



VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

**Valorización mediante
compostaje de los
residuos agrícolas
generados en la estación
experimental agraria de
Elche.**

Ana Antón Cayuelas
Grado de Ingeniería Agroalimentaria y
Agroambiental



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**VALORIZACIÓN MEDIANTE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS
AGRÍCOLAS GENERADOS EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL
AGRARIA DE ELCHE**

Grado en Ingeniería Agroalimentaria y Agroambiental



ENERO 2020

VºBº DIRECTORA: María Dolores Pérez Murcia

VºBº CODIRECTOR: Raúl Moral Moreno

ALUMNA: Ana Antón Cayuelas

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE GRADO**IDENTIFICACIONES**

Autor: Ana Antón Cayuelas

Título: Valorización mediante compostaje de los residuos agrícolas generados en la estación experimental agraria de Elche

Title: Appraisal through composting of agricultural waste generated in the experimental agricultural station of Elche

Títol: Valorització mitjançant compostatge de residus agrícoles generats en l'estació experimental agrària d'Elx

Director: María Dolores Pérez Murcia

Co-Director: Raúl Moral Herrero

Año: 2.020

Titulación: Grado de Ingeniería Agroalimentaria y agroambiental

Tipo de proyecto: Trabajo experimental y descriptivo

Palabras clave: Compostaje, compost, valorización, residuo, economía circular,

Nº de citas bibliográficas: 96

Nº de tablas:26

Nº de figuras:8



RESUMEN

Los residuos agrícolas son una fuente de materia orgánica necesaria para la supervivencia de los suelos. Mediante el compostaje se consigue gestionar los desechos y aprovechar el resultado del proceso, consiguiendo con ellos un modelo de economía circular.

El objetivo de este trabajo fue valorizar mediante compostaje los residuos de destrío de granada y plantones de naranjo de la finca de experimentación agraria de Elche. Para conseguir una mezcla adecuada se utilizó estiércol de oveja de una finca próxima.

Como resultado se obtuvo un producto higienizado y humificado con propiedades fertilizantes, pudiendo ser utilizado como un producto enmendante y reduciendo el consumo de insumos de la propia finca.

ABSTRACT

Agricultural waste is a source of organic matter necessary for soil survival. By composting, the waste is managed and the result of the process is obtained, acquiring with them a circular economy model.

The objective of this work was to value by composting the waste of pomegranate pick and Orange tree seedlings of the farm of agricultural experimentation of Elche. To get a proper mixture, sheep manure from a nearby farm was used.

As a result, a sanitized and humidified product with fertilizing properties was obtained, being able to be used as an amending product and reducing the consumption of inputs from the farm itself.

ÍNDICE



1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Definición y clasificación de los residuos agrícolas	9
1.2. Producción de biomasa vegetal residual.....	12
1.3. Gestión de los residuos agrícolas biodegradables.....	14
1.3.1 Método de reciclaje y valorización de la biomasa vegetal.....	18
1.4. Compostaje.....	21
1.4.1. Fases de compostaje.....	22
1.4.2. Parámetros de compostaje.....	24
1.5 Maduración y usos del compost.....	28
1.5.1 Definición de compost.....	28
1.5.2 Madurez del compost.....	28
1.5.3 Usos del compost como enmienda orgánica.....	31
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	33
3. MATERIAL Y MÉTODO.....	36
3.1 Diseño experimental.....	37
3.2 Dispositivo experimental.....	40
3.2.1 Dispositivo de compostaje utilizado.....	42
3.3 Desarrollo experimental.....	44
3.3.1 Cálculo y preparación de la mezcla.....	44
3.3.2 Seguimiento del proceso de compostaje.....	45
3.4 Método analítico.....	47
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	52
4.1 Evolución de los factores asociados al propio proceso de compostaje.....	53
4.1.1 Temperatura.....	53
4.2 Evolución de la fracción hidrosoluble: pH, CE y polifenoles.....	58
4.2.1 El pH.....	58
4.2.2 Conductividad eléctrica.....	59

4.2.3 Contenido en polifenoles.....	61
4.3 Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida.....	61
4.3.1 Materia orgánica.....	61
4.3.2 Pérdida de materia orgánica.....	63
4.3.3 Carbono orgánico total.....	64
4.3.4 Nitrógeno total.....	65
4.3.5 Relación C/N.....	66
4.3.6 Contenido en fósforo, potasio y sodio.....	68
4.4 Parámetros indicativos de la madurez del compost.....	69
4.4.1 Capacidad de cambio catiónico.....	69
4.4.2 Índice de germinación.....	70
4.4.3 Índice de humificación.....	71
4.5 Dosificación y valor económico del compost.....	73
4.5.1 Dosificación del compost.....	73
4.5.2 Estimación del valor económico del compost.....	75
5. CONCLUSIÓN	76
6. BIBLIOGRAFÍA	79

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad se han producido residuos agrícolas, teniendo en cuenta que la actividad agrícola es una práctica ancestral para la obtención de alimento del ser humano. Los materiales no aprovechables como alimento o para la comercialización no suponían riesgo alguno ya que al producirse de forma controlada se reciclaban de manera natural.

En la agricultura tradicional se conservaban los nutrientes del suelo mediante técnicas agronómicas básicas, como, la rotación de cultivos, la incorporación de rastrojos, reciclando los restos orgánicos mediante compostaje e introduciendo la cría animal dentro de las propias fincas de cultivo. Con estas técnicas de cultivo se conseguía cerrar el ciclo de los nutrientes del suelo y mantener la tierra fértil.

A principios del siglo XX a consecuencia de los periodos de guerras y la falta de alimento tuvo lugar la revolución verde, este periodo se caracteriza por un aumento considerable de la actividad agrícola mediante un cambio en las técnicas de cultivo, pasando de una agricultura tradicional sin consumo de insumos a otras prácticas en las que se incluyen el uso de maquinaria agrícola, monocultivo y el uso de plaguicidas, herbicidas, fertilizantes químicos y riego, consiguiendo mayor rendimiento por hectárea. En esta etapa hay una separación entre agricultura y ganadería rompiendo un equilibrio preestablecido y provocando graves consecuencias medioambientales y fitosanitarias. (Soliva y col. 2008)

1.1 Definición y clasificación de los residuos agrícolas

Se considera residuo agrícola *“la fracción o fracciones de un cultivo que no constituya la cosecha propiamente dicha, parte de la cosecha que no cumpla con la calidad mínima para ser comercializada como tal. Estos residuos se obtienen de los restos de los cultivos o de las limpiezas que se hacen en el campo para evitar plagas o incendios y pueden aparecer en estado sólido, como la leña, o en estado líquido como los purines u otros elementos residuales obtenidos en actividades agropecuarias”* (EcuRed, 2019).

Desde el punto de vista legislativo (22/2011, Ley de residuos y suelos contaminados, 2011), se entiende como residuo “Cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga intención de desechar o la obligación de desechar”

En el año 2016 se generaron 129 millones de toneladas de residuos en España (Instituto nacional de estadística, 2018), de los cuales 6,3 millones de toneladas corresponde a la agricultura y la ganadería y aunque en 2016 los residuos totales disminuyen un 0,1 % respecto al año anterior, en agricultura, ganadería, silvicultura y pesca experimentan un aumento del 1,7% en el año 2016.

La **Figura 1.1** indica las cantidades de residuos en tanto por cien, generados por la actividad humana en España. La agricultura, ganadería, silvicultura y pesca generan el 5% de los residuos en España. El sector de la industria y la construcción generaron más del 50% de los residuos totales.

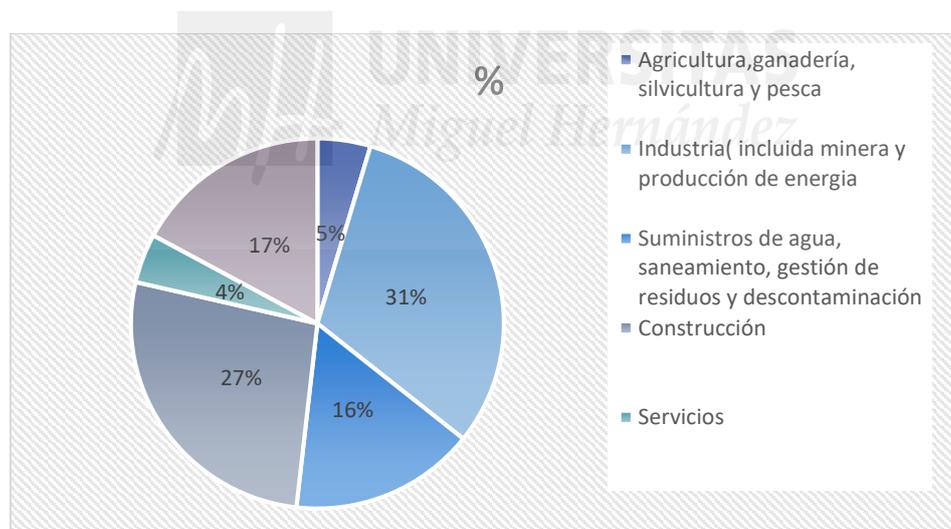


Figura 1.1 Distribución de los residuos generados por sectores de actividad y hogares (año 2017) en España. (INE https://www.ine.es/prensa/cma_2017_res.pdf)

La clasificación de residuos de origen agrario según el código LER, se muestra en la **tabla 1.1**.

Tabla 1.1 Lista Europea de residuos (LER). Decisión de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 (2014/955/UE) por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, aplicable desde el 1 de junio de 2015. (Ref. [DOUE-L-2014-83791](#)).

Código	Residuo (Origen/procedencia)
02	Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos
01 02	Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca.
02 01 01	Lodos de lavado y limpieza.
02 01 02	Residuos de tejidos de animales.
02 01 03	Residuos de tejidos de vegetales.
02 01 04	Residuos de plásticos (excepto embalajes).
02 01 06	Heces de animales, orina y estiércol (incluida paja podrida) y efluentes recogidos selectivamente y tratados fuera del lugar donde se generan.
02 01 07	Residuos de la silvicultura.
02 01 08*	Residuos agroquímicos que contienen sustancias peligrosas.
02 01 09	Residuos agroquímicos distintos de los mencionados en el código 02 01 08.
02 01 10	Residuos metálicos.
02 01 99	Residuos no especificados en otra categoría.

Los residuos que aparecen en la lista señalados con un asterisco (*) se consideran residuos peligrosos de conformidad con la Directiva 91/689/CEE sobre residuos peligrosos a cuyas disposiciones están sujetos a menos que se aplique el apartado 5 del artículo 1 de esa Directiva.

1.2 Producción de biomasa vegetal residual

Las especies cultivadas en España son muy variadas, debido a las diferentes condiciones climáticas y edáficas que constituye el territorio español, en primer lugar, se encuentra el cultivo del cereal en cuanto a extensión cultivada contando en el año 2015 con 6,1 millones de hectáreas, dentro de este grupo destacamos el cultivo de la cebada, el segundo grupo de mayor importancia lo constituye el cultivo del olivar con 2.271.000 hectáreas y en tercer lugar se encuentra el cultivo del viñedo con 932.600 hectáreas (Informe Anual de Indicadores 2017 MAGRAMA).

Cabe destacar que el cultivo del cereal es el grupo que más residuo genera tanto en residuo de campo (paja, tallos, vainas, hojas) y en residuos del procesado (cáscara, mazorcas...).

En la **tabla 1.2** se identifican los principales cultivos en España con su producción en el año 2015. A partir de los datos de producción se estima el residuo generado. Destacamos en primer lugar el cultivo del cereal con 20,1 millones de toneladas seguido del cultivo de hortalizas con 14,7 millones de toneladas.

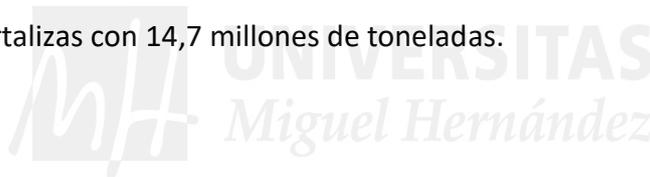


Tabla 1.2 Superficie, producción y residuo de los principales cultivos en España.
Elaboración propia a partir de los datos de producción de cultivos del informe Anual de Indicadores año 2017 y de la relación entre residuo y producción tomados de López y Boluda, 2008.

Cultivo	Superficie (Miles hectáreas)	Producción cultivo en España (Miles de toneladas)	Relación entre residuo producido/producción cultivo	Residuo (Miles de toneladas)	Tipo de residuo
Cereales					
Cereal grano	6.196,0	20.141,0	1,32	26.586	Paja
Trigo duro	347,9	924,9	1,58	1.461	Paja
Trigo blando	1.828,4	5.437,7	1,58	8.591,6	Paja
Cebada	2.598,8	6.705,1	1,17	7.845	Paja
Maíz	398,2	4.564,4	1,19	5.431,6	Paja
Oleaginosos					
Algodón (2)	63,3	185,4	2,775	514,5	Tallos
Girasol	738,8	769,1	2,0	1.538	Paja
Colza	71,0	149,1	1,86	277,3	Paja
Hortícola y frutícola					
Guisante seco	161,7	193,3	1,0	193,3	Paja
Patata	71,6	2.284,0	0,28	8.157	Tallo
Remolacha azucarera	37,6	3.605,1		2.992,2	Hojas
Almendro	487,7	209,0	3,17	656,3	Podas
Naranja	135,8	3.086,8	0,07	216,1	Podas
Mandarino	100,1	2.018,8	0,07	141,3	Podas
Viñedo (Uva de mesa)	14,4	270,7	0,43	116,4	Podas
Viñedo (Uva vino)	932,6	5.528,4	0,43	2.377,2	Podas
Oliva (Almazara)	2.271,5	6.811,6	1,13	7.697,1	Podas
Oliva (Aceituna de mesa)	161,1	540,5	1,13	610,8	Podas

1.3 Gestión de los residuos agrícolas biodegradables

El objetivo principal de la gestión de residuos debe ser reducir al mínimo el efecto negativo que ejerce sobre la salud y el medio ambiente. La mejor medida para reducir los residuos es, sin duda, la de no generarlos.

