sci.*, 15, 24-31.

**Porta, J.; López-acebedo, M.; Raquero, C. 1994.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

**Reuss, J.O. y Johnson, D.W, 1986.** Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters. Spring-Verlag. New York.

**Roig, A.; Lax, A.; Cegarra, J.; Costa, F.; Hernández, M.T. (1988).** Cation-exchange capacity as a parameter for measuring the humification degree of manures. *Soil science*, 146: 311-316.

**Roletto, E., Barberis, R., Consiglio, M. y Jodice, R. 1985.** Chemical parameters for evaluating compost maturity. *BioCycle*, 26 (2), 46-47.

**Rynk, R. 1992.** On-farm composting handbook. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension Service.

- Saña, J. y Soliva, M. 1987.** El Compostatge. Procés, Sistemes i Aplicacions. Ed.: Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient. Barcelona.
- Saviozzi A, Riffaldi R, Levi-Minzi R (1987).** Compost maturity by water extract analyses. In: de Bertoldi M, Ferranti MP, L'Hermite P, Zucconi F (eds.) Compost: Production, Quality and Use. Elsevier, Barking, pp. 359-367.
- Stentiford, E.I. 1987.** Recent developments in composting. En: Compost: Production, Quality and Use. Ed.: M. de Bertoldi, M.P. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier. Barking. pp. 52-60.
- Stevenson, F.J. 1982.** Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions. John Wiley and Sons. New York.
- Stickelberger, D. 1975.** Survey of city refuse composting. En: Organic Matters as Fertilizers. Swedish International Development Authority. FAO. Soils Bulletin. 27. Rome. pp. 185-209.
- Sugahara, K., Harada, Y. e Inoko, A. 1979.** Color change of city refuse during composting process. Soil Sci. Plant Nutr., 25, 197-208.
- Spohn, E. 1978.** Determination of compost maturity. Compost Sci., 19, 26-27.
- Tate, R.L. 1987.** Soil Organic Matter. Biological and Ecological Effects. John Wiley and Sons. New York.
- Vaughan, D. y Ord, B.G. 1985.** Soil organic matter. A perspective on its nature, extraction, turnover and role in soil fertility. En: Soil Organic Matter and Biological Activity. Ed.: D. Vaughan y R.E. Malcolm. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers. Dordrecht. pp. 1-35
- Viel, M., Sayag, D., Peyre, A. y André, L. 1987.** Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. Biol. Wastes, 20, 167-185.
- Zhang, M.; Heaney, D.; Henriquez, B.; Solberg, E.; Bittner, E. 2006.** A fouryear study on influence of biosolids/MSW cocompost application in less productive soils in Alberta: nutrient dynamics. Compost Sci. Util., 14: 68-80.

**Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. y de Bertoldi, M. 1981.** Evaluating toxicity of immature compost. BioCy

**Zucconi, F., Monaco, A. y 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. y de Bertoldi, M. 1987.** Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. En: Compost: Production, Quality and Use. Ed.: M., de Bertoldi, M.P., Ferranti, P., L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. pp. 30-50.

