



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN, TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LOS
RESIDUOS ORGÁNICOS**

**VALORIZACIÓN DE FLUJOS RESIDUALES ORGÁNICOS GENERADOS EN
ENTORNOS URBANOS MEDIANTE
CO-COMPOSTAJE**



**Lorena Montes García
Julio 2015**



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D^a. Lorena Montes García**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Valorización de flujos residuales orgánicos generados en entornos urbanos mediante co-compostaje”, bajo la dirección de D^a. M^a Dolores Pérez Murcia, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 25 de junio de 2015

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

Fdo.: Concepción Paredes Gil


Miguel Hernández
DE ELCHE
CAMPUS DE ORIHUELA
DEPARTAMENTO DE
AGROQUÍMICA Y
MEDIO AMBIENTE

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



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN, TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LOS
RESIDUOS ORGÁNICOS**

**“ VALORIZACIÓN DE FLUJOS RESIDUALES ORGÁNICOS GENERADOS EN
ENTORNOS URBANOS MEDIANTE
CO-COMPOSTAJE”**

Lorena Montes García

Vº Bº DIRECTORA

Mª Dolores Pérez Murcia

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES:

Autor: Lorena Montes García

Título: Valorización de flujos residuales orgánicos generados en entornos urbanos mediante co-compostaje.

Directores: M^a Dolores Pérez Murcia y Concepción Paredes Gil.

Año: 2015

Titulación: Máster Universitario en gestión, tratamiento y valorización de los residuos orgánicos.

Tipo de trabajo: Experimental.

Palabras clave: Hoja de palmera, poda de morera, compost

Keywords: Palm leaf, pruning mulberry, compost

Nº Citas bibliográficas: 71

Nº de tablas: 24

Nº de figuras: 37

Resumen

Debido al aumento de la población, se ha incrementado la generación de residuos, que demandan una adecuada gestión. El compostaje es una alternativa viable de tratamiento de estos residuos.

En este experimento, se han ensayado proporciones variables de lodo de depuradora y de restos de poda de hoja de palmera y de morera de forma tal que podemos observar la incidencia de la proporción y relación entre restos vegetales y lodo de depuradora.

En conclusión, la relación en torno al 40% de lodo de depuradora y al 60 % de restos de poda ensayados parece adecuada para desarrollar un buen proceso de compostaje, que permitiría conseguir las condiciones adecuadas para la higienización de los materiales, acortar el proceso de compostaje y obtener un compost con un alto contenido de materia orgánica humificada y nutriente.

Abstract:

Due to increase in population has increased waste generation, demanding proper management. Composting is a viable alternative to treatment of these wastes.

In this experiment, they were tested varying proportions of sewage sludge and pruning of palm and mulberry so that we can observe the incidence of proportion and relationship between plant waste and sewage sludge.

In conclusion, the ratio around 40% of sewage sludge and 60% of remains of pruning tested seems appropriate to develop a good composting process, which will achieve adequate for sanitizing the material conditions, shorten the process composting and obtain a compost with a high content of humified organic matter and nutrient.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer el gran apoyo mostrado por el Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente al dejarme hacer uso de sus instalaciones y equipos. Destacando la colaboración de mi directora M^a Dolores Pérez, que sin ella no podría haber realizado este trabajo.

También a la técnico de laboratorio, Marisol que gracias a ella he aprendido mucho.

A mi familia, a mis amigas y a mi novio, que siempre han estado presente en los momentos de mayor dificultad y me han mostrado todo su apoyo y comprensión.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
1.1 RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS ORGÁNICOS	2
1.1.1 Tipos de riesgos medioambientales.	2
1.1.2 Principales agentes contaminantes.....	2
1.2. RESIDUOS DE PODA Y DE JARDINERÍA	7
1.2.1. Origen de los residuos de poda y jardinería	7
1.2.2. Producción y destino de los restos de poda y jardinería.....	9
1.2.3. Características de los residuos de poda y jardinería	11
1.3. LODOS DE DEPURADORA.....	13
1.3.1. Origen de los Lodos	13
1.3.2. Producción y Destino de los Lodos.....	15
1.3.3 Características de los Lodos de depuradora.....	17
1.3.4. Métodos de aprovechamiento y tratamiento	21
1.3.5 Legislación medioambiental aplicada a la generación de Lodos.....	23
1.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE	26
1.4.1. Definición y etapas del proceso de compostaje.....	26
1.4.2. Condiciones para el proceso de compostaje.....	28
1.4.3 Sistemas de compostaje.....	31
1.4.4. Evaluación del grado de madurez un compost	33
1.5. UTILIZACIÓN DEL COMPOST	41
1.5.1 Uso como enmienda orgánica.....	42
1.5.2. Uso como sustrato de cultivo.....	43
1.5.3. Legislación medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo.	44
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	55
3. MATERIAL Y MÉTODOS	58

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	58
3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	61
3.2.1. Características de los residuos utilizados	61
3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado.....	63
3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	64
3.3.1. Cálculo y preparación de las mezclas a compostar	64
3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje	66
3.4. MÉTODOS ANALITICOS.....	68
3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....	70
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
4.1. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE .	72
4.2 EVOLUCION DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE: pH, CONDUCTIVIDAD	
ELÉCTRICA Y POLIFENOLES SOLUBLES.....	77
4.2.1. Evolución de pH.....	77
4.2.2. Evolución de la conductividad eléctrica	79
4.2.3. Evolución de polifenoles solubles	81
4.3 EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA.....	83
4.3.1. Evolución del contenido de materia orgánica	83
4.3.2. Evolución del contenido de cenizas.....	84
4.3.3. Evolución de la pérdida de materia orgánica	85
4.3.4. Evolución del contenido de carbono orgánico total.....	87
4.3.5. Evolución del contenido de nitrógeno total	88
4.3.6. Evolución de la relación COT/NT	90
4.3.7. Contenido de fósforo, potasio y sodio	92
4.4. PARÁMETROS INDICATIVOS DE CALIDAD DEL COMPOST	94
4.4.1. Capacidad de cambio catiónico	94
4.4.2. Índice de germinación	95
5. CONCLUSIONES.....	97
6. BIBLIOGRAFIA	100

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.1:** Riesgos que debemos cuestionar relacionados con los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995)
- Tabla 1.2:** Conductividad eléctrica de diferentes residuos (Navarro y col., 1995)
- Tabla 1.3:** Cantidad de residuos urbanos recogidos en España en 2012 (MAGRAMA 2015a)
- Tabla 1.4:** Características de residuos de poda y jardinería (Montemurro y col., 2009; Barrena y col., 2011b; Hernández-Apolaza y Guerrero, 2008)
- Tabla 1.5:** Principales características analíticas de residuos vegetales individuales recogidos en plantas de compostaje de restos verdes
- Tabla 1.6:** Producción y destino de lodos en España (MAGRAMA, 2015)
- Tabla 1.7:** Parámetros agronómicos, patógenos y contaminantes orgánicos para caracterizar la composición de lodos
- Tabla 1.8:** Composición media de los lodos de depuradora generados en España (Pérez, MD y Moreno, J.2008)
- Tabla 1.9:** Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990 de 29 de Octubre, donde se regula la normativa actualmente vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo
- Tabla 1.10:** Condiciones deseables durante el proceso de compostaje
- Tabla 1.11:** Ventajas y desventajas de los sistemas de compostaje
- Tabla 1.12:** Legislación y directrices referentes al uso de compost en agricultura
- Tabla 1.13:** Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el Real Decreto 506/2013
- Tabla 1.14:** Propuesta de los requerimientos de calidad del compost, Posiblesparámetros y valores límite de los requisitos de calidad mínima del producto. “Fin de la condición de residuos” (Comisión Europea, 2014)
- Tabla 1.15:** Características de los compost como sustrato de cultivo o componente de los sustratos de cultivo, según el RD 865/2010

- Tabla 1.16:** Niveles máximos de microorganismos en sustratos de cultivo de origen orgánico, anexo VI RD 865/2010
- Tabla 1.17:** Niveles máximos de metales pesados en sustratos de cultivo, anexo VI RD 865/2010
- Tabla 3.1:** Características de los materiales utilizados como ingredientes en las pilas de compostaje
- Tabla 3.2:** Proporciones de materiales en las pilas de compostaje en peso seco.
- Tabla 3.3:** Fecha de muestreo de las pilas de compost
- Tabla 3.4:** Volteos realizados en la pila de compost C1 y C2
- Tabla 4.1:** Índice exotérmicos (EXI), T máxima y mínima promedio del proceso y nº de días con fase termófila ($T > 40^{\circ}\text{C}$).
- Tabla 4.2:** Evolución de la capacidad de intercambio catiónico en pilas durante el proceso de compostaje
- Tabla 4.3:** Evolución del índice de germinación en pilas durante el proceso de compostaje



ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1:** Clasificación de los biorresiduos de competencia Municipal (MAGRAMA, 2015)
- Figura 1.2:** Esquema de tratamiento y generación de lodos de depuradora (MAGRAMA,2015)
- Figura 1.3:** Destino de los lodos en España 8MAGRAMA,2015)
- Figura 3.1:** Descarga de Lodo
- Figura 3.2:** Hoja de palmera triturada
- Figura 3.3:** Poda de morera
- Figura 3.4:** Volquete auto-cargable (Dumper) y sistema de riego y control de temperatura
- Figura 3.5:** Mezclado/ volteo de pila
- Figura 3.6:** Fases de montaje de las pilas: a) fase 1: Base vegetal, b) fase 2: incorporación del lodo, c) fase 3: pre-mezcla y d) fase 4: incorporación capa vegetal y mezcla
- Figura 4.1:** Evolución de la temperatura de la pila C1, durante el proceso de compostaje.
- Figura 4.2:** Evolución del incremento térmico experimentado en la pila C1, durante el proceso de compostaje.
- Figura 4.3:** Evolución de la temperatura de la pila C2, durante el proceso de compostaje.
- Figura 4.4:** Evolución del incremento térmico experimentado en la pila C2, durante el proceso de compostaje.
- Figura 4.5:** Evolución del pH en el compost C1
- Figura 4.6:** Evolución del pH en el compost C2
- Figura 4.7:** Evolución de la CE en el compost C1
- Figura 4.8:** Evolución de la CE en el compost C2
- Figura 4.9:** Evolución de polifenoles solubles en el compost C1
- Figura 4.10:** Evolución de polifenoles solubles en el compost C2
- Figura 4.11:** Evolución del contenido de MO en el compost C1
- Figura 4.12:** Evolución del contenido de MO en el compost C2

Figura 4.13: Evolución del contenido de cenizas en el compost C1

Figura 4.14: Evolución del contenido de cenizas en el compost C2

Figura 4.15: Evolución de la pérdida de MO en el compost C1

Figura 4.16: Evolución de la pérdida de MO en el compost C2

Figura 4.17: Evolución del COT en el compost C1

Figura 4.18: Evolución del COT en el compost C2

Figura 4.19: Evolución del NT en el compost C1

Figura 4.20: Evolución del NT en el compost C2

Figura 4.21: Evolución de la relación COT/NT en el compost C1

Figura 4.22: Evolución de la relación COT/NT en el compost C2

Figura 4.23: Evolución del contenido de P en el compost C1

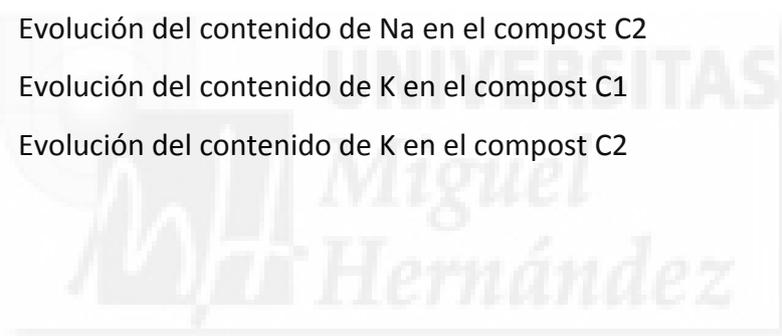
Figura 4.24: Evolución del contenido de P en el compost C2

Figura 4.25: Evolución del contenido de Na en el compost C1

Figura 4.26: Evolución del contenido de Na en el compost C2

Figura 4.27: Evolución del contenido de K en el compost C1

Figura 4.28: Evolución del contenido de K en el compost C2



INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

1.1 RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

Una de las principales características de nuestra sociedad de consumo en la que vivimos, es la velocidad a la que se generan los residuos, que es muy superior a la capacidad de hacerlos desaparecer.

El problema surge cuando la actividad humana; y en este caso, la sobrepoblación y la falta de respeto sobre el medio ambiente, hace generar una cantidad de materia orgánica cuya integración en los ciclos naturales no se realiza con la adecuada velocidad, provocando una acumulación desmesurada. Esta acumulación de residuos provoca una serie de problemas ambientales importantes sino se gestiona de forma adecuada.

1.1.1 Tipos de riesgos medioambientales.

Los riesgos medioambientales asociados a los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995) son:

- La degradación física, química y biológica del suelo
- La contaminación de aguas superficiales y subterráneas
- La contaminación atmosférica
- La contaminación de la cadena trófica
- Los problemas sanitarios

1.1.2 Principales agentes contaminantes

Los principales agentes que inducen los riesgos medioambientales anteriormente comentados son:

- ⇒ La presencia de metales pesados y otras sustancias tóxicas
- ⇒ La existencia de microorganismos patógenos
- ⇒ El exceso de nutrientes o la deficiencia o demanda de los mismos
- ⇒ Solubilidad de sales en exceso: salinidad
- ⇒ Presencia de materiales no biodegradables
- ⇒ Otros agentes.

Como orientación, en la **Tabla 1.1** se muestran los principales agentes contaminantes, así como una correlación entre éstos y los diferentes residuos estudiados, con el fin de evaluar su mayor o menor presencia en cada residuo. Es importante mencionar que aquellos residuos derivados de procesos de transformación de productos agrícolas y ganaderos, así como los residuos urbanos (basuras y lodos), son los materiales a los que en general, se les debe mostrar una mayor atención por la posible presencia de agentes contaminantes y componentes no biodegradables.

Tabla 1.1. Riesgos que debemos cuestionar relacionados con los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995).

RESIDUO	Metales pesados	Sustancias tóxicas	Patógenos	Exc. / Dem. nutrientes	Sales en exceso	Materiales no biodegradables
Residuo ganaderos			×	×		
Abonado verde				×		
Residuos de cosechas		×		×		
Agroindustriales	×	×	×	×	×	×
Basuras urbanas	×	×	×	×	×	×
Lodos de depuradora	×	×	×	×	×	×

• **Metales pesados y otras sustancias tóxicas**

– *Elementos potencialmente tóxicos*

Se consideran elementos potencialmente tóxicos aquellos elementos que no tienen funciones esenciales y que poseen una elevada toxicidad (As, metales pesados, etc.) y aquellos que son esenciales pero tóxicos en determinadas concentraciones (Mo, Zn, Cu...).

– *Compuestos orgánicos potencialmente tóxicos*

Existe una enorme variedad de compuestos orgánicos potencialmente perjudiciales para el medio ambiente, los cuales se agrupan en diversas familias o categorías, las principales de las cuales, de acuerdo a un estudio a nivel europeo realizado en 2004 (Amlinger y col., 2004) se muestran a continuación:

- Bifenilos policlorado (PCB)
- Dibenzodioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCCD y PCCF)
- Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHS)
- Pesticidas clorados y compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX)
- Sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS)
- Nonifenol (NPE)
- Ftalatos: dietilhexil ftalato (DEHP), butilbencil ftalato (BBP) y dibutil ftalato (DBP)

Su determinación resulta muy compleja y cara, de manera que la realización de análisis preventivos rutinarios conllevaría unos costes altos para el sector del tratamiento del residuo. A diferencia de los metales pesados que salvo pérdidas por lixiviación se concentran en el compost final a causa de la degradación de la materia orgánica, los contaminantes orgánicos pueden desaparecer en mayor o menor medida durante el compostaje, no sólo por su mineralización, sino por su degradación parcial hasta formas más resistentes, volatilización y nebulización al unirse a microgotas de vapor de agua.

- **Patógenos**

La presencia de organismos patógenos es prácticamente inherente al concepto de residuo. Es uno de los problemas más importantes que se dan en los materiales residuales frescos y que pueden afectar al hombre. Por ello resulta importante realizar procesos de acondicionamiento que nos permitan controlar y eliminar este riesgo tan importante el mantenimiento de temperaturas adecuadas. Durante el proceso de compostaje toda la masa del producto facilita la eliminación de patógenos.

Los contaminantes bióticos (virus, bacterias, hongos, protozoos, helmintos, etc.), independiente de su tipología, han sido poco estudiados a pesar de que constituyen

un gran riesgo para los ecosistemas, debido a la alteración de los sistemas biológicos que ocasionan la entrada de microorganismo ajenos a éstos.

- **Exceso y Demanda de nutrientes**

Cuando se añaden residuos frescos al suelo un riesgo que se puede plantear es la demanda inicial de nutrientes por parte del propio residuo para activar los procesos biológicos, pudiendo aparecer deficiencias de nitrógeno para el cultivo, debido a la competencia estrecha por este elemento entre los microorganismos y la planta.

Otra situación que puede derivarse del vertido o uso inadecuado de estos residuos es la deficiencia de oxígeno. Los materiales frescos y con alto contenido orgánico, cuando son enterrados a una mayor profundidad que la superficie, presentan dificultades para la mineralización por falta de oxigenación lo que produce la formación de compuestos tóxicos. Los residuos frescos, pueden provocar situaciones de deficiencia de oxígeno que se traducen en procesos de eutrofización.

- Exceso de nutrientes

Por otro lado una desmesurada aplicación de fertilizantes nitrogenados así como una inadecuada gestión de residuos de naturaleza orgánica provoca que los niveles de nitratos en aguas superficiales y subterráneas sea cada vez mayor. Este hecho puede ocasionar problemas graves de salud pública, pues al ingerirse a través del agua potable, puede ser precursor de compuestos de naturaleza tóxica para el organismo.

La eutrofización, desarrollo excesivo de algas o plantas acuáticas, se manifiesta cada vez más a menudo en los sistemas acuáticos. La presencia excesiva de las algas consume el oxígeno disuelto, en ocasiones hasta el agotamiento de las reservas, provocando la muerte por asfixia de la fauna y de la flora. Las algas se desarrollan cuando sus condiciones ambientales son favorables: temperatura cálida, sol, agua rica en nutrientes y en particular en nitrógeno y fósforo, siendo este último el factor limitante.

- **Salinidad**

La presencia de sales solubles puede influir desfavorablemente sobre la producción agrícola. Los residuos de naturaleza orgánica suelen presentar valores elevados de salinidad. Los valores que se muestran en la **Tabla 1.2** son orientativos de la presencia de sales solubles en diferentes residuos, pues la variabilidad de este parámetro es muy elevada.

La salinización, acumulación excesiva de sales en el suelo, afecta a la absorción hídrica del cultivo. Este proceso depende más de la cantidad total de sales que de los distintos iones que la componen.

El problema de la salinidad debe abordarse de forma conjunta al contenido total de sales, las especies iónicas del residuo y las características del suelo. Además hay que tener en cuenta la sensibilidad del vegetal y las condiciones climáticas de la zona.

Tabla 1.2. Conductividad eléctrica de diferentes residuos (Navarro y col., 1995)

RESIDUO	VALOR (dS/m)
Lodo de depuradora	0,8- 11
Gallinaza	5,7
Estiércol de oveja	2,8- 7
Estiércol de ternero	4,7
Estiércol de vaca	4,0
Estiércol de conejo	1,0- 2,9
Purín de cerdo	5,0-12
Piel de almendra	7,1
RSU	3,8- 10

1.2. RESIDUOS DE PODA Y DE JARDINERÍA

Los residuos de poda y jardinería desempeñan un papel fundamental, ya que logran alcanzar, el equilibrio de nutrientes y condiciones físicas, que permiten la formación de una mezcla adecuada facilitando el proceso y contribuyendo a la obtención de un producto de mayor calidad.