Para ello se ha de realizar una gestión adecuada en la que se establece un orden de prioridades, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, presenta la jerarquía de residuos en el siguiente orden de prioridad:



Figura 1.2. Orden de prioridad en las actuaciones en la política de residuos.

El objetivo de la aplicación de esta jerarquía es desplazar la mayor parte de las actuaciones de la gestión de residuos hacia los escalones superiores, siendo la prevención de residuos la medida más eficaz para reducirlos. En la **Figura 1.2.** muestra el orden de prioridad en las actuaciones políticas de residuos, en primer lugar, estaría la prevención, seguido de la reutilización, reciclado, otro tipo de valorización y en último lugar desechar como residuo.

En España el 57% de los residuos generados va a vertedero, más del doble que la media de la unión europea, las tasas de valorización y reciclaje también son inferiores como se muestra en el siguiente gráfico.

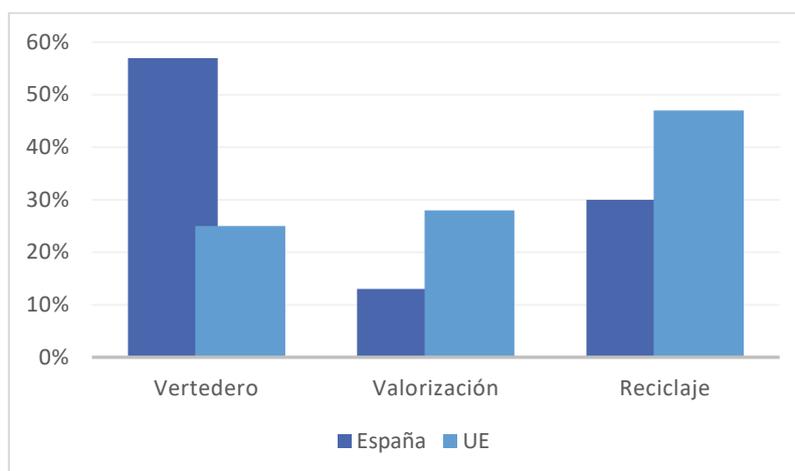


Figura 1.3 Tratamiento de residuos en España y total Europa (año 2016). Fuente Informe Anual de Indicadores año 2017.

España se encuentra entre los países más rezagados de la Unión Europea en cuanto a gestión de residuos, mientras que la media de reciclaje en la UE es del 47% España le sigue con un 30% y lo mismo ocurre con la valorización de residuos nos encontramos en 13% y La UE alcanza el 25% de valorización de residuos.

Estamos en el VII PROGRAMA AMBIENTAL DE LA UNIÓN EUROPEA, 2013-2020 que estima que la mejora de los recursos será fundamental para garantizar el empleo y el crecimiento en Europa.

La directiva 2008/98/CE de Parlamento Europeo y del Consejo, del 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por las que se derogan algunas directivas, integrándolas en la **Directiva marco de residuos**, establece un marco jurídico en la Unión Europea para la gestión de residuos. En mayo de 2018, se publica la Directiva (UE) 2018/851 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre residuos, que establece medidas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de residuos y el impacto negativo de la generación y gestión de residuos.

Donde establece consideraciones cruciales para la transición a la economía circular, tales como:

- ▶ La gestión de los residuos en la Unión Europea debe mejorarse y transformarse en gestión sostenible de la materia, para proteger, preservar y mejorar la calidad del medio ambiente y proteger la salud humana, garantizar la utilización racional de los recursos naturales, promover la economía circular, mejorar la eficiencia energética, reducir la dependencia de la Unión Europea de los recursos importados, crear nuevas oportunidades económicas y contribuir a la competitividad a largo plazo.
- ▶ Mejorar la eficiencia del uso de recursos y asegurarse de que los residuos se valoren como recursos puede contribuir a reducir la dependencia de la Unión Europea de las importaciones de las materias primas y crear un modelo de economía circular.
- ▶ Deben incrementarse los objetivos establecidos en la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y el consejo en materia de preparación para la reutilización y de reciclado de residuos para que se refleje mejor el cambio hacia la economía circular.
- ▶ Debe introducirse una definición de valorización de materiales para cubrir las formas de valorización, distintas de la valorización energética y de la transformación de los residuos materiales que son utilizados como combustible o como otro medio de generación de energía.
- ▶ Cuando el cálculo del índice de reciclado se aplique a tratamientos aerobios o anaerobios de los residuos biodegradables, se puede contabilizar como materia reciclada, siempre que el resultado se utilice como producto, material o sustancia reciclada.

Una mala gestión de residuos vegetales puede tener riesgos para el medio ambiente, riesgos sanitarios o fitopatológicos. En la **tabla 1.3.** se muestran las consecuencias que pueden provocar una mala gestión de los residuos.

Especialmente, los residuos de cosecha puede ser un riesgo fitopatológico debido a las plagas y enfermedades del cultivo de procedencia. Evitarlo es de gran importancia ya que pueden verse perjudicada la producción y la calidad del cultivo provocando grandes pérdidas económicas. Los residuos de cosecha deben gestionarse para evitar que

puedan ser reservorio de plagas y enfermedades en el campo perjudicando a la cosecha establecida o a posteriores cosechas. Entre los patógenos que pueden sobrevivir en el suelo encontramos los hongos fitopatógenos del género *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Verticillium* o *Sclerotinia*. También virus de alta resistencia como el virus del mosaico de tomate (TMV) o virus del moteado necrótico del melón (MNSV). En cuanto a bacterias fitopatógenas encontramos del género *Xanthomonas*. Estos patógenos no son los únicos que pueden sobrevivir en el material vegetal desechado, pero son un grupo de patógenos importantes en cuanto al daño que pueden ocasionar en los cultivos.

Tabla 1.3. Consecuencias de una mala gestión de residuos vegetales (Parra y col. 2008, modificada)

- | | |
|-----------------------------|--|
| ▶ Incineración incontrolada | <ul style="list-style-type: none"> • Contaminación atmosférica • Pérdida de recurso |
| ▶ Abandono indiscriminado | <ul style="list-style-type: none"> • Reservorio de plagas y enfermedades en el campo perjudicando a la cosecha establecida o a posteriores cosechas • Riesgo de obstrucción de ramblas durante lluvias torrenciales • Alteración de comunidades vegetales • Proliferación de roedores e insectos • Impacto visual negativo • Contaminación de suelos y acuíferos por lixiviados de compuestos tóxicos (pesticidas, metales pesados) • Contaminación atmosférica (malos olores, gases efecto invernadero) • Alimento incontrolado para ganado • Pérdida de recurso |

1.3.1 Método de reciclaje y valorización de la biomasa vegetal residual

Como se ha visto anteriormente, la actividad agrícola genera anualmente una producción muy elevada de biomasa vegetal no comercializable. Su naturaleza es variable y de ello depende el tipo de gestión, mientras que la horticultura genera biomasa altamente biodegradable, los cultivos leñosos generan biomasa más lignificada. En la mayoría de los casos la gestión se lleva a cabo dentro de la propia instalación. Actualmente la aplicación directa al suelo es una tendencia creciente y mayoritaria para la biomasa generada en horticultura, mientras que la quema controlada predomina como forma de gestión de podas en cultivos leñosos. Alternativas a la quema de podas como su uso como mulching o triturada in situ de los residuos leñosos permite el retorno al suelo de nutrientes y materia orgánica, aumentando el C edáfico, a la vez que se protege el suelo contra la erosión.

La biomasa **asociados a podas y restos de cosechas** es un recurso natural que puede ser empleado en diferentes usos de acuerdo a los principios de la economía circular, entre los que se destacan:

- **Aplicación directa**, consiste en la incorporación directa de los materiales de desecho al suelo, requiere una mínima transformación de picado o troceado. Era un tratamiento muy extendido con el que se conseguía incorporar al suelo materia orgánica de manera natural. Este método de reciclaje puede provocar déficit de nitrógeno para el cultivo, que se puede rectificar aportando nitrógeno ya sea de naturaleza orgánica (estiércol, abonos orgánicos, purines, abonado en verde) o inorgánica (abonos amoniacales o ureicos), junto con el residuo evita estos efectos negativos.
- **Uso como material de cobertura**: las podas picadas o troceadas pueden depositarse sobre el suelo como mulch. Esta gestión ayuda a prevenir procesos de degradación como la erosión y mejorar la reserva de agua en el suelo, la pérdida de agua del suelo por procesos de evapotranspiración, además fomenta el secuestro de carbono en el suelo.
- **Aprovechamiento del ganado**: los destríos de cosecha o pajas de cultivos como el trigo, cebada, avena se utilizan como alimento para ganado, la paja también

pudiéndose utilizar como cama para el ganado, debe restringirse en aquellos materiales que puedan presentar contaminantes tales como pesticidas que pasarían al animal. En la Ley 6/2003, de 4 de marzo de ganadería de la Comunidad Valencia se regula el aprovechamiento de pastos y rastrojeras. Cuando los residuos agrícolas son destinados a la alimentación animal, se estará a lo dispuesto en el Real Decreto 1002/2012, de 29 de junio, por el que se establecen medidas de aplicación de la normativa comunitaria en materia de comercialización y utilización de piensos y se modifica el Real Decreto 1409/2009, de 4 de septiembre, por el que se regula la elaboración, comercialización, uso y control de los piensos medicamentosos.

- **Valorización energética**, el uso de los residuos agrícolas como combustible es uno de los métodos más antiguos que existe, la reducción de residuo con aprovechamiento energético es una forma de valorización sustitutivo de los combustibles fósiles. Este método disminuye la dependencia externa de abastecimiento de combustible, pero es un recurso limitado. Se usa como combustibles para estufas y calderas.
- **Obtención de bioetanol**: La obtención de este biocombustible se consigue por fermentación microbiana de materiales lignocelulósicos como los restos de tallos o bagazos, se utilizan materiales con alto contenido en azúcares que al realizar una fermentación alcohólica dan como resultado un alcohol hidratado, que después de deshidratarlo se utiliza como combustible. Los bioalcoholes pueden utilizarse como sustitutos de las gasolinas. En la práctica esta sustitución es parcial, alcanzándose sustituciones de hasta un 20%.
- **Pirólisis**: es la descomposición térmica de un material a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, se consigue biocombustibles sólidos, líquidos y gaseoso. Los biocombustibles generados pueden aprovecharse en procesos de gasificación o combustión para producir electricidad o vapor industrial.
- **Digestión anaeróbica**, consiste en la transformación microbiológica de la materia orgánica a metano, en ausencia de oxígeno. En esta transformación obtenemos biogás y digerido.

El biogás es un combustible sustitutivo al gas natural, su alto contenido en metano entre 60-70% hace que sea una excelente fuente de combustible, se usa en calderas y en motores de combustión interna. El digerido es una mezcla de compuestos minerales y compuestos orgánicos de difícil degradación. Se usa como ingrediente para procesos de compostaje o como biofertilizante.

Este proceso biológico es ampliamente utilizado en el tratamiento de una amplia gama de residuos agrícolas, municipales e industriales. La mayor limitación que presentan los residuos vegetales durante el proceso de digestión anaerobia es la dificultad para degradar la lignina, componente mayoritario de estos residuos. La codigestión con purines o lodos mejora los resultados obtenidos.

- **Compostaje**, es la transformación de la materia orgánica en material mineralizado y estabilizado, mediante microorganismos aeróbicos, el resultado es un compuesto llamado compost que se usa como enmienda orgánica o sustrato. Es la operación de valorización más aceptada requiere una transformación previa de triturado de los materiales. Para una correcta transformación hay que evitar que entre los materiales a compostar se encuentren restos de plásticos.
- **Vermicompostaje**, es un método de degradación, biooxidación y estabilización de la materia orgánica gracias a la acción combinada de microorganismo y lombrices, el producto final es una materia orgánica higienizada y estabilizada llamada vermicompost, un producto de gran calidad agronómica, se usa como abono agroquímico. Una de las ventajas de la metabolización de la materia orgánica mediante el uso de lombrices (*Eisenia fetida*, *Eisenia andrei*) es la eliminación de productos nocivos de difícil gestión.
- **Otras formas de valorización más novedosas:**
 - Como soporte adsorbente en **biofiltros** útiles en la descontaminación de gases y líquidos.
 - la fabricación de **tableros**, aislantes y material de relleno en materiales de construcción.

- Extracción de compuestos de residuos agrícolas como el limón, brócoli, cascara de almendra, granada; que aportan propiedades a la **impresión 3D**. Entre las propiedades que se han conseguido aportar a las piezas generadas con la impresión, destaca las propiedades antimicrobianas que aporta el limón, y una gran gama de colores que se consigue con la granada, la almendra y el brócoli.
- Obtención **biopolímeros**, a partir de frutas como la sandía y el melón y hortalizas como el pimiento y el tomate, que sustituyan al plástico, estos materiales se pueden utilizar para envasado de alimentos.

