

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**Master Universitario Oficial de
Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo**



**Desarrollo de un compost ecológico y
biodinámico en el entorno de la
horticultura del sureste español**

TRABAJO FIN DE MASTER

Septiembre – 2019

AUTOR: Esperanza Pérez Rodríguez

DIRECTOR/ES: Raúl Moral Herrero
Aurelia Pérez Espinosa



Máster Oficial en Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo

Se autoriza a la alumna **D^a Esperanza Pérez Rodríguez** a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Desarrollo de un compost ecológico y biodinámico en el entorno de la horticultura del sureste español” realizado bajo la dirección de D. Raúl Moral Herrero y D^a Aurelia Pérez Espinosa, debiendo cumplir las directrices para la redacción del mismo que están a su disposición en la asignatura.

Orihuela, 2 de septiembre de 2019

ESTHER|
SENDRA|
NADAL

Firmado digitalmente por
ESTHER|SENDRA|NADAL
Fecha: 2019.09.02 15:23:58
+02'00'

Fdo.: Esther Sendra Nadal

Directora del Master Universitario en Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo





MASTER UNIVERSITARIO OFICIAL DE AGROECOLOGÍA, DESARROLLOR RURAL Y AGROTURISMO

VISTO BUENO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO 2018/2019

Director/es del trabajo
Raul Moral Herrero Aurelia Pérez Espinosa

Dan su visto bueno al Trabajo Fin de Máster

Título del Trabajo
Desarrollo de un compost ecológico y biodinámico en el entorno de la horticultura del sureste español
Alumno
Esperanza Pérez Rodríguez

Orihuela, a 5 de Septiembre de 2019

Firma/s directores/es trabajo



MASTER UNIVERSITARIO OFICIAL DE AGROECOLOGÍA, DESARROLLOR RURAL Y AGROTURISMO

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título: Desarrollo de un compost ecológico y biodinámico en el entorno de la horticultura del sureste español

Modalidad (proyecto/experimental/bibliográfico/caso práctico): experimental

Autor: Esperanza Pérez Rodríguez

Director/es: Raúl Moral Herrero y Aurelia Pérez Espinosa

Convocatoria: Septiembre

Número de referencias bibliográficas: 65

Número de tablas: 11

Número de figuras: 15

Palabras clave (5 palabras): Agricultura ecológica, compostaje, caracterización, fertilización, compost.

RESUMEN:

Se ha realizado un ensayo de compostaje con una mezcla a base de restos hortícolas y cítricos de cultivo ecológico, dentro del entorno de la agricultura biodinámica. El proceso de compostaje se ha desarrollado durante 200 días, incluyendo la etapa de madurez y se han analizado los principales parámetros agronómicos y medioambientales asociados para determinar la calidad final del compost obtenido.

ÍNDICE

1. Introducción	8
1.1. Agricultura Ecológica y Agricultura Biodinámica	9
1.2. Residuos orgánicos en Agricultura Ecológica	12
1.3. Fundamentos del compostaje	13
1.3.1 Definición y etapas del proceso de compostaje	14
1.3.2 Condiciones para el proceso de compostaje	16
1.3.3 Sistemas de compostaje	19
1.3.4 Evaluación del grado de madurez de un compost	20
1.4. Utilización del compost	27
1.4.1. Uso como enmienda orgánica	27
1.4.2. Uso como sustrato de cultivo	28
1.4.3. Legislación medioambiental aplicada al uso del compost	29
1.5. Compostaje Biodinámico	31
2. Antecedentes y objetivos	33
3. Material y métodos	36
3.1. Diseño experimental	37
3.2. Dispositivo experimental	41
3.2.1. Características de los materiales	41
3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado	44
3.3. Desarrollo experimental	45
3.3.1. Seguimiento del proceso del compostaje	46
3.3.2. Muestreo del material, volteos y operaciones realizadas	46
3.4. Métodos analíticos	47
4. Resultados y discusión	49

4.1. Evolución de factores relativos al propio proceso de compostaje	50
4.1.1. Temperatura	50
4.1.2. Densidad aparente	53
4.2. Evolución de la fracción hidrosoluble	54
4.2.1. pH	54
4.2.2. Conductividad eléctrica	55
4.3. Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida	57
4.3.1. Materia orgánica	57
4.3.2. Pérdida de materia orgánica	58
4.3.3. Relación COt/Nt	59
4.3.4. Macronutrientes	62
4.4. Parámetros indicativos de calidad del compost	63
4.4.1. Índice de germinación	65
4.4.2. Capacidad de intercambio catiónico	66
4.4.3. Contenido en polifenoles	66
4.4.4. Metales pesados	66
5. Conclusiones	69
6. Bibliografía	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Agricultura Ecológica y Agricultura Biodinámica

Según el Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018, se define la Producción Ecológica como “un sistema general de gestión agrícola y producción de alimentos que combina las mejores prácticas en materia de medio ambiente y clima, un elevado nivel de biodiversidad, la conservación de los recursos naturales y la aplicación de normas exigentes sobre producción que responden a la demanda, expresada por un creciente número de consumidores, de productos obtenidos a partir de sustancias y procesos naturales”

En el Reglamento anteriormente citado, se definen también los objetivos, principios, normas y características específicas asociadas a cada tipo de explotación que deben seguirse para poder obtener la certificación de producción ecológica.

De manera general, en su Artículo 4, encontramos que los objetivos generales de la producción ecológica son:

- a) contribuir a la protección del medio ambiente y del clima,
- b) mantener la fertilidad de los suelos a largo plazo,
- c) contribuir a un alto grado de biodiversidad,
- d) contribuir sustancialmente a un medio ambiente no tóxico,
- e) contribuir a las rigurosas normas de bienestar animal y, en particular, responder a las necesidades de comportamiento propias de cada especie de animales,
- f) fomentar los circuitos cortos de distribución y las producciones locales en los territorios de la Unión,
- g) fomentar el mantenimiento de las razas raras o autóctonas en peligro de extinción,

h) contribuir al desarrollo de la provisión de material genético vegetal adaptado a las necesidades y objetivos específicos de la agricultura ecológica,

i) contribuir a un elevado nivel de biodiversidad, en particular mediante el uso de material genético vegetal diverso, como material heterogéneo ecológico y variedades ecológicas adecuadas para la producción ecológica,

j) promover el desarrollo de actividades de mejora vegetal de plantas ecológicas a fin de contribuir a las perspectivas económicas ventajosas del sector ecológico.

Asimismo, en su Artículo 5, se definen los principios generales que deben seguir los sistemas de gestión catalogados como sostenibles y, por lo tanto, ecológicos:

a) respeto de los sistemas y los ciclos naturales y mantenimiento y mejora del estado del suelo, el agua y el aire, la salud de las plantas y los animales, y el equilibrio entre ellos;

b) conservación de elementos del paisaje natural como lugares que sean patrimonio natural;

c) utilización responsable de la energía y de recursos naturales tales como el agua, el suelo, las materias orgánicas y el aire;

d) obtención de una amplia variedad de alimentos de buena calidad y otros productos agrícolas y de la acuicultura que respondan a la demanda de los consumidores de productos obtenidos mediante procesos que no dañen el medio ambiente, la salud humana, la salud y el bienestar de los animales ni la fitosanidad;

e) garantía de la integridad de la producción ecológica en cada etapa de la producción, transformación y distribución de los alimentos y piensos.

f) diseño y gestión adecuados de los procesos biológicos basados en sistemas ecológicos y que utilizan recursos naturales propios del sistema de gestión, mediante métodos que:

- i) utilicen organismos vivos y métodos de producción mecánicos,
- ii) desarrollen cultivos vinculados al suelo y una producción ganadera vinculada al suelo o una acuicultura que respete el principio de la explotación sostenible de los recursos acuáticos,
- iii) excluyan el uso de OMG, productos obtenidos a partir de OMG y productos obtenidos mediante OMG, salvo medicamentos veterinarios,
- iv) estén basados en la evaluación de riesgos y en la aplicación de medidas cautelares y preventivas, si procede;

g) restricción del uso de medios externos; en caso de necesitarse medios externos o de no existir las prácticas y métodos adecuados de gestión mencionados en la letra f), los medios externos se limitarán a:

- i) medios procedentes de la producción ecológica, y por lo que respecta al material de reproducción vegetal, se dará prioridad a las variedades seleccionadas por su capacidad de satisfacer las necesidades y objetivos específicos de la agricultura ecológica,
- ii) sustancias naturales o derivadas de sustancias naturales,
- iii) fertilizantes minerales de baja solubilidad,

h) adaptación del proceso de producción, en caso necesario y en el marco del presente Reglamento, para tener en cuenta la situación sanitaria, las diferencias regionales en materia de equilibrio ecológico, condiciones locales y climáticas, fases de desarrollo y prácticas pecuarias específicas;

i) exclusión, en la totalidad de la cadena de alimentos ecológicos, de la clonación de animales, de la cría de animales poliploides inducidos artificialmente y del empleo de radiación ionizante;

j) mantenimiento de un nivel elevado de bienestar animal que respete las necesidades propias de cada especie.

Por otra parte, la Agricultura Biodinámica es un método de agricultura basado en las teorías de R. Steiner en la que las granjas son consideradas como organismos complejos en los que hay que evitar la pérdida de nutrientes por las aportaciones externas, buscando el equilibrio entre suelo, plantas y animales.

Se considera a la finca como un todo, que no debe depender del exterior, por lo que se desarrollan fuentes orgánicas propias para fertilizar los cultivos a partir de los residuos en forma de autocompostaje de larga duración. Este sistema de autoconsumo se lleva a cabo en todos los sectores de la explotación: tanto las especies vegetales como animales que crecen dentro de la finca son las necesarias para su mantenimiento y para no depender de insumos externos.

Asimismo, son indispensables los “preparados biodinámicos” que se añaden al elaborar el compost, además de seguir un estricto calendario astronómico para llevar a cabo la siembra, el cultivo o la cosecha (Diver, 1999).

Así pues, se puede decir que la Agricultura Biodinámica es un subtipo de Agricultura Ecológica en la que hay unas exigencias mayores para poder obtener la certificación.

1.2. Residuos orgánicos en Agricultura Ecológica

Los residuos orgánicos procedentes de actividades agrícolas son los restos de las cosechas tras su recolección y la poda de los cultivos arbóreos. Han sido tradicionalmente usados como abono a lo largo de la historia de la agricultura. Actualmente, su uso es menor en la agricultura convencional por la adición de abonos inorgánicos, pero en agricultura ecológica son los que se siguen usando a día de hoy.

Hay que tener en cuenta que en Agricultura Ecológica solo pueden usarse los residuos procedentes de explotaciones agropecuarias en este sistema,

pues hay que garantizar la ausencia de pesticidas y otros químicos. En el caso de proceder de un sistema en conversión o no certificado por razones logísticas, ya que se fomenta el uso de insumos cercanos para minimizar la emisión de carbono del transporte, se deberá realizar un análisis de los residuos para asegurar su trazabilidad.

La aplicación de estos residuos orgánicos al suelo contribuye a la recuperación de los suelos y a la mejora de la fertilidad, lo que se traduce en un mejor rendimiento de las cosechas aumentando la productividad del cultivo. Según si los restos son arbóreos o no, se opta por su conversión a compost o se adicionan directamente al suelo en forma de abonado verde (Navarro-Pedreño et al., 1995).

Los abonos verdes son los restos de los cultivos o plantas cultivadas específicamente para adicionarlas al suelo que cumplen la función de mejorar las características del suelo. Se caracterizan por presentar abundante materia orgánica, una adecuada proporción de C/N, ser fijadoras de nitrógeno, capacidad de reducir el desarrollo de adventicias y estar adaptadas a las condiciones edafoclimáticas de la zona (Bastida, 2004).

1.3. Fundamentos del compostaje

El compostaje es una gran opción para la valorización de los residuos orgánicos, entre los que podemos incluir los residuos orgánicos procedentes de los procesos agrícolas. Este sistema de tratamiento aporta un beneficio ambiental ya que evita los riesgos de contaminación por incineración y supone un aprovechamiento de la materia orgánica.

Los principales objetivos del proceso de compostaje son:

- La estabilización e higienización de la materia orgánica, por la eliminación de patógenos y malas hierbas.
- La reducción en peso y volumen de los materiales que se compostan.

Teniendo en cuenta estos objetivos, el uso agrícola posterior del producto obtenido, conseguirá efectos beneficiosos para el suelo y los cultivos (Moral y Muro, 2008).

1.3.1. Definición y etapas del proceso de compostaje

Se puede definir el compost como el producto resultante del proceso de compostaje y maduración, que está formado por materia orgánica estabilizada, parecida al humus que no se parece a la materia orgánica original ya que se ha degradado dando lugar a partículas más finas y oscuras. Resulta pues, un producto inocuo y libre de sustancias fitotóxicas que al aplicarlo al suelo no provoca daños a las plantas y, es posible almacenarlo sin necesidad de tratamientos conservativos (Costa et al., 1991).

Al tratarse de un proceso biooxidativo, con un componente biológico imprescindible, se diferencia del resto de procesos físicos, químicos y los que no se realicen de forma aerobia. Asimismo, se diferencia también de los procesos naturales en el control al que está sometido, evitando de esta manera en procesos anaeróbicos.

El compostaje es un proceso microbiológico en el que la materia orgánica inicial se convierte en materia orgánica humificada, interviniendo una gran variedad de bacterias, hongos y actinomicetos. Estos microorganismos no se van sucediendo en las distintas etapas de conversión según influyan factores como la naturaleza del sustrato, el contenido en humedad, la temperatura, la relación C/N, el pH y la aireación. Una vez finalizado el proceso de compostaje, se encuentra como producto final agua, dióxido de carbono y materia orgánica estabilizada (Bueno et al., 2008).