1.2.1. Origen de los residuos de poda y jardinería

Los residuos vegetales procedentes de las zonas verdes y la vegetación privada y pública, al igual que el origen de los materiales estructurantes que se ensayan (hoja de palmera molida y morera), se incluyen dentro de la denominación de *Biorresiduo*. En la **Ley 22/2011**, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados se define el término ***biorresiduo*** como residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimentarios y de cocinas procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimiento de venta al por menor, así como residuos comparables procedentes de plantas de procesamiento de alimentos. En la **Figura 1.1** se muestra la clasificación de los biorresiduos según MAGRAMA, 2015.



Figura 1.1. Clasificación de los biorresiduos de competencia Municipal

(MAGRAMA, 2015).

Los residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal; a efectos de su gestión pueden subdividirse en dos corrientes específicas que se deben gestionar de forma diferenciada:

- **Residuos de Jardinería**

Fracción Vegetal en forma de restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso que procede de servicios de jardinería (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. El césped por su alto contenido en humedad y por su composición, puede dar problemas de emisiones de olores.

- **Poda**

La poda está constituida por Fracción Vegetal en forma de restos vegetales de tamaño grande 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) (MAGRAMA, 2015). Los residuos más problemáticos son las hojas de palmera, ya que sus fibras se enredan en las trituradoras y disminuye su rendimiento.

Los residuos de poda y de Jardinería utilizados en este estudio son de morera y de hoja de palmera datilera triturada.

- ***Morus alba L.***

- Familia: *Moraceae*
- Nombre científico: *Morus alba L.*
- Características: árbol pequeño de 10-13 m de altura. Hojas dispuestas de forma alternada, sobre dos filas a lo largo del ramillo, son grandes de 6-12 y hasta 20 cm, rugosas por ambas caras, asimétricas y algo acorazonadas.

La Moreras son árboles originarios de las zonas templadas de Asia, a unos 960 metros de altitud, pero ha sido introducida y cultivada en muchas zonas.

Se trata de un árbol que ha sido históricamente cultivado para ser el alimento de los gusanos de seda y es un árbol de sombra por excelencia, por lo que admite dos podas asiduas, una poda de formación y otra poda de mantenimiento.

▪ ***Phoenix dactylifera* L. (Palmera datilera)**

- Familia: *Arecaceae*
- Nombre científico: *Phoenix dactylifera* L.
- Características: palmera de hasta 30 m altura con hojas pinnada de 6-7 cm con tacto liso, foliosos lanceolados y con pecíolo con espinas.

El clima donde habita la Palmera datilera se encuentra de forma natural en altitudes comprendidas entre los 0-200 metros de altitud, prefiriendo exposiciones soleadas.

Se trata de la palmera más conocida y también está muy extendida en las zonas calidad por su cultivo de dátiles. Puede llegar hasta los 600 años de vida aunque muere antes por rotura del viento.

En las zonas turísticas y urbanas, especialmente del sur y el sureste español y las áreas insulares, existe una mayor profusión de especies palmáceas. Su manejo y mantenimiento necesita de estrategias específicas debido al gran volumen de residuos que se genera en cortos periodos del año debido a la estacionalidad en su mantenimiento (poda, recortes etc.).

1.2.2. Producción y destino de los restos de poda y jardinería

La generación de restos de poda y de jardinería se debe, mayoritariamente, a las actividades de mantenimiento de las zonas verdes de espacio público. Con la nueva tendencia urbanística enfocada hacia un mayor ratio de parques y jardines municipales por habitante, se ha incrementado progresivamente el volumen generado de estos restos. Además, su incorrecta gestión supone la pérdida de materia orgánica potencialmente valorizable en otros usos, por lo que resulta necesaria la introducción de tecnologías y procesos que sean capaces de recuperar aquellos materiales contenidos en los desechos, reintroduciéndolos en el ciclo productivo.

La gestión de residuos de poda y de jardinería están dentro de la gestión de los residuos urbanos, que queda regulada mediante la **Ley 10/2000**, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunitat Valenciana, dictada como norma adicional de protección en base a la competencia autonómica reconocida en el artículo 148.1.23 de la Constitución Española.

En el ámbito de la Comunidad Valenciana, no se dispone de reglamentación específica. Sin embargo, el vigente Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana (Decreto 81/2013 de 21 de junio, del Consell de aprobación definitiva del Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana (PIRCV), [2013/6658]), establece un modelo de gestión de los residuos urbanos ordenado que enfatiza la recuperación de materia orgánica de calidad a nivel de acera y de materia inorgánica de alta calidad en áreas de aportación, destinándose los residuos orgánicos a planta de compostaje y las fracciones de papel/ cartón, vidrio y envases ligeros a plantas de clasificación y de valorización.

Por otro lado, en consonancia con la jerarquía de residuos y con objeto 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.

Los tratamientos más habituales de la fracción orgánica de los residuos urbanos son el compostaje y la biometanización.

Los requisitos mínimos para la gestión de biorresiduos y los criterios de calidad para el compost y el digestato procedentes de biorresiduos se ajustarán a lo establecido al efecto por la normativa comunitaria y la normativa básica estatal que se dicte en la materia.

En el año 2012 la **cantidad total estimada de residuos de competencia municipal** recogidos en España fue de unos 21,2 millones de toneladas. Las cantidades que se indican en la siguiente **Tabla 1.3** corresponden a residuos domésticos y comerciales, procedentes de hogares y del sector servicios (comercio, oficinas e

instituciones) gestionados por las Entidades Locales, no incluyéndose los residuos comerciales gestionados por canales privados distintos al municipal.

Tabla 1.3. Cantidad de residuos urbanos recogidos en España en 2012 (MAGRAMA 2015a).

Modalidad de recogida		Cod. LER -RESIDUO	T/año	%
Residuos mezclados	20 03 01	Mezclas de residuos municipales	17.911.465	85
	20 01 01	Papel y cartón	1.085.574	
	15 01 01	Envases de papel y cartón		
	20 01 02	Vidrio	8.818	
Residuos recogidos	20 01 08	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	547.564	15
separadamente	20 02 01	Residuos biodegradables de parques y jardines	249.101	
	15 01 06	Envases mezclados	641.266	
	15 01 07	Envases de vidrio	726.729	
TOTAL			21.170.517	100

1.2.3. Características de los residuos de poda y jardinería

A menudo se les denomina “agentes estructurantes” por su función de aportar estructura, porosidad y resistencia a la compactación a la mezcla a compostar. Sin embargo, estos materiales aportan mucho más.

Como se puede observar en la **Tabla 1.4.** en general estos materiales se caracterizan por una baja humedad a modo que pueden compensar y absorber el exceso de humedad habitualmente presente en los residuos orgánicos. Además, presenta una elevada cantidad de materia orgánica y carbono orgánico, principalmente lignina, celulosa y hemicelulosa, de modo que su relación C/N es alta. Por tanto se consideran ideales para compensar las bajas relaciones C/N de muchos residuos orgánicos y minimizar así las pérdidas de nitrógeno en el proceso de compostaje.

La poda verde se diferencia de las dos fracciones por un mayor contenido en humedad, materia orgánica y nitrógeno. Esta variabilidad es debida a la composición de poda según el momento en que se realiza y el tiempo de almacenamiento en la planta.

Tabla 1.4. Características de Residuo de poda y jardinería (Montemurro y col.,2009; Barrena y col.,2011b; Hernández-Apolaza y Guerrero, 2008)

PARAMETRO	PODA VERDE	PODA FINA (< 10 mm)	PODA GRUESA (10-20 mm)
Materia seca (%)	40,3	92	83
Materia orgánica (%)	84,78	88,8	74,8
pH	6,67	7,53	7,91
Conductividad Eléctrica (dS/m)	2,08	1,74	1,09
Carbono Orgánico (g/Kg)	453	279	506
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	1,10	1	1
Nitrógeno Total (g/kg)	14,8	0,5	1,2
C/N	30,6	52	42

En este ensayo vamos a utilizar, como “agente estructurante” un residuo de morera y un residuo de hoja de palmera triturada. En la **Tabla 1.5**, podemos observar las principales características analíticas de residuos vegetales individuales recogidos en plantas de compostaje de restos verdes (Proyecto OPTIVER, 2012).

Observando los datos de la **Tabla 1.5** podemos ver que los restos con mayor contenido en hojas, y por tanto menos leñosos, tienden a presentar una mayor humedad, relación C/N más baja y mayor contenido nutritivo, a pesar de la gran variación existente entre los diferentes materiales, que destaca en nutrientes como el calcio donde hay diferencias superiores al orden de magnitud de materiales. Además, en estos residuos menos leñosos existe una mayor disponibilidad de los nutrientes debido no sólo a las formas químicas en las que se encuentran sino a la menor resistencia física de las estructuras vegetales donde se engloban.

Por el contrario, los restos vegetales que hemos elegido, restos de morera y restos de hoja de palmera triturada, presentan unas características analíticas ideales para compensar las características de los residuos orgánicos, como los lodos de depuradora, ya que son materiales más o menos leñosos.

Tabla 1.5 Principales características analíticas de Residuos Vegetales individuales recogidos en plantas de compostaje de restos verdes

	HUMEDAD (%)	COT (%)	Norg (%)	C/N	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
ALGARROBO	46,6	47,9	1,64	29,1	0,109	0,963	0,993	0,163
BUGANVILLA	71,1	44,2	2,02	21,9	0,204	1,842	1,550	0,433
FALSA PIMIENTA	63,7	52,4	2,08	29,2	0,114	2,008	0,400	0,096
MORERA	51,6	42,1	1,92	22,0	0,08	1,16	3,38	0,13
PALMERA COMUN	53,6	50,1	0,81	61,9	0,09	1,89	0,81	0,49
PINO	42,8	60,4	0,71	85,1	0,069	0,423	0,607	0,098

1.3. LODOS DE DEPURADORA

1.3.1. Origen de los Lodos

Los **lodos de depuradora** son residuos urbanos que se originan en la depuración de las aguas residuales urbanas, 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 empleados y por el tratamiento a que es sometido el lodo.

Los **lodos** generados en los procesos de tratamiento del agua residual son olorosos y ricos en patógenos por lo que deben de ser tratados y estabilizados. Por otra parte, para reducir los costes de tratamiento, transporte y almacenamiento debe reducirse su volumen mediante la eliminación parcial de agua. El espesamiento, acondicionamiento, deshidratación y secado del lodo pueden disminuir el contenido

de agua y aumentar el porcentaje de sólidos del 5 al 10%, reduciendo el volumen de lodo a la mitad.

Así, los lodos se **espesan**, para reducir su contenido en agua. Los lodos físico-químicos se decantan por gravedad y los biológicos suelen ir a un espesador por flotación. El agua extraída vuelve a la cabecera de la línea de agua. A continuación, mediante la **estabilización biológica** (aerobia o anaerobia), se consigue la reducción del contenido en materia orgánica del fango. En la estabilización aerobia, la materia orgánica se transforma en CO₂ mientras que, con una digestión anaerobia, la materia orgánica se transforma en gas metano. En caso de producirse metano en cantidad suficiente, se acumula en el gasómetro, para generar energía, el exceso de gas metano se quema en una antorcha, para evitar su emisión a la atmósfera. En algunas EDAR se realiza una **inertización** de los fangos mediante adición de cal en lugar de una estabilización, así no se reduce el contenido en materia orgánica, pero debido al pH alcalino que se consigue, se matan las bacterias.

Con el **acondicionamiento** se prepara el lodo para su deshidratación, rompiendo la afinidad del agua con el resto de la materia que contiene. Se realiza por vía química, mediante la adición de polielectrolito. Por último, se realiza una **deshidratación** para reducir su volumen y el coste de su transporte. Generalmente, se utilizan filtros banda, filtros prensa o centrífugas. El agua extraída vuelve a la cabecera de la línea de agua.

Los fangos obtenidos, convenientemente caracterizados, se envían a su destino definitivo (aplicación al suelo, compostaje o vertedero, etc.). En ocasiones, puede ser conveniente someter los fangos a un proceso de **secado térmico**, previo a su destino final.

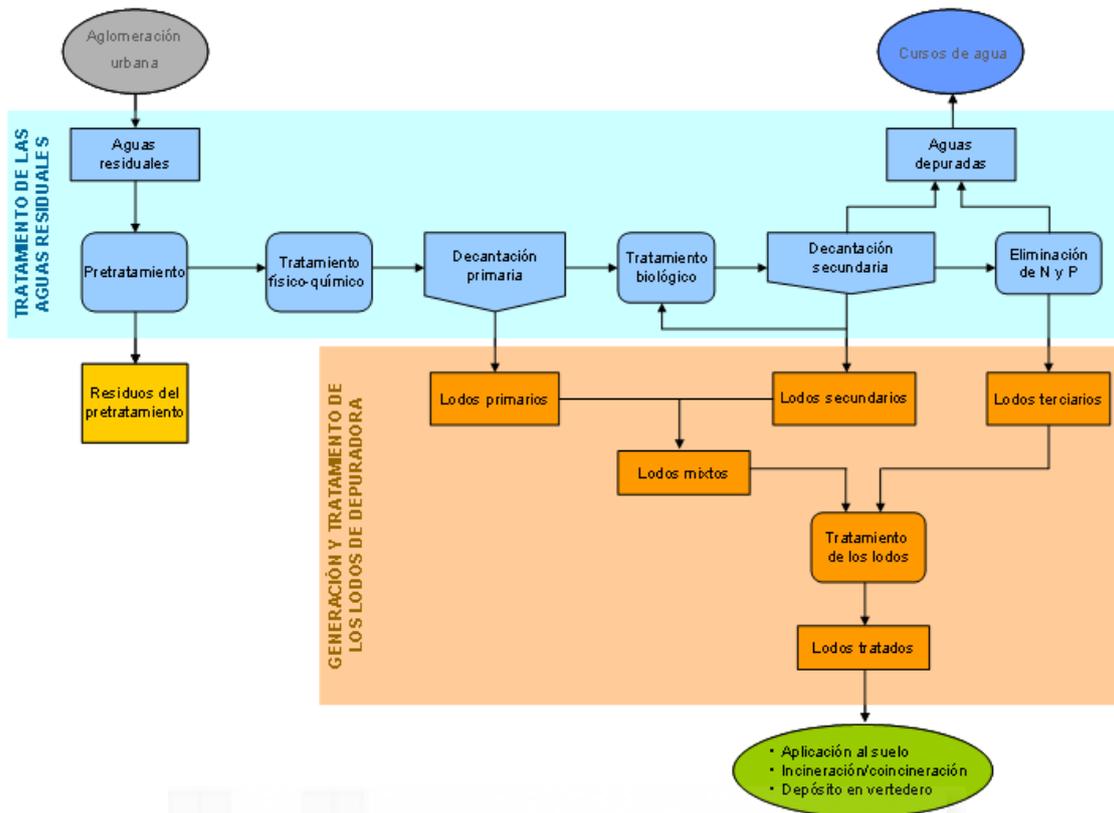


Figura 1.2. Esquema de tratamiento y generación de lodos de depuradora. MAGRAMA 2015.

1.3.2. Producción y Destino de los Lodos

Según los datos del Registro Nacional de Lodos, en España se producen anualmente alrededor de 1.200.000 toneladas (en materia seca, m.s.) de estos lodos de depuradora.

En la **tabla 1.6** se puede observar la producción y destino de los lodos de instalaciones por comunidad. Según los datos del Registro Nacional de Lodos ha primado como destino final su utilización agrícola (aproximadamente el 80% de los generados). Se ha logrado reducir en gran medida el depósito en vertedero (aproximadamente el 8% actualmente) y la incineración va creciendo (entorno al 4%).

Tabla 1.6. Producción y destino de Lodos en España (CC.AA. España, 2012)

	Producción total	Uso agrario	Vertedero	Incineración	Otros
España	1.130.761	914.92	80.490	75.258	60.08
Andalucía	110.109	93.892	14.315	0	1.902
Aragón	29.537	9.106	431	20.000	0
Asturias	2.548	1.688	836	0	25
Balears	44.221	20.796	4.122	0	19.303
Canarias	31.422	0	30.966	0	456
Cantabria	27.800	18.127	3.827	0	5.846
Castilla y León	64.910	60.686	3.929	0	294
Castilla- La Mancha	58.112	51.970	1.132	0	5.009
Cataluña	135.058	107.320	1.231	24.668	1.840
C. Valenciana	198.690	184.583	1.802	163	12.14
Extremadura	14.357	11.423	2.892	0	43
Galicia	110.346	96.318	5.030	2.693	6.305
Madrid	197.345	185.656	5.373	1.234	5.082
Murcia	34.515	33.194	1.098	0	223
Navarra	12.631	12.313	0	0	319
País Vasco	39.138	8.838	3.505	25.518	1.277
Rioja (La)	19.040	19.022	0	0	19
Ceuta y Melilla	982	0	0	982	0

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Catálogo de residuos (2013).

<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/68.pdf>

Figura 1.3. Destino de los Lodos en España (CC.AA. España, 2012)

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Catálogo de residuos (2013).

<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/68.pdf>

1.3.3 Características de los Lodos de depuradora

Las características de los lodos de depuradora dependen fundamentalmente:

1. Origen del Efluente
2. Tecnología y tipo de depuración
3. Tratamiento final del lodo
4. Época del año

En general, el lodo de depuradora es un material con un elevado contenido en humedad, materia orgánica y nitrógeno. Por ello, es viable su uso como enmienda de suelo o incluso como fertilizante orgánico (siempre que no haya elementos tóxicos). 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 a recursos). No obstante, la presencia de elementos tóxicos (metales y compuestos orgánicos) y de microorganismos patógenos hace necesaria una caracterización exhaustiva de su reciclaje o valorización.

La caracterización de la composición de los lodos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales supone determinar parámetros y niveles como: parámetros agronómicos, patógenos y contaminantes orgánicos (**Tabla 1.7**).

Tabla 1.7. Parámetros agronómicos, patógenos y contaminantes orgánicos para caracterizar la composición de 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	DEHP	Níquel
Materia orgánica oxidable	totales	NPE	Mercurio
Nitrógeno total	Coliformes	PAH	Plomo
Relación C/N	fecales	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			

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

- Materia orgánica: poseen niveles 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 derivados de la aplicación agrícola de los 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 cultivo sensibles a cloruro.
- Nutrientes: los contenidos en nitrógeno y fósforo, le confiere un importante valor fertilizante. Además, constituye 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 personas.

En la tabla 1.8, se expone la composición media de los lodos generados en España y publicada por el MARM en 2009.

Tabla 1.8. Composición media de los lodos de depuradora generados en España (MARM, 2009).

PARAMETROS AGRONÓMICOS	RANGO
pH	5,5 - 12
Conductividad (dS/m)	2 - 12
Carbono total (%)	15 - 55
Carbono oxidable (%)	10 - 25
Materia orgánica oxidable (%)	10 - 35
Nitrógeno total	3,5 - 4,5
Relación C/N	10
P total (mg/kg)	3.000 - 4.000
P asimilable (mg/kg)	2.500 - 3.000
Ca total (mg/kg)	10.000 - 120.000
Ca asimilable (mg/kg)	100 - 30.000
Mg total (mg/kg)	2.000 - 13.000
Mg asimilable (mg/kg)	2.000
K total (mg/kg)	1.000 - 10.000
K asimilable (mg/kg)	1.500
Fe total (mg/kg)	5.000 - 70.000
Fe asimilable (mg/kg)	15
Na asimilable (mg/kg)	1.000 - 1.500
METALES PESADOS	
Cadmio (mg/kg)	0
Cromo (mg/kg)	135
Cobre (mg/kg)	250
Mercurio (mg/kg)	1
Níquel (mg/kg)	40
Plomo (mg/kg)	80
Zinc (mg/kg)	710

Tabla 1.8. Composición media de los lodos de depuradora generados en España (MARM, 2009) (continuación).

COMPUESTOS ORGÁNICOS	VALOR
AOX (mg/kg)	275
DEHP (mg/kg)	8
NPE (mg/kg)	10
PCB (mg/kg)	0,1
PAH (mg/kg)	0,9
LAS (mg/kg)	4515
DIOXINAS	7
PBDE (ng/g)	380

1.3.4. Métodos de aprovechamiento y tratamiento

La eliminación de los residuos constituyen un problema de primer orden para todos los municipios en general y en especial para las grandes ciudades, existiendo una tendencia para reducirlos, reciclarlos y reutilizarlos de una forma respetuosa con el medio ambiente.