1.4. Compostaje

“El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado, que requiere sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termófila y una producción temporal de fitotóxicas, dando lugar al final, CO₂, H₂O y minerales como productos de los procesos de degradación, así como materia orgánica estabilizada, libre de fitotóxicas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos” (Costa y col.,1991).

Mediante el proceso de compostaje se pueden transformar residuos previamente seleccionados, en un material estabilizado y de menor volumen. Este tratamiento requiere unas condiciones de humedad y aireación adecuadas, en la que los microorganismos endógenos del residuo colonizan y transforman la materia. La actividad microbiológica de la materia produce calor, este incremento de temperatura higieniza el residuo previniendo la aparición y dispersión de patógenos. Las condiciones físicas y químicas en las que se desarrolla la actividad microbiana cambian a medida que se está produciendo la biodegradación de la materia orgánica afectando directamente al proceso.

El proceso de compostaje debe ser riguroso en cuanto a la reducción de las emisiones y de las pérdidas de nutrientes durante el proceso y además el producto final debe cumplir determinadas características que sean adecuadas para un uso posterior.

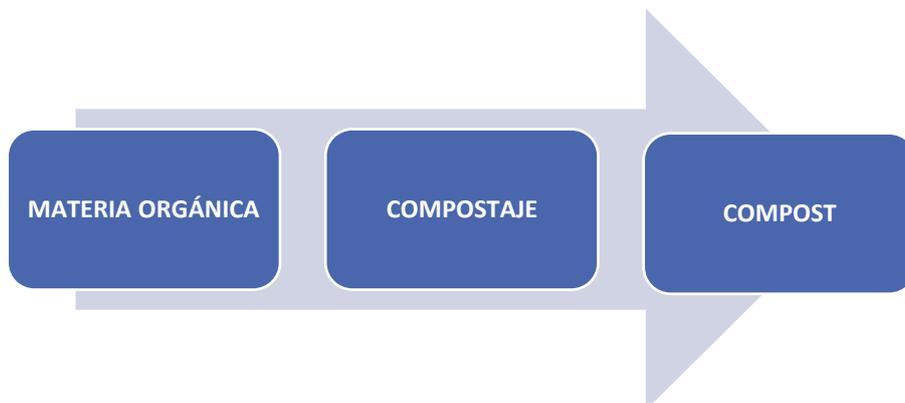


Figura 1.4 Transformación de la materia orgánica.

1.4.1 Fases del compostaje

El proceso de compostaje se basa en tres etapas de transformación independientemente de los materiales iniciales. Dependiendo de la materia orgánica y de cómo este conservada, el sustrato inicial contendrá un tipo de microbiota. Una vez preparados los materiales esta microbiota colonizará el sustrato y dará inicio a la evolución de la pila de compostaje.

1. Fase inicial

La materia orgánica fácilmente biodegradable se descompone con la ayuda de microorganismos tales como bacterias, hongos y actinomicetos en presencia de oxígeno. En esta etapa la temperatura asciende rápidamente, pasando de un sustrato a temperatura ambiente, a alcanzar los 40 °C. Los hongos y las bacterias termófilas actúan sobre el material degradando las sustancias solubles carbonatadas y de fácil degradación como azúcares y aminoácidos. En esta etapa desciende el pH de la pila y la temperatura asciende dando paso a microbiota termófila (Moreno y Mormeneo, 2008).

2. Fase Termófila

La temperatura continúa ascendiendo y el sustrato se coloniza por microorganismos termotolerantes, esta fase es de higienización de la pila ya que los parásitos y patógenos

son inhibidos. Con el aumento de la temperatura hay un descenso de la biodiversidad, los microorganismos que se desarrollan son los actinomicetos junto con algunos *Bacillus* que comienza a metabolizar proteínas incrementando la liberación de amoníaco. La temperatura en esta fase continúa aumentando y la pila se alcaliniza. Cuando alcanza temperaturas superiores a 60 °C aparecen las bacterias *Hydrogenobacter spp.* y *Thermus spp.* y *Bacillus*.

En esta fase del compostaje la actividad microbiológica es muy alta hasta alcanzar temperaturas de 70 °C, es cuando la actividad decrece ya que por encima de los 60 °C el suministro de oxígeno decrece. Cuando las temperaturas son altas y la fuente de carbono es un factor limitante, comienza la fase de enfriamiento (Moreno y Mormeneo, 2008).

3. Fase de maduración

La temperatura desciende y en el sustrato aparecen microorganismos mesófilos, predominando hongos y actinomicetos capaces de degradar compuestos complejos, oxidar el hidrógeno, amonio, nitrito y sulfuros, fijan el nitrógeno, reducen los sulfatos, producen exopolisacáridos a partir de amonio en condiciones heterótrofas (Díaz-Raviña y col., 1989; Beffa y col., 1996).

Los materiales utilizados inicialmente se han transformado en un producto estabilizado e higienizado con un alto contenido en sustancias húmicas.

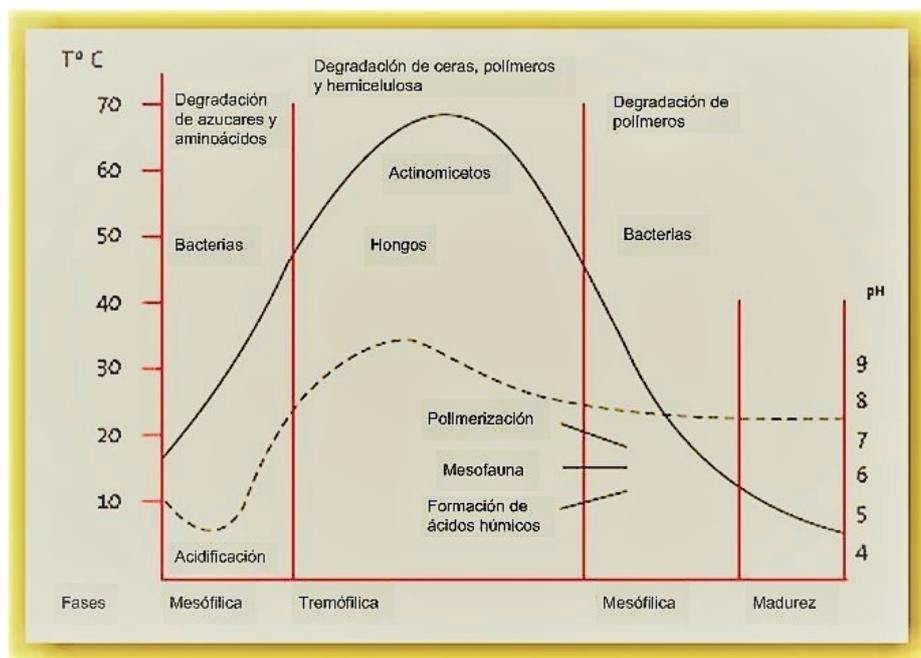


Figura 1.5. Evolución de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el pH durante el proceso de compostaje (Laos y col., 2003; Mustin y col., 1987).

1.4.2 Parámetros del compostaje

Para que los resultados del compostaje sean óptimos para la utilización como sustrato fertilizante existen unos parámetros que deben ser considerados durante el proceso. Podemos diferenciar dos tipos de parámetros, los de seguimiento que son aquellos que han de ser medidos durante el proceso y corregirlos, en casos necesario, para que sus valores se encuentren en los intervalos correctos para cada fase del proceso (Jeris y col., 1973) y parámetros relativos a la naturaleza del sustrato, estos se miden y se adecuan al inicio de proceso (Madejón y col., 2001).

Parámetros de seguimiento:

1. Temperatura

La temperatura es un factor generado por la actividad microbiana, en un primer momento el material a compostar se encuentra a la misma temperatura, cuando comienza la actividad microbiana la masa empieza a generar calor. Por la evolución de

la temperatura podemos saber si el material presente está compostándose de forma correcta y en qué fase del proceso se encuentra el material.

Se distinguen tres fases en el proceso de compostaje:

- Primera fase mesófila, las temperaturas no superan los 45°C, al final de esta fase se producen ácidos orgánicos
- Segunda fase termófila las temperaturas superan los 45°C, en esta fase se produce la higienización de la masa
- Tercera fase mesófila final, de enfriamiento y madurez, la materia vuelve a temperaturas iniciales, después de esta fase se puede dar por concluido el proceso de compostaje.

La temperatura que alcance la pila de compostaje dependerá de la materia inicial y por el sistema empleado en el proceso.

2. Humedad

La humedad es imprescindible para el desarrollo de los microorganismos, los compuestos de la materia orgánica se disuelven y los microorganismos se alimentan. Es importante que el contenido de humedad se encuentre entre un 40-60% del total de la masa y que no exceda esos valores, ya que los microorganismos precisan oxígeno para el proceso de compostaje; porcentaje muy altos de humedad daría lugar a procesos anaerobios produciendo malos olores y una evolución indeseada para nuestro compost final. También afectaría al proceso valores bajos de humedad ya que se ralentizaría la actividad microbiológica.

La aplicación de agua a la pila de compostaje puede ayudar a reducir sales de los materiales originales, si partimos de materiales con conductividad eléctrica alta, habrá que tener en cuenta que el compostaje normalmente aumenta la conductividad eléctrica final del compost. Con la aplicación de agua limpia a la pila podemos controlar este parámetro fundamental en la calidad del compost final.

3. Aireación

Los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje son aerobios, una disminución de oxígeno en la pila daría un intercambio de microorganismos aerobios a

anaerobios, provocando una serie de consecuencias indeseables en la pila de compostaje, como malos olores, ralentización, además generan productos secundarios indeseables como metano. Un déficit de oxígeno en la pila no favorece al aumento de temperatura afectando al proceso de higienización y no se logra la estabilización biológica total del producto.

A medida que aumenta la actividad microbiana el requerimiento de oxígeno aumentará debido al consumo de los microorganismos, por lo tanto, en la fase mesófila y termófila el consumo de oxígeno será mayor que el que se produce en la fase de maduración.

Los mecanismos de aireación pueden ser manuales o por ventilación forzada y deben producirse periódicamente a lo largo del proceso de compostaje.

4. pH

Mediante la medida del pH podemos detectar si el sustrato se está compostando de forma correcta, un descenso del pH nos indicará que se pueden estar produciendo condiciones de anaerobiosis en la mezcla.

En el proceso de compostaje, el pH varía a medida que este evoluciona. En la fase inicial del proceso el pH desciende, es la fase mesófila del compostaje, donde se produce liberación de ácidos orgánicos. En la segunda fase del compostaje se produce la alcalinización del medio, debido a la pérdida de ácidos orgánicos y la liberación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas y, por último, en la fase final tiende a la neutralidad de la mezcla, por la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón (Sánchez-Monedero, 2001).

Se establece que en condiciones adecuadas de aireación el compost final debe tener unos valores de pH entre 7-8, valores más bajos son indicativos de anaerobiosis (Suler y col. 1977).

Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato:

1. Equilibrio Carbono/ Nitrógeno

Debe ser considerado al inicio de la mezcla de los materiales, un equilibrio en cuanto a la relación Carbono/ Nitrógeno se encuentra entre los valores de 25 y 35/1 de forma

ideal. Si se realizan mezclas con valores inferiores a 25 pueden ocasionar pérdidas en cuanto a nitrógeno en forma de NH_3 y con concentraciones superiores a 35 el proceso de compostaje puede ser más lento que en situación óptima.

2. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula influye directamente en las características del compostaje, con material demasiado grande (> 2 o 3 cm) se degradará de forma lenta por la superficie insuficiente para sufrir el ataque de microorganismos, con partículas demasiado pequeñas se produciría escasa aireación requiriendo en el proceso mayor necesidad de aireación.

3. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica tiende a aumentar durante el proceso de compostaje, debido a la mineralización de la materia orgánica. Durante el compostaje se produce un aumento de la concentración de nutrientes, ocasionalmente puede haber un descenso de la conductividad eléctrica debido a la lixiviación del material provocado por un exceso de humedad.

La dosis de compost aplicable al suelo está condicionada por la conductividad eléctrica del compost ya que un exceso de sales en el suelo puede provocar problemas en el desarrollo de la planta.

4. Materia orgánica

La materia orgánica de un material compostado tiende a mineralizarse a lo largo del proceso, la cantidad de materia orgánica mineralizada dependerá de su grado de biodegradabilidad, que nos indica la cantidad de materia orgánica que puede llegar a descomponerse.

El descenso de la materia orgánica se produce en dos etapas, en la primera hay un rápido descenso de los carbohidratos, se transforman las cadenas carbonatadas largas en otras más cortas con la producción de compuestos simples, que pueden agruparse y formar moléculas complejas, formando compuestos húmicos; y una segunda etapa se degradan lentamente las ligninas transformándose en compuestos húmicos (Tomati y col., 2000; Castaldi y col., 2005). La naturaleza física y química del sustrato, los microorganismos que intervienen y las condiciones físico-químicas del proceso influirán en la velocidad de

transformación de la materia orgánica (Michael y col., 2004). El contenido en materia orgánica de un compost es fundamental para determinar su calidad agronómica.

1.5 Madurez y usos del compost

1.5.1 Definición de compost

El compost es un producto obtenido a partir de diferentes materiales orgánicos sometidos a proceso de biooxidación controlada. Este producto se puede emplear como enmienda orgánica o como sustrato, dependiendo del resultado final del proceso.

1.5.2 Madurez del compost

Un compost maduro es aquel que ha evolucionado correctamente, su materia orgánica se ha transformado a formas más resistentes a la biodegradación y se asemeja a la materia orgánica humificada del suelo, el compost debe de no poseer sustancias fitotóxicas (Iglesias y col., 2008).