La evolución de la temperatura delimita las etapas por las que pasa el material compostado y marcan su grado evolutivo. Atendiendo a la temperatura y al tipo de microorganismos que actúan sobre el material en proceso de conversión, se diferencian las siguientes etapas (Chen e Inbar, 1993):

1) Etapa mesófila

La temperatura al comienzo del proceso es la misma que en el ambiente donde se encuentre. Empieza también la multiplicación de los microorganismos presentes en el material, existiendo un aumento rápido de la temperatura conforme crece la población de microorganismos. Esta etapa está marcada por su carácter mesófilo en la que se forman ácidos orgánicos de cadena corta. El pH desciende por la acidificación del material y la temperatura se eleva hasta los 40°C.

2) Etapa termófila

Una vez alcanzados los 40°C en la pila, la actividad mesófila llega a su fin y empieza la etapa termófila, que a su vez se divide en dos fases:

- Fase primera: la temperatura se eleva progresivamente, aumenta el pH al incrementarse la acidez por la presencia del ion amonio consecuencia de la degradación de la materia orgánica.
- Fase segunda: mayor incremento de la temperatura y destrucción de patógenos y microorganismos termófilos. Se puede perder nitrógeno en forma de amoníaco y el pH sufre un ligero descenso.

3) Etapa de enfriamiento

Tras el punto máximo de temperatura de la etapa anterior, ésta comienza a descender hasta que vuelve a las condiciones térmicas ambientales. También se ralentiza la velocidad de la reacción y se pierde más calor del que se genera. No hay modificaciones en los valores del pH.

4) Etapa de maduración

Ocurre una vez alcanzada la temperatura del ambiente. Comienzan a ocurrir reacciones secundarias de condensación y polimerización por las que se obtiene el producto final del compostaje, es decir, el humus. Se caracteriza por presentar sustancias antibióticas y la desaparición total de los patógenos. Asimismo, es la etapa que más tiempo requiere.

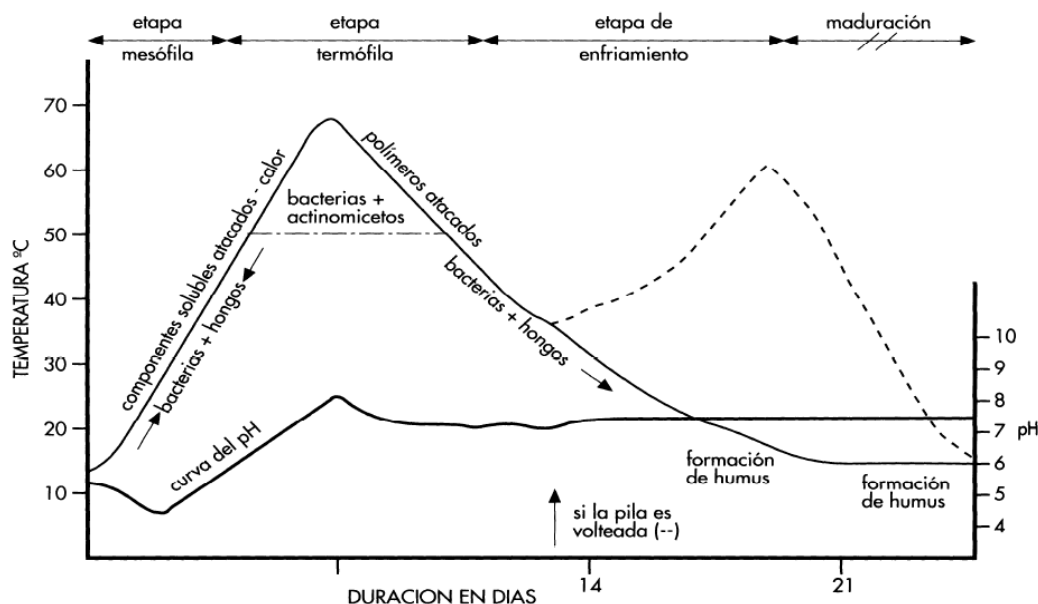


Figura 1. Fases del proceso de compostaje y evolución de los parámetros

1.3.2. Condiciones para el proceso de compostaje

Como se ha comentado anteriormente, el compostaje es un proceso biooxidativo dependiente de la actividad microbiana. Por ello, es necesario controlar los factores que pueden afectar al desarrollo de los microorganismos involucrados en el proceso y, conseguir de esta manera la optimización de la actividad. Estos factores están relacionados con la naturaleza del sustrato o con las condiciones de su desarrollo.

Los principales residuos usados en los procesos de compostaje son de origen agrícola, ganadero, urbano, industrial y forestal. La naturaleza del sustrato sobre la que actúan los microorganismos influye por sus características físicas y físico-químicas:

- 1) Tamaño de las partículas.

Cuanto mayor sea la superficie disponible para los microorganismos, más rápida y eficiente será la reacción. El tamaño óptimo debe estar comprendido entre 1 y 5 cm (Biddlestone y Gray, 1991).

2) Porosidad del sustrato.

Una adecuada porosidad del material a compostar asegura una correcta aireación y capacidad de retención hídrica. En el caso de que los materiales sean poco porosos, se pueden mezclar con otros materiales, preferentemente inertes, para que no ocurran reacciones simultáneas (Costa et al., 1991).

3) Relación superficie/volumen de las partículas.

Esta relación interviene directamente en la forma y velocidad de la degradación del sustrato. Asimismo, la relación aire/agua en la fase intersticial del material contribuyen a una mejor respiración celular (Costa et al., 1991).

4) Relación C/N.

Los valores recomendados para que el proceso de compostaje sea lo más eficiente posible son de 25 a 35. Con valores menores hay pérdida de nitrógeno y, con valores mayores, el proceso se alarga teniendo que añadir nitrógeno externo (Saña y Soliva, 1987).

5) Contenido en nutrientes.

Los microorganismos necesitan ciertos elementos esenciales como el boro, cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc, que son necesarios en pequeñas cantidades pero, tóxicos en concentraciones altas. Estos micronutrientes desempeñan un papel importante en los mecanismos de transporte celular, en el metabolismo y en la síntesis de enzimas en los microorganismos (Biddlestone y Gray, 1991).

6) pH.

Los materiales compostados pueden tener un amplio rango de valores de pH. Sin embargo, los comprendidos entre 5,5 y 8 son los considerados como óptimo ya que, aunque los hongos toleran un pH entre 5 y 8, las bacterias tienen su óptimo entre 6 y 7,5 (Costa et al., 1991).

Las condiciones ambientales son las responsables de la correcta evolución del proceso de compostaje una vez comienza el proceso.

1) Temperatura.

Este parámetro es el que marca el inicio y el final de las etapas en las que se divide el proceso de compostaje. La biodegradación del material es un proceso exoenergético en la que las temperaturas óptimas están en el intervalo de 35-55°C. Temperaturas menores y mayores impiden el desarrollo del compost ya sea por la muerte (o inactivación) de los microorganismos, o la mineralización excesiva del producto final (Saña y Soliva, 1987).

2) pH.

La acidez inicial es la que presentan los residuos usados, posteriormente desciende a lo largo del proceso y, finalmente, se supera el valor neutro. Este descenso del pH es debido a la liberación de ácidos orgánicos en las primeras etapas del compostaje. Más tarde, por la concentración del ion amonio, aumenta su valor hasta la estabilización (Costa et al., 1991).

3) Aireación.

La presencia de oxígeno es imprescindible para el desarrollo del humus. No obstante, es necesario que esté dentro de unos límites, pues la excesiva aireación puede provocar que la temperatura descienda por debajo de los niveles requeridos. El nivel óptimo de oxígeno está comprendido entre el 10 y el 18% (Biddlestone y Gray, 1991).

4) Humedad.

Los microorganismos necesitan cierta cantidad de agua presente durante el proceso de compostaje para su metabolismo. El nivel más adecuado está entre el 40 y el 60%. Por debajo del 30% de humedad la actividad microbiana se reduce de manera considerable y por debajo del 12% cesa por completo (Saña y Soliva, 1987).

1.3.3. Sistemas de compostaje

Atendiendo al lugar donde se produce el compostaje, al tipo de aireación y al grado de complejidad del sistema, se encuentran distintos sistemas de compostaje (Chica y García, 2008):

SISTEMAS ABIERTOS

- Hileras de volteo

El material se dispone en pilas con forma alargada al aire libre. El tamaño y la forma de las pilas que se forman dependerán del clima, el sustrato utilizado y la disponibilidad de maquinaria. En este sistema el sustrato inicial se voltea para conseguir una aireación homogénea. Puesto que las pilas hay que voltearlas de forma regular, esta acción se puede realizar con maquinaria específica (volteadoras) o de forma manual.

- Pilas estáticas

El material a compostar se coloca en hileras de baja altura que no se voltean en ningún momento del proceso. La aireación es natural, pasando el aire a través de la pila. Como el material no se mueve, pueden ocurrir procesos anaerobios en algunas zonas, acompañados de malos olores y gases. Para evitarlo, es recomendable usar sustrato inicial lo suficientemente poroso, de esta manera, la aireación será más eficiente.

- Pilas estáticas con aireación pasiva

El material inicial se coloca en forma de pilas alargadas en sobre unas tuberías perforadas que permiten la aireación del compost. Para optimizar el proceso, la altura de la pila no debe superar los 1.5 metros. Se coloca también una capa de turba sobre la pila para evitar los malos olores y controlar la humedad.

- Pilas estáticas con aireación forzosa

Este sistema de compostaje es similar al anterior, pero, en este caso, la aireación se hace por medio de un compresor que succiona o inyecta el aire para que fluya por el interior de la pila. Al necesitar un equipamiento más sofisticado que controle la aireación y la humedad, se incrementa su costo de puesta en marcha.

SISTEMAS CERRADOS

- Reactores

El compostaje del material inicial se realiza en un contenedor cerrado que voltea el recipiente de manera automática. Presenta la ventaja de ser un método rápido en la finalización del proceso de compostaje y que necesita poco terreno. No obstante, el coste de instalar el reactor y manejarlo es costoso.

1.3.4. Evaluación del grado de madurez de un compost

Para evaluar el grado de madurez de un compost, los indicadores a utilizar son los relacionados con la evolución de los parámetros físico-químicos que afectan al proceso de compostaje y no a los relacionados con el producto final (el compost).

Esto es debido a que la evolución de estos parámetros durante el proceso de compostaje suele seguir una tendencia parecida independientemente del tipo de sustrato inicial.

Los parámetros utilizados deben reunir algunas características comunes (Iglesias et al., 2008):

- Que se pueda saber si el proceso de compostaje ha sido correcto en base al producto final.
- Que su aplicación sea sencilla en la práctica y no requieran de personal o material especializado.

- Que se pueda comprobar científicamente el grado de humificación del material final.
- Que se pueda reproducir el índice de madurez con independencia del origen del material inicial.

Existe una amplia bibliografía respecto a la determinación del grado de madurez del compost, habiendo numerosos métodos aplicables, así como diversos indicadores propuestos.

A continuación, se desarrollan los métodos que se pueden usar para determinar el grado de madurez de un compost, agrupados según la naturaleza del indicador que se usa:

PARÁMETROS FÍSICOS

- Temperatura

La evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje es un signo de la actividad microbiana que se produce. Como esta actividad biológica se estabiliza una vez el compost está maduro, a pesar de que se voltee, el control de la temperatura permite determinar en qué momento el compost está maduro, esto ocurre cuando los valores de la temperatura se estabilizan.

Para determinar este parámetro se usa el test Dewar, en el que se clasifica el compost en cinco niveles según intervalos de temperatura de 10°C. Una vez alcanzado el nivel V, se puede considerar el compost maduro (Brinton et al., 1995).

- Olor

El olor característico que presentan muchos residuos se debe a la presencia de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, cuya concentración va disminuyendo conforme avanza el proceso de compostaje hasta valores inapreciables (Iglesias y Pérez, 1989).

- Color

El proceso de humificación que se produce durante el compostaje de los materiales tiene como consecuencia el oscurecimiento del sustrato hasta un color pardo oscuro casi negro. Aunque se puede determinar de forma visual el correcto oscurecimiento del compost, es más usual determinarlo con el índice Y colorimétrico del grado de luminosidad (Sugahara et al., 1979). Cuando el valor del índice Y se encuentra entre 11 y 13 se puede considerar el compost como maduro.

PARÁMETROS QUÍMICOS

- Ratio C/N de la fase sólida

Este criterio es el más utilizado para determinar el grado de madurez de un compost. Para que este parámetro pueda utilizarse, es necesario que el valor del producto inicial sea 30 y, menor de 20 en el producto final.

Morel et al, (1985) consideran que para establecer el grado de madurez hay que hacer un seguimiento periódico de este índice. Por otra parte, Iglesias y Pérez (1992a) y Bernal et al., (1998), determinan que el valor más idóneo es inferior a 12.

- Ratio C/N de la fase soluble

A lo largo del proceso de compostaje, la descomposición de la materia orgánica da lugar a numerosos compuestos, pasando muchos de ellos a la fase acuosa. El contenido en carbono y nitrógeno orgánico en la fase líquida son un claro reflejo de los procesos bioquímicos que se producen (Chanyasak y Kubota, 1981).

La relación entre los valores de estos dos compuestos nos indica el grado de madurez del material compostado final, considerándose maduro cuando el índice es menor de 6 (Iglesias y Perez, 1991, 1992a; Chang et al., 2006).

- Carbono orgánico soluble en agua (C_w)

La determinación del carbono orgánico soluble en agua es considerada el método más fiable para determinar la madurez de un compost debido a que su comportamiento siempre es el mismo: un descenso gradual que acaba en una estabilización. No obstante, se los límites son difíciles de establecer, pues la concentración depende del material de partida.

Numerosos autores consideran que el valor máximo es menor de 5g/kg o su equivalente en absorbancia de 465 nm. Esta equivalencia se acepta puesto que, tras diversos ensayos con distintos materiales iniciales, la correlación entre el C_w y ese valor de absorbancia es significativo (Iglesias et al., 2008).

- Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico esta significativamente correlacionada con el grado de humificación de la materia, aumentando su valor conforme la materia orgánica se va transformando en sustancias húmicas. Es por ello que se considera un buen índice de determinación de la madurez de un compost, teniendo en cuenta siempre el material inicial a compostar.