La aplicación del principio de jerarquía de residuos a la gestión de los lodos supone, en primer lugar, priorizar la aplicación al suelo, en segundo lugar emplear otras formas de valorización incluyendo la energética y, como última opción, la eliminación en vertedero. Tanto el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales-EDAR II PNLD (2008-2015), como el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 hacen referencia a este principio de jerarquía.

La reutilización de lodos de depuradora es controvertida debido a que si tienen un gran potencial para la fertilización de suelos agrícolas (porque son ricos en materia orgánica y elementos fertilizantes como el nitrógeno y fósforo), también pueden poseer concentraciones elevadas de metales pesados y compuestos orgánicos difíciles de degradar por microorganismo patógenos presentes en las aguas residuales. La transformación mediante compostaje o anaerobia para la producción de biogás son alternativas para su reciclado.

La práctica más habitual de aprovechamiento es el empleo de los lodos en agricultura. El marco legal que regula la aplicación de los lodos de depuradora a los suelos agrícolas determina valores límites de metales pesados, que no deben de sobrepasarse y obliga a tratar los mismos por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan, de manera significativa, su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización, para poder aplicarlos en el terreno. Así mismo, obliga a considerar las necesidades nutritivas de las plantas para fijar las dosis de aplicación de forma que no se vea afectada la calidad de las aguas ni la calidad del suelo.

Los **procesos de tratamiento** disponibles para los lodos de depuradora son principalmente:

1. Digestión anaerobia mesofílica con o sin aprovechamiento energético del metano. En algunos casos el digestato se composte y en otros se somete a un secado térmico, que en ocasiones se destina a incineración.
2. Deshidratación y compostaje.
3. Deshidratación y secado térmico.
4. Deshidratación, secado térmico y compostaje.
5. Estabilización aerobia con o sin compostaje posterior.
6. Estabilización química.
7. Secado térmico e incineración. Secado térmico y co-incineración en cementeras.

El compostaje se plantea como una de las alternativas de tratamiento para los lodos, ya sean frescos o digeridos, consiguiéndose estabilizar la materia orgánica y su higienización. El elevado contenido de N de los lodos permite obtener un compost con gran valor agronómico. Existen numerosas experiencias del compostaje de lodos con otros materiales como la fracción orgánica de los residuos municipales y otros materiales. Debido a la baja relación C/N que presentan los lodos la elección del

material estructurante, como puede ser la fracción orgánica de los residuos municipales u otros materiales, es de gran importancia para su optimización.

1.3.5 Legislación medioambiental aplicada a la generación de Lodos

Los lodos de las depuradoras, tienen la peculiaridad respecto a otros tipos de residuos, de que su uso en el suelo está regulado por la **Directiva 86/278/CEE** relativa a la protección del medio ambiente y en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura, estableciendo el marco normativo que permite fomentar la valorización de los lodos de depuración mediante su aplicación a los suelos agrarios, garantizando simultáneamente una protección eficaz del medio ambiente.

Esta directiva se incorporó a la legislación española mediante el **RD 1310/1990** de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario. En él se designa al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y a las autoridades responsables de las Comunidades Autónomas en esta misma materia como los competentes en materia de aplicación y control de la citada directiva y se crea el Registro Nacional de Lodos (RNL).

Según la legislación vigente, **RD 1310/1990**, se permite la utilización en suelos agrícolas de los lodos de depuración cuando la concentración de metales pesados de los lodos y de los suelos receptores no supere ciertos límites y además, se controle la acumulación de los metales en las parcelas receptoras (**Tabla 1.9**).

La Directiva prohíbe la aplicación de los lodos de depuradora sin tratar y también prohíbe de manera explícita la aplicación de los lodos tratados para determinados cultivos y establece plazos para su aplicación en los cultivos autorizados.

También indica que la aplicación de los lodos debe de hacerse teniendo en cuenta las necesidades de la planta. Limita los contenidos de metales pesados y exige análisis periódicos de los suelos y lodos. Además, exige control estadístico de los lodos producidos, cantidades dedicadas a fines agronómicos, composición y características de los lodos, tipos de tratamiento e identificación del destinatario y lugar de aplicación.

Tabla 1.9. Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990 de 29 de Octubre, donde se regula la normativa actualmente vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo.

Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos		Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria		Valor límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años	
Elemento	Valores límite (mg kg ⁻¹ m.s.)		Valores límite (mg kg ⁻¹ m.s.)		Valores límite (kg Ha ⁻¹ año ⁻¹)
	pH<7	pH>7	pH<7	pH>7	
Cadmio	1	3,0	20	40	0,15
Cobre	50	210,0	1000	1750	12,00
Níquel	30	112,0	300	400	3,00
Plomo	50	300,0	750	1200	15,00
Zinc	150	450,0	2500	4000	30,00
Mercurio	1	1,5	16	25	0,10
Cromo	100	150,0	1000	1500	3,00

Con la finalidad de mejorar el sistema de información sobre la gestión de los lodos y mejorar el control de las aplicaciones agrícolas garantizando el uso adecuado de los lodos de depuración en el suelo, se aprobó la **Orden AAA/1072/2013**, de 7 de junio, sobre la utilización de lodos de depuradora en el sector agrario. Con la citada orden se establece un nuevo régimen jurídico que promueve la transparencia en materia de producción y gestión de residuos y asegura su trazabilidad.

En su Anexo I, *“información de la estación depuradora de aguas residuales”*, se regula la información que deben proporcionar los titulares de las depuradoras de aguas residuales al órgano competente de cada Comunidad Autónoma, referida a cada año natural. Entre otros datos se requiere la carga contaminante media tratada, el caudal tratado, el tratamiento aplicado tanto en la línea de aguas como de lodos, la cantidad de lodos tratados, su porcentaje de materia seca y el destino de los lodos.

En el Anexo II, *“documento de identificación del lodos”*, se detalla la información que debe acompañar a toda partida de lodos de depuración destinada a la actividad agraria, desde las instalaciones de tratamiento hasta las explotaciones agrarias donde se aplique y se actualiza la información que debe contener el Registro de Lodos. Este documento requiere el origen y el tratamiento del lodo, la cantidad transportada, su porcentaje en materia seca, su contenido en metales y diversos parámetros agronómicos y microbiológicos.

En el Anexo III, *“documento de aplicación de lodos”*, se recoge la información que los gestores deben cumplir con cada aplicación de lodos y guardar durante al menos tres años. Para este documento se necesitan datos de la instalación de tratamiento, del gestor, del usuario, de la parcela, de la cantidad y características del lodo, del cultivo, fecha de aplicación, etc.

En el Anexo IV, *“información anual de las aplicaciones de los lodos”*, se recoge la información que los gestores deben remitir a la Comunidad Autónoma de forma anual. En este documento se recoge la identificación de la instalación de tratamiento del lodo, del gestor, información de las características del lodo, cantidad aplicada, parcela, superficie, cultivo, etc.

La Comisión Europea trabaja actualmente, en la revisión de la citada Directiva de Lodos a fin de adaptarla al progreso técnico y científico y a las exigencias de otras legislaciones más recientes como la Directiva relativa a los residuos (2006/12/CE) que establece la jerarquía en la gestión de residuos (prevención, reducción, reutilización, reciclado y recuperación energética) y con la Directiva sobre vertido (1999/31/CE) que limita la posibilidad de eliminación en vertederos de los residuos biodegradables y prohíbe el vertido de residuos que no se hayan sometido a tratamiento. En la próxima Directiva sobre lodos se regulará probablemente, los tratamientos para la reducción de patógenos, la presencia de contaminantes orgánicos y la contaminación por metales pesados.

1.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE

El compostaje constituye un procedimiento adecuado de la valorización de los residuos orgánicos, incluyendo la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora. Este sistema de tratamiento de residuos orgánicos, reporta un beneficio ambiental ya que evita los riesgos de contaminación provocados por otras alternativas como, la incineración o el vertido y así facilitar un mejor aprovechamiento de la materia orgánica.

Los principales objetivos del proceso de compostaje son:

- Estabilización de la materia orgánica y la higienización, mediante la eliminación de patógenos y de las malas hierbas.
- Reducción del peso y volumen de los materiales que se van a compostar.

Con estos objetivos el uso agrícola del producto final obtenido, presentará efectos beneficiosos para el suelo y para los cultivos (Moreno-Casco y col., 2008)

1.4.1. Definición y etapas del proceso de compostaje

Podemos definir al compost como el producto que resulta del proceso de compostaje y maduración, constituido por una materia orgánica estabilizada semejante al humus, con poco parecido con la original, puesto que se habrá degradado dando partículas más finas y oscuras. Será el producto inocuo y libre de sustancias fitotóxicas, cuya aplicación al suelo no provocará daños a las plantas y permitirá su almacenamiento sin posteriores tratamientos ni alteraciones (Costa y col.,1991).

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos, que requiere una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termófila y una producción temporal de fitotoxinas, dando como productos de los procesos de degradación, dióxido de carbono, agua y minerales, así como una materia orgánica estabilizada, libre de fitotoxinas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos (Costa y col., 1991).

El hecho de que sea biooxidativo exige una condición biológica, que hace al compostaje diferente tanto de los procesos físicos y químicos como todos aquellos que no se realicen de forma aerobia. Además, debe distinguirse el compostaje de todos aquellos procesos naturales sin control alguno, los cuales suelen desembocar siempre en anaerobiosis más o menos acusadas.

La conversión de la materia orgánica inicial, biodegradable, al estado de materia orgánica humificada (humus), realizada durante el compostaje, es un proceso microbiológico influido por la naturaleza de los organismos presentes, como bacterias, hongos y actinomicetos, fundamentalmente. Durante el proceso de compostaje tiene lugar una sucesión de predominio de diferentes microorganismos; en función de la influencia de determinados factores, como la naturaleza química del sustrato que está siendo digerido con mayor intensidad, el contenido de humedad, la disponibilidad de oxígeno, la temperatura, la relación C/N y el pH, ciertos microorganismos se multiplican más rápidamente que otros, predominando en el medio de fermentación.

El proceso de compostaje conduce a la producción de dióxido de carbono, agua y minerales y, por último, a una materia orgánica estabilizada.

El compostaje debe, por tanto, tener como resultado un producto estabilizado, con un alto valor fertilizante para ser empleado en agricultura; además, el producto ha de ser fácilmente manipulado y almacenado, y su empleo directo en el suelo no debe provocar efectos adversos.

La evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje marca las diferentes etapas que nos determinan el grado evolutivo del material compostado. Las etapas que componen este proceso en condiciones aerobias y el tipo de microorganismo que actúan son las siguientes (Chen e Inbar, 1993):

1. **Etapas mesófila.** Al comienzo del proceso, la masa está a temperatura ambiente. A medida que la población de microorganismo se multiplica, la temperatura aumenta rápidamente. Es una etapa con carácter mesófilo, en la cual, entre los productos que se forman, destacan los ácidos orgánicos de cadena corta. La acidificación lleva consigo el descenso del pH. La temperatura se eleva hasta los 40 °C.

2. **Etapa termófila.** Alcanzados los 40 °C, la actividad mesófila cesa y se entra en una etapa termófila, en la que se distinguen dos fases:
 - Una fase inicial, en la cual la temperatura se eleva progresivamente, la acidez del medio evoluciona, apreciándose un aumento del pH, consecuencia directa de la presencia del ión amonio como producto de la degradación.
 - En una segunda fase, más lenta, hay un incremento mayor de la temperatura, alcanzándose una temperatura de 75 °C. En esta etapa se produce la destrucción de bacterias patógena, hongos y bacterias termofílicas. El aumento de la temperatura puede provocar pérdida de nitrógeno en forma amoniacal y el pH desciende ligeramente.
3. **Etapa de enfriamiento.** La temperatura desciende provocando la ralentización de la reacción y el calor generado es menos que el que se pierde. Al descender tanto la temperatura se recuperan las condiciones térmicas ambientales. El pH no sufre modificación apreciable.
4. **Etapa de maduración.** Tiene lugar a temperatura ambiente. En esta etapa se producen complejas reacciones secundarias de condensación y de polimerización, las cuales dan lugar al humus como producto final la etapa de maduración precisa de un período de tiempo más extenso que las etapas anteriores. Se detecta la presencia de sustancias dotadas de actividad antibiótica y la desaparición de patógenos.

1.4.2. Condiciones para el proceso de compostaje

Dado que el compostaje es un proceso bio-oxidativo y que depende fundamentalmente de la actividad microbiana, es de suma importancia controlar diferentes factores, que influyen en mayor o en menor grado, para conseguir la optimización de esta actividad. Estos factores están directamente relacionados con la naturaleza del sustrato o bien, con las condiciones de desarrollo del mismo. Tanto unos como otros aparecen tan íntimamente ligados entre sí, que es difícil de hacer una consideración individualizada.

La naturaleza del sustrato sobre el que actúan los microorganismos es otro factor relevante. Los principales residuos que se destinan a la producción de compost son de origen agrícola, ganadero, urbano (basuras y lodos), industrial y forestal.

Las características físicas, físico-químicas del sustrato que influyen en el compostaje son:

- A. El tamaño de las partículas, cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano, más rápido y completo será la reacción (mayor actividad química por unidad de masa). La experiencia demuestra que el tamaño debe de estar entre 1 y 5 cm de diámetro (Biddlestone y Gray,1991).
- B. La porosidad del sustrato, los sustratos con poca porosidad, como los lodos, purines, etc., es conveniente mezclarlos con otros materiales que confieran estructura apropiada para la aireación y la capacidad de retención hídrica, y que además serán preferentemente inertes, desde el punto de vista químico, con el fin de que no presenten reacciones simultáneas (Costa y col.,1991).
- C. La relación superficie/volumen de las partículas, esta relación tiene una influencia directa en la forma y la velocidad de degradación. La relación aire/agua en los intersticios de las partículas es igualmente importante; agua y oxígeno son indispensables para la actividad microbiológica y cuando la proporción es menor del nivel crítico, el metabolismo y la respiración disminuyen y se paralizan (Costa y col.,1991).
- D. Relación C/N: los valores más recomendables de esta relación para un rápido y eficiente compostaje están comprendidos entre 25 y 35 (Saña y Soliva.,1987; Costa y col.,1991). Si la relación tiene valores menores se producen pérdida de nitrógeno en forma de amonio y si por el contrario, la relación inicial es elevada, el proceso se prolonga siendo necesaria la adición de nitrógeno para rebajarla.
- E. Contenido en nutrientes. Los microorganismos del proceso del compostaje precisan elementos esenciales para su nutrición, desarrollo y reproducción. Entre estos están algunos micronutrientes (boro, manganeso, zinc, cobre, hierro, molibdeno y cobalto) aunque en poca cantidad, pueden llegar a ser tóxicos a

concentraciones altas. Estos elementos desempeñan un importante papel en la síntesis de enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporta intracelular y extracelular (Biddlestone y Gray,1991).

- F. pH: se puede compostar materiales dentro de un amplio rango de valore de pH (3-11). No obstante, los comprendidos entre 5,5 y 8 son los que se consideran óptimos, ya que en general los hongos toleran un amplio margen de pH (5-8) mientras que, las bacterias tienen un margen más estrecho pH (6-7,5) (Costa y col.,1991).

Condiciones Ambientales: en este apartado se consideran aquellos parámetros cuya correcta evolución es necesaria para que se desarrolle adecuadamente el proceso de compostaje.

- A. Temperatura: este parámetro varía durante el proceso de compostaje marcando las diferentes etapas que nos determina el grado evolutivo del material compostado desde el punto de vista termodinámico, la biodegradación se desarrolla a través de un proceso global exoenergético, constituido por diferentes etapas, mesófila, termófila, de enfriamiento y de maduración se consideran óptimas las temperaturas del intervalo 35-55 °C, ya que a temperatura más alta, los microorganismos mueren o se desactivan por encontrarse esporulados.

Por otra parte, la generación de temperaturas demasiado altas implica una mayor mineralización que conduce a la obtención de productos finales (Saña y Solvia, 1987).

- B. pH: la acidez inicial es la propia de los residuos a compostar y posteriormente desciende, para alcanzar y superar la neutralidad. En la etapa inicial del compostaje, los microorganismos actúan sobre la materia orgánica más lábil, liberando ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH inicial. Posteriormente, debido a un aumento en la concentración del ión amonio el pH va aumentando. Conviene tener en cuenta que aumentos grande en los valores de pH acompañados con elevadas temperaturas, supone la pérdida de nitrógeno en forma de amoniaco (Costa y col.,1991).

- C. Aireación: es imprescindible asegurar la presencia de oxígeno para el desarrollo del proceso de compostaje, pero siempre dentro de unos límites, ya que el exceso de aireación puede provocar el enfriamiento de la masa con la consiguiente disminución de la actividad microbiana. El nivel de oxígeno óptimo está dentro del intervalo 10-18% (Biddlestone y Gray,1991). El oxígeno no sólo es necesario para la respiración de los microorganismos y el metabolismo aerobio, sino también para oxidar algunas moléculas presentes en la masa a compostar.
- D. Humedad: los microorganismos necesitan cierta cantidad de agua para su metabolismo. El nivel óptimo de humedad está situado entre un 40 y 60%. La actividad microbiana se reduce considerablemente cuando el contenido en humedad está por debajo del 30%. Por debajo del 12% la actividad microbiana cesa y el proceso es extremadamente lento (Saña y Solvia,1987).

Tabla 1.10. Condiciones deseables durante el proceso de compostaje (Fermor,1993; Rynk et al., 1992)

CARACTERÍSTICAS	RANGO RAZONABLE	RANGO ÓPTIMO
Relación C/N	20:1-40:1	25:1-30:1
Contenido de Humedad	40-65%	50-60%
Concentración de oxígeno	Mayor al 5%	Mucho mayor al 5%
pH	5,5-9	6,5-8
Temperatura	45-66	55-60

1.4.3 Sistemas de compostaje

Los distintos sistemas de compostaje se diferencian en su nivel de complejidad, grado de control del proceso, método de ventilación empleado y que sean abiertos o cerrados.

Los diferentes sistemas de compostaje se pueden agrupar en dos grandes tipos:

Sistemas abiertos :

- a) **Compostaje en pilas estáticas:** formación de pilas de reducida altura, que se dejan sin movimiento. La aireación ocurre naturalmente a través del aire que fluye en forma pasiva a través de la pila. Puede producirse, en algunas zonas de la pila

anaerobiosis, generando malos olores, gases y líquidos no deseables. Por esto se debe de tener especial cuidado en la realización de la mezcla inicial, eligiendo materiales que permitan tener una adecuada porosidad de la pila durante el proceso. Es un proceso lento y no permite la obtención de un producto de alta calidad.

- b) Compostaje en pilas de volteo o en hileras:** el material se amontona en pilas alargadas al aire libre. El tamaño y la forma de las pilas dependerá del clima, material utilizado y la maquinaria disponible. Las pilas deben de ser volteadas de forma regular, ya sea con maquinaria (volteadoras) o en forma manual.
- c) Compostaje en pilas estáticas aireadas en forma pasiva:** el material a compostar se dispone en pilas y su aireación se produce a través de una red de tuberías perforadas que están colocadas en la parte inferior de la pila. La altura recomendada de la pila es de 1 a 1,5 metros. Se coloca una cubierta porosa (turba) para permitir un flujo adecuado de aire y así se evita la emisión de olores, ya que la turba presenta afinidad por las moléculas que lo causan y controlar la humedad.
- d) Compostaje en pilas aireadas forzadamente:** a diferencia del anterior, en este sistema se utiliza un compresor que succiona aire hacia el exterior o lo inyecta al interior de la pila. Este tipo de compostaje necesita una serie de equipamientos, como un compresor, red de tuberías, válvulas y sistema de control de presión de aire, temperatura y humedad, por lo que tiene un alto valor económico.

Sistemas Cerrados:

- a) Compostaje en reactores:** se lleva a cabo en un contenedor o recipiente cerrado. La principal ventaja es su rápida velocidad de descomposición (10-14 días) y que se necesita poco terreno. Sin embargo, presenta un alto coste en la instalación y operación (Mathur,1991).

Por último en la **Tabla 1.11** se indican las ventajas y desventajas de los distintos tipos de sistemas de compostajes.

Tabla 1.11. Ventajas y desventajas de los sistemas de compostaje (FAO).