Efectos de un compost inmaduro:

- Inmovilización de nitrógeno, un compost inmaduro contiene alto contenido en C/N que provoca que aumente la microbiota edáfica, produciendo competencia por el nitrógeno entre microorganismo y planta.
- Fitotoxicidad, durante el proceso de descomposición de la materia orgánica se generan emisiones de óxido nitroso, amoníaco y ácidos orgánicos como ácido acético o butírico.
- Deficiencia de oxígeno en suelo, cuando se incorpora materia orgánica en descomposición se produce un descenso de O_2 produciendo condiciones anaeróbicas en el sistema radicular de la planta.

La calidad de un compost depende de su grado de madurez y estabilidad, el compost debe de ser un material estable, no contener sustancias fitotóxicas y estar libre de patógenos.

Para evaluar la madurez de un compost se dispone de diferentes métodos que se basan en el estudio de los parámetros físicos, químicos y biológicos, debido a la gran variabilidad de los compost, es necesario tener en cuenta diferentes criterios durante el

compostaje y la humificación. Se dividen en cinco grupos dependiendo de la naturaleza del parámetro que se estudia.

1. Métodos de observación: color, olor, seguimiento de la temperatura durante el proceso de compostaje
2. Métodos de análisis físico-químicos: seguimiento del pH o CE
3. Parámetros biológicos, evolución de la actividad microbiana: consumo de O₂, temperatura, emisión de CO₂, Test de autocalentamiento (test Dewar), fitotoxicidad de semillas.
4. Indicadores químicos: MOT, COT, CCC
5. Métodos físicos: Granulometría, porosidad, densidad.



En la **tabla 1.4.** se muestra algunos de los parámetros para evaluar la calidad de un compost. Los datos se han obtenido del libro Compostaje (Moreno y Moral 2008).
Cap.11 Indicadores de la estabilidad y madurez de un compost.

Tabla 1.4 Parámetros a evaluar en la madurez de un compost.

PARAMETRO	VALOR	FUENTE
Color	Olor a tierra húmeda (ausencia de malos olores)	Iglesias Jiménez y Pérez García, 1989
Olor	Pardo oscuro- Negro	Sugahara y col., 1979
Ratio AH/AF	>1.9	Iglesias Jiménez y Pérez García 1992b
Temperatura	Test Dewar	
Consumo O ₂	< 1mg O ₂ g ⁻¹ VS h ⁻¹ Método SOUR	Lasardi y Stentiford, 1998
Emisión CO ₂	7-8 (test de Solvita [®])	
Índice de biodegradabilidad	<2,4	Morel y col., 1985
Test de fitotoxicidad	IG≥80%	Zucconi y col. 1981b
Cot/NOT	<12	Iglesias-Jiménez y Pérez- García 1992c
Cw/Nw	<6	Iglesias-Jiménez y Pérez-García 1991, 1992c
CIC/Cot	>1.9	Iglesias-Jiménez y Pérez- García 1992c
Cw	>5g Kg ⁻¹	García y col. 1992
Ratio N-NH ₄ ⁺ /N- NO ₃ ⁻	<0,16	Bernal y col. 1998

1.5.3 Usos del compost como enmienda orgánica

El uso posterior de un compost está determinado por el resultado final de este, es importante tener en cuenta antes de su aplicación la eficacia agronómica y el contenido de sustancias perjudiciales para la salud o el medio ambiente.

Con la aportación de compost a los cultivos podemos paliar **la pérdida de materia orgánica** de la tierra, aportando a la plantación abono orgánico indispensable para su desarrollo. La organización estructural del suelo depende del ordenamiento de las partículas en unidades de mayor tamaño denominadas agregados. Los agregados es la unión de partículas minerales y orgánicas del suelo. De la estructura del suelo depende la disponibilidad de agua, el oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica para que la planta pueda desarrollar su sistema radicular. La falta de materia orgánica en el suelo provoca una inestabilidad de los agregados que afecta a la compactación, sellado, aireación, provocando una degradación física del suelo.

La elaboración de compost de residuos vegetales y su aprovechamiento en el suelo se enmarca en un modelo de economía circular al favorecer el retorno de nutrientes extraídos del suelo agrícola, incluyendo el aumento de la fertilidad orgánica del suelo al favorecer el **incremento del carbono edáfico del suelo**.

El aumento del contenido de materia orgánica en el suelo es la práctica con el máximo potencial de mitigación según el Special Report de IPCC (2019). Los suelos del sureste español tienen un gran potencial de mitigación del cambio climático debido a la escasez de materia orgánica que contienen. La aplicación de prácticas agrícolas que contribuyan a reconstituir, mejorar y mantener los niveles de materia orgánica del suelo contribuirá a ello.

Con aportaciones de compost al suelo también se puede conseguir un **control de los patógenos** vegetales. Durante el proceso de compostaje el material vegetal se coloniza por diferentes microorganismos, en la fase de maduración el compost se repuebla por microorganismos responsables del control biológico entre los que podemos encontrar *Enterobacter spp.*, *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.* (Vargas y Suárez, 2008)

También hay que señalar el poder **fertilizante** del compost, aunque va a depender de su composición y de las necesidades del cultivo al que vaya dirigido la aplicación. La

comercialización del compost como abono orgánico está regulado por RD 999/2017 sobre productos fertilizantes. Las características mínimas que ha de cumplir para que se considere abono orgánico son las siguientes:

Tabla 1.5 Condiciones necesarias que ha de cumplir un compost para ser comercializado como fertilizante. Fuente: Real Decreto 999/2017 sobre productos fertilizantes que modifica al RD 506/2013 sobre productos fertilizantes.

Parámetro	Valor		
<i>Materia orgánica mínima</i>	35%		
<i>Humedad máxima</i>	40%		
<i>Relación C/N</i>	< 20		
<i>Piedras y gravas eventualmente presentes de diámetro superior a 5 mm</i>	< 2%		
<i>Impurezas (metales, vidrios y plásticos) eventualmente presentes de diámetro superior a 2 mm</i>	< 1,5 %		
<i>Partículas de diámetro superior a 25 mm</i>	> 90 %		
<i>Salmonella</i>	Ausente en 25g		
<i>Escherichia coli</i>	<1000 NMP por g		
Polifenoles (% p/p) ¹	0,8		
Furfural (% p/p) ²	0,05		
<i>Metales Pesados³ (mg/Kg.m.s.)</i>	Clase A	Clase B	Clase C
<i>Níquel</i>	25	90	100
<i>Mercurio</i>	0,4	1,5	2,5
<i>Cobre</i>	70	300	400
<i>Cromo (IV)</i>	nd	nd	nd
<i>Cromo total</i>	70	250	300
<i>Cadmio</i>	0,7	2	3
<i>Zinc</i>	200	500	1000
<i>Plomo</i>	45	150	2,5

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.

¹ En los productos que contengan como materia prima subproductos o residuos procedentes de almazaras, se acreditará que no superan el 0,8% p/p como límite máximo de contenido de polifenoles.

² En los productos que contengan como materia prima lignosulfonatos, lodos procedentes de la industria del papel o de la elaboración de azúcar, se acreditará que no supera el 0,05% p/p como límite máximo de contenido de furfural (2 furaldehido)

³ Niveles máximos permitidos de metales pesados dependiendo de la clasificación del fertilizante

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS



2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) tiene como uno de sus objetivos la educación y la transferencia de tecnología, para ello cuenta con un servicio de transferencia de tecnología cuyos objetivos fundamentales son la experimentación y adaptación de innovaciones, el apoyo a la investigación agraria, la transferencia y divulgación de la información, la formación continua, asesoramiento y asistencia técnica.

Para ello dispone de una red de Estaciones Experimentales Agrarias, como por ejemplo la de Elche, que es donde se ha realizado este piloto de Agrocompostaje. Esta estación se centra en:

- Las innovaciones en el sector cítrico, con el desarrollo y experimentación de nuevo material vegetal, con especial interés en variedades de limón, de naranja y nuevos patrones de cítricos.
- Las innovaciones en el cultivo del granado con el desarrollo y experimentación de nuevo material vegetal y adecuación a las nuevas técnicas de cultivo.
- Las innovaciones en el sector hortícola con incidencia en las necesidades en torno a material vegetal y técnicas agronómicas de cultivo de la alcachofa.
- El desarrollo de la horticultura ecológica, conservación de variedades hortícolas tradicionales (Plan de la Biodiversidad Agrícola Valenciana)

La gestión adecuada de las podas y restos de cosecha que se generan en este centro pueden suponer un valioso recurso. A través del compostaje adecuado de estos materiales podemos obtener un fertilizante (compost), que aporte nutrientes al suelo y que además nos ayude a equilibrar su materia orgánica tan deficiente en los suelos del área mediterránea. El European Soil Bureau establece que para gran parte de nuestro territorio los niveles de MOS son inferiores a 1,7% con consecuencias asociadas en la cuenca mediterránea a la pérdida de estructura de los suelos, menor retención de agua y nutrientes, aumento de escorrentías y pérdida de infiltración, pobreza biológica, pérdida de fertilidad e incremento de los riesgos de erosión. En todo caso, una pérdida general de resiliencia del sistema suelo-planta. La MO del suelo genera beneficios a nivel de propiedades físicas, químicas y biológicas, mejorando la estabilidad estructural, la

permeabilidad, porosidad, aireación, el nivel de nutrientes y la actividad de organismos del suelo. Además, el incremento de la MO del suelo está considerada como un de las mejores opciones de mitigación del cambio climático según el último informe del IPCC.

El agrocompostaje se presenta como alternativas de gestión sostenibles de los residuos orgánicos agrícolas frente a otras acciones tradicionales en el territorio como serían el acopio descontrolado y las quemas agrícolas. De esta forma se contribuye a la economía circular dentro del ámbito local.

El **objetivo** de esta pila es *“desarrollar un proceso de agrocompostaje donde los ingredientes principales sean los insumos generados en la propia finca de la Estación Experimental Agraria de Elche (destrío de granada y plantones de naranjo) y estiércol, mediante pila móvil con ventilación natural y con volteos periódicos, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido, cuya aplicación al suelo permita aprovechar los nutrientes y la materia orgánica que contienen los residuos vegetales que se generan en el centro, mejorando su sistema productivo.”*

Para ello, se establecen los siguientes objetivos concretos:

- Desarrollo de un proceso de compostaje controlado mediante el sistema de pila abierta móvil, donde los componentes de la mezcla a compostar son destrío de granada y plantones de naranjo no utilizados del propio centro y estiércol de oveja que se considera insumo.
- Seguimiento de los parámetros indicadores del proceso de compostaje, a nivel de temperatura, humedad y aireación.
- Estudio de la evolución de características fisicoquímicas y químicas de la mezcla de residuos a lo largo del proceso de compostaje, así como del producto final obtenido (compost).
- Propuesta de fertilización del compost producido a partir de los resultados obtenidos y la legislación vigente.

MATERIAL Y MÉTODO



3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El ensayo se llevó a cabo en la finca de la Estación experimental Agraria de Elche. Se planteó el estudio para la valorización por compostaje mediante pila móvil con volteos periódicos, de desechos de granada de la propia finca como elemento principal, poda de naranjo también de la finca y estiércol de oveja procedente de una ganadería cercana, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido. Para ello, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en cuatro fases:

Etapa 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar

Etapa 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.

Etapa 3: Elaboración y desarrollo de la pila de compostaje

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

Etapa 5: Dosificación y valoración económica del compost

Fase 1. Caracterización inicial de los residuos a compostar

Se realizó una caracterización inicial de los residuos a compostar con el fin de establecer con posterioridad una estrategia de compostaje adecuada en función de la tipología de estos materiales. Esto nos permite establecer una buena relación de C/N en la mezcla inicial para la obtención de un compost con buenas características para su posterior uso. Con la reutilización de los residuos se ha conseguido un modelo de economía circular aprovechando desechos y dándole una segunda oportunidad para ser utilizados.

En la **tabla 3.1.** se muestra el origen de las materias primas elegidas para la realización de este estudio:

Tabla 3.1. Componentes para la elaboración de los compost.

Destrío de granada:	Generado en la finca de la Estación Experimental Agraria de Elche
Plantones de naranjo:	Se trata de plantones que se compraron para plantar en la finca de la Estación Experimental Agraria de Elche y que finalmente no se utilizaron
Estiércol de oveja maduro:	Proviene de una granja cercana a la Estación.

Los parámetros analizados en las muestras de materiales iniciales fueron:

- Humedad
- Densidad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- COT
- Nitrógeno total
- Fósforo
- Potasio y sodio
- Polifenoles.

UNIVERSITAS
Miguel Hernández

Fase 2. Establecimiento de la mezcla a compostar

Se escogieron los materiales a compostar por la disponibilidad que había en ese momento en la finca, teniendo en cuenta su relación C/N, para conseguir una mejor relación se hizo uso de material externo. Se calculó el porcentaje de cada uno de ellos para obtener una buena relación y también se tuvo en cuenta la humedad y aireación de la mezcla.

Fase 3. Elaboración y desarrollo de la pila de compostaje

La elaboración de la pila de compostaje se realiza en la propia finca de experimentación, para ello se hace acopio de los residuos utilizando la pala del tractor de la propia finca, que se usa como unidad de medida y para realizar la mezcla de los materiales.