Se han descrito distintos métodos para determinar este parámetro, pero se consideran como estandarizados el de Harada e Inoko (1980) para composts de RSU y el de Lax et al., (1986), para composts de otros residuos orgánicos (Iglesias et al., 2008).

- Ratio $N-NH_4^+/N-NO_3^-$

Se considera que un compost está maduro cuando aparecen cantidades significativas de nitratos y/o nitritos debido a que en la fase termófila la nitrificación no puede producirse (Finstein y Miller, 1985).

A su vez, Bernal et al. (1998), proponen como índice de madurez un valor inferior a 0,16 en la ratio $N-NH_4^+/N-NO_3^-$.

PARÁMETROS BIOLÓGICOS

La fitotoxicidad es la característica del compost que afecta negativamente al crecimiento vegetal. Dado que la finalidad del compost es ayudar al correcto crecimiento de los cultivos, es necesario evaluar su calidad, mediante ensayos de fitotoxicidad, para asegurar su aptitud (Zucconi et al., 1985).

- Germinación y elongación de raíces

Los ensayos de germinación son una manera rápida y fiable de comprobar si existe fitotoxicidad en el compost. Consisten en germinar semillas con extracto de compost en placas de Petri, introducidas en una incubadora entre 20 y 28°C durante un tiempo establecido (1-5 días). Posteriormente se mide la elongación de las raíces respecto a un control germinado con agua destilada (L) y el número de semillas germinadas (G) (Zucconi et al., 1981).

Los datos obtenidos se expresan como:

$$\text{IG (Índice de Germinación)} = [\% \text{Germinación} \cdot \% \text{Elongación}] / 100.$$

Se considera que un compost es fitotóxico si el IG es inferior al 50%; moderadamente fitotóxico entre 50 y 80%; y no fitotóxico cuando el valor es superior al 80%. Asimismo, se puede hablar de compost fitoestimulante cuando se obtienen valores superiores al 100% (Emino y Warman, 2004).

- Siembra directa

Este ensayo es más complicado de realizar que el anterior, pues supone la siembra de las semillas sobre un suelo determinado y usar un suelo control para poder establecer diferencias. Además, las condiciones ambientales deben poder ser controladas, y el tiempo necesario son de 7 a 14 días de cultivo. Se emplea el protocolo estandarizado de la FCQAO (1994) y sus resultados se miden en términos de producción respecto al control (Iglesias et al., 2008).

- Cultivo de plantas

Se sigue el mismo protocolo que la siembra directa, pero el tiempo de crecimiento de la planta es de 15 a 77 días. Es el método más lento y costoso

de todos los existentes, pero es el que se aproxima más a las condiciones reales en las que se va a usar el compost (Iglesias et al., 2008).

PARÁMETROS DE EVOLUCIÓN DE LA MASA MICROBIANA

- Cuantificación y diversidad microbiana

La cantidad de biomasa microbiana varía a lo largo del proceso de compostaje, decreciendo de manera constante hasta el final. Asimismo, cada etapa del proceso está caracterizada por una especie característica, por lo que cuantificar los microorganismos presentes es un buen método de determinación del grado de madurez.

Las técnicas de determinación más usadas son la del perfil de ácidos grasos de fosfolípidos (PLFA) y la del perfil de quinonas (QP). No obstante, no siempre se pueden utilizar por el elevado coste que suponen (Iglesias et al., 2008).

- Respirometría

Los métodos respirométricos de cuantificación del consumo de oxígeno y emisión de dióxido de carbono son una manera sencilla de evaluar la madurez del compost. Para que se considere maduro el producto final, no debe consumir más de 40 mg de O₂/Kg de materia seca en una hora, tras permanecer en una incubadora durante tres días (Iglesias y Pérez, 1989).

- Parámetros bioquímicos de la actividad microbiana

El estudio de la actividad enzimática de la masa microbiana es un indicador de la actividad celular, relacionándose esta actividad con la variación de temperatura en el proceso de compostaje. Se considera que conforme disminuye la actividad enzimática aumenta la madurez del compost (Costa et al, 1991).

- Análisis de constituyentes biodegradables

Morel et al, en 1985, indicaron que el parámetro que mejor caracteriza la madurez de un compost es el Índice de Degradabilidad, que relaciona el

carbono orgánico total, los carbohidratos solubles en agua caliente y el tiempo de compostaje.

La fórmula a utilizar sería:

$$ID: 3,166 - 0,011 (\text{Edad}) + 0,059 (\text{COT}) + 0,832 (\text{PHs})$$

Siendo:

- Edad: días de compostaje
- COT: Carbono Orgánico Total
- PHs: Carbohidratos solubles en agua caliente

Usando la relación anteriormente mostrada, se consideran que valores de ID inferiores a 2,4 corresponden a un compost maduro. Por otro lado, los valores de ID superiores a 2,7 indican inmadurez en el producto.

PARÁMETROS DE EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA HUMIFICADA

- Relación de polimerización o Ratio AH/AF

Debido a la mineralización progresiva del sustrato inicial, se van formando precursores de los ácidos húmicos, especialmente polifenoles. Para caracterizar un compost como maduro, la relación de polimerización basándose en la cantidad de ácidos húmicos y fúlvicos debe ser superior a la unidad (Iglesias y Pérez, 1992b).

Tras exponer la diversidad de métodos existentes para determinar el grado de madurez de un compost, se puede observar la dificultad que supone encontrar un método único y extrapolable a todos los materiales compostados. Sin embargo, cualquiera que sea el método o los métodos seleccionados para determinar el índice de madurez, es necesario que cumplan algunas directrices comunes:

- Basarse en la evaluación de parámetros que puedan ser determinados mediante técnicas analíticas sencillas y reproducibles.

- Las preparaciones y manipulaciones previas no deben afectar a los resultados.
- Hay que tener en cuenta los materiales de origen y las condiciones ambientales existentes durante el compostaje.

1.4. Utilización del compost

Es necesario conocer la composición química de un compost antes de utilizarlo para poder evaluar y determinar a qué uso es más adecuado destinarlo. Para ello, debe comprobarse y verificar que los productos destinados a mejorar las características del suelo de cultivo tengan eficiencia agronómica y ausencia de efectos dañinos para la salud humana y el medio ambiente.

De esta manera, se puede considerar que un material compostado tiene dos usos fundamentales: como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo. Para cada uno de ellos, hay que tener en cuenta tanto las características específicas del compost como las necesidades del suelo o de los cultivos. Asimismo, debe contemplarse el marco normativo aplicado a cada caso (Martínez, 1995).

Independientemente del uso al que se destine el compost, su aplicación deberá tener en cuenta las buenas prácticas agrícolas, tal y como reflejan el RD 506/2013, sobre productos fertilizantes, modificado por el RD 999/2017, y el RD 865/2010, sobre sustratos de cultivo.

1.4.1. Uso como enmienda orgánica

El uso como enmienda orgánica del compost tiene como finalidad el incrementar la cantidad de sustancias húmicas en el suelo para corregir la concentración de estos compuestos en suelos pobres, en el mantenimiento del terreno de cultivo entre rotaciones o cuando las producciones agrícolas dan balance húmico negativo (García y Lobo, 2008).

Los principales efectos beneficiosos asociados a este uso es la mejora general de la fertilidad del suelo a nivel físico, químico y biológico, como

consecuencia del mantenimiento o incremento de la presencia de sustancias húmicas. Es especialmente interesante en suelos agrícola por el descenso paulatino de los niveles de materia orgánica, que conllevan la disminución de la fertilidad y el aumento de la erosionabilidad del suelo (Favoino y Hogg, 2008).

El uso del compost como enmienda orgánica frente a otros compuestos derivados de la materia orgánica es debido a la estabilidad del material y de su contenido en sustancias húmicas. Asimismo, al aplicar el compost como enmienda orgánica se ayuda a fijar el carbono orgánico del suelo y se evita el uso posterior de fertilizantes inorgánicos (Soliva et al., 2013).

1.4.2. Uso como sustrato de cultivo

Es uso como sustrato de cultivo es la aplicación más reciente para la valoración del compost. Tradicionalmente se ha usado turba en la producción de tierra vegetal, pero el compost evita las emisiones producidas por la extracción y mineralización de la turba (Boldrin et al., 2009).

El sistema de cultivo con compost como sustrato es utilizado para la multiplicación por semillas y esquejes de especies hortícolas, frutícolas o forestales; y para el cultivo de plantas en contenedor para jardinería y paisajismo.

Los inconvenientes asociados a estas prácticas se pueden corregir durante el proceso de compostaje. Algunas soluciones son (Bernal et al., 1998):

- Materias primas
 - Co-compostar materiales iniciales básicos con otros ácidos para disminuir el pH final y disminuir la pérdida de nitrógeno orgánico.
 - Uso de materias primas poco salinas y con bajo contenido en sustancias fitotóxicas.
- Proceso de compostaje

- Reducción del tamaño de las partículas mediante procesos físicos.

Todas estas mejoras tienen como objetivo la obtención de un producto final estable y maduro, mediante la realización de una buena fase de descomposición y maduración del material inicial.

1.4.3. Legislación medioambiental aplicada al uso del compost

El uso del compost, independientemente de cual sea su material de origen, presenta numerosas aplicaciones. Algunas de ellas son la de fertilizante de cultivos, enmienda orgánica de suelos cultivados y suelos pobres, recuperación de suelos sobreexplotados y sustrato de cultivo.

No obstante, todos estos usos están limitados por diferentes factores relacionados con su aplicación: el tamaño de las partículas, la emisión de olores tras su aplicación, la presencia de metales pesados y patógenos, y que contengan materiales inertes como vidrio o plásticos.

Por todo lo anteriormente descrito, se hace necesaria la definición, y la enumeración de las características físicas, químicas y biológicas de los distintos compost que se pueden usar, estableciendo una normativa que garantice su uso libre de riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

En España, la trasposición de la Directiva europea sobre nitratos da lugar al RD 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias

Este Real Decreto está mayormente enfocado a los vertidos de procedentes de las explotaciones agropecuarias, y en él se definen los compuestos considerados como contaminantes y cómo afectan al medio ambiente y a la salud humana, donde el aporte de ciertos materiales orgánicos (purines o compost no estabilizados o estiércoles frescos) podría ocasionar problemas.

En el Anexo III de este decreto se delimita que la cantidad máxima de abono orgánico que puede adicionarse a la tierra. Este valor es de 170 kg de Nitrógeno por hectárea y año. Esta cantidad sirve de base de cálculo para

delimitar el número máximo de animales que puede haber en una explotación agropecuaria.

RD 506/2013, DE 28 DE JUNIO, SOBRE PRODUCTOS FERTILIZANTES Y RD 999/2017, DE 24 DE NOVIEMBRE, SOBRE PRODUCTOS FERTILIZANTES

Este decreto, modificado posteriormente para caracterizar nuevos compuestos desarrollados tras su publicación, clasifica el compost dentro del “Grupo 6. Enmiendas orgánicas” y lo define como “producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo la fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente”.

Además de esta definición, en este Real Decreto se enumeran las normas de identificación, etiquetado, comercialización y márgenes de tolerancia de los productos compostados. También, se indican las materias primas permitidas como material inicial de los compost, y cuáles son los requisitos mínimos exigidos para que un producto se considere compost.

RD 865/2010, DE 2 DE JULIO, SOBRE SUSTRATO DE CULTIVO Y RD 1039/2012, DE 6 DE JULIO, POR EL QUE SE MODIFICA EL RD 865/2010, DE 2 DE JULIO, SOBRE SUSTRATO DE CULTIVO

En este decreto, modificado posteriormente para la corrección de errores, se definen y tipifican todos los productos que se engloban dentro del término “sustrato”, con el fin de que cuando se pongan en el mercado sean agrónomicamente viables y no provoquen efectos adversos en el medio y el ser humano.

Los compost de residuos orgánicos se delimitan en el “Grupo 1: productos orgánicos como sustratos de cultivo o componentes de los mismos”. Asimismo, en los anexos se especifican las características y los requisitos (obligatorios y opcionales) que deben cumplir estos materiales cuando se usen como sustrato de cultivo o como componente de los sustratos de cultivo.

1.5. Compostaje Biodinámico

El compostaje Biodinámico tradicional se realiza en forma de pilas estáticas en las que se colocan de forma alterna materiales ricos en carbono y ricos en nitrógeno. Una vez finalizada la pila, se recubre con una capa de suelo y paja. Posteriormente, la pila se deja compostar entre 6 meses y un año (Canet y Albiach, 2008).

Además del material a compostar, se añaden unos “preparados biodinámicos”, en cantidades muy pequeñas (aproximadamente 1g de preparado por cada 10 t de material a compostar), en unos lugares determinados de la pila o se pulverizan sobre ella. En la Figura 2 se pueden observar dónde se colocan los preparados.

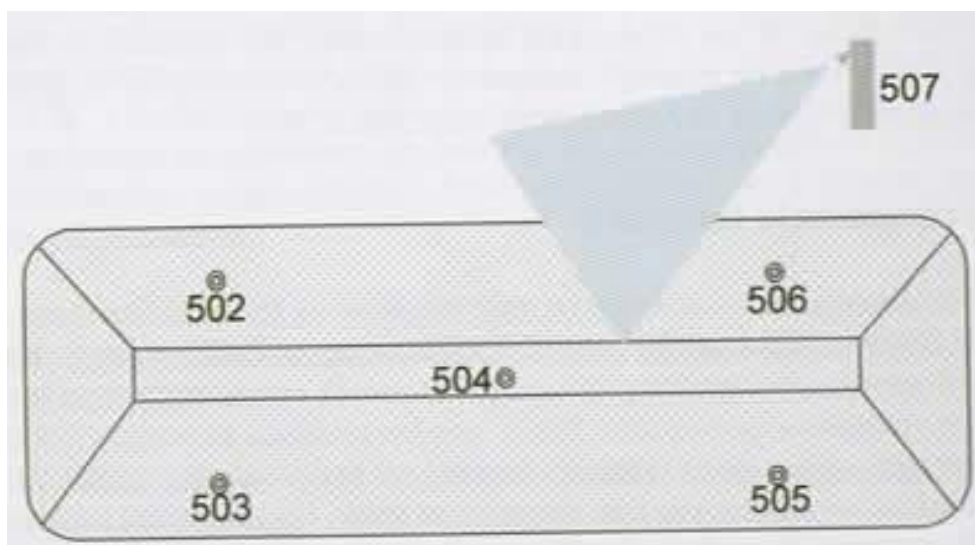


Figura 2. Colocación de los preparados Biodinámicos

Estos preparados, su base y sus efectos se recogen en la Tabla 1. No obstante, todos estos efectos y el porqué de su utilización no están demostrados de manera científica, sobre todo por las cantidades tan pequeñas que se usan. Carpenter-Boggs et al. (2000) no encontraron diferencias entre dos composts elaborados a partir de los mismos materiales, pero uno de forma convencional y otro biodinámico.