MÉTODOS DE COMPOSTAJE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Pilas estáticas	<ul style="list-style-type: none"> - Una vez que la pila esta armada, necesitan volteos ocasionales para restaurar la porosidad. - Bajos costos 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostaje lento - Mayor riesgo de olores - Pilas deben ser pequeñas - Susceptibles a efectos climáticos.
Pilas de volteo o en hileras	<ul style="list-style-type: none"> - Permita el compostaje de un gran volumen de residuos. - La aireación permite un mejor secado y separación del material que las pilas estáticas 	<ul style="list-style-type: none"> - Susceptibles a efectos climáticos. - Requiere de una mayor cantidad de labores (volteos) - Problemas de olores. - Alta disponibilidad de terreno. - Alto costo en maquinarias
Pilas estáticas aireadas pasivamente	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere de volteo - Menos costos que la de aireación forzada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Susceptibles a efectos climáticos. - No apropiada para materiales de fácil compactación. - La mezcla inicial es crítica para mantener la aireación - Espacio para maquinarias.
Pilas aireadas forzadamente	<ul style="list-style-type: none"> - No se requiere de espacio para la maquinaria volteadora. - Menor tiempo de compostaje - Alcanza mayores temperaturas (muerte de patógenos) 	<ul style="list-style-type: none"> - En algunos casos seca demasiado la pila
Reactor	<ul style="list-style-type: none"> - No existe influencia climática. - Rápida descomposición. - Mejor calidad del producto final - Mejor uso del espacio 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto coste inicial y operacional.

1.4.4. Evaluación del grado de madurez un compost

La evaluación de la madurez de los productos compostados ha sido considerada desde hace tiempo como uno de los grandes problemas, en relación a la utilización de esos materiales, sobre todo en su aspecto agrícola debido a que el término compost es

utilizado con criterios muy diversos. Algunos autores apuntan incluso a la especificación de diferenciar entre compost fresco, compost y compost maduro, en función de las características y sobre todo, del tiempo en el cual ha sido sometido al proceso de compostaje. Por ello, cuando un compost va a ser utilizado debe de tener unas condiciones que garanticen la falta de peligrosidad del mismo.

Otro problema añadido es el propio concepto de madurez ya que cubre distintos grados de estabilidad según vaya a ser el destino del compost. Por esto, se recomienda realizar un seguimiento completo del desarrollo del proceso de compostaje, ya que de esta forma se puede obtener una idea más clara y segura de la madurez del producto, de la eficacia del proceso de compostaje y su aplicabilidad.

La aplicación agrícola de un compost sin un adecuado grado de madurez, puede ocasionar efectos negativos muy graves, como:

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

Métodos de evaluación del grado de madurez

La diversidad y complejidad de los procesos que tienen lugar en el compostaje, hace que cualquier parámetro evaluado pueda suministrar una información valiosa sobre las características y evaluación del material en función del tiempo.

Por ello, las variables utilizadas recorren una amplia gama de determinaciones y análisis, tanto cualitativos como cuantitativos.

En general los podemos clasificar en:

A. MÉTODOS DE OBSERVACIÓN

1. Olor: los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco, aminos y en general ácidos orgánicos, que producen malos olores, pero que a medida que el compost madura tienden a desaparecer. La evaluación de estos compuestos ha sido utilizada como criterio de madurez (Iglesias Jiménez y Pérez García,1989).
2. Temperatura: el control y seguimiento de la curva de temperatura durante el compostaje puede darnos información de la fase en la cual se encuentra el proceso, dado que se supone que en la fase final de estabilización se alcanza de forma continua la temperatura ambiente (Stickelberger,1975).
3. Color: la evaluación colorimétrica puede ser considerada como un criterio de madurez para determinados materiales (Sugahara y col.,1979).

B. MÉTODOS BASADOS EN EL ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA

Estos métodos se basan en la relación existente entre la madurez de la masa y la estabilidad biológica de los materiales, midiendo la actividad de la biomasa microbiana o de los constituyentes fácilmente biodegradables.

1. Métodos respirométricos: emplean el estudio de la respiración del compost (absorción de oxígeno o desprendimiento de anhídrido carbónico). Consideran maduro un compost que no consuma más de 40 mg de oxígeno por Kg de materia seca en una hora, después de incubarlo durante 3 días (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1989).
2. Determinación de sustancias orgánicas degradables: Morel y col.,1979, realizan un estudio de la evolución de la madurez del compost por métodos indirectos relacionándola con características físico-químicas del material como son edad, el carbono orgánico total (representante de todas las sustancias orgánicas disponibles) y los azúcares solubles (fracción fácilmente fermentable), obteniendo una estimación de la degradabilidad y maduración del compost

$$D.E.G = 3,166 - 0,011 (Edad) + 0,059 (C.O.T) + 0,832 (A.E)$$

Siendo:

Edad = días de compostaje

C.O.T = Carbono Orgánico Total

A.E = Azúcares Extraíbles con agua caliente

Los valores de límites de madurez definidos por respuesta vegetal son:

DEG < 2,4 → COMPOST MADURO

DEG > 2,7 → COMPOST INMADURO

3. Métodos de análisis bioquímico: basados en el estudio de enzimas indicadores de la actividad celular y otros se basan en la identificación de la microflora específica de cada fase del compostaje.

C. MÉTODOS DE ANÁLISIS FÍSICOS Y FISICOQUÍMICOS

Se basan en una evaluación cualitativa o cuantitativa de las sustancias que durante el proceso de compostaje experimentan una fermentación o humificación.

1. Contenido de carbono orgánico hidrosoluble: García y col., (1992), determinaron el contenido de carbono orgánico hidrosoluble durante el compostaje de 6 mezclas, preparadas con dos residuos urbanos de distinta procedencia, un residuo agrícola y otro agroindustrial, y consideraron que un compost estaba maduro cuando el contenido de carbono orgánico hidrosoluble era < 0,5%. Sin embargo, Hue y Liu, (1995) encontraron que el porcentaje de carbono orgánico del extracto acuoso tenía que ser < 1% para establecer que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable, basándose en el estudio de 16 compost de origen y composición distintos, mientras que Bernal y col.,1998. Consideraron 7 mezclas preparadas con materiales de muy distinto origen y propusieron que un compost estaba maduro cuando su contenido en carbono orgánico hidrosoluble era < 1,7%.
2. Relación C/N en la muestra sólida: es el criterio que con más asiduidad se ha venido empleando para determinar el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica. Muchos autores han propuesto una relación C/N por debajo

de 20 como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poincelot 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) ó con un valor menor de 15 (Juste, 1980).

3. Relación C/N en el extracto acuoso: teniendo en cuenta que la mayor parte de las reacciones que ocurren en el proceso de compostaje son transformaciones bioquímicas de la materia orgánica de los residuos, llevadas a cabo por los microorganismos cuyo metabolismo ocurre en fase acuosa, Hue y Liu (1995), basándose en el estudio de 17 compost de origen y composición distinta, propusieron la relación C_{ORG} soluble en agua/ N_{ORG} total y de este modo consideraron que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable cuando la relación de C_{ORG} soluble en agua/ N_{ORG} total era $< 0,70$, mientras que Bernal y col. (1998), consideraron una colección de 7 mezclas preparadas con materiales de distinta procedencia, encontrando que el valor de esta relación tenía que ser $< 0,55$.
4. Determinación del contenido en polisacáridos son progresivamente descompuestos por la microflora desarrollada en el curso de los distintos estadios de termogénesis y maduración. Esta fracción compuesta, fundamentalmente, por mono y disacáridos, desaparece por hidrólisis, mientras que otros polisacáridos lo hacen más lentamente debido a su estructura más resistente (celulosa) (Morel y col.,1979).
5. Variación de pH: este parámetro ha sido utilizado como marcador del punto final del compostaje debido a que durante este proceso se produce alcalinización o evolución hacia niveles neutros. Basados en este hecho, Jann y col. (1959) realizaron un ensayo que consistía en incubar el material final del proceso de compostaje en condiciones de anaerobiosis a una temperatura de $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si al cabo de 24 horas el pH del compost era alcalino, indicaba que éste estaba maduro.
6. Ausencia de compuestos indicadores de un medio reductor: si al final del compostaje se detectase la presencia de compuestos reductores, tales como el amonio y ácido sulfhídrico, indicaría que durante el proceso ha existido un potencial redox inadecuado de los materiales, mostrando que las condiciones de la pila han sido predominantemente anaerobias y que los residuos están todavía en

un período de descomposición. De este modo, Zucconi y Bertoldi (1987) establecieron que si el contenido en NH_4^+ en un compost era superior al 0,04% indicaba que éste no estaba lo suficientemente maduro. A este respecto, también Spohn (1978) desarrolló un rápido test cualitativo para determinar la presencia de NH_4^+ y H_2S , por medio de la aplicación de reactivos específicos a un papel de filtro humedecido con un extracto del compost.

7. Nitrificación: Bernal y col. (1998) establecieron que un compost estaba maduro cuando su relación NH_4/NO_3 era $< 0,16$, basándose en el estudio de una colección de mezclas preparadas con materiales de muy distinto origen.
8. Estudio de la materia orgánica humificada: los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los compost, a partir de los porcentajes de carbono extraíble (C_{EXT}), carbono de ácidos húmicos (C_{AH}) y de los ácidos fúlvicos (C_{AF}), son los siguientes:

- Relación de humificación: $C_{\text{EX}}/C_{\text{OT}} \times 100$
- Índice de humificación: $C_{\text{AH}}/C_{\text{OT}} \times 100$
- Porcentaje de ácidos húmicos: $C_{\text{AH}}/C_{\text{EX}} \times 100$
- Relación de polimerización: $C_{\text{AH}}/C_{\text{AF}}$

Los valores mínimos de cada uno de estos índices para poder evaluar la madurez del compost, encontrados en el estudio de Roletto y col. (1985) realizado sobre 5 mezclas preparadas con un residuo lignocelulósico y con otro residuo orgánico rico en nitrógeno son:

- ⇒ Relación de humificación $> 7\%$
- ⇒ Índice de humificación $> 3,5\%$
- ⇒ Relación de polimerización > 1

Mientras que, Iglesia Jiménez y Pérez García (1992 b), basándose en el estudio del compost de residuos sólidos urbanos, propusieron los siguientes valores:

- Índice de humificación $> 13\%$
- Porcentaje de ácidos húmicos $> 62\%$
- Relación de polimerización $> 1,6$

Lo anterior nos indica que estos índices sólo serán útiles para seguir el proceso de compostaje de una determinada pila, por lo que se deberá estudiar su evolución en el tiempo más que los valores finales y esto sucede porque dependen de la naturaleza de los materiales originales que se utilicen.

9. Capacidad de intercambio catiónico: Harada e Inoko (1980) desarrollaron un método para determinar la capacidad de cambio catiónico en compost y observaron que en el compostaje de residuos sólidos urbanos se producía un aumento conforme progresaba el proceso hasta que alcanzaba un valor estable. Concluyeron que si éste era > 60 meq/100g, sobre la materia orgánica, nos indica que el compost está maduro (Harada y col., 1981). Sin embargo, Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 b) encontraron que el valor de este parámetro tenía que ser > 67 meq/100g, sobre la materia orgánica, para considerar al compost maduro. Además, Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 a), basándose en el estudio de dos pilas preparadas con residuos sólidos urbanos y sin lodos de aguas residuales urbanas, propusieron la relación capacidad de cambio catiónica/carbono orgánico total (CCC/C_{OT}) como índice de madurez más fiable que la capacidad de cambio sola, considerando que un compost es maduro cuando esta relación es $> 1,9$, mientras García y col., (1992) encontraron un valor más alto, debía de ser $> 3,5$, considerando 6 mezclas preparadas con dos residuos urbanos de distinta procedencia, un residuo agrícola y otro agroindustrial.
10. Estudio del contenido de ácidos volátiles: el proceso de fermentación de la materia orgánica implica el desprendimiento de numerosas sustancias orgánicas volátiles, detectables por técnicas cromatográficas y cuya presencia en mayor o menor grado puede ser considerada como un índice de madurez. De Vleeschauwer y col., (1981) ponen de manifiesto la presencia de ácido acético, propiónico isobutírico, etc. Según estos autores, una concentración de 300 ppm de acético inhibe el desarrollo vegetal y a partir de 2.000 ppm no se observa germinación.

D. ENSAYOS SOBRE VEGETALES

Sin lugar a dudas, son los ensayos más fiables, ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectado por los métodos anteriores.

1. Test de germinación: como los propuestos 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.
2. Test de crecimiento: supone la evaluación del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el rye-grass, el maíz y la cebada.

En función de todos los métodos expuestos anteriormente, 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 parámetro estará 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:

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

Por último, decir que 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

Antes de utilizar un compost, es necesario conocer su composición química concreta. Dicha información será muy útil para evaluar su idoneidad para un determinado uso y establecer las estrategias de gestión oportunas en un ámbito de aplicación específica.

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:

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

La valorización agrícola de los materiales estabilizados mediante compostaje puede realizarse mediante diferentes vías, atendiendo a unos objetivos concreto, entre los que cabe diferenciar su uso como:

- ❖ Enmienda orgánica
- ❖ Sustrato de cultivo

Para cada uno de estos usos (Martínez, 1995) habrá que atender de forma específica a los factores más determinantes de su eficacia, tanto los derivados de las características del compost como los asociados al escenario edafoclimático y los requerimientos de los cultivos o vegetación. Asimismo, se deberá tener en cuenta el marco legislativo y normativa aplicable en cada caso. Sea cual sea la valorización agrícola, prevista para el compost, su uso y aplicación deberá atenderse a las buenas prácticas agrícolas, tal y como indican en el RD 506/2013 y el RD 865/2010.

La evaluación de la aptitud de un compost para un determinado uso, debe hacerse de forma integral, valorando todos los parámetros de forma conjunta (Iglesias y col., 2008; Masaguer y Benito, 2008; Huerta y col., 2010; Soliva y col., 2013), dado que el comportamiento del compost va a depender de la interrelación e interacción de estos parámetros con el escenario suelo-planta-atmósfera.

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).

Los efectos principales se asocian a la mejora general de la fertilidad física, química y biológica, resultantes del aumento o mantenimiento del nivel de sustancia húmicas. Este uso es muy conveniente en los suelos agrícolas dado que se ha observado un descenso progresivo de los niveles de materia orgánica que provoca paulatinamente una disminución de la fertilidad y un aumento de la erosionabilidad (Favoiono y Hogg, 2008).

Los programas de enmienda orgánica 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.

El uso del compost bien elaborado como enmienda orgánica es de elección frente a otros residuos orgánicos dado a su elevada estabilidad de la materia orgánica y de su contenido en sustancias húmicas (Soliva, 2001; Moral y Muro, 2008; Soliva y col., 2013). Además, la utilización del compost aplicándolo al suelo como enmienda disminuye el uso de fertilizantes inorgánicos y hace que parte del carbono que contiene la materia orgánica del compost se fije en el suelo.

La producción de fertilizantes minerales requiere tanto el consumo de energía como la extracción y utilización de materias primas que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero. El compost, por su contenido en nutrientes, no puede sustituir completamente a los fertilizantes minerales, si los puede reemplazar de manera parcial. De esta forma, puede conseguir una disminución de las emisiones de efecto invernadero de entre 4 y 82 kg CO₂ eq/t FORM (Boldrin y col., 2009)

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.

1.5.2. Uso como sustrato de cultivo

El uso del compost en el cultivo sin suelo es una forma de valorización de este producto mucho más reciente que las tradicionales como enmienda orgánica o fertilizante orgánico. El compost puede sustituir a la turba en la producción de tierra vegetal y evitar las emisiones que se producen durante su extracción y mineralización en condiciones aerobias. Según Boldrin y col. (2009) las emisiones equivalente de CO₂ debidas al uso de turba se encuentran entre 550 y 1.197 kg CO₂ eq/t turba. Además, la utilización del compost como sustitutivo de la turba supone un ahorro entre 44 y 838 kg CO₂ eq/t FORSU.

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.

En general, los composts de corteza de pino, los de residuos de poda urbana, los vermicomposts y algunos de los lodos de EDAR tienen mayor aptitud que los de estiércol y de FORM.

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:

a) **Materias primas:**

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

- Utilizando materias primas con bajo contenido en sustancias fitotóxicas.

b) Proceso de compostaje:

- 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, producir 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.

Sin embargo, el uso de estos productos tratados encuentra serias dificultades por factores relacionados como la calidad y riesgos asociados. Los factores que limitan la aplicación de compost están relacionados por: el tamaño de partícula, la presencia de metales pesados, la producción de malos olores tras su aplicación, presencia de microorganismos patógenos, semillas de malas hierbas, y de materiales inertes como vidrio, plásticos y metales.

El suelo agrícola es un recurso inestimable y limitado, por ello las gestiones agrícolas, entre ellas el abonado, deben desarrollarse teniendo en cuenta criterios de protección, para garantizar su fertilidad y su valor agronómico, presente y futuro. La aparición de nuevos productos fertilizantes y de nuevos ingredientes en su formulación ha obligado a modificar las regulaciones de su uso, de forma que se eviten sus posibles efectos nocivos en el agua, el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

Por otra parte, la utilización de compost como sustituto parcial de la turba para la elaboración de sustratos de cultivo, es una práctica que va en desarrollo en los últimos años. La agricultura intensiva necesita este tipo de insumos en grandes

cantidades para el desarrollo de semilleros, viveros, horticultura intensiva protegida, etc. Su uso también se extiende en otros sectores como la jardinería y el paisajismo. 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.

En la **Tabla 1.12**, se recoge la legislación actual sobre productos fertilizantes, **Real Decreto 506/2013** que regula las enmiendas orgánicas elaboradas con residuos orgánicos y la legislación sobre sustratos de cultivo **Real Decreto 865/2010**, así como la propuesta de la Comisión Europea (2014) sobre el uso de compost y digeridos, recogida en 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.

Tabla 1.12. Legislación y directrices referentes al uso de compost en agricultura.

Disposiciones Nacionales
▶ Real Decreto 506/2013 de 28 de junio, sobre productos fertilizantes .
▶ Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.
▶ 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.
Directrices
▶ Comisión Europea. Informe final sobre el “Fin de la Condición de Residuo” (FdR) (Comisión Europea, 2014).

El **Real Decreto 506/2013** de 28 de junio sobre productos fertilizantes, 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 el Real Decreto 506/2013 se recogen las normas de identificación y etiquetado de los productos, comercialización y los márgenes de tolerancia. También se indican las materias primas permitidas en la elaboración de abonos orgánicos, órgano-minerales y de enmiendas orgánicas, pudiendo utilizarse materias primas de origen orgánico, animal o vegetal, estas son:

- Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos.
- Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles, pasta de papel, papel y cartón.
- Residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil.
- Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos.
- Residuos municipales (residuo domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente.

En la **Tabla 1.13** se exponen los requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013. Los compost se clasificarán 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).

Sin perjuicio de las limitaciones establecidas en esta normativa, los productos fertilizantes elaborados con componentes de origen orgánico se aplicarán al suelo siguiendo los *códigos de buenas prácticas agrarias*. Los productos de la *clase C* no podrán aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por ha y año. En zonas de especial protección, particularmente a efectos del cumplimiento del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE 45, 2003) y el Real Decreto 261/1996 relativo a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura, las comunidades autónomas

modificarán, en su caso, la cantidad anterior. El Real Decreto 261/1996 limita la incorporación de N en 170 kg por hectárea y año, pudiendo alcanzar los 210 kg durante los primeros programas de actuación, pudiendo las Comunidades Autónomas establecer cantidades distintas en base a ciertas consideraciones.

Tabla 1.13. Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013.

Parámetro	Real Decreto 506/2013		
	Clase A	Clase B	Clase C
Mat. Orgánica total (%)	35		
Humedad máxima (%)	40		
C/N	< 20		
N inorgánico máximo (% N total)	15		
Metales pesados	Clase A	Clase B	Clase C
(mg/kg m.s.):			
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
Contaminantes orgánicos			
Polifenoles (% p/p)		0,8	
Furfural(% p/p)		0,05	
Microorganismos			
Salmonella spp	Ausentes en 25 g de compost		
<i>E. coli</i>	<1000 MPN/g		
Semillas de malas hierbas	-		
Partículas (%)	90 (25mm)		
Impurezas (%)	No puede contener		
Gravas y piedras (%)	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.