Se desarrolla el sistema de compostaje en forma piramidal, ya que es uno de los sistemas de tratamiento más sencillos y económicos, cuyos bajos requerimientos técnicos se podían cubrir con la propia maquinaria existente en la finca. Se controlaron las condiciones del entorno a nivel de aireación, temperatura y humedad en las que deberá estar comprendida la mezcla a compostar en el sistema. La aireación se controló mediante volteos periódicos de la pila, la temperatura con mediciones periódicas mediante sonda de temperatura y la humedad mediante riegos de 30 minutos aproximadamente cada dos semanas, también se tienen en cuenta los episodios de lluvia. Se realizaron un total de 4 volteos, utilizando una pala mecánica con el objetivo de homogeneizar la pila y airearla.

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

A lo largo de todo el proceso, desde el inicio hasta que se obtiene el compost maduro, se estudió la evolución de la mezcla, mediante el análisis de diferentes parámetros indicativos del proceso:

- Asociados al propio proceso de compostaje: temperatura, humedad y densidad.
- Asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble: pH, conductividad eléctrica y polifenoles.
- Asociados a la evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida: contenido en materia orgánica, carbono orgánico, pérdida de la materia orgánica y relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total, contenidos de macronutrientes NPK y de Na.
- Asociados a la madurez del compost: capacidad de intercambio catiónico, índice de germinación e índices de humificación.

Es importante hacer un seguimiento de los factores que pueden ser limitantes en la evolución de un compost, como pueden ser el pH, la humedad, la salinidad y la aireación de la pila. Estos parámetros deben establecerse dentro de un rango óptimo, otros parámetros nos indican la biotransformación del proceso, como la evolución de la materia orgánica en componentes inorgánicos y orgánicos más humificados. Finalmente se debe tener en cuenta la evolución de los nutrientes primarios NPK y saber cómo evolucionan a lo largo del proceso donde el producto puede enriquecerse o no, y aumentar su poder fertilizante.

Fase 5: Dosificación y valoración económica del compost

Se realizará el cálculo de la cantidad de nitrógeno aportada en dosificaciones habituales de entre 3 y 8 toneladas de compost por hectárea y año. También se indicará el límite de aportación para no superar los 170 kg/ha.año que limita la legislación para prevenir la contaminación por nitratos (RD 261/1996, de 16 de febrero, sobre la protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias).

En base al valor de mercado de los fertilizantes urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, proporcionados por el Banco Mundial, se calculará el valor económico del compost, teniendo en cuenta sus unidades fertilizantes.

3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Características de los residuos utilizados

En este estudio se han utilizado 2 flujos residuales generados en la Estación Experimental Agraria de Elche (destrío de granada y plantones de naranjo) y un estiércol de oveja de una granja cercana.

Las características de los materiales iniciales de la pila elaborada se exponen en la **tabla 3.2.**

Tabla 3.2. Características de los materiales utilizados para elaborar la pila.

<i>Propiedades</i>	Destrío de granada	Plantones de naranjo	Estiércol de oveja
Humedad (%)	69,4	26,5	19,5
Materia seca (%)	30,6	73,5	80,5
Densidad aparente (kg/L)	0,494	0,073	0,372
pH (ud pH)	4,3	7,4	9,4
Conductividad Eléctrica (dS/m)	3,77	2,84	7,10
Materia orgánica total, MOT (%)	96,5	94	38,6
Cenizas (%)	3,5	6	61,4
Nitrógeno total, NT (%)	0,77	0,99	1,80
Carbono orgánico total, COT (%)	43,5	45,5	23,5
Relación COT/NT	56,5	46,1	13,3
Fósforo total (g/kg)	1,65	0,76	4,30
Potasio total (g/kg)	17,9	9,54	37,0
Sodio total (g/kg)	2,13	1,29	13,4
Polifenoles (mg/kg)	66.826	6.402	10.627

Destrío de granada: Residuo compuesto por granadas enteras, se caracteriza por una humedad elevada, un pH ácido y un alto contenido en materia orgánica. Por su alto contenido en carbono, su relación COT/NT es muy alta. Destaca su contenido en potasio. Su densidad es elevada por lo que necesita de otro residuo que funcione como estructurante. Además, su contenido en polifenoles es muy elevado, pudiendo ocasionar que el proceso sea más lento.

Plantones de naranjo: Restos de plantones de naranjo que al final no se plantaron en la finca. Este residuo tiene una baja humedad y un pH ligeramente básico. También tiene un alto contenido en materia orgánica y como tiene un alto contenido en carbono su relación COT/NT es alta.

Estiércol de oveja maduro: Proviene de una granja cercana a la estación. El estiércol se caracteriza por su naturaleza alcalina y por tener una salinidad relativamente alta debido

a su mayor contenido en nitrógeno, potasio, fósforo y sodio. La relación C/N de este material es baja, debido a la alta concentración de nitrógeno, compensando la mezcla inicial ya que los materiales anteriores contienen niveles altos de carbono.

3.2.1 Dispositivo de compostaje utilizado

El proceso de compostaje objeto de este estudio se ha desarrollado en las instalaciones de la finca del Instituto Valenciano de Investigaciones agrarias (IVIA) del término municipal de Elche.



Figura 3.1. Instituto Valenciano de Investigaciones agrarias (IVIA) del término municipal de Elche.

El objetivo de la realización de esta pila fue valorizar los residuos agrícolas de los que disponía en el momento de montaje, en este caso restos de destríos de granadas de la finca, para complementar la mezcla se utilizó restos de plantones de naranjo en su totalidad, como material estructurante, y estiércol de oveja de una finca cercana, para obtener una proporción adecuada de C/N.

Para realizar la pila se estableció una correlación entre volumen de materia fresca y materia seca, a partir de los valores de humedad y densidad aparente de cada ingrediente. Estos valores son especificados en el proceso. Se utilizó la pala de un tractor como unidad de medida. Una vez establecida la relación de los materiales que había que incorporar a la pila se procedió a su montaje constituyendo unidades básicas de montaje en volumen usando la cazuela-pala del tractor como unidad de medida. También se utilizó la pala para voltear la pila con el fin de airearla y homogeneizarla. El resultado de la pila inicial de 15,8 m³.

Los materiales a compostar se incorporaron a la pila tras una breve manipulación, las granadas fueron pisadas por un vehículo para romper el fruto y facilitar el compostaje, la poda fue triturada, tras el acopio de los materiales hubo una homogenización de la pila a compostar.

Los riegos se realizaron a mano con manguera, por un tiempo de 30 minutos cada dos semanas, se tuvieron en cuenta los episodios de lluvia. Los volteos para airear y homogeneizar la pila se realizaron mediante pala mecánica, se han producido 4 volteos durante la etapa de compostaje de los residuos. Para el control de las temperaturas se utilizó una sonda térmica con la que se sondeaba en cuatro puntos y alturas diferentes a lo alto de la pila.



Figura 3.2. Aspecto inicial y final de la pila.

3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

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

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

3.3.1. Cálculo y preparación de la mezcla

Para realizar este ensayo, se planteó como objetivo encontrar la proporción adecuada de los ingredientes a co-compostar de destrío de granada, de plantones de naranjo y de estiércol de oveja que permitan un buen desarrollo del proceso para la obtención de un compost de calidad. Uno de los requisitos es que las mezclas tengan una relación C/N entre 25 y 35, rango ideal para el buen desarrollo del proceso. Para ello se calcularon las cantidades necesarias a mezclar de cada ingrediente para alcanzar dicho objetivo. Este proceso se realizó utilizando las expresiones:

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

$$\text{Ecuación (2)}$$

$$CN = \frac{(A \times \%C_A \times \%MS_A) + (B \times \%C_B \times \%MS_B) + (C \times \%C_C \times \%MS_C)}{(A \times \%N_A \times \%MS_A) + (B \times \%N_B \times \%MS_B) + (C \times \%N_C \times \%MS_C)}$$

P = Peso total de la pila, en kg.

A = Peso del componente A, en kg.

B = Peso del componente B, en kg.

C = Peso del componente C, en Kg

CA, CB, CC = Carbono de componente A, B y C

NA, NB, NC = Nitrógeno de componente A, B y C

MS = Materia seca.

Con el programa gratuito que ofrece el “Cornell Waste Management Institute” se puede establecer la relación C/N esperada para un compost ternario, introduciendo los datos

de humedad, peso fresco, y los porcentajes de carbono y nitrógeno de las materias primas.

Una vez realizados los análisis previos de carbono, nitrógeno y humedad de cada uno de los ingredientes e introducidos los datos en el programa, la relación C/N esperada para esta mezcla de compost es 36,9 muy cercana al rango óptimo 25-35, lo que nos indica el proceso se desarrollará de forma adecuada siempre que se establezca un buen control.

En la **Tabla 3.3**, se expone la proporción de cada componente en la mezcla, en peso fresco y en volumen.

Tabla 3.3. Relación en materia fresca, materia seca y volumen del compost propuesto.

GVA 40	Ing 1: Destrío de granada (MP 120)	Ing 2: Plantón de naranjo (MP 122)	Ing 3: Estiércol oveja (MP 133)
% peso M.F	88,1	6,5	5,4
% volumen M.F	63,3	31,6	5,1

3.3.2 Seguimiento del proceso de compostaje

Para controlar el sistema de compostaje, es necesario llevar un control de la temperatura de la pila, esta nos indicará la actividad microbiana que se está produciendo en cada momento. También es necesario mantener la pila húmeda y aireada para que los procesos térmicos se realicen en correctas condiciones.

La fase bio-oxidativa del compostaje se consideró finalizada cuando la temperatura se aproximó a la del ambiente y no hubo reactivación tras el volteo. La duración de la fase bio-oxidativa fue de 148 días. A continuación, se estableció un periodo de maduración de 30 días.

La fase bio-oxidativa del proceso de compostaje tuvo una duración de 148 días, posteriormente se dejó madurar durante 30 días, por lo tanto, la duración del proceso fue de 178 días. Se realizaron 4 muestreos correspondientes al inicio del proceso (M1), fase termófila (M2), final de fase bio-oxidativa (M3) y madurez (M4), tal y como se muestra en la **Tabla 3.4**.

Se realizaron riegos periódicos, teniendo en cuenta los episodios de lluvia y el estado de humedad de la pila, los riegos se realizaron durante todo el periodo de compostaje.

El primer volteo tuvo lugar a los 15 días tras el inicio de la pila, con ello conseguimos la homogenización de la pila y reactivarla mediante la aireación, el segundo volteo se realizó el día 22, el tercer volteo el día 63 de proceso. Tras el periodo bio-oxidativo se realizó un último volteo el día 148 y se dejó la pila en fase de maduración.

Tabla 3.4. Resumen de acciones realizadas durante el proceso.

OPERACIÓN	DÍA	OBSERVACIONES
Montaje de la pila	Día 1	Procedimiento mecánico
Toma de muestras iniciales	Día 1	Muestra integrada de 10 submuestras
Riego	Día 1	
Riego	Día 5	
Volteo	Día 15	Procedimiento mecánico
Riego	Día 15	
Volteo	Día 22	Procedimiento mecánico
Riego	Día 22	
Lluvia	Día 28	
Riego	Día 30	
Lluvia	Día 33	
Lluvia	Día 47	
Lluvia	Día 51	
Volteo	Día 63	Procedimiento mecánico
Riego	Día 63	
Lluvia	Día 75	
Lluvia	Día 77	
Riego	Día 91	
Toma de muestra fase termófila	Día 105	Muestra integrada de 10 submuestras
Riego	Día 133	
Riego	Día 145	
Volteo	Día 148	Procedimiento mecánico
Toma muestra fase bio-oxidativa	Día 148	Muestra integrada de 10 submuestras
Toma de muestras fase madurez	Día 178	Muestra integrada de 10 submuestras

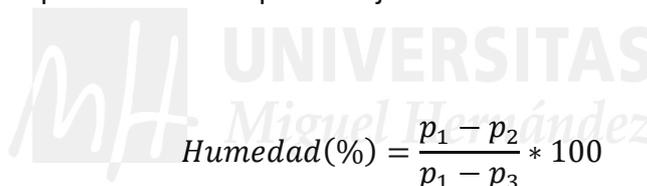
3.4. MÉTODO ANALÍTICO

- Preparación de la muestra

Recogidas las muestras del campo se llevan al laboratorio y se someten a secado en una estufa en de aire forzado a 60 °C. Una vez seca la muestra se procede al molido del material y se vuelve a secar a 105 °C, posteriormente se homogeneiza la muestra en un tamiz de 0.5mm de luz.

- Humedad original

Para la determinación de la humedad se utilizó el método gravimétrico. La humedad la determinamos por diferencia de peso entre la materia humedad y la seca una vez secado el material a 105°C quedándonos un porcentaje de humedad.


$$\text{Humedad}(\%) = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3} * 100$$

P₁= peso de la cápsula + peso de la muestra seca al aire

P₂=peso de la cápsula + peso de la muestra se a 105°C

P₃=peso de la cápsula.

- Pérdida de peso por calcinación

Se determina según el método de (Navarro y col,1993), se toma como cenizas el residuo fijo obtenido de la calcinación de la muestra a 430°C.

- Pérdida de materia orgánica

Las pérdidas de materia orgánica (MO), se determina según el método Navarro y col. (1993). La pérdida de peso se expresa respecto de la muestra seca.

$$\% \text{ Cenizas} = 100 - \% \text{ MOT}$$

El contenido de materia orgánica total de una muestra se determina mediante la expresión:

$$\% \text{ MOT} = \frac{p_s - p_c}{p} \times 100$$

P_s = peso seco, en gramos, del crisol + el filtro con muestra.

P_c = peso calcinado, en gramos, del crisol con la muestra

P = peso en gramos de la muestra seca.

- Medida del pH

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

- Conductividad eléctrica

Se determina sobre la suspensión acuosa anterior, previamente centrifugada y filtrada, con un conductímetro y también se realiza sobre las dos submuestras para evitar posibles errores.