Tabla 1. Preparados Biodinámicos

Preparado	Base	Efectos
502	Flores frescas de milenrama	Mejora en el metabolismo edáfico del potasio, azufre y elementos traza
503	Flores secas de camomila	Estabilización del nitrógeno en el compost e incremento de la flora microbiana del suelo
504	Ortigas	Mejora nutricional y activante
505	Corteza de roble viejo	Microbicida
506	Flores de dientes de león	Establecer relaciones entre el sílice y el potasio
507	Flores secas de valeriana	Mejora de las propiedades del fósforo del compost

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

En las últimas décadas, el aumento de la actividad agropecuaria con fines industriales para satisfacer la demanda de los consumidores ha tenido como consecuencia un incremento considerable de la producción y acumulación de residuos, especialmente los orgánicos.

Gracias a la concienciación con el cuidado del medio ambiente, actualmente existe una extensa normativa, tanto a nivel europeo como a nivel regional y local, que pretende detener este crecimiento de residuos. Además, desde la Unión Europea, se fomenta la valorización de los residuos para evitar su acumulación.

La política de gestión de residuos de la UE se ha articulado en base a tres principios básicos:

1. Impedir que se generen residuos.
2. Recuperar los residuos que ya se han generado.
3. Eliminar estos residuos de forma segura.

La necesidad de generar menos residuos, y de obtener un beneficio de su explotación, ha hecho que los productos obtenidos a partir de residuos orgánicos sean más demandados. Esta situación no es novedosa, durante la época preindustrial, los fertilizantes únicamente provenían de materiales considerados residuos, como los estiércoles. Posteriormente, el uso de estos abonos se ha visto minimizado en favor del auge de los fertilizantes inorgánicos de síntesis o minerales.

Sin embargo, en los últimos años, la concienciación con el medio ambiente y las consecuencias nocivas del uso indiscriminado de estos fertilizantes inorgánicos ha hecho que los fertilizantes de origen orgánico cobren protagonismo.

En este sentido, la Agricultura Ecológica (en la que los fertilizantes inorgánicos están prohibidos) ha tenido mucho que ver, pues el número de explotaciones agropecuarias en régimen ecológico crece cada año debido a la concienciación por la sostenibilidad de propietarios y consumidores.

El compostaje de los residuos generados en las explotaciones ecológicas supone por tanto una alternativa a la adquisición de material orgánico certificado externo, ayudando al sistema a ser autosuficiente y a minimizar la acumulación de residuos.

Por todo lo anteriormente expuesto, en este Trabajo Fin de Máster nos planteamos como objetivo principal, el estudio de la viabilidad de residuos de explotaciones agrícolas ecológicas como material inicial para la valorización con pila estática y preparados biodinámicos, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterización inicial de los residuos a compostar.
2. Seguimiento de los parámetros indicadores del proceso de compostaje, a nivel de temperatura y aireación.
3. Estudio de la evolución de las características fisicoquímicas y químicas de la mezcla de residuos a lo largo del proceso de compostaje, así como del producto final obtenido (compost).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Diseño experimental

En este trabajo experimental se plantea el estudio de la valorización por co-compostaje mediante pila móvil con ventilación natural y por volteos periódicos, de poda de cítricos, destríos hortícolas y estiércol de caballo. Para ello, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en 4 fases:

- Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.
- Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.
- Fase 3: Desarrollo de un sistema de compostaje por pilas.
- Fase 4: Análisis de las características físico-químicas y químicas de los materiales durante el proceso de compostaje y del producto final obtenido.

FASE 1: CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS RESIDUOS A COMPOSTAR

Como se pretende estudiar la evolución del material final tras el compostaje de distintos materiales, se han de caracterizar los materiales de los que se parte para poder establecer la mejor estrategia de compostaje.

En este ensayo se caracterizaron los siguientes materiales:

- Poda de cítricos:

Tras la cosecha de los cítricos, se realiza una poda de manera manual de los árboles para favorecer su correcto crecimiento y optimizar el rendimiento de la producción.

- Destrío hortícola

Tras la cosecha hortícola del rábano, colirábano e hinojo, los materiales que no pueden ser aprovechados para el consumo sí pueden ser interesantes como material inicial para compostar por su alto contenido en materia orgánica. Este destrío se trata de forma conjunta al tratarse de flujos residuales vegetales de

origen ecológico que se generan en la misma época del año, y por tanto, son biomásas afines en disponibilidad



Figura 2. Poda de cítricos



Figura 3. Destrío hortícola

- Estiércol de caballo

El estiércol animal procedente de la propia explotación se adiciona junto al material vegetal a compostar por su bajo contenido en nitrógeno y sus propiedades bactericidas.



Figura 4. Estiércol equino

Para el muestreo de los materiales iniciales, se ha seguido el siguiente protocolo:

1. El material incorporado a cada pila se ha recogido de las distintas cooperativas del piloto, gestionando un total de 426 m³ M.F y 61 t M.F

2. De cada material se muestreó por separado tomando submuestras a diferentes alturas y profundidades de la pila.
3. Estas submuestras se homogeneizaron para obtener una sola muestra final.
4. Se realizaron análisis por triplicado de la muestra final.

FASE 2: ESTABLECIMIENTO DE LA MEZCLA A COMPOSTAR

Debido a las características propias del proceso de compostaje, es importante que, a la hora de elaborar la pila, la mezcla inicial posea una correcta humedad, porosidad y relación C/N.

Este proceso se realizó mediante el uso de las siguientes expresiones:

- Ecuación (1)

$$P = A + B + C = (A \cdot \%CA \cdot \%MSA) + (B \cdot \%CB \cdot \%MSB) + (C \cdot \%Cc \cdot \%MSc)$$

- Ecuación (2)

$$C/N = (A \cdot \%NA \cdot \%MSA) + (B \cdot \%NB \cdot \%MSB) + (C \cdot \%Nc \cdot \%MSc)$$

Siendo:

- 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.
- CA, CB, CC = Carbono de componente A, B y C, respectivamente.
- NA, NB, NC = Nitrógeno de componente A, B y C, respectivamente.
- MS = Materia seca.

FASE 3: DESARROLLO DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE

Una vez establecida la mezcla en las condiciones óptimas iniciales se inicia el proceso de compostaje en pila estática y su control desde el inicio hasta la obtención del compost maduro.

El proceso se desarrolló con los siguientes requerimientos:

- Realizar un proceso de compostaje biodinámico, incluyendo preparados biodinámicos y una duración mínima de 6 meses.
- Reducción del número de volteos para minimizar el uso de aperos mecánicos y las emisiones de gases GEI asociadas al manejo.

La aireación se controla mediante volteos periódicos de la pila de manera mecánica y la temperatura con sondas portátiles.

FASE 4: ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS Y QUÍMICAS DE LOS MATERIALES A COMPOSTAR A LO LARGO DEL PROCESO, ASÍ COMO DEL PRODUCTO FINAL OBTENIDO (COMPOST).

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

Humedad

- Densidad aparente
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- Nitrógeno total
- Carbono hidrosoluble
- Contenido de P, K, Ca y Na

– Ácidos húmicos y fúlvicos

Además de los parámetros anteriores, se estudia la evolución del material a lo largo de todo el proceso, desde el inicio hasta que el compost está maduro. Esta evolución se hace mediante parámetros indicativos del proceso:

- Asociados al proceso de compostaje

Estos parámetros son los cambios de la temperatura de las pilas, la altura a la que se montan, y el volumen de material existente.

- Asociados a la evolución de la materia orgánica

Los parámetros a estudiar son los siguientes: materia orgánica, carbono orgánico, pérdida de la materia orgánica y relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total.

- Asociados a la evolución de contenidos nutrientes

El contenido en nutrientes como la concentración de NPK y de Na en el compost, de interés para la nutrición vegetal nivel agronómico, es muy importante.

- Asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble

Los parámetros que se estudian en esta fracción son el pH y la conductividad eléctrica.

- Asociados a la madurez del compost

Estos indicadores son la capacidad de intercambio catiónico y el índice de germinación.

3.2 Dispositivo experimental.

3.2.1. Características de los materiales

De los materiales usados para formar la pila de compostaje, solo el estiércol equino es el que está disponible en cualquier momento del año. Los otros dos,

están sujetos a la temporalidad de la cosecha, pues hasta no ocurre, no se procede a la poda de los cítricos ni al destrío hortícola.

Las características de los materiales utilizados en el proceso de co-compostaje ensayado se muestran en la Tabla 2. Las materias primas que se utilizarán en este proyecto son el estiércol equino, la poda de cítricos y el destrío hortícola de rábano, colirábano e hinojo.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de los ingredientes utilizados

Propiedades	Estiércol equino (MP-165)	Poda de cítrico (MP-181)	Destrío hortícola		
			Rábano (MP-172)	Colirábano (MP-171)	Hinojo (MP-170)
Humedad (%)	38,9	12,7	93,7	86,6	93,0
Materia seca (%)	61,1	87,3	6,9	13,4	7,0
Densidad aparente (kg/L)	0,122	0,085	0,422	0,292	0,162
pH (ud pH)	7,7	5,8	5,9	5,4	6,3
Conductividad Eléctrica CE (dS/m)	2,1	2,1	2,0	5,9	2,0
Materia orgánica total, MOT (%)	67,4	90,3	76,7	70,6	50,4
Cenizas (%)	32,6	9,7	22,4	29,4	49,6
Nitrógeno total, NT (%)	1,94	1,11	2,84	2,08	1,23
Carbono total, CT (%)	34,0	44,3	33,1	33,9	22,2

Relación CT/NT	17,5	41,1	11,7	16,3	18,9
Fosforo total, P total (g/kg)	1,15	0,52	3,91	3,32	2,73
Potasio total, K total (g/kg)	24,9	5,2	43,5	39,5	43,9
Sodio total, Na total (g/kg)	8,8	1,7	22,7	10,4	11,5

Respecto al contenido en humedad, el destrío hortícola presenta un alto contenido en humedad, tal y como corresponde a estas especies vegetales, mientras que el estiércol equino y la poda de cítricos presentan un contenido en humedad menor. En este sentido, los materiales se complementan de cara al proceso de compostaje pues equilibran la humedad total de la pila.

Por otra parte, el alto contenido en materia seca de la poda de cítricos ayuda a evaporar el agua contenida en los otros materiales, ayudando así a que se alcance el calor requerido para que se produzcan las reacciones biológicas.

El pH de los materiales es ligeramente ácido en el caso de los materiales de origen vegetal, y ligeramente básico en el material de origen animal.

En el caso de la materia orgánica, el mayor porcentaje se encuentra en la poda de cítricos, aunque los valores en todos los materiales son elevados. Asimismo, los niveles de carbono orgánico son también elevados, siendo el más alto en la poda de cítricos.

Para los elementos minerales, los destríos hortícolas presentan el valor más elevado para todos ellos, observándose diferencias significativas con los otros dos materiales.

3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado

El proceso de montaje se desarrolló utilizando los tres ingredientes básicos que se muestran en la Tabla 3 con los siguientes porcentajes:

Tabla 3. Porcentaje de peso en fresco y volumen de los materiales empleados en la pila.

Pila	Poda de cítrico	Destrío hortícola	Estiércol equino
% peso M.F	8,2	45,9	45,9
% volumen M.F	13,8	32,4	53,8

Se plantea un proceso de compostaje en sistema abierto, tal y como se observa en la Figura 5, con volteo periódico de empleando una volteadora acoplada al tractor, controlando diariamente temperatura y humedad. La humectación se realiza mediante manguera.

Este proceso de compostaje y la composición de la pila, así como el porcentaje de ingredientes se estableció de forma que se optimice la relación C/N de la mezcla resultante para que alcance un valor de 29. Este valor preestablecido permite un desarrollo largo del proceso y minimizar las pérdidas de nitrógeno asociadas a pilas con relación C/N inicial menor de 20.



Figura 5. Pilas de compostaje al aire libre

3.3. Desarrollo experimental

El proceso de montaje se desarrolló siguiendo la mezcla anterior y los materiales se depositaron por capas de los diferentes residuos “modo sándwich” mediante pala mecánica, durante el montaje la pila se regó alcanzando una humedad del 50%.

Se plantea un proceso de compostaje en sistema abierto, con volteo periódico de empleando una volteadora acoplada al tractor, controlando diariamente temperatura y humedad. La humectación se realiza mediante manguera.

DESARROLLO Y CONTROL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

En cada proceso de compostaje se realizan una serie de operaciones que se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Operaciones realizadas a cada pila.

Operación	Fecha	Observaciones
Toma de muestras iniciales	10/04/2018	Muestra integrada de 4 submuestras
Volteo	25/06/2018	Homogenización y humectación de la pila. Añadido de los preparados biodinámicos
Toma de muestras	25/06/2018	Determinación de la humedad par toma de decisiones
Toma de muestras	07/09/2018	Muestra integrada de 4 submuestras
Volteo	20/09/2018	Homogenización y humectación de la pila.
Toma de muestras	05/12/2018	Muestra integrada de 4 submuestras

Estas operaciones se establecen para asegurar la correcta aireación y humedad de las pilas y se adaptan a los medios.