Recientemente la Comisión Europea ha publicado 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 (Comisión Europea, 2014). El alcance de la condición de fin de residuo incluye el compost y el digerido higienizados y estabilizados obtenidos de un proceso biológico en el que se han utilizado exclusivamente materiales no contaminados procedentes de la recogida selectiva de biorresiduos tales como, residuos verdes de parque y jardines y otros grandes espacios, biorresiduos de hogares, comedores, restaurantes, mercados, así como residuos biodegradables de origen agrícola (incluido estiércol), forestal, pesquero u hortícola, biorresiduos del procesado de alimentos, y subproductos de origen animal (categoría 2 y 3, según el reglamento CE Nº 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009).

Los requisitos de calidad propuestos para compost en informe FdR se presentan en la **Tabla 1.14** Se excluye del ámbito de aplicación de la FdR los lodos de depuración urbanos, los lodos de la industria papelera y la fracción orgánica mezclada de los RU procedente de separación mecánico-biológica, físico-química o manual.

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

Actualmente la Comisión Europea se encuentra en proceso de revisar el Reglamento (EC) Nº 2003/2003 con el objeto de realizar una completa armonización de las normativas relativas a los fertilizantes minerales y orgánicos, incluyendo a las materias primas y los productos finales. Este nuevo reglamento debería estar publicado en el año 2015 otorgando al **compost FdR** (compost de alta calidad) un completo **status de producto**. Los compost de menor calidad (lodos, RSU mezclados,

etc.) se denominarían en principio **residuo bioestabilizado** y con **status de residuo** podría utilizarse en agricultura con ciertas restricciones.

Tabla 1.14. 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).

Parámetro	Valor
Contenido mínimo en materia orgánica	15 % m.s.
Estabilidad mínima	- Índice respirométrico máximo: 25 mmol O ₂ /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
<i>Salmonella spp</i>	Ausentes en 25 g
<i>E. Coli</i>	1000 CFU/g m.f.
Contenido límite de impurezas macroscópicas	< 0,5% en peso sobre m.s. en vidrio; Metal y plástico >2mm
Semillas viables y propágulos de plantas	2 semillas viables/litro de compost
Metales pesados y Contaminantes orgánicos	mg/kg m.s.
Cd	1,5
Cr	100
Cu	200
Hg	1
Ni	50
Pb	120
Zn	600
PAHs ₁₆	6

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

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 ponen en el 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 compost de residuos orgánicos que se utilicen como sustrato de cultivo o como componente de los sustratos de cultivo se muestran en la **Tabla 1.15**

Tabla 1.15 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 esta normativa no se excluyen los lodos de depuración urbanos y la fracción orgánica mezclada de los RU procedente de separación mecánico-biológica, físico-química o manual.

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 1.16 y 1.17** respectivamente. Para los microorganismos se establecen dos limitaciones:

- a) La materia prima transformada, lista para ser usada como ingrediente de productos orgánicos de origen animal, debe ser sometida a un proceso de higienización que garantice que su carga microbiana no supera los valores máximos establecidos en el Reglamento (CE) n.º 1774/2002.
- b) En los sustratos de cultivo de origen orgánico, se acreditará que no superan los niveles máximos de microorganismos, incluidos en el anexo VI de dicho RD y expresados en la **Tabla 1.16**.

Tabla 1.16 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.

En cuanto a los metales pesados los límites máximos que se establecen son aplicables a todos los grupos de productos (orgánicos, minerales, de síntesis mineral u orgánica, preformados y de mezcla), con alguna salvedad para el caso de las lanas minerales que se indica en la Tabla 6.8. Según el contenido en metales de los sustratos se establecen dos clases: A (sin restricción de uso) y B (no aplicables en cultivos de plantas para consumo humano).

Tabla 1.17 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

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS



2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Durante las últimas décadas la concentración de la población en las ciudades, ha provocado un incremento en la generación de flujos residuales de naturaleza orgánica en el entorno urbano, como los lodos de depuradora, restos de poda, fracción orgánica de RSU, etc., que demandan una gestión adecuada que permita la estabilización del residuo generado así como su reciclaje. El compostaje puede ser una alternativa viable de tratamiento para este tipo de residuos ya que no solo permite obtener materia orgánica estabilizada, compost, apta para ser utilizada como enmienda orgánica en los suelos con finalidad de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, sino que además frente a otras opciones el almacenaje convencional o aplicación directa en el suelo consiguen efectos ambientales positivos como la disminución de la emisión de gases efecto invernadero y de la contaminación del suelo. Además, el compost puede tener otras vías de utilización como es su uso como sustrato de cultivo contribuyendo así la disminución del uso de turba en el sector del cultivo sin suelo. La turba es un recurso natural no renovable y su explotación está generando problemas ambientales derivados de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de su extracción y mineralización, además cada vez su precio es más alto por lo que tiene implicaciones económicas en el sector.

Una de las prioridades de la política del medio ambiente de la UE es la gestión de los residuos generados. Éstos no sólo son una fuente potencial de contaminación, sino que pueden llegar a ser valioso recurso secundario. En este sentido, la política de gestión de residuos de la UE se ha desarrollado teniendo en cuenta tres principios básicos: impedir que se generen residuos, recuperar los residuos generados y eliminación de éstos de forma segura.

En los últimos años la fertilización orgánica tradicional está ganando a la fertilización inorgánica de los suelos, con el fin de paliar los efectos negativos que están generando el mal uso de estos fertilizantes inorgánicos sobre la agricultura, asociado a la dosificación abusiva, la contaminación del medio y especialmente de los acuíferos, a la salinización de los suelos, a la pérdida de propiedades físicas, etc.

El compostaje de los residuos orgánicos generados en las zonas urbanas de forma directa o indirecta, como una alternativa para el reciclado y aprovechamiento de los mismos, es interesante 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.

El compostaje se define como un proceso bio-oxidativo controlado, que se desarrolla sobre sustratos orgánicos heterogéneos, generalmente, en estado sólido por la acción de los microorganismos. Implica el paso a través de una etapa termofílica y una producción temporal de fitotoxinas, generándose como productos de la biodegradación dióxido de carbono, agua, minerales y una materia orgánica estabilizada, libre de compuestos fitotóxicos y patógenos, y con ciertas características húmicas.

Por tanto, en este ensayo nos planteamos como objeto principal, *el co-compostaje de los lodos de depuradora y restos de poda de jardinería (poda de morera y poda de hoja de palmera), mediante pila móvil, con volteos periódicos, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido, así como la valorización agronómica y ambiental de los compost obtenidos para diferentes usos.* Para ello, establecen los siguientes objetivos concretos:

- 1) Caracterización inicial y cuantificación de cada ingrediente en las pilas.
- 2) Desarrollo de dos pilas de co-compostaje, una a base de lodo de depuradora, restos de poda de hoja triturada de palmera y restos de poda de morera, y la otra pila a base de lodo de depuradora y restos de poda de hoja triturada de palmera.
- 3) Seguimiento de los parámetros indicadores del proceso de compostaje, a nivel de temperatura y aireación.
- 4) Estudio de la evolución de características fisicoquímicas y químicas de la mezcla de residuos a lo largo del proceso de compostaje así como del producto final obtenido (compost).

MATERIAL Y MÉTODOS



3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para conseguir el objetivo principal del presente trabajo, se han ensayado 2 pilas de compostaje (C1 y C2) a base de lodos de depuradora y residuos de poda. 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 mediante el sistema pila móvil.

Fase 4: Análisis de las características físico-químicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso, así como del producto final obtenido.

Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.

Se pretende conocer la naturaleza de los residuos que van a intervenir en el proceso de co-compostaje, con el fin de establecer con posterioridad una estrategia de compostaje adecuada en función de la tipología de estos materiales. En nuestro ensayo se caracterizaron 3 materiales distintos.

1. Lodo EDAR: los lodos EDAR son residuos que resultan de la depuración de aguas residuales urbanas. Los lodos tienen buenas propiedades desde el punto de vista agronómico por sus contenidos (NPK) y MO, pudiendo ser utilizados como enmienda orgánica. El lodo utilizado procede de la estación de depuración de aguas residuales municipales de Orihuela casco y las pedanías de Molins y la Campaneta, Provincia de Alicante. La EDAR dispone de un tratamiento biológico mediante fangos activados con digestión aerobia de fangos, que son espesados y finalmente, deshidratados mediante filtros banda.
2. Hoja de Palmera: residuo de origen vegetal, procedente del mantenimiento de palmeras ubicadas en parques, jardines y huertos. La hoja de palmera utilizada procede de la poda del palmeral del término municipal de Elche, provincia de

Alicante. Este material vegetal fue homogeneizado y troceado a un tamaño de partícula de 1 cm.

3. Poda de morera: residuo de origen vegetal, procedente de la poda de las moreras de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, que incluye tramas con su parte leñosa y hojas. Este material vegetal fue homogeneizado y troceado a un tamaño de partícula de 1 cm.

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, mediante el método del cuarteo. La muestra se dividió en tres submuestras para el análisis por triplicado de cada uno de los parámetros estudiados.

Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar

Debido a la propia naturaleza del proceso de compostaje, es necesario que la mezcla a compostar posea una serie de características a nivel físico, físico-químico y químico que condicionan el proceso. Por eso, a la hora de elaborar la pila de compostaje nos planteamos como objetivos básicos la obtención de una adecuada Humedad, Porosidad y Relación C/N en la mezcla inicial.

Fase 3: Desarrollo del sistema de compostaje en pila móvil

Una vez establecida la mezcla con las condiciones óptimas iniciales en función de nuestros objetivos, se desarrolla el sistema de compostaje en pila móvil, 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. Para ello se dispone de volteadora, sondas de temperatura y sistema de riego.

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 determinó:

- Humedad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- Carbono orgánico
- Nitrógeno total
- Relación C/N
- 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 que se obtiene el compost maduro. Esto se hace mediante el estudio de diferentes parámetros indicativos del proceso:

- Asociados al propio proceso de compostaje: temperatura.
- Asociados a la evolución de la materia orgánica: 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 pilas de compostaje.

Compost	C1	C2	C1	C1 y C2
Parámetro	Lodo 1	Lodo 2	Poda Morera	Hoja Palmera
Humedad (%)	73,9	75,53	21,27	21,8
pH	7,05	6,80	7,42	6,60
CE (dS/m)	3,25	2,14	1,78	5,11
MO (%)	68,74	64,8	91,8	91,8
Corg (%)	37,8	35,8	44,8	45,1
Nt (%)	5,88	5,80	0,77	2,59
C/N	6,43	6,17	58,5	17,4
Polifenoles (%)	14967	4745	16579	13204
P (%)	1,74	2,05	0,11	0,14
Na (g/kg)	3,59	3,78	1,49	14,9
K (g/kg)	2,89	4,58	13,9	27,6

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

Respecto a la humedad, el lodo EDAR utilizado en las pilas presenta una alta humedad superior al 70% como corresponde a este tipo de materiales. Este hecho puede influir en el proceso de compostaje, cuando la humedad es excesiva y la biodegradabilidad moderada, puede ocurrir que el calor producido biológicamente en el proceso de compostaje sea insuficiente para las dos funciones principales de evaporar agua (la del sustrato y la formada en el proceso) y la de calentar la masa a temperaturas termófilas para su higienización. Los materiales vegetales utilizados, hoja de palmera y poda de morera, pueden compensar esta condición debido a su mayor porcentaje de materia seca (79%). El lodo EDAR tiene un pH neutro, la hoja de palmera tienen un pH ligeramente ácido mientras que el pH de la poda de morera es básico. En cuanto a la salinidad, la hoja de palmera es el residuo que presenta mayor salinidad, siendo también mayor su contenido en Na y K.

Los restos vegetales utilizados se caracterizan por altos contenidos en materia orgánica superior al 90%, siendo el contenido de carbono orgánico, del 45%. Respecto a la relación C/N esta suele ser bastante baja en los lodos en comparación con otros residuos orgánicos. Las pérdidas de nitrógeno en forma de emisiones de amoníaco suponen una pérdida del valor agronómico del lodo, además de ser una fuente de contaminación. Durante el compostaje estas pérdidas son prevenibles con un ajuste adecuado de la relación carbono/nitrógeno (C/N) en la mezcla inicial, así nos aseguramos que el nitrógeno permanece en el compost. En los residuos analizados la relación C/N es mucho menor en el lodo EDAR (6,43) y en la poda de morera (58,5) que en la hoja de palmera (17,4). El contenido de nutrientes N y P es mayor en lodo que en los residuos de poda, mientras que el contenido de K es superior en los restos de poda que en el lodo EDAR.

Es importante indicar aunque no se muestran los datos en este trabajo que el lodo EDAR utilizado cumple la legislación vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo (Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990), siendo los contenidos de Cu, Zn, Cd, Ni, Cr, Pb y Hg, inferiores a las concentraciones límite establecidas en la legislación para su aplicación al suelo. En las **Figuras 3.1, 3.2 y 3.3** se muestran los materiales utilizados para elaborar las mezclas a compostar.



Figura 3.1. Descarga de Lodo



Figura 3.2. Hoja palmera triturada



Figura 3.3. Poda de morera.

3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado

El proceso de compostaje objeto de este estudio se ha desarrollado en la planta piloto de compostaje (COMPOLAB) situada en la Escuela Politécnica de Orihuela (E.P.S.O.), Universidad Miguel Hernández de Elche.

Para llevar a cabo el montaje de las pilas se utilizó un volquete auto-cargable (Dumper) con un volumen de volquete de 720 L (**Figura 3.4**). Para los volteos periódicos que se realizaron a las mezclas que conformaban la pila se utilizó una volteadora Backhus 14.28 (**Figura 3.5**). También se dispuso de un sistema de riego por aspersión para el control de la humedad y de sondas de temperatura para control de la temperatura de las pilas. El riego de las pilas de compost se realizó con un sistema de microaspersores que suministraban agua 3 horas al día. Para el control de las temperaturas se utilizaron 4 sondas de temperaturas conectadas a un *data logger* (*HOBO® U12*) que registraba los datos cada 2 horas. Las sondas se situaron equidistantes a lo largo de la pila de compost a una profundidad de 50 cm.



Figura 3.4. Volquete auto-cargable



Figura 3.5. Mezclado/volteado de pila.

3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se comentan todos los procesos y pasos seguidos para la realización del proceso de compostaje, su seguimiento analítico a lo largo del tiempo de experimentación, así como los procesos previos para la preparación de la mezcla a compostar. Por ello se comenta este desarrollo experimental en diferentes pasos:

1. Cálculo y 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 de las mezclas a compostar

Para realizar este ensayo, se planteó como objetivo maximizar el uso de los residuos verdes de hoja de palmera y de poda de morera sin alejarnos mucho de la condición de que las mezclas tuviesen 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 de tres componente (Lodo (EDAR) + (Hoja de Palmera)+ (Poda de morera)) en el caso del compost C1 y de dos componentes (Lodo (EDAR) + (Hoja de Palmera)) en el caso del compost C2 para alcanzar dicho objetivo.

Este proceso se realizó mediante las expresiones:

$$\text{Ecuación (1)} \quad P = A + B + C$$

$$\text{Ecuación (2)} \quad C/N = \frac{(A * \% C_A * \% MS_A) + (B * \% C_B * \% MS_B) + (C * \% C_C * \% MS_C)}{(A * \% N_A * \% MS_A) + (B * \% N_B * \% MS_B) + (C * \% N_C * \% MS_C)}$$

P = Peso total de la pila, en kg.

A = Peso del componente A, en kg.

B = Peso del componente B, en kg.

C = Peso del componente C, en kg.

C_A, C_B, C_C = Carbono de componente A, B y C, respectivamente.

N_A, N_B, N_C = Nitrógeno de componente A, B y C, respectivamente.

MS = Materia seca.

En la **Tabla 3.2** se expone la proporción de cada componente en la mezcla. Una vez establecidos los porcentajes de mezcla de los residuos sujetos a compostaje, se procedió al muestreo de los residuos, para su posterior caracterización inicial.

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

Compost	% Lodo 1	% Lodo 2	% Hoja Palmera	% Poda Morera
C1	25,3 %	-	36,9 %	37,8 %
C2	-	42,2 %	57,8 %	-

Las pilas de compost se formaron acumulando los materiales orgánicos que compone cada pila por capas (tipo sándwich), depositando sobre el suelo una primera capa de material vegetal, seguida de una segunda de lodo y terminando con el resto de material vegetal.

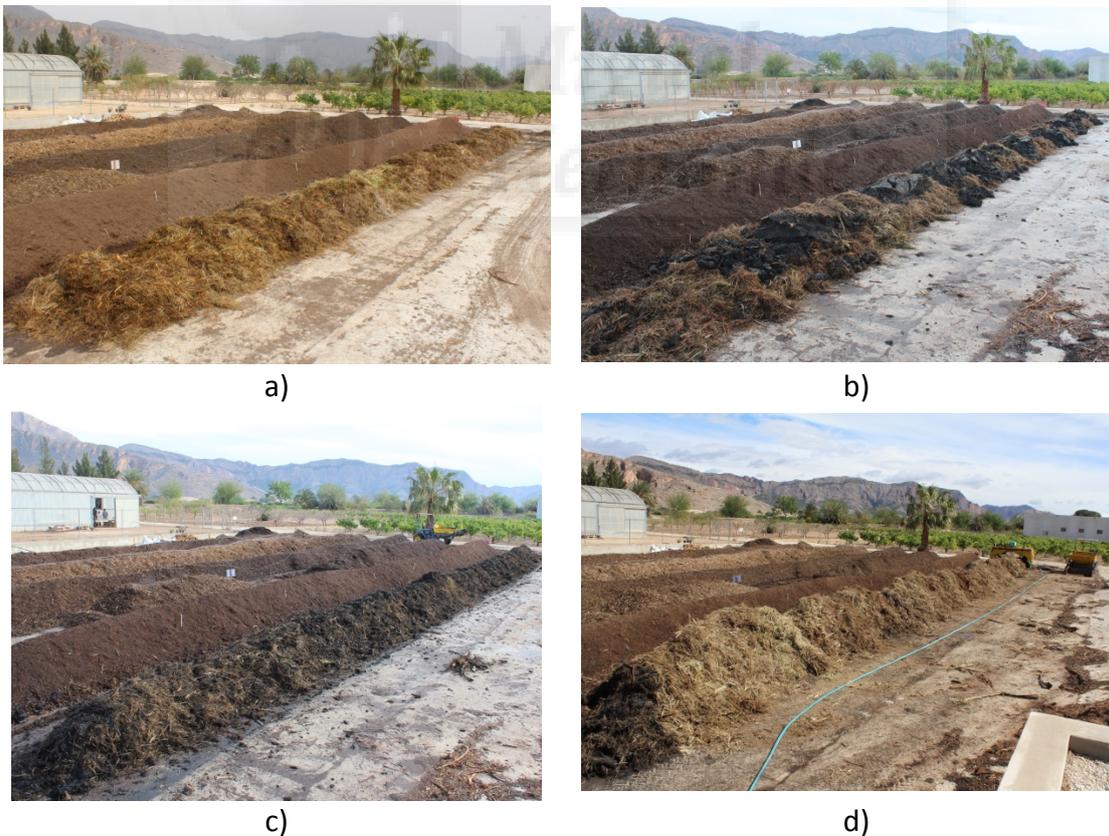


Figura 3.6. Fases de montaje de las pilas: a) fase 1: Base vegetal, b) fase 2: incorporación del lodo, c) fase 3: pre-mezcla d) fase 4: incorporación capa vegetal y mezcla.

Se formaron pilas longitudinales en tramos 5 metros hasta un total de 4 tramos continuos (20 metros), incorporando en cada tramo el peso correspondiente a la proporción de cada componente en la mezcla, intentando ajustar la pila a una base máxima de 2,50 m y una altura máxima de 1,30 m. Para llevar a cabo este proceso se utilizó un volquete auto-cargable (Dumper) con un volumen de volquete de 720 L. Las pilas tuvieron como fuente de humedad inicial, así como para los riegos posteriores, agua potable procedente de la red de abastecimiento del término municipal de Orihuela (Alicante), siendo estos riegos realizados a la vez que se realizaban los mezclados/volteos, para lo que se utilizó una volteadora Backhus 14.28.

Una vez dispuesto el material de cada pila en capas se realizó un primer volteo para partir de unas condiciones lo más homogéneas posibles.