- Carbono orgánico total y nitrógeno total

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

- Mineralización de la muestra

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

- Fósforo total

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

Una vez obtenida la lectura de nuestra muestra podemos obtener el fosforo total mediante el cálculo de la ecuación:

$$\text{g/kg P} = \frac{L \times V \times 5}{P}$$

$$P = (\text{g/ kg}): 10 = \quad P (\%)$$

$$P_2O_5 = \% P \times 2.29$$

L= Lectura obtenida en el espectrómetro visible-ultravioleta (mg/l)

V= Volumen de aforo de mineralización de la muestra.

P = Peso del material orgánico utilizado para la mineralización

- Sodio y potasio

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

El contenido de sodio y potasio obtenido en la muestra se determina mediante la siguiente expresión:

$$C = \text{mg Na}^+ / l = \text{lectura} \times \text{disolución} \times 0.1$$

$$C = \text{mg K}^+ / l = \text{lectura} \times \text{disolución} \times 0.1$$

$$\text{Na o K g/kg} = \frac{C \times V}{P}$$

C = mg/l obtenidos para el Na y el K

V= volumen de aforo de la mineralización de la muestra (l)

P= peso de la muestra utilizada en la mineralización (g)

- Índice de germinación (IG)

Para el índice de germinación (IG) se siguió el método de (Zucconi y col, 1985). El cual determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y longitud de las raíces de semillas *Lepidium sativum* L. (berro), incubadas durante 24h a 27°C en un extracto acuoso de compost. Y siempre teniendo una muestra testigo que nos sirve de control. Los resultados se obtienen al multiplicar el porcentaje de germinación (G) por el porcentaje de crecimiento de las raíces (L) y dividido por 100. Quedando esta ecuación:

$$\text{IG} = (\%G) \times (\%L) / 100$$

Donde:

%G: nº de semillas germinadas muestra/nº de semillas germinadas control*100.

%L: longitud suma raíces muestra/longitud suma raíces control*100.

- Capacidad de intercambio catiónico

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

- Sustancias húmicas totales y ácidos fúlvicos.

La determinación de las sustancias húmicas y fúlvicas, mediante la técnica de precipitación con NaOH (Sánchez-Monedero y col., 1996) y posterior medida en un analizador de carbono orgánico total.

Se ha realiza una extracción con NaOH 0.1 M, en proporción 1:20 sólido y líquido. Agitamos durante 4 horas y posteriormente se centrifuga. Se hace la separación sólido líquido mediante una malla de fibra sintética. Los ácidos húmicos precipitan a pH 2 en el extracto hidróxido sódico (Cegarra, 1978), así que se adiciona H₂SO₄ hasta alcanzar el pH deseado y se deja reposar durante 24 horas a una temperatura de 4°C

Los ácidos fúlvicos se separan por decantación. El líquido resultante se pasa a través de una malla de fibra sintética. En los ácidos fúlvicos determinamos el carbono como se hace con el carbono extraíble, sin la adicción de HCl. El carbono de los ácidos húmicos se calcula por la diferencia de carbono extraíble y el carbono de ácidos fúlvicos.

$$\%C_{ex} = \%C_{ah} + \%C_{af}$$



RESULTADOS Y DISCUSIONES



4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. EVOLUCIÓN DE FACTORES ASOCIADOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTAJE

4.1.1. Temperatura

En el proceso de compostaje se pueden observar diferentes fases, que vienen determinadas, entre otros parámetros, por la evolución de la temperatura. La energía liberada por la actividad microbiana durante la biodegradación de materia orgánica hace que aumente la temperatura dentro de la pila, de modo que cuanto más intensa sea su actividad, mayor será el incremento de temperatura en la mezcla.

En el proceso de compostaje diferenciamos varias etapas de temperaturas, una etapa mesófila, una termófila, una etapa de enfriamiento y de maduración. Cada una de estas etapas nos indicará el grado evolutivo de nuestro material compostado. La inadecuada evolución de la temperatura repercutirá en la calidad del compost, además de producirse una mala higienización del producto.

La fase inicial de compostaje se caracteriza por un incremento rápido de la temperatura, el material se encuentra a temperatura ambiente y al realizar la mezcla de materiales y formar la pila de compostaje aumenta rápidamente la temperatura gracias a la actividad microbiológica. Posteriormente la pila pasaría a la etapa termófila, en la que los microorganismos que proliferan son termotolerantes y termófilos, destacamos los actinomicetos (*Thermoactinomyces sp.*), también encontramos *Bacillus spp.* y bacterias, *Thermus* e *Hydrogenobacter*. (Moreno- Casco y Mormeneo 2008). Los microorganismos metabolizan las proteínas y se incrementa la liberación de amoníaco, la temperatura aumenta a medida que los microorganismos procesan la materia, en esta etapa también se produce una alcalinización de la pila, en nuestro caso se observa un aumento del pH. En último lugar se produce la etapa de enfriamiento y maduración, la temperatura desciende y en esta etapa trabajan hongos y actinomicetos capaces de degradar compuestos complejos. Estas bacterias no solo se ocupan de la degradación de la materia orgánica, también participan en la oxidación de hidrógeno, amonio, nitrito, y sulfuros, fijan el nitrógeno, reducen los sulfatos, producen exopolisacáridos y producen nitrito a partir de amonio bajo condiciones heterotróficas (Diaz-Raviña y col., 1989; Beffa y col.,1996).

Cada microorganismo evoluciona a determinada temperatura, entre 15-40 °C para los microorganismos mesófilos y entre 40-70 °C para los termófilos (Suler y col., 1977). Los microorganismos determinan la temperatura de la pila que también se ve influenciada por determinados factores como humedad, aireación, tamaño de la pila (Ekinci y col., 2004).

En la **Figuras 4.1**, se muestra la evolución de la temperatura en la pila elaborada a base de plantones de naranjo, destrío de granada y estiércol de oveja, durante el proceso de compostaje de la mezcla, la temperatura ambiental proporcionada por la propia estación experimental de Elche, así como los días en los que se realizaron los volteos a la pila.

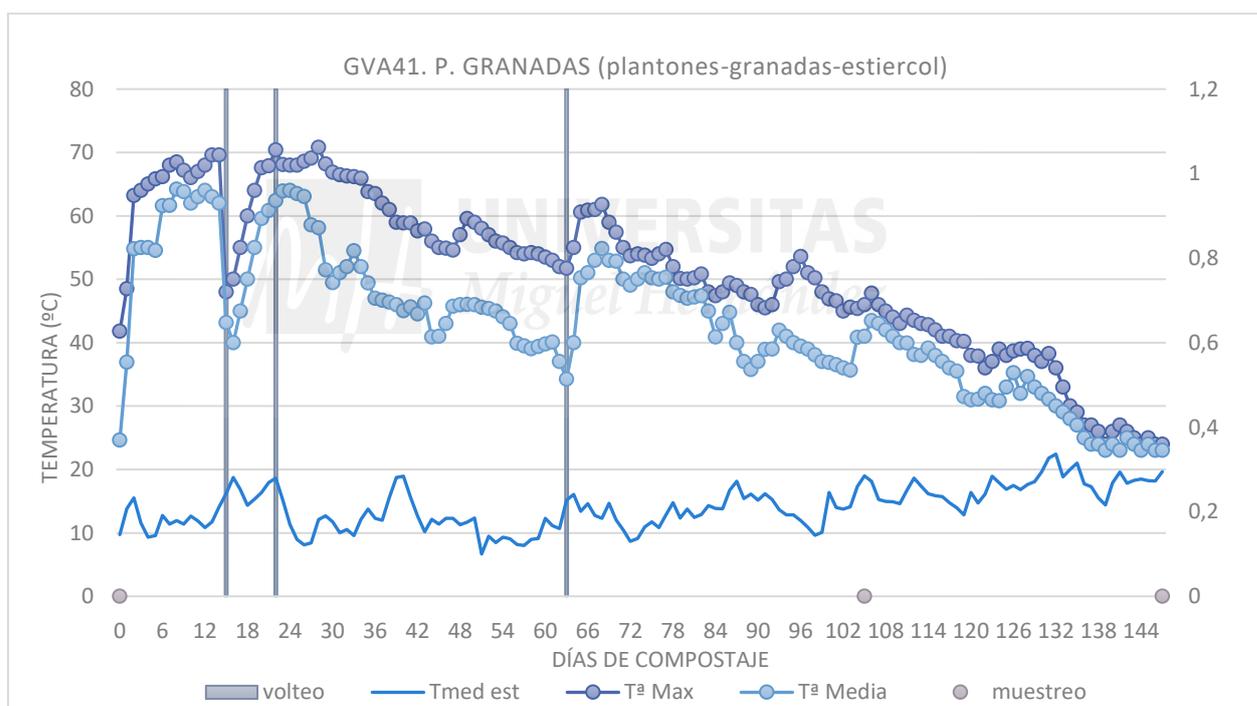


Figura 4.1. Perfil térmico durante el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

En el perfil térmico podemos observar cómo se produce una fase termófila a los pocos días de la elaboración de la pila, alcanzando temperaturas de 70 °C necesarias para la

higienización del producto. En el primer muestreo a los 15 días la temperatura desciende y rápidamente vuelve a subir, sometiendo a los materiales a otro pico de temperatura de 70 °C. El segundo volteo también permitió que se alcanzaran temperaturas de 70 °C. Posteriormente las temperaturas comienzan a descender, aumentando con el siguiente volteo el día 63 a temperaturas cercanas a los 60 °C. Los diferentes volteos realizados sirvieron para homogeneizar la masa, suministrar oxígeno al proceso y reactivar así el proceso microbiano, al disponer de nuevo de compuestos orgánicos fácilmente biodegradables (Stentiford, Mara, y Taylor 1985).

La fase termófila, que corresponde a los días en que la temperatura promedio alcanza valores >40°C, duró 120 días hasta que la temperatura descendió por debajo de 40°C, dando la fase termófila por finalizada, la fase bio-oxidativa se prolongó durante 148 días, momento en el que se observó un progresivo descenso de la temperatura promedio de la pila hacia valores promedios cercanos a la temperatura ambiente, tras lo cual se mantuvo en maduración durante 30 días más.

Tabla 4.1 Parámetros térmicos del proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

<i>Parámetro</i>	<i>Pila</i>
<i>Días fase bio-oxidativa</i>	148
<i>N.º Días F. Bio-oxid/ >40°C</i>	120
<i>N.º Días F. Bio-oxid/ >50°C</i>	85
<i>N.º Días F. Bio-oxid/ >60°C</i>	38
<i>Temperatura máxima pila</i>	70,8
<i>Temperatura promedio pila</i>	47,6
<i>Temperatura mínima pila</i>	23
<i>N.º Días >40°C/ Días fase bioxid.</i>	0,81
<i>Índice EXI² (°C²)</i>	233.232
<i>Ratio EXI²/días f. bio-xid</i>	1.576

En la **tabla 4.1** se muestra el número de días que la pila ha permanecido por encima de 40°C, valor que establece la condición termófila. La evolución térmica acumulada de la

pila expresada, se establece mediante el índice EXI^2 (sumatorio cuadrático de la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente durante la fase bio-oxidativa) nos sirve para obtener un valor absoluto, que incluye la exotermia de la pila. El Índice EXI^2 /días bio-oxidativa nos indica el incremento promedio diario, informándonos de la compostabilidad del material o materiales y del sistema operacional. Los valores obtenidos están relacionados con el origen y composición del material, el cual influirá en la actividad microbiana del compost, repercutiendo en la temperatura de la pila y su valor final EXI^2 /día. En el proceso de compostaje desarrollado, el índice EXI^2 alcanzó un valor de 233.232 ° C² y la ratio EXI^2 / días f. bio-oxid. de 1.576, que se consideran bastante elevados, indicando una alta liberación de calor en los procesos microbianos de degradación de la MO. Los valores de ambos parámetros han sido muy superiores a los obtenidos por Vico y col. (2018) en el proceso de compostaje de lodos de la industria agroalimentaria con restos de palmera y por Pelegrin y col., (2018) en el proceso de compostaje de lodos agroalimentarios y Arundo Donax.

En compostaje se puede ver una evolución ascendente del EXI^2 acumulado, siendo más pronunciada en los primeros días del proceso ya que se libera más energía en forma de calor y manteniéndose estable hacia el final del proceso debido a que disminuye la actividad microbiana, produciéndose menos liberación de calor.

El control de las temperaturas durante el proceso nos permite evaluar la **higienización** del producto final. Existen diversas normativas para evaluar la higienización. Los criterios de dos de ellas se indican a continuación:

- Según el *“Study report on End-of-waste criteria for Biodegradable waste subjected to biological treatment. Draft Final Report, July 2013”* el productor del compost debe demostrar que cada proceso de compostaje ha alcanzado un perfil temperatura-tiempo adecuado.
- ✓ que no incluyan residuos o subproductos ganaderos:
 - 65°C o más al menos 5 días
 - 60°C o más al menos 7 días
 - 55°C o más al menos 15 días

- ✓ En compostajes que incluyen residuos y subproductos animales deben cumplir requisitos adicionales de cara a la prevención de otros riesgos, en general al menos 70°C al menos una hora.
- Según el Reglamento (UE), 2019/1009 para la correcta higienización de los compost deben cumplirse los requisitos de la **tabla 4.3**, y los días en que el proceso ha estado a temperaturas por encima de las especificadas por dicho reglamento.

Tabla 4.2. Temperatura de higienización del Reglamento 2019/1009 Fertilizantes UE y obtenidos en el proceso.