3.3.1. Seguimiento del proceso del compostaje

El control del proceso se ejerce mediante el análisis del perfil térmico de las pilas de compostaje. La temperatura nos indica la eficiencia del proceso de biotransformación aeróbica de los materiales existiendo una correlación directa entre la temperatura de la pila y la actividad microbiana que es exotérmica en estos procesos.

Durante el proceso se alcanzaron temperaturas de 60°C durante 20 días consecutivos y una temperatura máxima de 72,2°C que aumentan la garantía de higienización.

3.3.2. Muestreo del material, volteos y operaciones realizadas

Se recogió una muestra en al inicio ($t=0$), a mitad del proceso ($t= 150$) y previo a su aplicación en campo ($t= 239$)

EMPLAZAMIENTO DE LA ZONA DE COMPOSTAJE

Situado en la parcela de un cooperativista y próximo a la nave central se encuentra el emplazamiento del piloto, junto a un invernadero con una playa de tierra compacta de 25 x 8 metros, dispone de fácil acceso para el movimiento de la maquinaria y el acopio de los residuos y con toma de agua.

MONTAJE DE LAS PILAS (START-UP)

Cada una de las pilas se configuró estableciendo una correlación entre volumen, materia fresca y materia seca, a partir de los valores de humedad y densidad aparente de cada ingrediente. Estos valores son especificados de cada proceso. Una vez establecida esta relación en volumen propuesta en la Tabla 3, se procede a montar cada pila constituyendo unidades básicas de montaje en volumen usando la pala del tracto como unidad de medida.

Se consiguió configurar una pila de dimensión estándar de sección 3 metros de ancho x 1,5 m de alto, con lo que tenemos 4,5 m² de sección. La longitud de la pila depende de la cantidad de insumo disponible existiendo un mínimo de 5 m de largo, la mezcla 1 se conformó de 30 metros de largo y 61 toneladas iniciales.

Sobre el largo de la pila se realizó una un surco por el que regar evitando que el agua resbale por los laterales, para realizar el riego se utilizando un sistema de riego localizado por manguera portagoteros.

Para los volteos se usó un apero tipo volteadora acoplado a un tractor, este apero lleva acoplado una cuba de 1000 l para humectar la mezcla durante los volteos.

3.4. Métodos analíticos

Las determinaciones que se realizaron son humedad o peso seco, mediante el método gravimétrico, secando las muestras a 105°C hasta peso constante.

El pH y la conductividad eléctrica se determinaron potenciométricamente en una suspensión 1:5 (p/V) mediante pHmetro y conductímetro, respectivamente.

Para la materia orgánica total, el método fue mediante calcinación de la muestra a 550 °C en cápsula de porcelana.

El carbono total de la muestra y nitrógeno total se determinaron por combustión de la muestra a 1020 °C en un analizador elemental (Navarro et al., 1991) y la relación C/N, a partir de los valores de C y N obtenidos anteriormente.

El fósforo se determinó por espectrofotometría visible con formación del complejo fosfovanadomolibdico y, la capacidad de intercambio catiónico mediante el método de Harada e Inoko (1980).

El Índice de Germinación se determinó usando semillas de *Lepidium Sativum* L (Zucconi et al., 1985), a partir de los porcentajes de semillas

germinadas y la longitud de las raíces, tras su incubación en un extracto acuoso del compost.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evolución de factores relativos al propio proceso de compostaje

4.1.1. Temperatura

La temperatura es indicativa de la eficiencia del proceso de biotransformación aeróbica de los materiales y existe relación directa entre la temperatura de la pila y la actividad microbiana que es exotérmica. Es por ello que a mayor temperatura las condiciones de aireación, humedad y alimento para la pila implican necesidades de manejo, como son el volteo para aumentar la aireación, el riego para mejorar humectación, el volteo para homogenización y el acceso a materia fresca sin compostar de la pila.

Durante las fases que atraviesa el compost en cada volteo realizado, se produce un aumento de la temperatura, que se asocia a la fermentación del material que queda en la parte exterior de la pila. Este aumento se debe a la reactivación de los microorganismos, que disponen nuevamente de alimento al homogeneizar la masa y mezclar la capa superficial con la interna.

Se estima que la pila ha alcanzado el final de la fase biooxidativa cuando después de un volteo, la temperatura promedio de la pila durante al menos 10 días seguidos no supera en 10°C la temperatura ambiente. Esto nos indica que la materia fresca esta transformada en gran medida antes de su paso a la fase de maduración, que se establece de forma programada en 30 días adicionales donde la pila evoluciona de forma más lenta.

Para el control diario de las temperaturas de la pila se usa una sonda de temperatura que se introducirá en diferentes puntos de la pila y se realiza su promedio. Mediante las temperaturas medias y máximas de las pilas y la temperatura media ambiental de la parcela se obtienen los perfiles térmicos.

En la Figura 6, se muestra la evolución de la temperatura a lo largo de todo el proceso, así como los días que se volteó la pila y cuándo se tomaron muestras. En total la pila se compostó durante 200 días, coincidiendo los máximos de temperatura con los volteos de homogeneización.

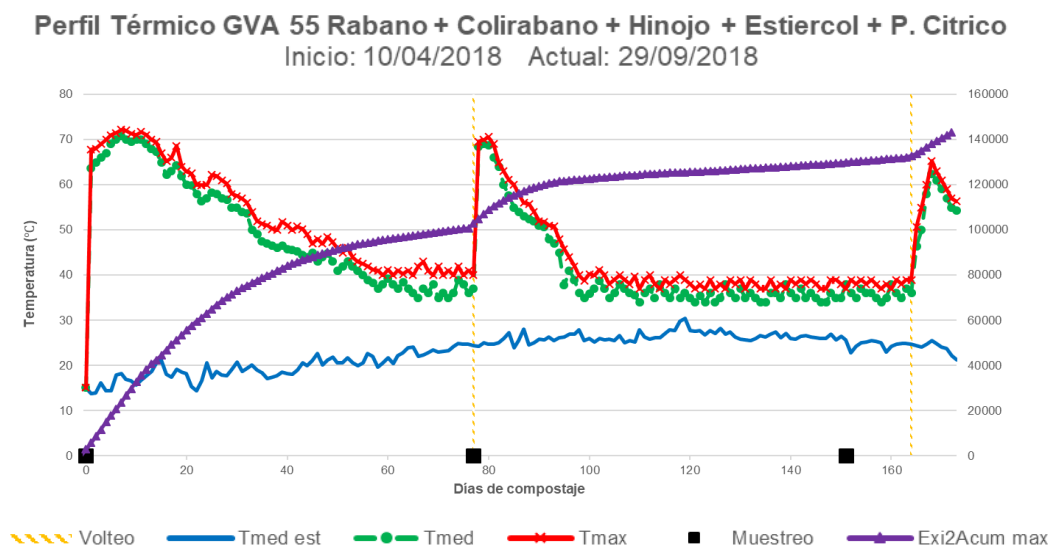


Figura 6. Perfil térmico de la pila ensayada.

Para la evaluación integrada del proceso a nivel térmico y comparar procesos de compostaje, se establecen diferentes índices y parámetros numéricos que se correlacionan con el perfil exotérmico del proceso de compostaje, es decir cuando calor emite la pila, su intensidad y evolución acumulada de temperaturas, que además nos hablan de la verificación de unas condiciones de higienización adecuadas. Todos los índices anteriormente descritos aparecen reflejados en la Tabla 5.

Se cuenta el número de días que la pila ha permanecido por encima de 40°C, valor que establece la condición termófila, siendo en nuestro caso de 105 días.

La temperatura máxima alcanzada por la pila sobrepasó los 70°C, alcanzándose valores de 72,2°C. Estas altas temperaturas son un factor clave para la higienización durante el compostaje y, de la misma manera, la pila presentó más de 35 días una temperatura superior a 60°C.

Estos valores máximos de temperatura alcanzado pila son superiores a los alcanzados en otros trabajos de compostaje de residuos ganaderos (Khan et al., 2014, Jiang et al., 2015).

La evolución térmica acumulada de la pila expresada se establece mediante el índice EXI2, definido por Vico et al. (2018) como el sumatorio cuadrático de

la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente durante la fase biooxidativa, nos sirve para obtener un valor absoluto que incluye la exotermia de la pila y nos permite comparar pilas, tratamientos y sistemas de compostaje en mismas condiciones, siendo en la pila ensayada de 143.499, valor ligeramente inferior al encontrado en otros trabajos de co-compostaje de resto de poda con diversos estiércoles (Pérez-Espinosa et al., 2018)

El cociente Índice EXI2/días fase biooxidativa nos indica el incremento promedio diario en cada escenario, informándonos de la compostabilidad del material o materiales y del sistema operacional. Los valores obtenidos están relacionados con el origen del material, así como de su composición, el cual influirá en la actividad microbiana del compost, lo que repercutirá en la temperatura de la pila y su valor final EXI2/día.

Tabla 5. Evolución de los índices de seguimiento térmico del proceso

Parámetro	Valor
Días fase biooxidativa	154
Nº Días F.Bio-oxid/ >40°C	105
Nº Días F.Bio-oxid/ >50°C	59
Nº Días F.Bio-oxid/ >60°C	35
Temperatura máxima pila	72,2
Temperatura promedio pila	48,2
Índice EXI2* (°C²)	143.499
Ratio EXI2/días f. bio-oxid.	932

4.1.2. Densidad aparente

La densidad aparente se relaciona con la porosidad del material y el contenido en humedad, siendo una característica a tener en cuenta para el correcto funcionamiento del proceso aeróbico y la ocupación y ordenación del espacio a la hora de realizar la pila (Croteau y Alpert, 1994).

Cuando se prepara el material inicial para formar la pila de compostaje, se trituran los restos vegetales para disminuir su densidad y facilitar la autoaireación. De esta manera, se reducen la cantidad de volteos necesarios para completar el proceso.

A pesar de que una elevada densidad aparente puede relacionarse con un bajo nivel poroso, esta situación puede llevar a cabo un mal establecimiento del proceso, por no tener una aireación adecuada. Este parámetro depende del contenido en agua y la presencia de material estructurante, por lo que hay que tener en cuenta ambos factores a la hora de seleccionar los materiales iniciales.

Al finalizar el compostaje de los materiales, la densidad aparente tiende a ser menor que al comienzo, pues el volumen y cantidad de los materiales va disminuyendo conforme avanza el proceso.

En la Figura 7 se encuentran representados los valores obtenidos en la pila ensayada:

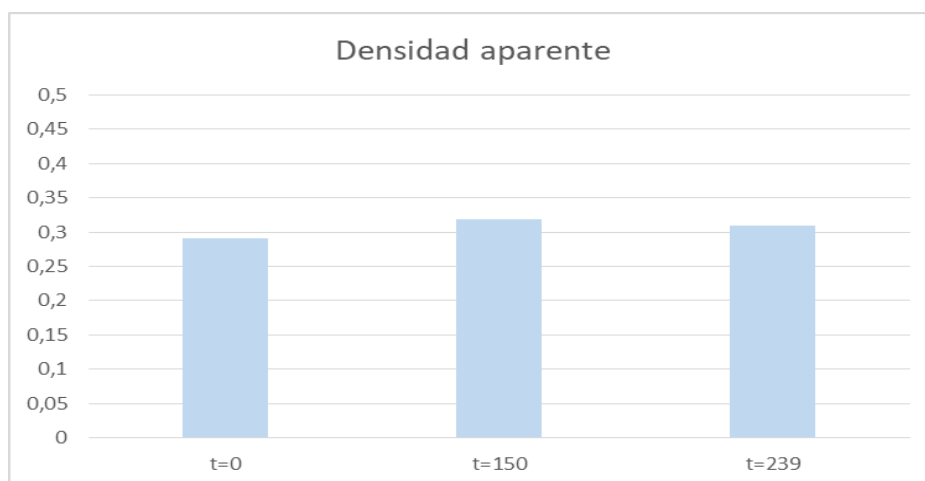


Figura 7. Evolución de la densidad aparente

Los resultados siguen un patrón de aumento de la densidad del proceso al final de la fase biooxidativa y un descenso tras la maduración del compost. Asimismo, la densidad aparente final es mayor que la inicial, siguiendo la tendencia teórica, lo que significa que las pérdidas de volumen y materia son las esperadas.

Al igual que en otros estudios de evaluación de compost, los valores de densidad aparente obtenidos son menores de 0,4 kg/l, pudiendo utilizarse tanto como fertilizante y como sustrato de cultivo (Ansorena, 1994; Karlaniann, 2010)

4.2. Evolución de la fracción hidrosoluble

Para realizar un seguimiento de los procesos de compostaje, es importante analizar también diferentes indicadores ligados con propiedades claves del proceso. En la Tabla 6 se recogen todos los datos relativos a este apartado, que posteriormente se irán desarrollando.

Tabla 6. Evolución de los parámetros de la fracción hidrosoluble

Fase de compostaje	pH	CE (dS/m)
Inicio	8,50	4,57
Final fase Biooxidativa	9,09	4,28
Madurez	9,06	4,12

4.2.1. pH

La variación del pH a lo largo del proceso de compostaje se suele tomar como indicador de la evolución del proceso. Normalmente, el pH sufre un descenso al comienzo del compostaje debido a la descomposición de la materia orgánica.

Posteriormente hay un incremento del pH a consecuencia de la degradación de los compuestos más ácidos, que contienen ácidos carboxílicos y fenólicos

en su composición; y de la mineralización de proteínas y aminoácidos a amoníaco, el cual se posteriormente sufrirá un proceso de amonificación (Iglesias y Pérez, 1991).

Por último, el pH disminuye de nuevo, ya que los procesos de degradación son menos intensos, y el proceso de nitrificación de la etapa anterior conlleva la liberación de iones H^+ (Gagnon et al., 1993).

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8, en los que se muestra un acusado ascenso hasta el final de la fase biooxidativa, para descender ligeramente en la etapa de madurez.