3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje

Durante el proceso de compostaje se realizó un seguimiento de parámetros relacionados con la evolución de dicho proceso, como son la temperatura, la aireación y la humedad de la pila.

La fase biooxidativa del compostaje se consideró finalizada cuando la temperatura se aproximó a la del ambiente y no hubo reactivación tras el volteo. La duración de la fase biooxidativa fue de 163 días para el compost y 151 días para el compost C2. A continuación, se quitaron las sondas de temperatura y las pilas de compost (cuyo volumen se había reducido) se separaron en 2 filas y se pasó la volteadora de forma que las pilas quedara con poca altura. Finalmente los compost se dejaron madurar durante un periodo aproximado de un mes y medio.

Las pilas se muestrearon en cada una de las etapas del proceso de compostaje, tal y como se muestra en la **Tabla 3.3**.

Cada muestra de compostaje se formó a partir de un nº representativo de submuestras tomadas en diferentes puntos de la pila, considerando todo el perfil (desde la parte superior hasta la parte inferior de la pila). El nº de submuestras a tomar depende del peso de la pila (Reglamento (CE) N^o 2003/2003).

- Pilas con peso < 2,5 toneladas, se tomaran 7 submuestras.
- Pilas con peso > 2,5 toneladas y < 80 toneladas se tomaran (20 x toneladas de la pila de acopio)^{1/2}.

Tabla 3.3. Fecha de muestreo de las pilas de compost.

Muestreo	Etapas	Compost C1	Compost C2
1	Inicio	4/02/2014	2/04/2014
2	Termófila	24/03/2014	20/05/2014
	Final		1/09/2014
3	bioxidativa	17/07/2014	
4	Maduración	1/09/2014	14/10/2014

Las pilas fueron de aproximadamente 8,5 toneladas, correspondiéndole un nº de submuestra de 13. Las muestras se secaron al aire y se molieron a 0,5 mm para su análisis.

Con la finalidad de airear y homogeneizar la pila se realizaron una serie de volteos, como se indica en la **Tabla 3.4.**

Tabla 3.4. Volteos realizados en la pila de compost C1 y C2.

Volteo	Compost C1		Compost C2	
	Días de compostaje	Fecha	Días de compostaje	Fecha
1	7	11/02/2014	8	10/04/2014
2	20	24/02/2014	19	21/04/2014
3	29	05/03/2014	26	28/04/2014
4	36	12/03/2014	40	12/05/2014
5	49	25/03/2014	54	26/05/2014
6	56	01/04/2014	72	13/06/2014
7	64	09/04/2014	91	02/07/2014
8	71	16/04/2014	107	18/07/2014
9	83	28/04/2014		
10	111	26/05/2014		

3.4. MÉTODOS ANALITICOS

➤ Preparación de la muestra

Las muestras de residuos vegetales se secan en una estufa de aire forzado a 60°C y las muestras de lodo a 105°C. Posteriormente se muelen en molino y se 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.

➤ Pérdida de materia orgánica

Las pérdidas de materia orgánica (MO), con respecto a la materia orgánica inicial, se calculan del contenido de cenizas inicial (X_1) y en el punto de estudio (X_2), de acuerdo con la ecuación de Viel y col. (1987).

$$\text{Pérdidas MO (\%)} = 100 - 100 [X_1 (100 - X_2)] / [X_2 (100 - X_1)]$$

➤ 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 pHmetro.

➤ **Conductividad eléctrica**

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

➤ **Carbono orgánico total y nitrógeno total**

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

➤ **Polifenoles solubles**

Determinación en los materiales iniciales y en las muestras del proceso de compostaje. Los polifenoles solubles se determinan en el extracto acuoso 1:20, por medio del método Folin modificado (Beltrán y col., 1999).

➤ **Mineralización de la muestra**

Digestión nítrico-perclórica de las muestras según el método recomendado por Abrisqueta y Romero (1969).

➤ **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.

➤ **Capacidad de intercambio catiónico**

El método de determinación de la CCC se basa en la saturación del complejo de cambio con bario y determinación gravimétrica del catión retenido por diferencia con un blanco (Lax y col., 1986).

3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

El tratamiento estadístico aplicado a los datos obtenidos se realizó mediante un análisis estadístico ANOVA de una sola vía, que permitiera evaluar el efecto de la variable considerada: tiempo de compostaje.

En todos los parámetros determinados se estudió si la evolución a lo largo del proceso de compostaje fue significativa.

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



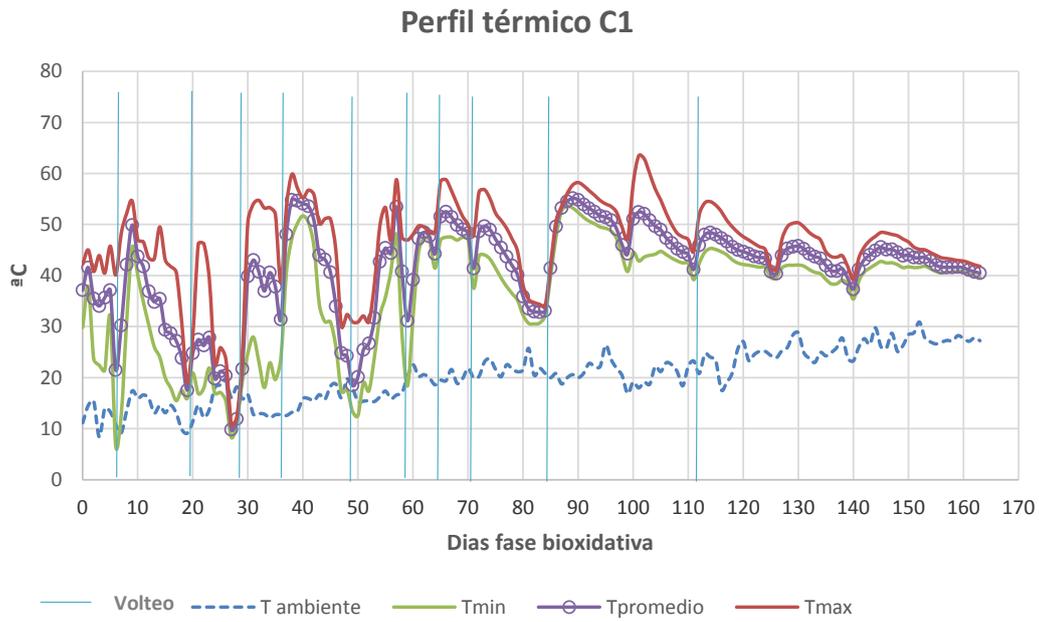
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE

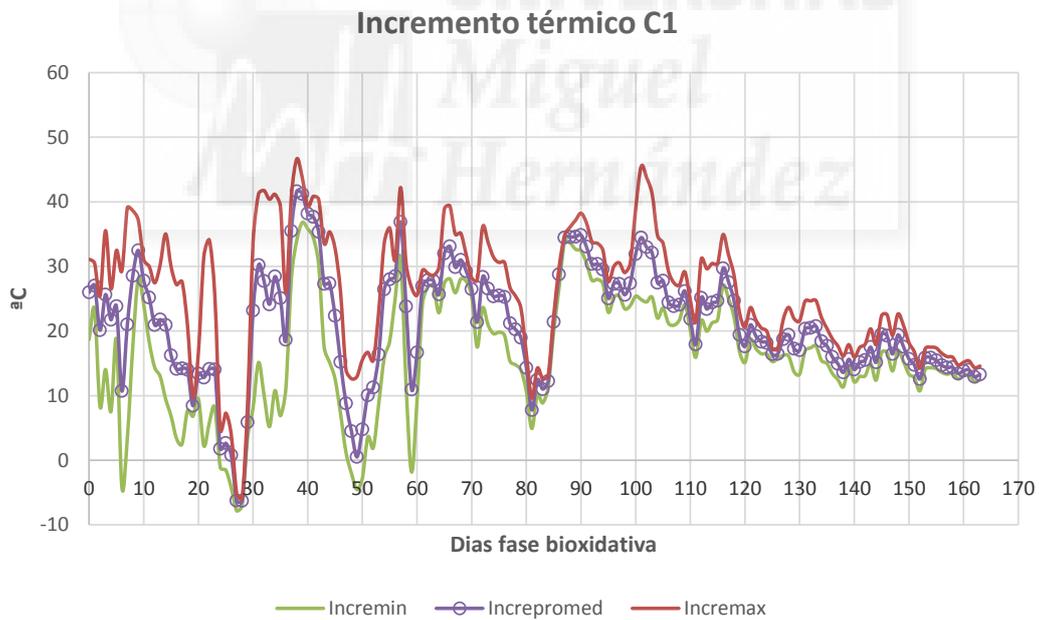
La temperatura es el parámetro más utilizado para seguir la evolución del proceso de compostaje, ya que su medida es directa e instantánea y puede hacerse de manera continua. La temperatura de la pila es el reflejo de la actividad microbiana que determina el proceso y, por tanto, su seguimiento permite 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 necesarios para un buen desarrollo del proceso aeróbico.

El proceso de compostaje atraviesa 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 (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.

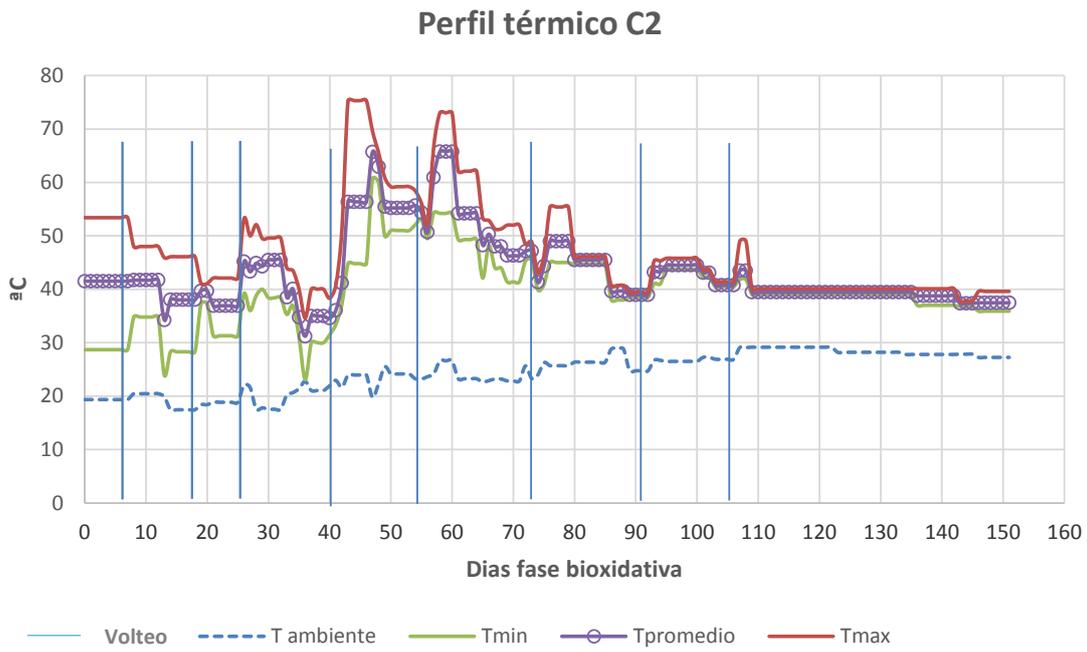
En las **Figuras 4.1 y 4.3**, se muestra la evolución de la temperatura de cada una de las pilas y en las **Figuras 4.2 y 4.4**, el incremento térmico experimentado. En la **tabla 4.1** se muestran los datos del índice exotérmico (EXI) durante la fase biooxidativa, la temperatura (T) máxima y mínima 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.



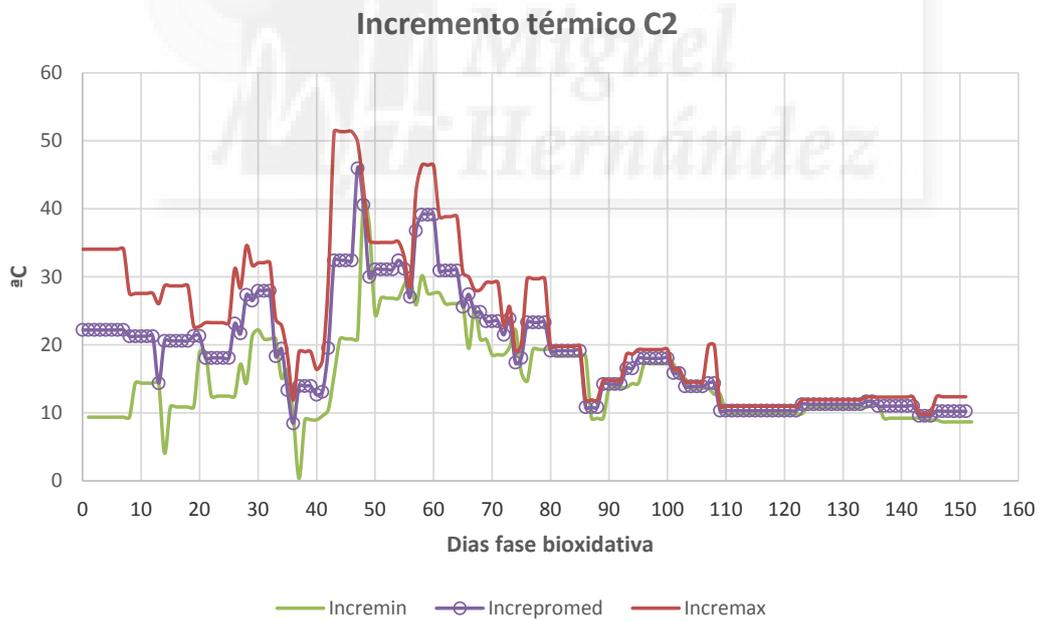
Figuras 4.1. Evolución de la temperatura de la pila C1, durante el proceso de compostaje.



Figuras 4.2. Evolución del incremento térmico experimentado en la pila C1, durante el proceso de compostaje.



Figuras 4.3. Evolución de la temperatura de la pila C2, durante el proceso de compostaje.



Figuras 4.4. Evolución del incremento térmico experimentado en la pila C2, durante el proceso de compostaje.

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
EXI ($^{\circ}\text{C}$)	3458	2867
EXI/día bioxidativa	21,2	19
T max ($^{\circ}\text{C}$)	55	66
T min ($^{\circ}\text{C}$)	10	31
días > 40 $^{\circ}\text{C}$	118	81

EXI= índice exotérmico

Según se observa en las **Figuras 4.1 y 4.3**, la fase bioxidativa del proceso de compostaje se desarrolló durante 163 días en el caso de la pila C1 y durante 150 días en el caso de la pila C2, momento en que los procesos verificaron un diferencial sostenido durante 15 días de menos de 10°C , entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiental.

En las pilas elaboradas, la fase termófila ($T > 40^{\circ}\text{C}$) fue discontinua. En la pila C1, con mayor proporción de restos vegetales, la etapa termófila se desarrolló en seis fases (días del 8-11, del 31-34, del 37-45, del 54-58, del 61-79 y del 85-163) y en la pila C2 en cuatro fases (días del 0-12, del 26-32, del 42-85 y del 93-108). Esta tendencia se puede explicar por el alto contenido lignocelulosico de los materiales vegetales utilizados (poda de morera y hoja de palmera) que proporcionan una fuente de carbono continua manteniendo la actividad microbiana y evitando así el enfriamiento completo (Yousefi y col., 2013). Estudios previos muestran diferencias en el perfil térmico durante la etapa termófila en el compostaje de residuos lignocelulosicos (Vargas García y col., 2010) lo cual podría ser debido a la actividad microbiana residual que resulta del contenido lignocelulosico remanente de los materiales compostados (Wei y col., 2012) y su mayor resistencia a la biodegradación (Hubbe y col., 2010). Esta actividad puede generar suficiente energía térmica para incrementar la temperatura, pero no la suficiente para producir una verdadera fase termófila (López Gonzalez y col., 2014).

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, Mara, y Taylor 1985). Se realizaron 10 volteos en el caso de la pila C1 y 8 volteos en la pila C2. Después de cada volteo se produjo un incremento de la temperatura que fue cada vez menor conforme avanzaba el proceso.

En la pila C1, la temperatura máxima promedio fue de 55 °C, la temperatura máxima del proceso fue de 63,4 °C que se alcanzó a los 101 días de proceso, el número de días con condiciones termófilas ($T > 40^{\circ}\text{C}$) fue de 118 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de 3458 °C. En la pila C2, la temperatura máxima promedio fue de 66 °C, la temperatura máxima del proceso fue de 75,3 °C que se mantuvo durante 4 días (43-46 de proceso), el número de días con condiciones termófilas ($T > 40^{\circ}\text{C}$) fue de 81 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de 2867 °C.

Así, en la pila C1, con mayor proporción de restos vegetales (poda de morera y hoja de palmera) que aportan mayor cantidad de polifenoles iniciales, la etapa termófila se alargó más en el tiempo (37 días más que en la pila C2), mostró incrementos superiores de temperatura respecto a la ambiental y un índice exotérmico superior al de la pila C2, con ausencia de poda de morera y mayor presencia de lodo de depuradora que la pila C1. Cáceres, y col., (2015) encontraron temperaturas más altas y mayor tiempo de compostaje en pilas con un 75% de residuos vegetales probablemente debido a la naturaleza de lignina-celulósico de su ingrediente principal. La celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en estos residuos son parcialmente descompuestos y transformados a una velocidad inferior (Bernal y col, 2009).

En la pila C2, la temperatura excedió durante 16 días de 55 °C, lo que asegura la máxima reducción de patógenos de acuerdo con los requisitos europeos en materia de saneamiento de compost, que establece 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), que 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 °C. Ninguna de estas condiciones se alcanzó en el caso de la pila C1.

4.2 EVOLUCION DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE: pH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y POLIFENOLES SOLUBLES

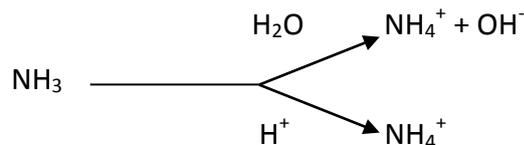
4.2.1. Evolución de pH

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 NH_3 para formar NH_4OH , con producción de iones OH^- , o de la protonación directa con el consumo de un ión 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.

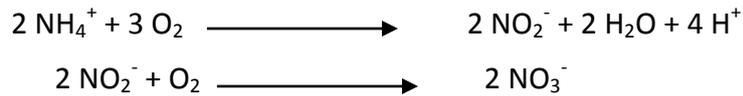


Amonificación.



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 valores de pH durante el proceso de compostaje para las dos pilas estudiadas se muestran en la **Figura 4.5 y 4.6**.

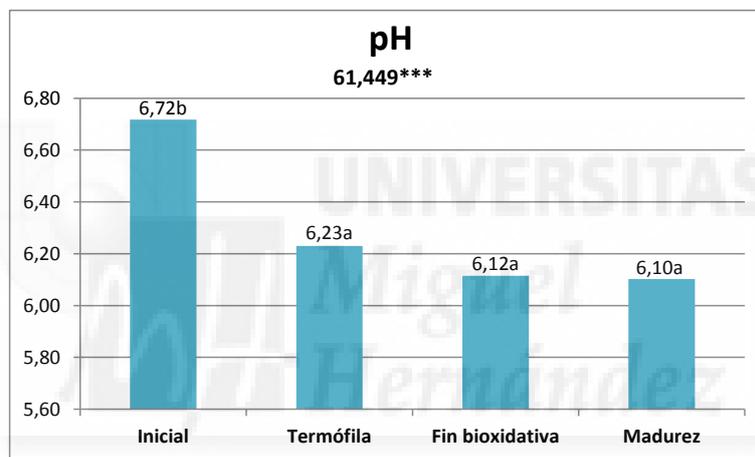


Figura 4.5. Evolución del pH en el compost C1.