Temperatura	Días min. Exigidos Reglamento (UE), 2019/1009
>70°C	3
>65°C	5
>60°C	7
>55°C	14

En la **tabla 4.3**. se muestran el cumplimiento de los requisitos de higienización del compost elaborado según el criterio *“Study report on End-of-waste criteria for Biodegradable waste subjected to biological treatment. Draft Final Report, July 2013”* por lo que podemos considerar que ha sufrido una correcta higienización.

Tabla 4.3. Evaluación de los criterios de higienización en el proceso de compostaje desarrollado.

Temperatura	<i>Study report on End-of-waste</i>	Reglamento (UE), 2019/1009	Días compostaje	Cumplimiento de los requisitos en el compost elaborado
>70°C	1 hora	3 días	2 días	S.R.E.
>65°C	5 días	5 días	26 días	Si, ambos
>60°C	7 días	7 días	38 días	Si, ambos
>55°C	15 días	14 días	58 días	Si, ambos

4.2. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE: pH, conductividad eléctrica y polifenoles

4.2.1. El pH

El pH está relacionado directamente con los procesos microbianos de la pila de compostaje. Durante el proceso de compostaje podemos detectar tres fases en evolución del pH. En la fase inicial que correspondería a la fase mesófila hay un descenso del pH, provocado por los microorganismos al descomponer la materia orgánica, en esta fase hay una liberación de ácidos orgánicos. En la segunda fase se produce la alcalinización de la pila, se produce por la pérdida de ácidos orgánicos y hay una liberación amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas, aminoácido y péptidos (Sánchez-Monedero, 2001). Por último, el pH tiende a la neutralidad por la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón.

Si durante el proceso se detectan pH ácidos podemos concluir que se están produciendo condiciones anaeróbicas en la pila (Bueno y col 2008)

Cuando una pila se composta en condiciones adecuadas de aireación, el pH en el compost final se establece en unos intervalos de pH entre 7 y 8, según (Suler y Finstein, 1977), también dedujeron que la degradación orgánica se inhibe a pH bajos, así que pH

por encima de 7,5 durante el proceso de compostaje podemos deducir que se está efectuando una buena descomposición de la materia orgánica.

El valor inicial del pH en la mezcla de residuos a compostar (pH=6,2) estuvo dentro del intervalo de valores de pH adecuado (pH = 6 – 9) para el desarrollo de las bacterias y hongos que degradan la materia orgánica durante el proceso de compostaje (Moreno-Casco y Mormeneo, 2008) (**tabla 4.4**).

Tabla 4.4. Evolución del pH en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

<i>Fases de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	pH
<i>Inicio</i>	1	6,2
<i>Termófila</i>	105	8,9
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	8,5
<i>Madurez</i>	178	8,8

Durante la fase termófila y bio-oxidativa el pH asciende hasta 8,9 y 8,5 respectivamente, la pila se alcaliniza posiblemente por la liberación de amoníaco, finalmente en la etapa de madurez el pH se mantiene en el rango alcalino (pH=8,8). El pH en el compost maduro se sitúa por encima del rango adecuado para su uso agrícola (6,0 – 8,5) (Hogg y col., 2002), por lo que se recomienda su uso como enmienda orgánica, pero no para sustrato.

4.2.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de un compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Sánchez-Monedero, 2001). La CE tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de sales y compuestos inorgánicos (Sáez y col.,

2017). Aunque la concentración de sales puede disminuir durante el proceso de compostaje por los riegos que se efectúan durante todo el proceso. Los riegos lavan la materia orgánica y se producen pérdidas por lixiviación. Si los lixiviados son reutilizados para humedecer la pila, se puede producir un exceso de sales en el producto final. En nuestra pila se realizan los riegos con una manguera de forma manual y sin el posterior uso de los lixiviados ya que nuestro montaje se realiza sobre suelo compacto.

Normalmente la conductividad eléctrica está condicionada por los materiales de los que se parten desde el inicio. El uso de compost con conductividad eléctrica alta puede ocasionar concentraciones de sales en el suelo y afectar a las propiedades físicas, deteriorando la estructura. (Masaguer y Benito, 2008).

Tabla 4.5. Evolución de la conductividad eléctrica en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 %vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	CE (dS/m)
<i>Inicio</i>	1	3,97
<i>Termófila</i>	105	3,18
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	3,50
<i>Madurez</i>	178	2,67

Nuestra mezcla inicial presenta una conductividad eléctrica de 3,97 dS/m, en los muestreos posteriores vemos como la conductividad eléctrica va descendiendo hasta situarse en 2,67 dS/m en el compost maduro. El resultado obtenido muestra niveles bajos en sales y dando un resultado óptimo para su uso, dentro de los límites establecidos (2-4 dS/m) como favorables para la aplicación en suelo. Según Lasardi y col. (2006), el valor de conductividad eléctrica que un compost debe tener para no provocar efectos adversos no ha de superar los 3 mS/cm.

4.2.3. Contenido de polifenoles

Los polifenoles se encuentran prácticamente en todos los materiales vegetales, se componen básicamente de ácido fenólicos que incluyen benzoato y derivados hidroxycinamato y flavonoides (Guendez y col., 2005). Los compuestos fenólicos merecen especial atención debido a su repercusión sobre la inhibición de la germinación de semillas (Manios y col. 1987), sobre la inmovilización del nitrógeno del suelo (Bustamante et al., 2007) y por su efecto antimicrobiano (Scalbert, 1991) que puede inhibir y limitar el proceso de compostaje. La evolución de los polifenoles solubles durante el proceso de compostaje es un parámetro a tener en cuenta en su uso agrícola, ya que debido a su efecto antimicrobiano puede inhibir la actividad de los microorganismos y ralentizar el proceso o incluso pararlo. Durante el compostaje el contenido de polifenoles solubles suele disminuir hasta valores en torno a 1000 mg/Kg.

El rango ideal que debe contener una mezcla debe ser inferior a 4000 mg/kg de materia seca, expresado en polifenoles hidrosolubles. En una pila de compostaje con niveles altos en polifenoles la temperatura de esta no llega a alcanzar niveles altos debido a la inhibición de la actividad microbiana, si observamos la gráfica de temperaturas en nuestra pila de compostaje vemos que alcanza niveles óptimos de temperatura, pudiéndose deducir que el alto contenido en polifenoles que mostraron los materiales iniciales (**tabla 3.1**), no ha sido un factor limitante en el desarrollo de nuestro caso. El contenido de polifenoles en el compost final ha sido de 1.379 mg/kg.

4.3. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA

4.3.1. Materia orgánica

En el proceso de compostaje la materia orgánica desciende debido a la mineralización y por la pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico (Zucconi y col.,1987). La pérdida de materia orgánica depende de los componentes de la mezcla inicial y su nivel de biodegradabilidad. La biodegradabilidad indica la cantidad de materia orgánica que puede descomponerse, o que se ha descompuesto de la mezcla inicial (Tchobanoglous y col., 1994).

El contenido final de materia orgánica (MO) en el compost dependerá del valor inicial, de su degradabilidad y de la transformación que hayan sufrido sus componentes durante el proceso. Es un parámetro importante porque en el caso de aplicarse al suelo incide de forma global en todas sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) y en caso de utilizarse como sustrato la MO incidirá sobre sus propiedades físicas, siendo indispensable además conocer su estabilidad. Pérdidas considerables de MO durante la fase de bio-oxidación indica la estabilidad relativa alcanzada por los productos después de esta etapa.

El contenido en materia orgánica de un compost es fundamental ya que se considera unos de los principales factores para determinar la calidad agronómica.

Tabla 4.6. Evolución de la materia orgánica durante el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1% vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	MO (%)
<i>Inicio</i>	1	60,6
<i>Termófila</i>	105	40,2
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	34,4
<i>Madurez</i>	178	33,4

El porcentaje en materia orgánica disminuye a lo largo del proceso. En la mezcla inicial el contenido de MO es de 60,6 %, disminuyendo a lo largo del proceso como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos. La mayor pérdida en materia orgánica se produce en la fase bio-oxidativa del compostaje, permaneciendo casi constante en la fase de madurez del compost. Los niveles de materia orgánica en el compost final (33,4%) no cumple con el límite de materia orgánica establecido en el RD 506/2013 para compost (MO > 35%). El contenido de MO en el compost final es comparable a los obtenidos para compost en plantas de compostaje industriales en España (Huerta-Pujol y col, 2011) y en compost de restos de poda urbana (López y col. 2014). También comparables con los contenidos de MO

obtenidos por Bustamante y col. (2013) en compost utilizando la fracción sólida del digerido de purín porcino con diferentes agentes estructurantes.

4.3.2. Pérdida de materia orgánica

La materia orgánica se transforma durante el proceso de compostaje, los microorganismos utilizan la materia orgánica como nutriente para su desarrollo y la transforman en moléculas orgánicas o inorgánicas más sencillas. Este proceso produce calor, CO₂, H₂O y humus que se caracteriza por su resistencia a posteriores procesos de descomposición.

Las pérdidas de materia orgánica (MO) reflejan la evolución sufrida por la mezcla de residuos estudiada. Estas se calcularon a partir del contenido de cenizas inicial (X₁) y en el punto de estudio (X_n), de acuerdo con la ecuación de (Viel y col. 1987):

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

Con esta ecuación determinamos el porcentaje de materia orgánica perdida con respecto a la cantidad inicial, consideramos que el contenido en cenizas a lo largo del proceso es constante, y así evitamos la concentración debidas a la pérdida de peso de la pila a lo largo del proceso.

La evolución de la pérdida de materia orgánica en el proceso de compostaje de la mezcla de destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja se muestra en la **tabla 4.7**.

Al final de proceso, se alcanzaron pérdidas de MO del 67 %. Pérdidas considerables de MO durante la fase de bio-oxidativa indica la estabilidad relativa alcanzada por los productos después de la etapa de bio-oxidativa. Esto puede ser utilizado como un indicador de la tasa de compostaje (Petric y col, 2012).

Tabla 4.7. Evolución de la pérdida de materia orgánica en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:6,5:5,4%vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	Perdida de MO%
<i>Inicio</i>	1	0
<i>Termófila</i>	105	56,4
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	66,0
<i>Madurez</i>	178	67,4

4.3.3 Carbono orgánico total

El carbono orgánico total nos indica el contenido en materia orgánica de la mezcla. El contenido de carbono orgánico disminuye a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

Los valores de carbono orgánico total (COT) obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en **tabla 4.8**. El tiempo de compostaje ha influido de forma significativa en el contenido de COT que ha disminuido a lo largo del proceso como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

El mayor descenso de CT se aprecia en la fase bio-oxidativa, debido a la mayor la actividad microbiana en esta etapa. El valor de COT en el compost final es de 21,4 %.

Tabla 4.8. Evolución del carbono orgánico total en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 %vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	COT (%)
<i>Inicio</i>	1	36,8
<i>Termófila</i>	105	29,1
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	26,3
<i>Madurez</i>	178	21,4

4.3.4 Nitrógeno total

El contenido de nitrógeno de una enmienda orgánica es muy importante ya que es un elemento fundamental para el desarrollo de la planta. Debemos tener en cuenta el contenido en nitrógeno del compost para su correcta aplicación en campo evitando excesos que podría ocasionar un impacto ambiental. El nitrógeno se pierde cuando lo encontramos en exceso por lixiviación o de forma gaseosa disipándose en la atmosfera.

A medida que el proceso de compostaje evoluciona, la concentración de nitrógeno aumenta, esto es debido a la disminución de masa que se produce en la pila además de la posible fijación biológica de nitrógeno (Paredes y col., 2002), aunque también se puede producir pérdidas por lixiviación o a la atmosfera por volatilización en forma de amonio.

Los valores de nitrógeno total (NT) obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en **tabla 4.9.**

Tabla 4.9. Evolución del nitrógeno total en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	NT (%)
<i>Inicio</i>	1	1,20
<i>Termófila</i>	105	1,67
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	1,55
<i>Madurez</i>	178	1,32

El contenido en nitrógeno total aumenta durante la fase termófila y aunque disminuye hasta el final del proceso, el contenido final es superior al inicial, mostrando el compost final un contenido del 1,32 %. Se consigue con el compostaje aumentar el contenido de nitrógeno de la mezcla, pudiendo ser utilizado para aportar al suelo un nutriente esencial para el desarrollo vegetal. El contenido de NT en este compost es inferior al reportado por (Vico y col., 2018).

4.3.5 Relación C/N

La relación inicial de C/N de la mezcla es muy importante para que el proceso se realice correctamente, el carbono es la fuente primaria de energía y el nitrógeno es necesario para el desarrollo de la población microbiana. Los microorganismos utilizan una relación de 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno, por este motivo una relación adecuada de C/N, al inicio del proceso de compostaje, estaría en valores cercanos a 25-35 (Jhorar y col, 1991). Relaciones bajas de C/N pueden provocar la pérdida de amoníaco (NH_3) y relaciones altas puede ocasionar lentos procesos de descomposición.

En el proceso de compostaje el carbono va disminuyendo debido a la mineralización de la materia orgánica mientras que la concentración de nitrógeno aumenta debido a la pérdida de peso de la pila (Bustamante y col. 2008), lo que hace que los valores de la relación entre ambos elementos tienda a disminuir.

La relación de carbono y nitrógeno, nos indica el contenido en materia orgánica del compost, este índice también nos indica la madurez y la estabilidad de la materia orgánica, por este motivo es igualmente importante el valor final de la relación C/N para evaluar la calidad del producto. Una relación entre 15 y 20 en el compost final es casi siempre una relación deseada (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1991), aunque Morel y col. (1985) indica que un seguimiento durante el proceso es un criterio concluyente. En la legislación española se sugiere valores de dicha relación inferiores a 20 en los compost (RD 999/2017).