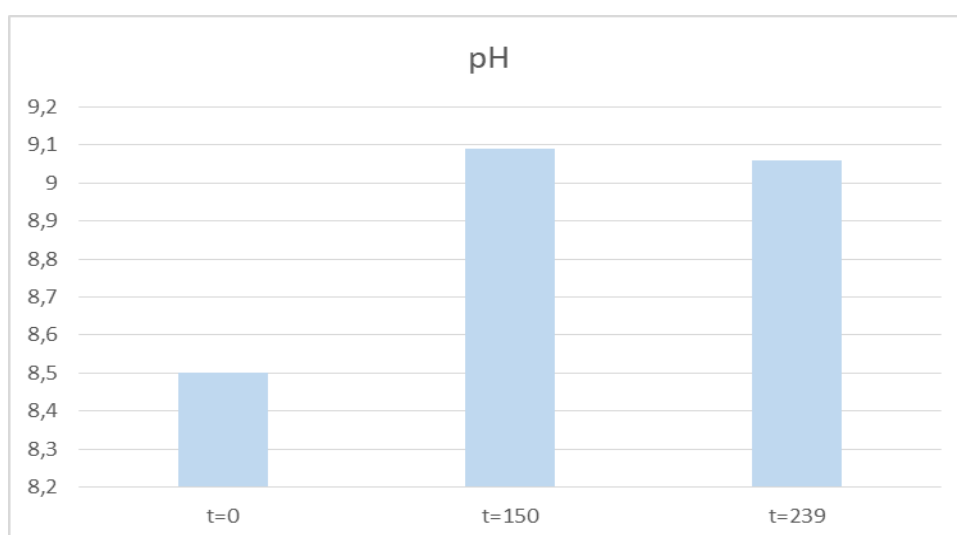


Figura 8. Evolución del pH

Los resultados obtenidos son concordantes con otros compost estudiados de restos de cultivos, oscilando los valores entre 8,5 y 9. Esta ligera alcalinidad es producto de usar restos vegetales en la mezcla inicial (Muscolo et al., 2018; Jiang et al., 2019; Chang et al., 2019), aunque en nuestro caso ninguno de los ingredientes iniciales empleados presenta valores superiores a 8.

4.2.2. Conductividad eléctrica

Generalmente, la conductividad eléctrica (CE) se incrementa a lo largo de todo el proceso de compostaje de los materiales por la mineralización de la materia orgánica y de la concentración relativa de iones por la pérdida de peso.

No obstante, en ocasiones, la conductividad eléctrica sufre un descenso, que suele ser debido a la una elevada humedad, ya sea por la adición de agua a la pila de manera manual, o por la lluvia, si la pila se encuentra al aire libre (Paredes et al., 2001).

Los resultados obtenidos de la pila se muestran en la Figura 9. En ella, se observa un descenso de la conductividad eléctrica a lo largo del proceso. Como la pila se encontraba al aire libre, la lixiviación producida por las lluvias ha arrastrado los iones, disminuyendo su valor.

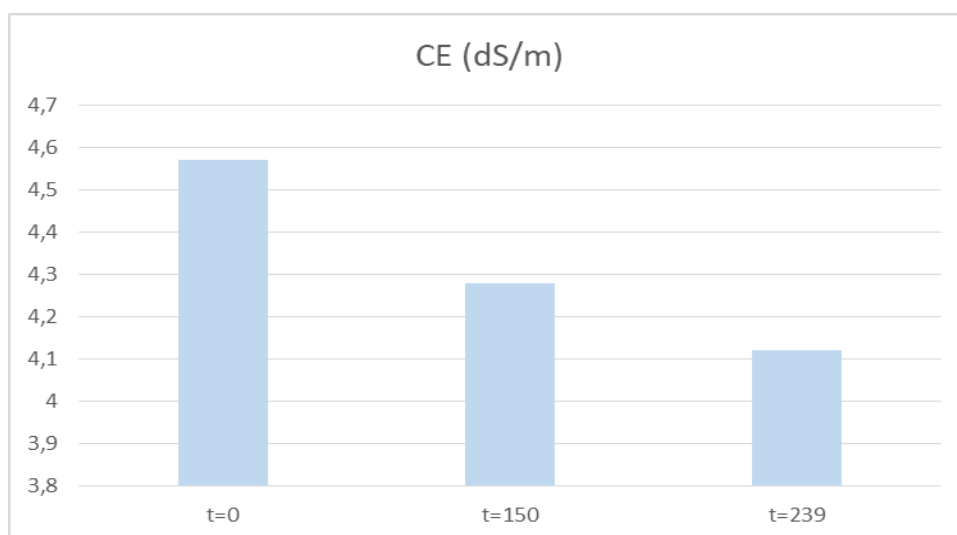


Figura 9. Evolución de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de un compost debe tenerse en cuenta para su uso agrícola, ya que adicionar un compost con una salinidad elevada puede provocar la inhibición de las semillas y aumentar la conductividad eléctrica de los suelos a los que se aplica (Hargreaves et al., 2008).

La conductividad eléctrica es similar a la encontrada en otros estudios con materiales iniciales similares. No obstante, estos valores son más bajos que cuando se usan otros materiales como ingredientes tales como lodos residuales (Muscolo et al., 2018; Toledo et al., 2019).

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

Conocer el contenido de la materia orgánica y de su fracción sólida nos proporciona información sobre los procesos ocurridos durante el compostaje de los materiales y del grado de intensidad de la actividad microbiana producida.

De manera general, se recoge en la Tabla 7 todos los datos relativos a este apartado, para posteriormente detallarlos.

Tabla 7. Evolución de los parámetros de la fracción sólida

Fase de compostaje	MOT (%)	Pérdida MOT (%)	Ct/Nt	COt (%)	Nt (%)	P (g/Kg)	K (g/Kg)
Inicio	52,9	0	28,8	35,5	1,13	1,9	22,0
Final fase Bioxidativa	42,5	34,4	19,9	32,4	1,14	2,1	20,3
Madurez	32,4	57,4	15,1	22,7	2,35	5,9	24,9

4.3.1. Materia orgánica

La cantidad de materia orgánica presente en un compost es indicativa de la materia orgánica que había en el sustrato inicial. El contenido en materia orgánica (MOT), incide de manera directa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo al que se le aplica, por lo que es necesario conocer su estabilidad.

Los resultados de la evolución de la materia orgánica en el compost se observan en la Figura 10. Hay una disminución progresiva del porcentaje de materia orgánica a lo largo de todo el proceso a consecuencia de la mineralización de la mezcla. Esta pérdida de materia orgánica suele ser más alta al principio del proceso de compostaje, coincidiendo con la fase termófila, que conlleva una mayor degradación y mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos presentes.

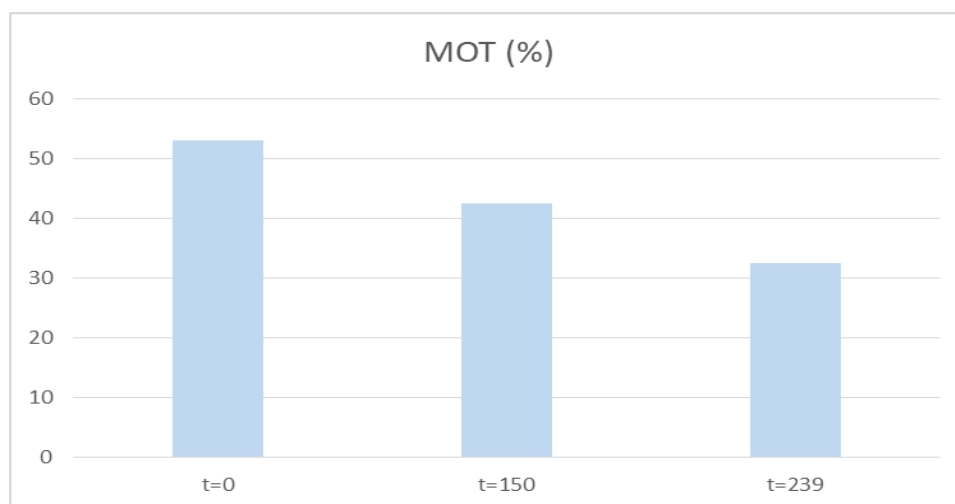


Figura 10. Evolución del contenido en materia orgánica

El contenido en materia orgánica final es menor que el obtenido en estudios similares de compostaje de restos vegetales. Esto puede ser debido a que en la pila de compostaje ecológico no se han adicionado lodos residuales o a que el contenido inicial de MOT en la pila de compostaje es bajo. También es significativo el hecho de que cuanto más largo es el proceso de compostaje mayor mineralización o pérdida de materia orgánica se produce. (Toledo et al., 2019; Rekasi et al., 2019).

4.3.2. Pérdida de materia orgánica

La pérdida de materia orgánica refleja la evolución de los materiales iniciales compostados. Este parámetro se calcula aplicando la ecuación de Viel et al., (1987), que relaciona el contenido en cenizas en el punto inicial (X_1), con el contenido en cenizas en el punto de estudio (X_n):

$$\text{Pérdida de MOT (\%)} = 100 - 100 [X_1 (100 - X_n) / X_n (100 - X_1)]$$

Los valores de pérdida de materia orgánica se observan en la Figura 11. En ella, se aprecia cómo, debido a los procesos de degradación, la pérdida de materia orgánica es cada vez mayor, superando incluso el 50%.

Estos resultados son acordes a los obtenidos por Chang et al. (2019), Muscolo et al. (2018) y Giron et al. (2018) en los que se estudiaron las propiedades de composts a partir de restos agrícolas vegetales.

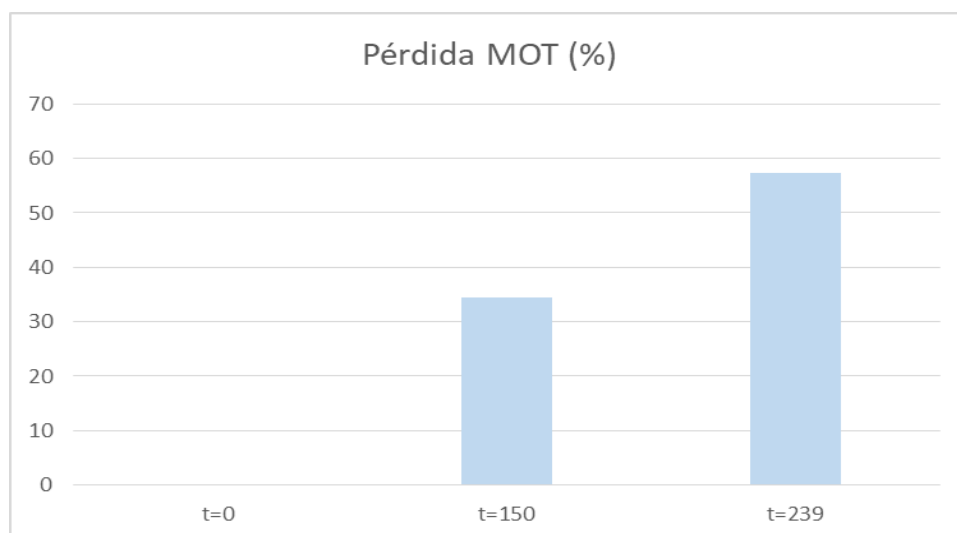


Figura 11. Evolución de la pérdida de materia orgánica

4.3.3. Relación COt/Nt

CARBONO ORGÁNICO TOTAL

Al igual que la materia orgánica, el carbono orgánico total disminuye a lo largo del proceso de compostaje a consecuencia de la mineralización de la materia orgánica por los microorganismos.

En el caso de la pila objeto de estudio, la evolución de los valores del carbono orgánico total se observa en la Figura 12:

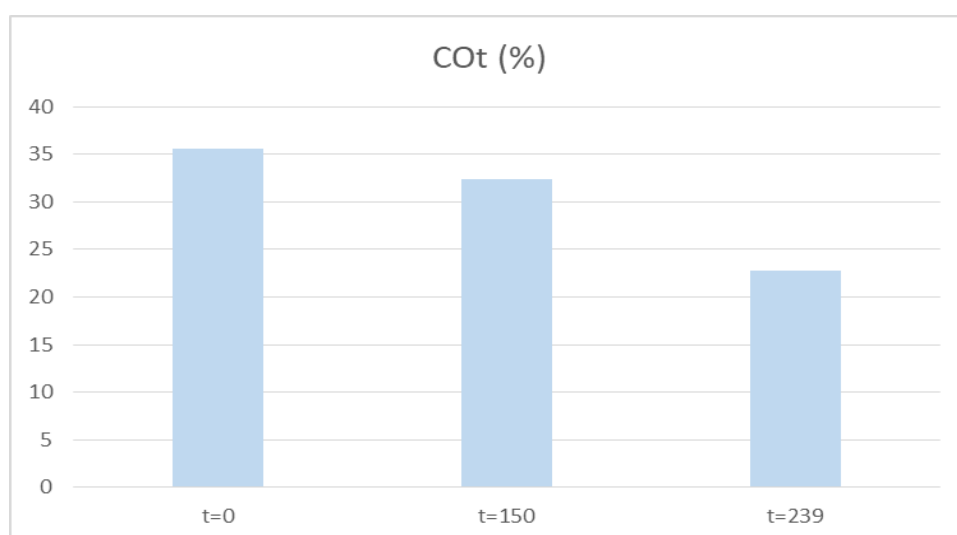


Figura 12. Evolución del porcentaje de carbono orgánico total

El tiempo a lo largo del proceso de compostaje ha influido, puesto que el contenido en carbono orgánico ha ido disminuyendo por la mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos. También, se aprecia que el descenso es más acusado en la fase de maduración, pues es cuando la actividad microbiana ya ha finalizado.

NITRÓGENO TOTAL

El estudio del nitrógeno total contenido en un compost es de suma importancia, pues es un nutriente esencial para el crecimiento vegetal. El nitrógeno puede encontrarse tanto de forma orgánica o inorgánica, el contenido en una u otra forma en el sustrato inicial depende de su naturaleza.