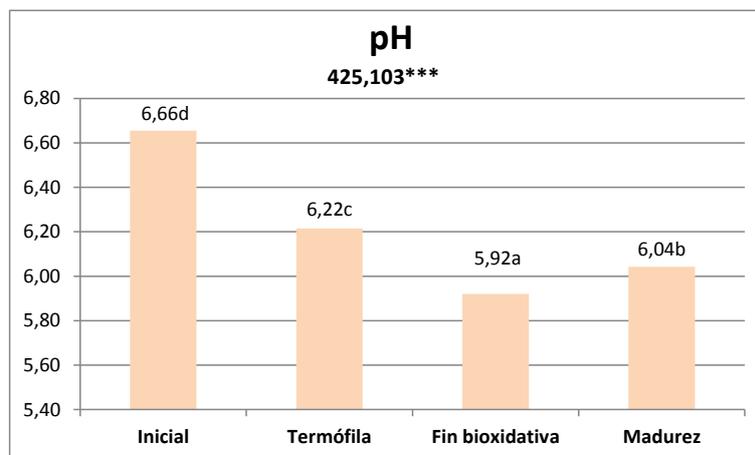


Figura 4.6. Evolución del pH en el compost C2.

Inicialmente los valores de pH fueron ligeramente ácidos, lo podría influir en el desarrollo de la actividad termófila, evitando que se alcancen temperaturas elevadas durante esta fase (Rynk, 1992). En ambas pilas se produce una disminución del pH durante el proceso de compostaje, posiblemente debido a la generación de ácidos orgánicos de cadena corta que acidifican el medio y a la reducción de amonio y al proceso de nitrificación desarrollado durante este periodo. En la pila C1, con un pH inicial ligeramente ácido, se produjo una reducción significativa del pH en la etapa termófila, respecto a la etapa inicial, no mostrando más variaciones en el tiempo. En la pila C2, también con un pH inicial ligeramente ácido, se produjo una reducción significativa del pH en la etapa termófila y también en la etapa biooxidativa, aumentando ligeramente durante la etapa de madurez. El pH en los composts maduros obtenidos se situó dentro del rango adecuado para su uso agrícola (6,0-8,5) (Hogg y col., 2002).

4.2.2. Evolución de la 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, lo cual puede ser provocado por los riegos o por la lluvia si el proceso se realiza al aire libre.

Los valores de CE durante el proceso de compostaje se muestran en las **Figuras 4.7 y 4.8**. En ambas pilas la CE se incrementó con el tiempo de compostaje desde el inicio hasta la fase biooxidativa y disminuyó al final durante el periodo de maduración. La mineralización de la materia orgánica y la concentración relativa de iones debida a la pérdida de peso son responsables del incremento de la (CE) durante el proceso. La disminución de la CE durante la maduración del compost pudo producirse como consecuencias del lavado de sales que se produjo en la masa de compost por las lluvias producidas en el mes de junio de 2014 en el caso del compost C1 y como consecuencia

del lavado de sales durante los riegos realizados. 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.

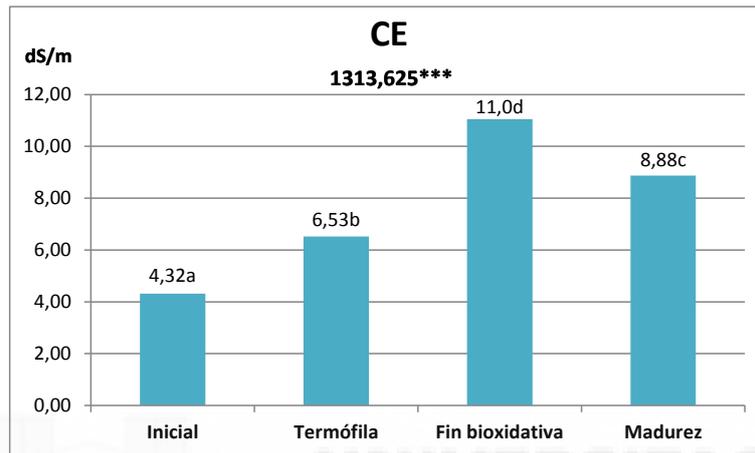


Figura 4.7. Evolución de la CE en el compost C1.

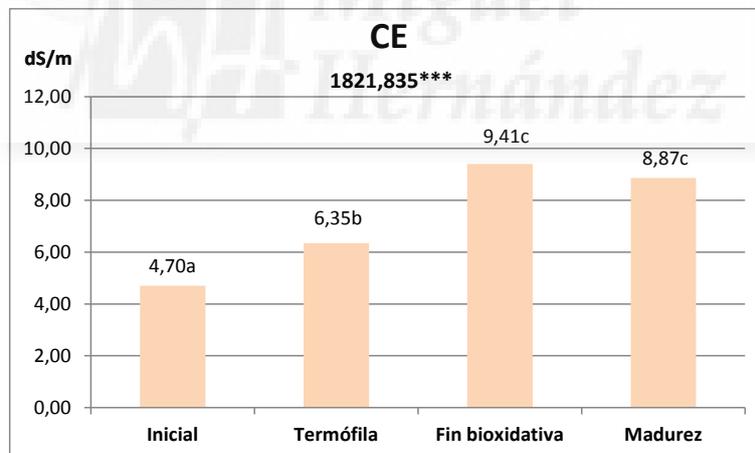


Figura 4.8. Evolución de la CE en el compost C2.

Los composts maduros obtenidos presentaron valores de altos CE (8,8 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). Los valores obtenidos son comparables a los obtenidos en compost elaborados con la fracción orgánica de

residuos municipales y en compost elaborados con lodos de depuradora (López y col. 2014).

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, siendo el ingrediente hoja de palmera el que contribuyó de forma más significativa a la CE.

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).

4.2.3. Evolución de polifenoles solubles

Los polifenoles se encuentran prácticamente en todos los materiales vegetales, se componen básicamente de ácido fenólicos que incluyen benzoato y derivados hidroxycinamato y flavonoides (Guendez y col., 2005). Los compuestos fenólicos merecen especial atención debido a su repercusión sobre la inhibición de la germinación de semillas (Manios y col. 1987), 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.

Como se puede observar en las **Figuras 4.9 y 4.10**, el contenido en polifenoles es alto sobretudo en el caso de la pila C1 (< 13.000 mg/kg), en cambio no se observó efecto inhibitorio o limitante del proceso de compostaje. Su evolución durante el proceso de compostaje fue típica, disminuyendo conforme avanza el proceso. La pila C1, al inicio presenta mayor cantidad de polifenoles que la pila C2, esto es debido a que dos de los ingredientes que componen la pila C1 (lodo y residuo de morera) tienen mayor cantidad de polifenoles que los ingredientes utilizados en el compost C2. En ambos compost los valores finales están en torno a 1000 mg/kg de polifenoles

solubles, superiores a los obtenidos por Bustamante y col. (2008) en compost de residuos vitivinícolas.

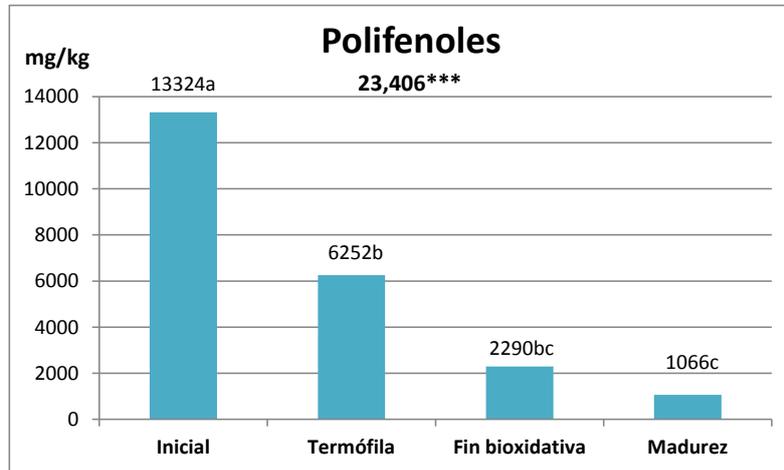


Figura 4.9. Evolución de polifenoles solubles en el compost C1.

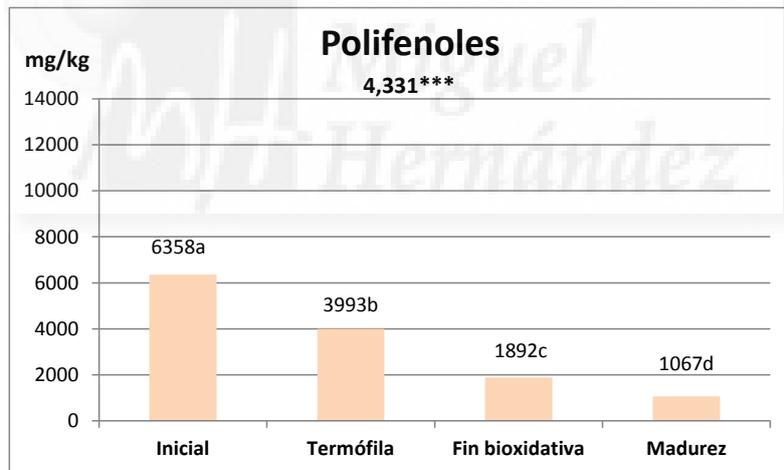


Figura 4.10. Evolución de polifenoles solubles en el compost C2.

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.

4.3.1. Evolución del contenido de 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 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 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 MO durante el proceso de compostaje se muestran en las **Figuras 4.11 y 4.12**. El contenido de materia orgánica disminuye 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, observándose un pequeño incremento durante la etapa de madurez en el compost C1. El tiempo de compostaje ha sido un factor decisivo en la evolución de éste parámetro. En los ensayos realizados el mayor descenso de MO se aprecia en la fase bio-oxidativa, esta disminución en la MO puede estar relacionada con la actividad microbiana en esta etapa, como transformaciones de la MO. Los valores de materia orgánica en los compost finales son altos, superiores al 60%, comparables a los alcanzados en plantas de compostaje industriales en España (Huerta-Pujol y col, 2011) y en compost de restos de poda

urbana (López y col. 2014). Estos valores son superiores a los establecidos en la legislación para compost (MO \geq 35%) (RD 506/2013).

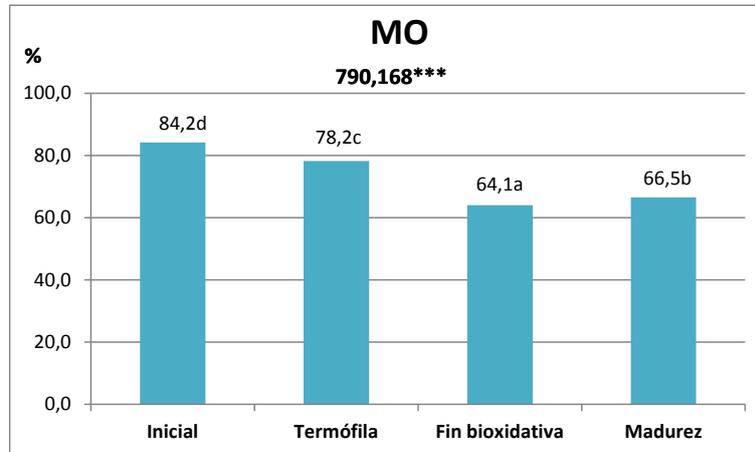


Figura 4.11. Evolución del contenido de MO en el compost C1.

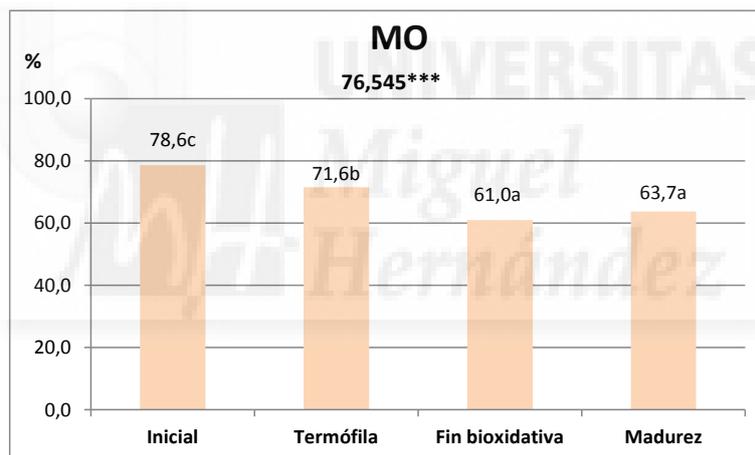


Figura 4.12. Evolución del contenido de MO en el compost C2.

4.3.2. Evolución del contenido de cenizas

La evolución del contenido de cenizas durante el proceso de compostaje en los compost estudiados se muestra en las **Figuras 4.13 y 4.14**. Durante el proceso de degradación de la materia orgánica que se prolonga hasta el final de la fase biooxidativa se producen compuestos inorgánicos cuya concentración relativa se incrementa por la pérdida de peso relativo de la masa. En ambos procesos, las cenizas

se incrementan durante la fase bio-oxidativa, lo cual ha repercutido en los altos valores de CE como se ha indicado anteriormente.

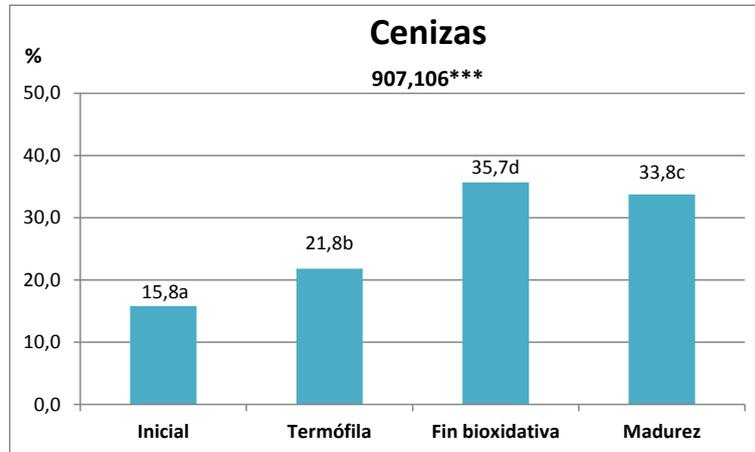


Figura 4.13. Evolución del contenido de cenizas en el compost C1.

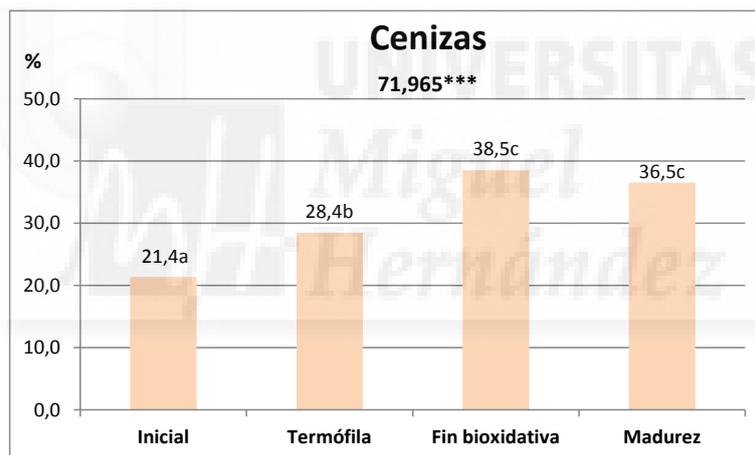


Figura 4.14. Evolución del contenido de cenizas en el compost C2.

4.3.3. Evolución de la pérdida de materia orgánica

Las pérdidas de materia orgánica (MO) reflejan la evolución sufrida por la mezcla de residuos estudiados. Éstas se calcularon a partir del contenido en 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.

En las **Figura 4.15 y 4.16** se muestran los valores de pérdida de MO durante el proceso de compostaje, respecto al valor inicial y calculado según la fórmula de Viel col. (1987).

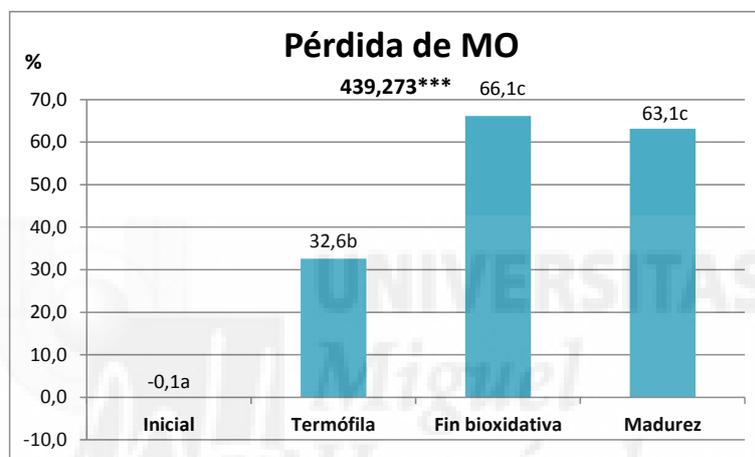


Figura 4.15. Evolución de la pérdida de MO en el compost C1.

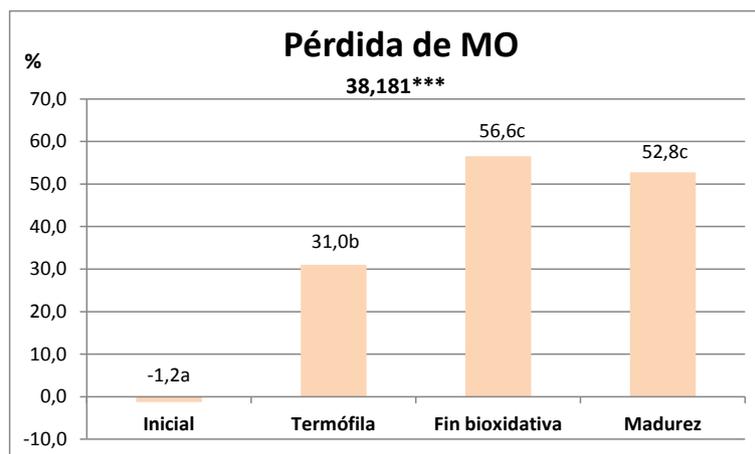


Figura 4.16. Evolución de la pérdida de MO en el compost C2.

La pérdida de MO se incrementó en las dos pilas durante el proceso de compostaje. En la fase bio-oxidativa es donde se produce la mayor pérdida de MO, como consecuencia de la actividad microbiana. Al final de proceso, se alcanzaron pérdidas del 63% para el compost C1 y del 53% para el compost C2. La pila C1, con mayor proporción de residuos vegetales, experimentó mayor pérdida de materia orgánica, esto puede ser utilizado como un indicador de la tasa de compostaje (Petric y col, 2012), también fue la pila que experimentó mayor índice de exotermia.

Cáceres y col. (2014) también 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.

4.3.4. Evolución del contenido de carbono orgánico total

Al igual 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) durante el proceso de compostaje se muestra en las **Figuras 4.17 y 4.18**. El tiempo de compostaje ha sido un factor decisivo en la evolución de éste parámetro. El contenido de C orgánico va disminuyendo 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. El mayor descenso de COT se aprecia en la fase bio-oxidativa, debido a la mayor la actividad microbiana en esta etapa. Los valores de COT en los compost finales son altos, en torno al 30%.

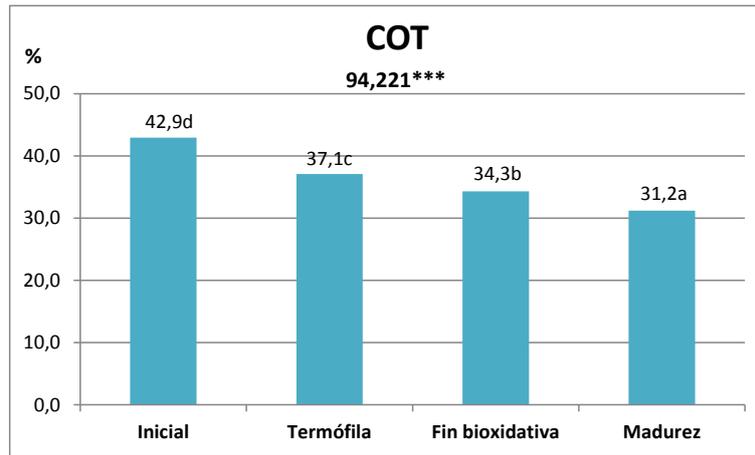


Figura 4.17. Evolución del COT en el compost C1.