A pesar de que por la mineralización de la materia orgánica se pierde nitrógeno, y es de esperar que el valor disminuya al igual que con el carbono o la materia orgánica, al producirse una disminución del volumen de la pila, la concentración en nitrógeno al final del proceso de compostaje es alta (Paredes et al., 2002).

Los valores de nitrógeno total se muestran en la Figura 13, en la que se observa un mantenimiento de los valores a lo largo de todo el proceso de compostaje, para aumentar de manera importante al doble cuando el compost ya está maduro, respecto al valor inicial.

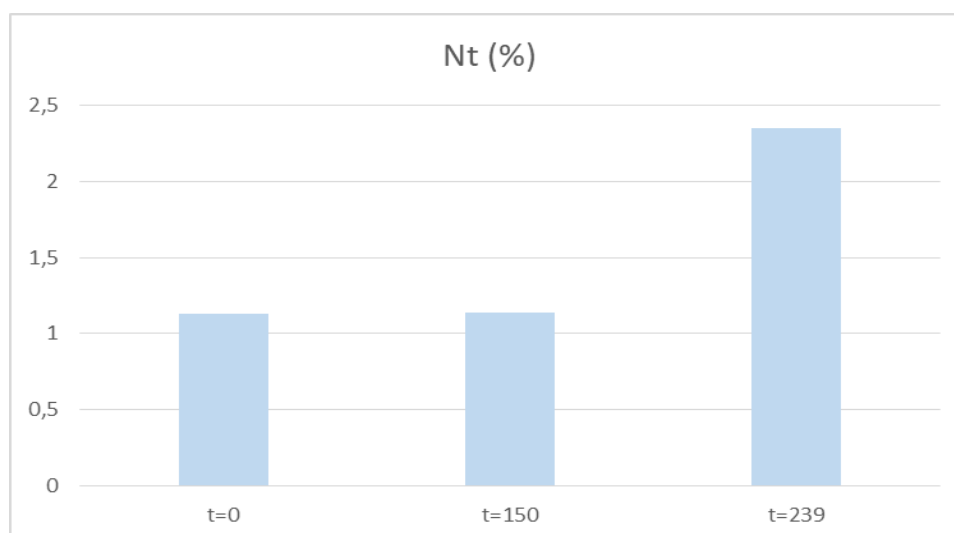


Figura 13. Evolución del porcentaje de nitrógeno total

RELACIÓN COt/Nt

Este parámetro es uno de los más utilizados para estudiar la evolución de la materia orgánica durante el compostaje, ya que representa a la vez, la disminución del carbono orgánico total y el aumento de la concentración del nitrógeno. De esta relación se obtiene la disminución de este parámetro, que se estabiliza al final del proceso, al igual que la materia orgánica.

Para que se produzca un correcto compostaje, el material de partida debe tener una relación COt/Nt de entre 25 y 35. Una relación demasiado elevada limita la cantidad de nitrógeno disponible, lo que ralentiza el proceso. Por otra parte, una relación muy baja provoca el efecto contrario, dando lugar a un ambiente anóxico y a la pérdida de nitrógeno al ambiente (Jhorar et al., 1991).

Los valores obtenidos de los muestreos de la pila, se observan en la Figura 14. En ella se puede ver como los valores disminuyen con el tiempo, hasta alcanzar un valor de 15. Según la legislación española (RD 999/2017) los requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost maduro son un valor inferior a 20, por lo que cumple el criterio normativo para denominarse compost.

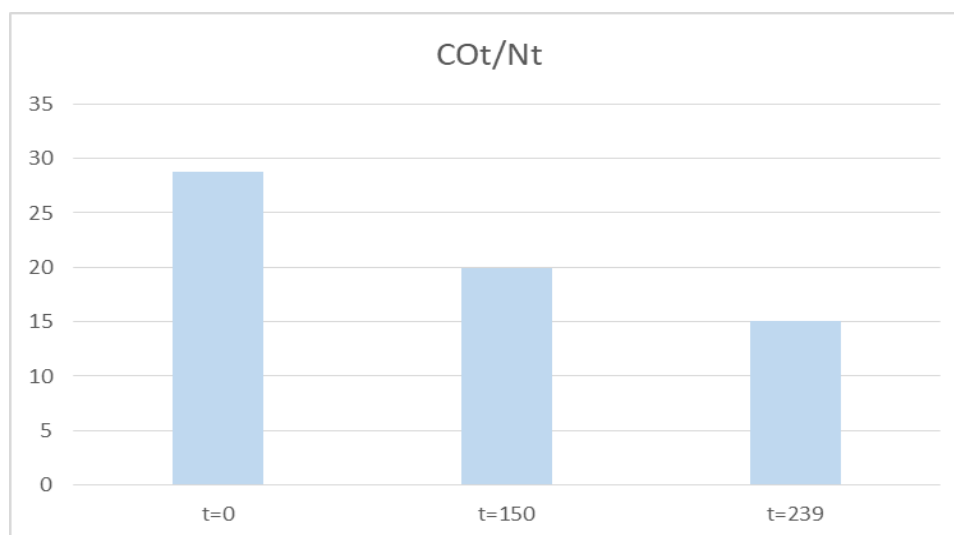


Figura 14. Evolución de la relación COt/Nt

Los valores obtenidos de este índice de madurez son los adecuados, no obstante, no siempre los ensayos de distintos materiales dan un resultado satisfactorio, siendo el valor superior en composts estabilizados (Khan et al., 2014; Muscolo et al., 2018; Bian at al., 2019)

4.3.4. Macronutrientes

Se consideran como macronutrientes principales el fósforo y el potasio, además del nitrógeno, que se ha desarrollado en el apartado anterior. Estos elementos desempeñan un papel fundamental en el metabolismo microbiano y, al igual que ocurre con el nitrógeno, al final del proceso de compostaje, su concentración aumenta.

La concentración final de los macronutrientes depende en gran medida del sustrato inicial que se composte, así, a mayor concentración en el material de partida, mayor presencia de estos elementos en el producto final.

En la Figura 15 se recogen los resultados de ambos elementos. Se observa un aumento del contenido en ambos nutrientes, aunque los incrementos son moderados, estabilizándose finalmente el fósforo en un valor de 6 y el potasio, en un valor de 25, puesto que en general todos los materiales iniciales del ensayo presentan valores más altos de potasio en su composición original excepto los restos de poda de cítricos.

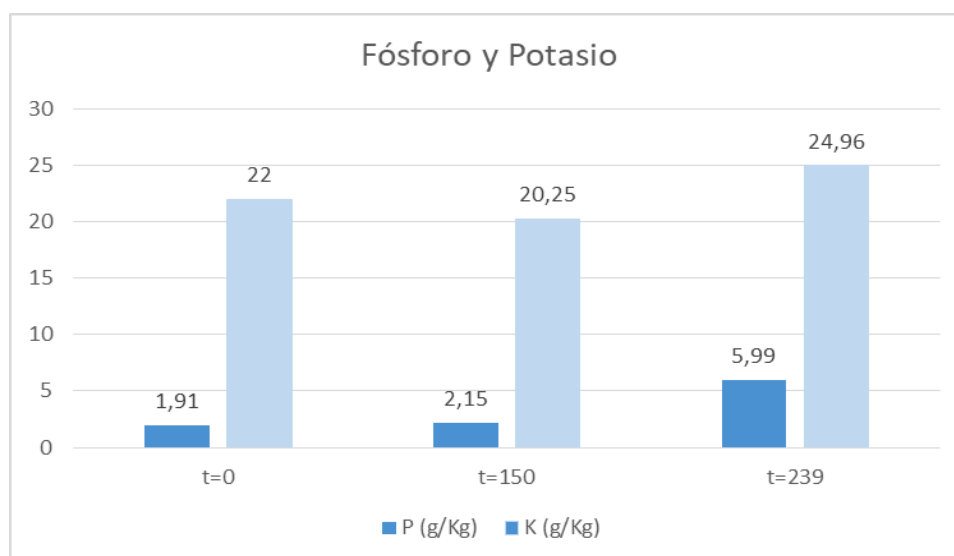


Figura 15. Evolución del contenido en fósforo y potasio

Los resultados obtenidos para el fósforo son similares a los encontrados en otros ensayos de composts. Sin embargo, los valores del potasio son significativamente más bajos, debido posiblemente a la concentración de los materiales iniciales (Rekasi et al., 2019)

4.4. Parámetros indicativos de calidad del compost

A la hora de evaluar el producto, denominado enmienda orgánica o compost debemos utilizar múltiples criterios, incluyendo aspectos agronómicos e indicadores de calidad del compost final para determinar su idoneidad y así mismo teniendo presente la normativa legal que especifica los contenidos mínimos.

En la Tabla 8, aparecen recogidos todos los parámetros analizados de manera general. Debido a que la mayoría ya se han desarrollado en los apartados anteriores, de los restantes, se estudiarán los más representativos: el índice de germinación (IG), la capacidad de intercambio catiónico (CCC), el contenido en polifenoles y la presencia de metales pesados.

Tabla 8. Parámetros de calidad en el compost final

Parámetro	Valor
pH	9,06
CE (dS/m)	4,12
MOT (%)	32,4
CCC (meq/100g MOT)	104,4
NT (%)	2,35
P₂O₅ (%)	1,37
K₂O (%)	3,01

Polifenoles (mg/Kg)	2489
CCC/CT (meq/g CT)	1,03
IG (%)	83,7
Carbono extraíble (%)	6,69
Carbono de ácidos fúlvicos (%)	1,85
Carbono de ácidos húmicos (%)	4,84
Relación de humificación (HR)	29,43
Índice de humificación (HI)	21,29
Porcentaje de ácidos húmicos (PHA)	72,3
Relación de polimerización (PI)	2,6

Para determinar si los valores anteriormente mostrados cumplen con los correspondientes a un compost maduro, es necesario compararlos con los obtenidos por diversos autores y establecer si entran dentro de los límites aceptados por la comunidad científica. Estos valores límite, así como los autores responsables de su caracterización como índices de madurez, aparecen recogidos en la tabla 9.

Tabla 9. Índices de estabilización de compost maduro.

Parámetro	Valor límite	Fuente
CCC (meq/100g MOT)	>60	Harada e Inoko (1980)
	>67	Iglesias y Perez (1992a)

CCC/COT (meq/g Cot)	>1,9	Iglesias y Perez (1992b)
	>3,5	García et al. (1992)
CEX (g/kg)	<60	Bernal et al. (1998)
Relación de humificación RH (%) = Cex/COT x 100	> 7	Roletto et al. (1985)
Índice de humificación IH (%) = Cah/COT x 100	> 3,5	Roletto et al. (1985)
	> 13	Iglesias y Perez (1992a)
Porcentaje de ácidos húmicos Pah (%) = Cah/Cex x 100	> 62	Iglesias y Perez (1992a)
Relación de polimerización Cah/Caf, Cah/Caf	> 1	Roletto et al. (1985)
	> 1,6	Iglesias y Perez (1992a)

Al comparar los valores obtenidos tras analizar el compost con los valores límites encontrados en la bibliografía, se puede observar que todos entran dentro del rango de un compost maduro, por lo que se puede usar como fertilizante.

4.4.1. Índice de germinación

Este indicador proporciona una valiosa información acerca de la fitotoxicidad que puede presentar un compost. En este estudio, se ha usado el método de Zucconi et al., (1981), que consiste en incubar semillas de *Lepidium sativum L.*, en placas de Petri, durante 24 horas a 27°C, sobre extracto acuoso del compost.

Según este método, se considera maduro un compost cuando el índice de germinación es superior al 50%, obteniéndose como resultado un IG = 83,7%;

por lo que en el momento del análisis, y había llegado al grado de madurez óptimo.

Estos resultados son los esperados en un compost maduro, no habiendo diferencias significativas en los estudios con materiales iniciales diferentes (Khan et al., 2014; Rekasi et al., 2019).

4.4.2. Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico es un parámetro indicador del grado de humificación de los materiales durante el compostaje, así como de la calidad del material final compostado. Diversos autores (Harada e Hinoko, 1980; Iglesias y Pérez, 1992a) han estudiado la evolución de este indicador, llegando a la conclusión de que la capacidad de intercambio catiónico aumenta durante el proceso hasta que se estabiliza en un valor.

El compost estudiado presenta un valor de 104,4; esto significa que entra dentro de los parámetros aceptables para que se considere maduro.

4.4.3. Contenido en polifenoles

Los polifenoles se componen de ácidos fenólicos y están presentes en casi todas las especies vegetales. Es de gran interés conocer su presencia en los composts por su efecto inhibitor sobre la germinación de semillas, la inmovilización del nitrógeno en el suelo; y su efecto antimicrobiano, que puede afectar al proceso de compostaje (Manios et al., 1987).

El compost presenta una concentración de 2489 mg/kg, no afectando al proceso de germinación de semillas, como se ha observado en el apartado anterior, mediante el estudio del IG.

4.4.4. Metales pesados

Por la naturaleza de estos elementos, suponen una fuente de contaminación muy peligrosa para el sistema suelo-planta. Es por ello que se deben analizar los compost antes de adicionarlos al suelo, para comprobar si cumplen con los

requisitos demandados por la normativa respecto al contenido en metales pesados del compost maduro.

En la Tabla 9 encontramos los valores obtenidos tras analizar el compost objeto de estudio, constatando que cumple los límites establecidos en el RD 506/2013 (modificado por el RD 999/2017) sobre productos fertilizantes para los metales pesados analizados. El Zn es superior a 200 mg/kg por lo que se clasificaría como clase B.

Tabla 10. Contenido en metales pesados

Metal	Cadmio	Níquel	Zinc	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio
mg/Kg	0,26	8,7	207	12	42	19,5	n.d.

Para los composts se permite su aplicación en agricultura, jardinería o restauración de suelos degradados, según el Real Decreto 999/2017, siempre que el compost no supere los márgenes de tolerancia establecidos en el Anexo III y los límites establecidos en el Anexo V, mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el Real Decreto 999/2017

Parámetro	Valor		
Mat. Orgánica total (%)	35		
Humedad máxima (%)	40		
C/N	< 20		
N inorgánico máximo (% N total)	15		
Metales pesados (mg/kg m.s.):	Clase A	Clase B	Clase C

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			
<i>Salmonella spp</i>		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	
<p>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.</p>			

5. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se puede concluir que:

La práctica del compostaje, a pesar de ser una técnica milenaria ha sufrido un auge importante asociado entre otros a la Agricultura Ecológica, promovido por la preocupación sobre el futuro del medio ambiente y el reciclado de distintos tipos de flujos residuales tales como los residuos agrícolas y ganaderos (estiércol equino, la poda de cítricos y el destrío hortícola de rábano, colirrábano e hinojo).

Por todo lo anteriormente mencionado, en este ensayo se ha compostado material procedente de la Agricultura Ecológica, siguiendo el proceso de compostaje biodinámico, obteniendo un producto final higienizado y totalmente apto para adicionar al terreno de cultivo bajo el régimen ecológico o convencional.

También, que el compost presenta una *evolución de la temperatura* acorde a las fases térmicas del proceso y que, al permanecer por encima de los 60°C durante más de 35 días, el nivel de higienización es el adecuado para su uso agrícola.

Los valores de *índice de humificación* y de *capacidad de intercambio catiónico*, superan con mucha amplitud el límite establecido por la bibliografía como signo de madurez, pudiendo considerar como maduro el compost objeto de estudio.

Respecto al *índice de germinación*, se obtuvo un valor muy superior al 50% hecho que justificaría la ausencia de fitotoxicidad en el compost maduro, asegurando así su uso como fertilizante y sustrato de cultivo adecuado.

Respecto a la *materia orgánica total* y la *relación C/N*, ambos parámetros siguen la evolución habitual de descenso durante el proceso de compostaje, aunque el nivel final de materia orgánica del compost (32,5%) no cumpliría, por muy poco, lo establecido por la legislación española para considerarse compost por ser algo inferior (valor mínimo en MOT 35%, Real Decreto 999/2017)

Los valores de *pH*, *conductividad eléctrica* y *metales pesados* analizados presentan unos niveles adecuados para su uso como enmienda orgánica y fertilizante, no siendo de preveer efectos negativos de su uso agrícola, aunque el valor de *pH* 9,06 final y de *CE* 4,12, deben ser tenidos en cuenta a la hora de su empleo agrícola especialmente en suelos de naturaleza caliza como los de nuestra zona y para especies sensibles a determinados valores de conductividad eléctrica.

En conclusión, el compost ecológico y biodinámico de estiércol equino, poda de cítricos y destrío hortícola desarrolla un buen proceso de compostaje, con una alta termofilia, una correcta higienización, un buen contenido nutriente NPK y una ausencia de fitotoxicidad en el producto final *compost maduro*.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ansorena, J. (1994). *Sustratos: propiedades y caracterización*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Bastida, C. (2004). Benéficos y regeneradores abonos verdes. *La fertilidad de la Tierra. Revista de Agricultura Ecológica*, 24, 10-12.
- 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 Technology*, 63, 91-99.
- Bian, B., Hu, X., Zhang, S., Lv, C., Yang, Z, Yang, W. y Zhang, L. (2019). Pilot-scale composting of typical multiple agricultural wastes: Parameter optimization and mechanisms. *Bioresource technology*, 287, 121482.
- Biddlestone, A.J. y Gray, K.R. (1991). Aerobic processing of solid organic wastes for the production of a peat alternative: a review. *Process Biochemistry*, 26, 275-279.
- Boldrin, A., Andersen, J.K., Moller, J., Christensen, T.H. y Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 800-812.
- Brinton, W.F., Evans, E., Droffner, M.L. y Brinton, R.B. (1995). Standardized test for evaluation of compost self-heating. *Byocycle*, 36, 64-69.
- Bueno, P., Díaz, J.M. y Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. En Moreno, J. y Moral, R. (Eds.), *Compostaje* (pp. 93-109), Madrid: Mundi-Prensa.
- Canet, R. y Albiach, M.R. (2008). Aplicaciones del compost en Agricultura Ecológica. En Moreno, J. y Moral, R. (Eds.), *Compostaje* (pp. 379-395), Madrid: Mundi-Prensa.
- Carperter-Boggs, L., Kennedy, A.C. y Reganold, J.P. (2000). Organic and biodynamic management: effects on soil biology. *Soil Science Society of American Journal*, 64(5), 117-123.

- Chang, J.I., Tsai, J.J. y Wu, K.H. (2006). Thermophilic composting of food waste. *Bioresource Technology*, 97, 116-122.
- Chang, R., Li, Y., Chen, Q. y Zhao, H. (2019). Influences of the thermophilic period on biodegradation and nitrogen loss in stimulated vegetable waste composting. *Global ecology and conservation*, 18, e00623.
- Chanyasak, V. y Kubota, H. (1981). Carbon / organic nitrogen ratio in wáter extract as measure of compost degradation. *Journal of Fermentation Technology*, 59, 251-259.
- Chen, Y. e Inbar, Y. (1993). Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. En Hoitink, H.A.J. y Keener, H.M. (Eds.), *Science and engineering of composting: desing, environmental, microbiological and utilization aspects* (pp. 561-600), Ohio: Renaissance Publications.
- Chica, A.F. y García, J.L. (2008). Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje. En Moreno, J. y Moral, R. (Eds.), *Compostaje* (pp. 141-164), Madrid: Mundi-Prensa.
- Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. (1991). *Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización*. Murcia: CSIC-CEBAS.
- Croteu, G. y Alpert, J. (1994). Problem Prevention Strategies – Low-tech approaches to composting supermarket organics. *Biocycle*, 35, 74-80.
- Diver, S. Biodinamic farming & compost preparation (1999). *Appropriate Technology Transfer for Rural*. Recuperado de <https://attra.ncat.org>
- Emino, E.R. y Warman, P.R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, 12, 342-348.
- Favoino, E. y Hogg, D. (2008). The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste Management & Research*, 26(1), 61-69.

- FCQAO (Federal Compost Quality Assurance Organization). (1994). *Methods Book for the analysis of compost*. Stuttgart: Abfall Now English Version Publishing House.
- Finstein, M.S. y Miller, F.C. (1985). Principles of composting leading to maximization of decomposition rate, odor control and cost effectiveness. En Gasser, J.K.R. (Ed.), *Composting of Agricultural and other Wastes*. (pp. 13-26), Londres y Nueva York: Elsevier Applied Science Publishers.
- Gagnon, B., Rioux, C. y Changnon, 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. y Lobo, M.C. (2008). *Rehabilitación de suelos degradados y contaminados mediante la aplicación de compost*. En Moreno, J. y Moral, R. (Eds.), *Compostaje* (pp. 425-448), Madrid: Mundi-Prensa.
- García, C., Hernández, T., Costa, F. y Ayuso, M. (1992). Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23, 1501-1512.
- Giron E.C., Moral, R., Lopez, M., Perez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Agullo, E., Martinez-Sabater, E., y Saez-Tovar, J.A. (noviembre, 2018). Aproximación al control de procesos de compostaje mediante técnicas de bajo coste. *VI Jornadas de la Red Española de Compostaje: Gestión integral de residuos orgánicos. Poniendo en marcha la economía circular en la sociedad*, Valencia.
- Harada, Y. e Inoko, A. (1980). The measurement of the cation-exchange capacity of compost for the estimation of the degree maturity. *Soil Science and Plant Nutrition*, 26, 127-134.
- Hargreaves, J.C., Adl, M.S. y Warman, P.R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, 1-14.

- Iglesias, E. y Pérez, V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity. A review. *Biological Wastes*, 27, 115-142.
- Iglesias, E. y Pérez, 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, E. y Pérez, V. (1992a). Determination of maturity compost indices for city refuse compost. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 38, 331-343.
- Iglesias, E. y Pérez, V. (1992b). Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some "humification" indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 243-257.
- Iglesias, E., Barral, M.T. Marhuenda, F.C. (2008). Indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En Moreno, J. y Moral, R. (Eds.), *Compostaje* (pp. 242-283), Madrid: Mundi-Prensa.
- Jhorar, B.S., Phogat, V. y Malik, E. (1991). Kinetics of composting rice Straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 5, 297-306.
- Jiang, J., Liu, X., Huang, Y. y Huang, H. (2015). Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting. *Waste Management*, 39, 78-85.
- Jiang, Z., Lu, Y., Xu, J., Li, M., Shan, G. y Li, Q. (2019). Exploring the characteristics of dissolved organic matter and succession of bacterial community during composting. *Bioresource Technology*, 292, 121942.
- Karlaniann, M., Barbaro, L. y Morisigue, D. (junio, 2010). Evaluación de compost comerciales: determinación de parámetros físicos y químicos. *XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: El Suelo, Pilar de la Agroindustria en la Pampa Argentina*, Rosario.

- Khan, N., Clark, I., Sánchez-Monedero, A., Shea, S., Meier, S. y Bolan, N. (2014). Maturity índices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource Technology*, 168, 254-251.
- Lax, A., Roig, A. y Costa, F. (1986). A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil*, 94, 349-355.
- Manios, V.I., Tsikalas, P.E., Siminis, H.I. y Verdonck, O. Phytotoxicity of olive tree leaf compost. En De Bertoldi, M., Ferranti, M.P., L'Hermite, P. y Zucconi, F. (Eds.), *Compost: Production Quality and Use* (pp. 296-308), Londres: Elsevier Applied Science Publishers.
- Martínez, F.X. (1995). *Posibles usos de los residuos urbanos en agricultura: abono, enmienda orgánica y sustrato de cultivo. Gestión y utilización de residuos orgánicos para la agricultura*. Fundación la Caixa/AEDOS.
- Moral, R. y Muro, J. (2008). Manejo, dosificación y gestión agronómica del compost. En Moreno, J. y Moral, R. (Eds.), *Compostaje* (pp. 351-395), Madrid: Mundi-Prensa.
- Morel, J.L., Colin, F., Germon, J.C., Godin, P. y Juste, C. (1985). Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost. En Gasser, J.K.R. (Ed.), *Composting of Agricultural and other Wastes*. (pp. 56-72), Londres y Nueva York: Elsevier Applied Science Publishers.
- Muscolo, A., Papalia, T., Settineri, G., Mallamaci, C. y Jeske-Kaczanowska, A. (2018). Are raw materials or composting conditions and time that most influence the maturity and/or quality of composts? Comparison of obtained composts on soil properties. *Journal of cleanser production*, 195, 93-101.
- Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A. y Bernal, M.P. (1991). An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22, 2137-2144.
- Navarro-Pedreño, J., Moral, R., Gomez, I. y Mataix, J. (1995). *Residuos orgánicos y agricultura*. Alicante: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Alicante.

- Paredes C., Bernal M.P., Roig, A. y Cegarra J. (2001). Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes. *Biodegradation* 12(4), 225-234.
- Paredes C., Bernal M.P., Roig, A. y Cegarra J. (2002). Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology* 85, 1-8.
- Pérez-Espinosa, A., Navarrón, L., Pérez-Murcia, M.D., Agulló, E., Bustamante, A., Paredes, C. y Moral, R. (noviembre, 2018). Compostaje de estiércol de oveja y gallinaza con restos de poda de vid. *VI Jornadas de la Red Española de Compostaje: Gestión integral de residuos orgánicos. Poniendo en marcha la economía circular en la sociedad*, Valencia.
- Rékásia, M., Mazsua, N., Draskovitsa, E., Bernhardta, B., Szabób, A., Rivierc, P.A., Farkasc, C., Borsányid, B., Pirkóa, B., Molnára, S., Kátaye, G. y Uzingera, N. (2019). Comparing the agrochemical properties of compost and vermicomposts produced from municipal sewage sludge digestate. *Bioresource technology*, 291, 121861.
- 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*. Barcelona: Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient.
- Soliva, M., Huerta, O., Martínez, F.X. y López, M. (2013). Ús del compost: millora dels sòls o gestió de residus orgànics? *Quaderns agraris*, 34, 7-32.
- Sugahara, K., Harada, Y. e Inoko, A. (1979). Color change of city refuse during composting process. *Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 197-208.
- Toledo, M., Márquez, P., Siles, J.A., Chica, A.F. y Martín, M.A. (2019). Co-composting of sewage sludge and eggplant waste at full scale: Feasibility study to valorize eggplant waste and minimize the odoriferous impact of sewage sludge. *Journal of environmental management*, 247, 205-213.

- Vico, A., Pérez, M.D., Bustamante, M.A., Agulló, E., Marhuenda-Egea, F.C., Sáez, J.A., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A. y Moral, R. (2018). Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *Journal of Environmental Management*, 226, 408-415.
- Viel, M., Sayag, D., Peyre, A. y André, L. (1987). Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. *Biology Wastes*, 20, 167-185.
- Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. y De Bertoldi, M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle*, 22, 27-29.
- Zucconi, F., Monaco, A. y Forte, M. (1985). Phytotoxins during stabilization of organic matter. En Gasser, J.K.R. (Ed.), *Composting of Agricultural and other Wastes*. (pp. 73-85), Londres y Nueva York: Elsevier Applied Science Publishers.

LEGISLACIÓN

- RD 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. Boletín Oficial del Estado, núm. 61, de 11 de marzo de 1996, pp. 9734 a 9737.
- RD 865/2010, de 2 de julio, sobre sustrato de cultivo. Boletín Oficial del Estado núm. 70, de 14 de julio de 2010, pp. 61831 a 61859.
- RD 1039/2012, de 6 de julio, por el que se modifica el RD 865/2010, de 2 de julio, sobre sustrato de cultivo. Boletín Oficial del Estado núm. 180, de 28 de julio de 2012, pp. 54344 a 54345.
- RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado, núm. 164, de 10 de julio de 2013, pp. 51119 a 51207.
- RD 999/2017, de 24 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado, núm. 296, de 6 de diciembre de 2017, pp. 119396 a 119450.

Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CE) nº 834/2007 del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea, 14 de junio de 2018, L 150, pp. 1 a 92.