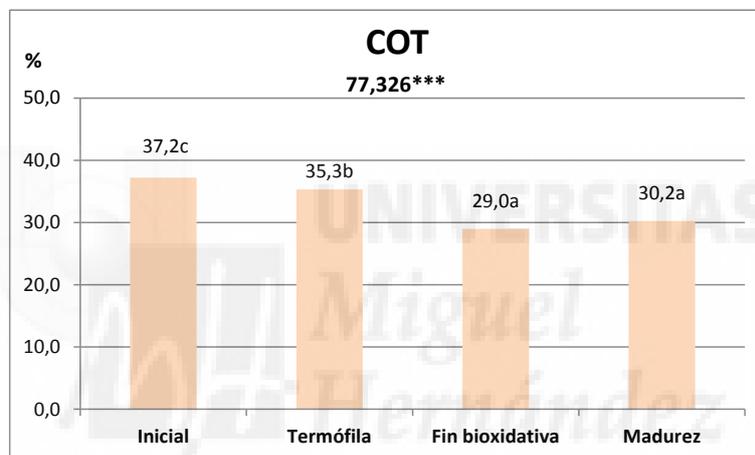


Figura 4.18. Evolución del COT en el compost C2.

4.3.5. Evolución del contenido de 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 de nitrógeno orgánico se irá transformando, paulatinamente, en especies inorgánicas. Estas

especies inorgánicas, 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) durante el proceso de compostaje se muestran en las **Figuras 4.19 y 4.20**. En las pilas elaboradas, el tiempo de compostaje ha sido un factor decisivo en la evolución de éste parámetro. El contenido de NT aumenta a lo largo del proceso de compostaje por el efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de materia orgánica (Said-Pullicino y col., 2007) y a la posible fijación biológica de nitrógeno. Como podemos observar en las figuras, la pila C1 a pesar de tener un contenido inicial de NT inferior, debido a que el componente poda de morera aporta menos N, presenta al final de proceso valores de NT superiores a los del compost C2, atribuible a la menor mineralización experimentada en este compost. La pila C2, experimento una ligera pérdida de NT en la etapa termófila. Los valores en el compost final están en torno a 3,5% de NT, comparables a los 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).

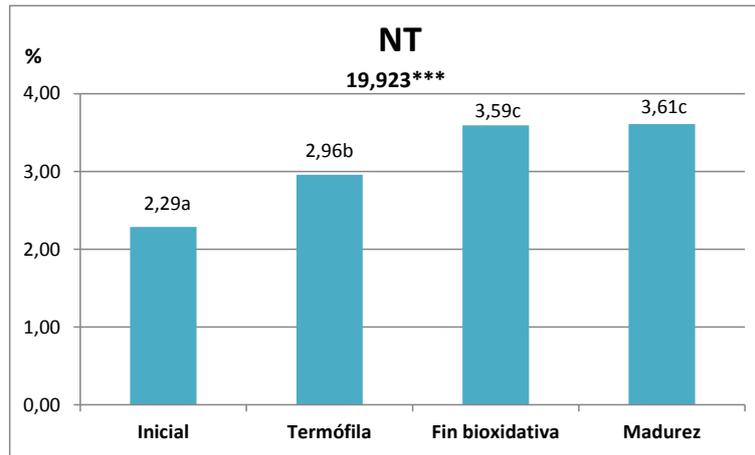


Figura 4.19. Evolución del NT en el compost C1.

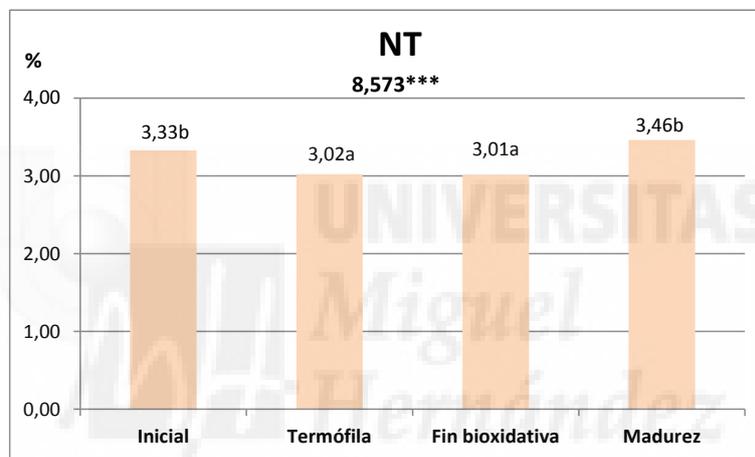


Figura 4.20. Evolución del NT en el compost C2.

4.3.6. Evolución de la relación COT/NT

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. Valores elevados de esta relación originarían un alargamiento del proceso, debido a que es necesario el desarrollo de varios ciclos de microorganismos para degradar el exceso de carbono, empleándose el único nitrógeno disponible que será el de los microorganismos que han muerto, mientras que valores muy bajos pueden conducir a pérdidas importantes de nitrógeno por volatilización en forma de amoníaco.

Los valores de relación COT/NT durante el proceso de compostaje se muestran en las **Figuras 4.21 y 4.22**.

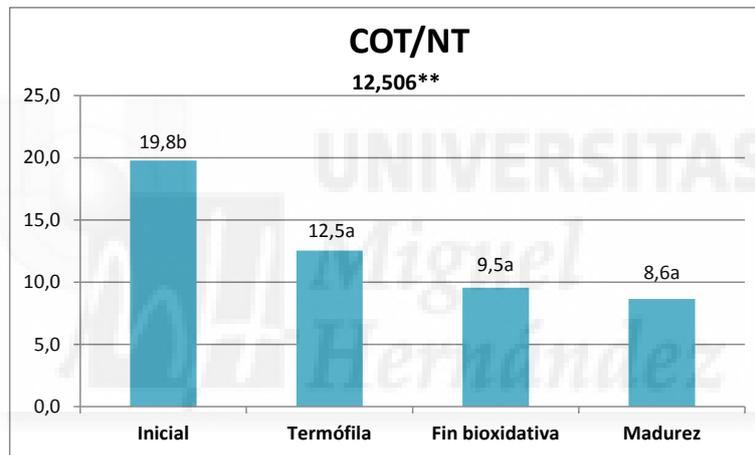


Figura 4.21. Evolución de la relación COT/NT en el compost C1.

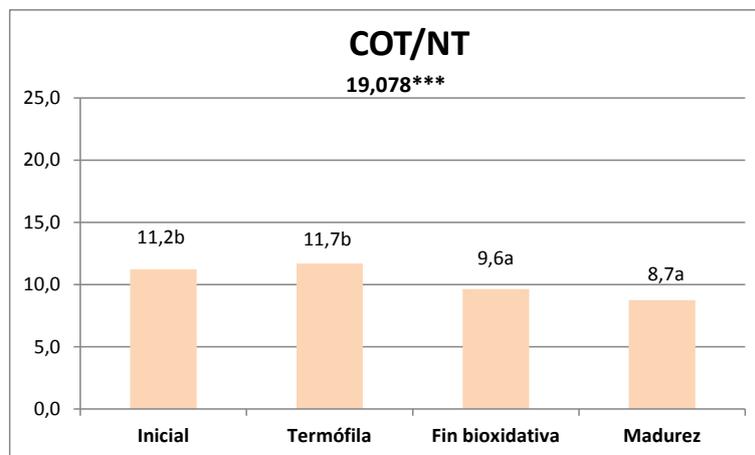


Figura 4.22. Evolución de la relación COT/NT en el compost C2.

La relación COT/NT disminuye a lo largo del proceso de compostaje en los dos ensayos planteados. La pila C1 presenta inicialmente una relación COT/NT superior a la pila C2 debido a la presencia del componente poda de morena que presenta un alto valor de dicha relación (58,8) debido a su bajo contenido en NT. Los valores de este parámetro se igualan para ambas pilas a partir de la etapa termófila. La disminución de esta relación es debida a la pérdida de carbono orgánico por la mineralización de la materia orgánica y el incremento del contenido de NT derivado de la pérdida de peso de la pila (Bustamante y col. 2008).

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 los compost C1 y C2 tendrían un grado de madurez adecuado. Sin embargo, los valores iniciales de esta relación ya eran inferiores al valor de referencia para el compost maduro por lo que este parámetro no puede ser indicativo de la madurez de estas pilas.

4.3.7. Contenido de fósforo, potasio y sodio

El fósforo 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 **sodio** 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. El compost C2 con mayor proporción de hoja de palmera presentó mayores valores de Na tanto al inicio como al final del proceso de compostaje. La presencia de sodio en los materiales orgánicos no es deseable debido a su no esencialidad para las plantas así como por el impacto negativo de este catión en las propiedades físicas del suelo potencialmente enmendado.

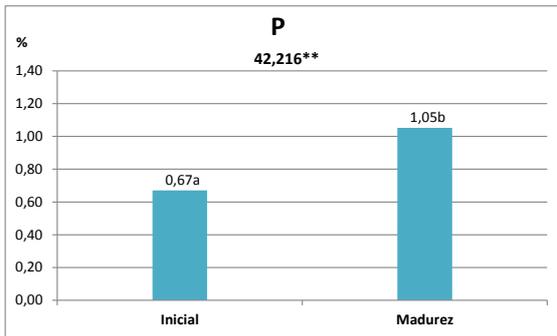


Figura 4.23. Evolución del contenido de P en el compost C1.

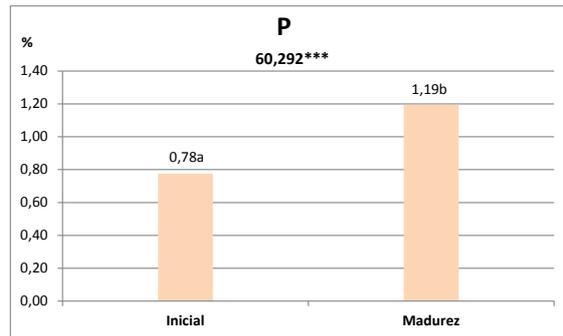


Figura 4.24. Evolución del contenido de P en el compost C2.

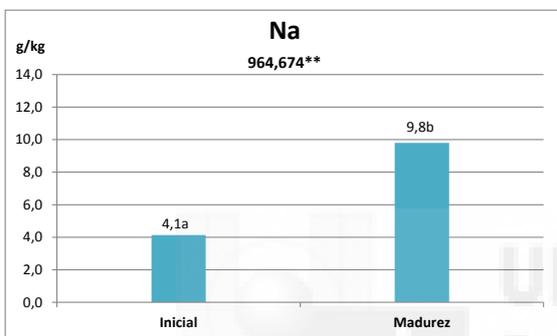


Figura 4.25. Evolución del contenido de Na en el compost C1.

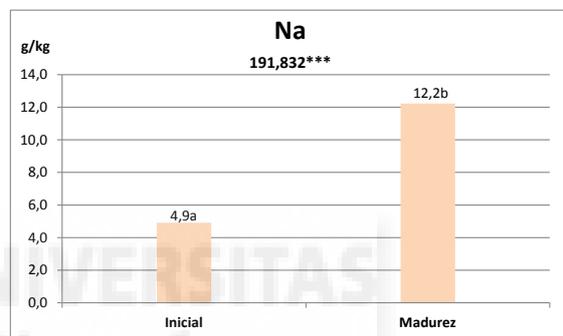


Figura 4.26. Evolución del contenido de Na en el compost C2.

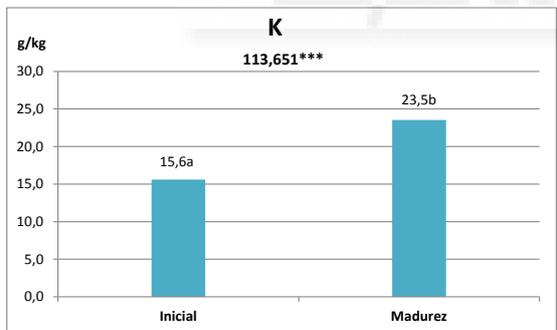


Figura 4.27. Evolución del contenido de K en el compost C1.

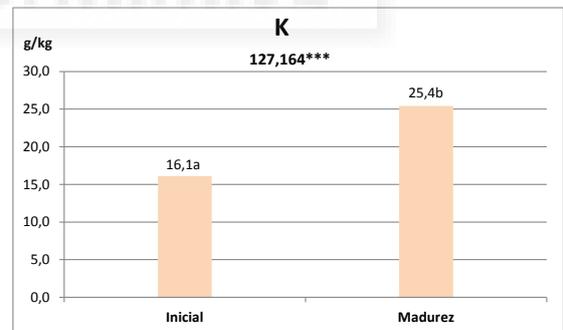


Figura 4.28. Evolución del contenido de K en el compost C2.

4.4. PARÁMETROS INDICATIVOS DE CALIDAD DEL COMPOST

4.4.1. Capacidad de cambio catiónico

La capacidad de cambio catiónico es un parámetro indicativo del proceso de compostaje y 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 los compost estudiados aumenta el valor de CCC durante el proceso como consecuencia de la humificación de la materia orgánica (**Tabla 4.2**). Los compost C1 y C2 alcanzaron un alto nivel de madurez de acuerdo con los valores mínimos de CCC.

Tabla 4.2. Evolución de la capacidad de intercambio catiónico en pilas durante el proceso de compostaje.

Nº Compostera	Tiempo de compostaje (días)	CCC (meq/100g mo)	CCC/C _{OT} (meq/g CoT)
C 1	0	42	0,83
	60	129	2,76
C 2	0	57	1,21
	60	196	4,06

Otros autores, (Iglesias Jiménez y Pérez García (1992), García y col. (1992)) proponen la relación capacidad de cambio catiónica/carbono orgánico total (CCC/COT) como índice de madurez más fiable, fijando valores de madurez adecuados superiores a 1,9 ó 3,5, respectivamente. Los compost C1 y C2 habrían alcanzado un grado de madurez y estabilidad adecuado según algunos autores, pero esto hay que tomarlo con precaución y tener en cuenta el resto de parámetros.

4.4.2. 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 27º 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, amoniaco, etc, resultantes de los procesos de mineralización de la materia orgánica). Todos los compost obtenidos presentaron valores de IG superiores al 50%, valor mínimo establecido en la bibliografía que indica que un compost está maduro y que no va a producir efectos tóxicos sobre el crecimiento de las plantas una vez que se les aplique como fertilizante (**Tabla 4.3**). El valor de IG superior al 100% obtenido en el caso del compost C2 se justifica por el mayor contenido nutrientes aportado por el compost, respecto al agua desionizada del control, que proporciona mejores condiciones para la germinación y desarrollo de las semillas.

Tabla 4.3. Evolución del índice de germinación en pilas durante el proceso de compostaje.

Nº Compostera	Tiempo de compostaje (días)	IG (%)
C1	0	4,1
	60	72
C2	0	9,5
	60	114,5

CONCLUSIONES



5. CONCLUSIONES

Los lodos de depuradora y los restos de poda son flujos residuales orgánicos generados en grandes cantidades en entornos urbanos, su gestión conjunta mediante co-compostaje es viable debido a las características complementarias que presenta y que repercuten en un buen desarrollo del proceso de compostaje. Los restos de poda aportan estructura a la mezcla mejorando las propiedades físicas e hidrofísicas y consiguiendo mejores perfiles térmicos durante el proceso.

En este experimento, se han ensayado proporciones variables de lodo de depuradora y de restos de poda de hoja de palmera y de morera de forma tal que podemos observar la incidencia de la proporción y relación entre restos vegetales y lodo de depuradora en el proceso de compostaje.

La mayor proporción de restos vegetales (poda de morera y hoja de palmera) en la mezcla (pila C1) prolonga el proceso de compostaje, alarga la etapa termófila, permite mayores incrementos de temperatura respecto a la ambiental y genera un mayor índice exotérmico, lo que indujo unas mayores pérdidas de materia orgánica. Los requisitos necesarios para permitir una correcta higienización del material de la pila, solo se cumplieron en la pila C2, con menor presencia de residuos vegetales.

La evolución de la capacidad de intercambio catiónico y del índice de germinación para ambos compost indica que han alcanzado un grado de madurez y estabilidad adecuado, mostrando los compost finales una materia orgánica humificada y con ausencia de fitotoxicidad.

Los compost obtenidos presentan características físico-químicas y químicas similares, con altos contenidos en materia orgánica (>60%), de carbono orgánico total (>30%) y de nutrientes NPK. Ambos compost presentan pH ligeramente ácido. La salinidad y el contenido en sodio son altos y están relacionados con la presencia de restos de poda de hoja de palmera en las pilas. Este aspecto sería mejorable realizando una gestión adecuada de la pila a escala industrial.

En conclusión, la relación en torno al 40% de lodo de depuradora y al 60 % de restos de poda ensayados parece adecuada para desarrollar un buen proceso de compostaje, que permitiría conseguir las condiciones adecuadas para la higienización de los materiales, acortar el proceso de compostaje y obtener un compost con un alto contenido de materia orgánica humificada y nutriente.



BIBLIOGRAFIA



6. BIBLIOGRAFIA

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.

Biddlestone, A.J. y Gray, K.R. 1991. Aerobic processing of solid organic wastes for the production of a peat alternative: a review. *Process. Biochem.*, 26, 275-279.

B.O.E Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

Disponible en: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540 (Acceso Octubre 2014).

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, 551-557.

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.

- Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. 1991.** Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización. Ed.: CSIC-CEBAS. Murcia.
- De Vleeschauwer, D., Verdonck, O. y Van Assche, P. 1981.** Phytotoxicity of refuse compost. *BioCycle*, 22, 44-46.
- EUROSTAT, 2013.**
- Fassbender, H.W. 1972.** Química del suelo. Ed. Turrialba. Costa Rica.
- 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: 1-14.
- He, X.; Logan, T.; Traina, S. 1995.** Physical and chemical characteristics of selected U.S. municipal solid waste composts. *J. Environ. Qual.*, 24: 543-552.
- Hernández, M.T., Cegarra, J. y Costa, F. 1983.** Adición de residuos vegetales a suelos calizos. IV. Influencia sobre la dinámica del manganeso en el suelo y respuesta de cultivos.
- 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 Programme

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. Microbiol.*, 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.

Juste, C. 1980. Avantages et inconvenients de l'utilisation des composts d'ordures ménagères comme amendement organique des sols on support. *Jornadas Internacionales sobre el Compost*. Madrid.

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.

Lidón Noguera, Vicente.2012. Apuntes de Jardinería, Cultivos Ornamentales e Ingeniería de Áreas Verdes. Universidad Miguel Hernández.

Lopez-Gonzalez, J.A., Vargas-García M.C., López, M.J., Estrella –Suarez, F., Jurado, Macarena and Moreno, J. 2014.Enzymatic characterization of microbial isolates from lignocellulose waste composting: Chronological evolution. *Journal of Environmental Management* 145: 137-146.

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'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. Pp. 296- 301.

MAGRAMA (2014). 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-de-estadistica/2012/default.aspx> (Acceso Noviembre/2014)

MAGRAMA (2014). Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Requisitos para la certificación de fabricantes de productos fertilizantes conforme al Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

<http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/productos-fertilizantes/certificacion-de-fabricantes/> (Acceso Noviembre 2014)

MAGRAMA (2014). 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> (Acceso Octubre 2014)

MAGRAMA (2014). 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)

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: 203-207.

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(Acceso Octubre 2014)

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.

Pérez Espinosa, A., Moral, R. y Pérez Murcia, M. 2013. Apuntes de Gestión de residuos. Universidad Miguel Hernández.

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.

Saña, J. y Soliva, M. 1987. El Compostatge. Procés, Sistemes i Aplicacions. Ed.: Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient. Barcelona.

Said-Pullicino et al., 2007

Scalbert, A. (1991). Antimicrobial properties of tannin. *Phytochemistry*, 30: 3875-3883.

Stentiford, E.I., Mara, D.D. y Taylor, P.L. 1985. Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. En: *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Ed.: J.K.R. Gasser. Elsevier. Barking. pp. 42-54.

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.

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

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

Venglovsky, J., N. Sasakova, M. Vargova, Z. Pacajova, I. Placha, M. Petrovsky, and D. Harichova. 2005. Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite. *Bioresource Technology* 96: 181–89. doi:[10.1016/j.biortech.2004.05.006](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.006)

Viel, M., Sayag, D., Peyre, A. y André, L. 1987. Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. *Biol. Wastes*, 20, 167-185.

Yousefi...2013 tesis almeria

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.