Los valores de relación de carbono y nitrógeno obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en **tabla 4.10**.

Tabla 4.10. Evolución de la Relación de C/N en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	<i>Tiempo de compostaje</i>	<i>TOC/TN</i>
<i>Inicio</i>	1	30,7
<i>Termófila</i>	105	17,7
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	17,0
<i>Madurez</i>	178	16,4

La relación C/N inicial de nuestra mezcla (C/N= 30,7) parte de valores establecidos como idóneos para el proceso de compostaje, en fase termófila se produce el mayor descenso de esta relación, terminando el proceso de madurez con valores en C/N de 16,4, lo cual sugiere que los materiales de la pila han sufrido un buen grado de maduración. EL valor final de relación C/N en el compost de 16,4 está dentro de los valores establecidos como correctos para un compost maduro y además cumple con los requisitos que marca la legislación que sugiere valores de dicha relación inferiores a 20 en los compost, (RD 999/2017).

4.3.6 Contenido en fósforo, potasio y sodio

El contenido de estos elementos aumenta en el proceso de compostaje, como le sucede al nitrógeno, a medida que se reduce el volumen de la pila la concentración de P, K y Na aumenta.

El fósforo es un elemento esencial para el desarrollo de los organismos del proceso de compostaje. Al final del proceso de compostaje es importante valorar el contenido en fósforo y potasio ya que son elementos fundamentales para el desarrollo de la planta.

En cambio, la presencia de concentraciones altas de sodio en el compost final no es deseable por su no esencialidad para la planta, además de los efectos negativos que produce en las propiedades físicas del suelo.

Tabla 4.11. Evolución de contenido de fósforo, potasio y sodio en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

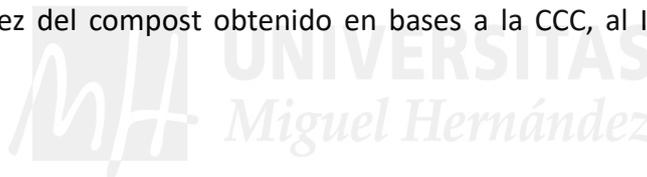
<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	P (g/kg)	K (g/kg)	Na (g/kg)
<i>Inicio</i>	1	2,50	21,3	4,50
<i>Termófila</i>	105	3,82	25,2	6,79
<i>Final f. bio-oxidativa</i>	147	4,20	28,4	8,03
<i>Madurez</i>	178	3,24	24,2	6,79

Los contenidos de fósforo, potasio y sodio evolucionan de forma similar aumentando a medida que la pila reduce su volumen durante la fase bio-oxidativa y disminuyendo al final durante la maduración del compost. Los contenidos de estos elementos no fueron muy elevados debido a la baja proporción del estiércol de oveja en la mezcla que fue el material inicial que más aportaba.

4.4 PARÁMETROS INDICATIVOS DE LA MADUREZ DEL COMPOST

Los compost preparados a partir de diferentes residuos orgánicos difieren en su calidad y madurez, que a su vez depende de los materiales de partida y de las condiciones en que se ha desarrollado el proceso. La amplia variedad de procesos químicos y biológicos que ocurren durante el proceso y la variada gama de métodos sugeridos en la literatura para la evaluación práctica de la madurez hace difícil llegar a un acuerdo.

Existen diversos parámetros utilizados para evaluar la madurez del compost, tales como: relación carbono-nitrógeno (C/N), actividad microbiana, índice de germinación (IG), capacidad de cambio catiónico (CCC), contenido de sustancias húmicas, concentración de carbono hidrosoluble (WSC), materia orgánica disuelta, proporciones de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y $\text{NO}_3^-\text{-N}$, WSC / TN y $\text{WSC} / \text{organic-N}$ (Azim et al.2017). También existen una serie de parámetros que han sido recientemente desarrollados para describir mejor el nivel de biodegradabilidad. Ningún parámetro es ampliamente aceptado como indicador único de la madurez sino más bien se necesita una combinación de ellos. A continuación se analiza la madurez del compost obtenido en bases a la CCC, al IG y a las sustancias húmicas.



4.4.1 Capacidad de cambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico está relacionada con el grado de humificación del compost, el aumento de CCC durante el proceso de compostaje es considerado como criterio de madurez del compost e indirectamente como criterio de humificación (Roig y col., 1988). Este parámetro muestra la evolución de la humificación debido a la formación de grupos carboxilo e hidroxifenilos (Bustamante y col., 2008). Según Iglesias-Jiménez y Pérez García (1992c) la capacidad de intercambio catiónico para un compost maduro se establece los valores mínimos en 67 meq/100g MOT, mientras que Harada e Ikono (1980a) establece los valores mínimos en 60 meq/100g MOT.

Por tanto, deducimos que nuestro compost se encuentra en un estado maduro y humificado por los resultados obtenidos en la CCC (**tabla 4.12**), encontrándose nuestro valor por encima. Después de 148 días en fase bio-oxidativa y posteriormente 30 días en proceso de maduración los resultados de la CCC son de 142 meq/100g MOT.

Tabla 4.12. Evolución de la capacidad de cambio catiónico en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	CCC (meq/100g MOT)	CCC (meq/g COT)
<i>Inicio</i>	1	60,1	1,06
<i>Madurez</i>	178	142	1,35

CCC: capacidad de cambio catiónico.

Aunque cabe destacar que algunos residuos agroindustriales pueden dar en su estado inicial o inmaduro valores por encima de los 100 meq/100g MOT, por este motivo se establece un valor alternativo para asegurarnos de la madurez de compost, según Roig y col. (1988) proponen como índice la capacidad de cambio catiónico por unidad de carbono (CCC/COT), Iglesias -Jiménez y Pérez-García (1992a) establecen valores por encima de 1,9 y García y col. (1992) valores por encima de 3,5.

Según los valores anteriores y los obtenidos en nuestra pila de compostaje quedaría por debajo de los valores recomendables para un compost maduro, ya que los resultados son de CCC/COT estarían en 1,35 meq/g Cot.

4.4.2 Índice de germinación

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

este método podemos saber si el compost presenta compuestos fitotóxicos (fenoles, ácidos grasos, amoníaco etc.) que resultan de los procesos de mineralización de la materia orgánica y que podrían causar problemas en la germinación de semillas.

Tras el ensayo los resultados obtenidos en el índice de germinación fueron superiores al 50% (**tabla 4.13**), por lo que podemos determinar que el compost no producirá efectos negativos en la planta y podría ser utilizado como enmienda orgánica al no producir fitotoxicidad.

Tabla 4.13. Índice de germinación en el compost final obtenido en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

<i>Fase de compostaje</i>	Tiempo de compostaje	Índice de germinación (%)
<i>Madurez</i>	178	87,2



4.4.3 Índices de humificación

La evaluación del grado de humificación de la materia orgánica durante el compostaje es un criterio agronómico de calidad de compost, porque la fracción humificada de la materia orgánica del suelo tiene un papel esencial en la fertilidad orgánica. El valor agrícola de un compost se incrementa cuando la MO presenta un nivel alto de humificación (Bernal y col., 2009). La humificación de la materia orgánica durante el proceso de compostaje supone la formación compuestos de peso molecular creciente con características aromáticas, concentraciones de oxígeno y nitrógeno y grupos funcionales, similares a las sustancias húmicas del suelo (Senesi 1989).

Los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los composts, a partir de los porcentajes de carbono extraíble (C_{ex}), carbono de ácidos húmicos (C_{ah}) y de ácidos fúlvicos (C_{af}), son los siguientes:

- Relación de humificación (RH): $C_{ex}/C_{OT} \times 100$
- Índice de humificación (IH): $C_{ah}/C_{OT} \times 100$
- Porcentaje de ácidos húmicos (Pah) $C_{ah}/C_{ex} \times 100$
- Relación de polimerización (RP): C_{ah}/C_{af}

El incremento de estos parámetros durante el compostaje es indicativo de la humificación de la materia orgánica. Roletto et al. (1985) usan estos parámetros para establecer el nivel de humificación de la materia orgánica en diferentes compost de diferentes orígenes. En la **tabla 4.14** se resumen diferentes índices utilizados para evaluar los compost y en la **tabla 4.15** se muestran los resultados de dichos índices para el compost obtenido.

Tabla 4.14. Índices de madurez y humificación de compost maduro.

Parámetro	Valor límite	Fuente
Carbono extraíble, Cex (g/kg)	<60	Bernal et al (1998)
Relación de humificación, RH (%), $C_{ex}/C_{OT} \times 100$	> 7	Roletto y col. (1985) BioCycle, 26 (2), 46-47.
Índice de humificación, IH (%), $C_{ah}/C_{OT} \times 100$	> 3,5	Roletto y col. (1985) BioCycle, 26 (2), 46-47.
	> 13	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.
Porcentaje de ácidos húmicos, Pah (%), $C_{ah}/C_{ex} \times 100$	> 62	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.
Relación de polimerización, RP (%), ah/C_{af} ,	> 1	Roletto y col. (1985) BioCycle, 26 (2), 46-47.
	> 1,6	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.

Tabla 4.15. Resultados de los índices de madurez y humificación de compost obtenido en el proceso de compostaje de la mezcla: destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.).

Parámetro	Valor
<i>Carbono extraíble (%)</i>	6,77
<i>Carbono de ácidos fúlvicos (%)</i>	2,03
<i>Carbono de ácidos húmicos (%)</i>	4,74
<i>Relación de humificación (RH)</i>	31,5
<i>Índice de humificación (IH)</i>	22,8
<i>Porcentaje de ácidos húmicos (PAH)</i>	70
<i>Relación de polimerización (PI)</i>	2,34

La concentración de sustancias húmicas fue de 6,77% s.m.s., siendo mayor la concentración de ácido húmicos frente a los ácidos fúlvicos. Los valores de los índices de humificación han sido mayores que los propuestos en la tabla, por lo tanto, podemos decir que nos encontramos ante un compost maduro y humificado.

4.5. DOSIFICACIÓN Y VALOR ECONÓMICO DEL COMPOST

4.5.1. Dosificación del compost

Teniendo en cuenta la humedad del compost (36,1 %) y su contenido en NT (1,32 %) podemos calcular los kg N/ha año mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} X \text{ kilos compost} \times (100 - \text{humedad } \%) / 100 \times \text{Nitrógeno Total } \% / 100 \\ = \text{kg N/ha año} \end{aligned}$$

A modo de ejemplo, aplicando dicha fórmula podemos establecer según los kilos de compost aportado la cantidad de N/ha año aplicada, como se muestra a continuación:

$$1.000 \times \frac{(100 - 36,1)}{100} \times \frac{1,32}{100} = 8.43 \text{ kg N/ha año}$$

- 3.000 kilos compost/ha: 25,3 kg N/ha año
- 5.000 kilos compost/ha: 42,2 kg N/ha año
- 8.000 kilos compost/ha: 67,5 kg N/ha año

El límite de kilos que se podrían aplicar con este tipo de fertilizante compost para alcanzar los 170 kg N /ha año sería de 20.155 kg de compost:

$$\frac{170}{\left(\frac{(100 - 36,1)}{100}\right) \times \left(\frac{1,32}{100}\right)} = 20.155 \text{ kg compost}$$

Tabla 4.16 Necesidades de nitrógeno en Kg/ha año. Tabla realizada a partir de los datos recogidos en la guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Cultivo	Necesidades de N Kg/ha al año	Aportación de compost (t)
Almendrao seco	55	6,5
Olivo regadío	80	9,48
Olivo seco	45	5,33
Vinao seco	30	3,55
Melocotonero regadío	85	10,1
Manzano regadío	80	9,48

4.5.2. Estimación del valor económico del compost

El valor económico del compost ha sido calculado de acuerdo con la metodología descrita por Jara-Samaniego y col. (2017), considerando el valor medio de mercado de los fertilizantes durante el periodo (noviembre 2018-octubre 2019) proporcionado por el Banco Mundial, para la urea, el fosfato diamónico (DAP) y el cloruro de potasio (228,5, 295,4 y 220,0 €/t, respectivamente). El % de unidades fertilizantes en la urea, DAP y cloruro potásico es de 46%, 46% y 60 %, respectivamente. Teniendo en cuenta estos valores, las unidades de fertilizantes N, P₂O₅ y K₂O podrían promediarse en 4,97, 14,7 y 4,40 €/t, respectivamente. El valor comercial equivalente final se calculó considerando un contenido promedio de agua del 25% en el compost comercial.

En la **tabla 4.16**, se presenta el valor económico estimado considerando el contenido nutriente NPK (€/t, expresado como N, P₂O₅ y K₂O).

El compost presentó un valor de NT de 4,92 €/t y de fósforo de 8,18 €/t ambos fueron inferiores al obtenido por Pelegrin y col., (2018) en compost a base de *Arundo Donax* y lodos de diversos orígenes (urbano y agroalimentario), en cambio para potasio los valores de 9.58 €/t que presento nuestro compost fueron superiores.

Tabla 4.16. Valor económico estimado considerando el contenido nutriente NPK (€/t, expresado como N, P₂O₅ y K₂O).

Nutriente	Valor (€/t)
Nitrógeno total (NT)	4,92
Fósforo (P₂O₅)	8,18
Potasio (K₂O)	9,58
Valor total NPK	22,68
*El valor de la concentración de nutriente ha sido determinado considerando un 25% de humedad en el compost	

CONCLUSIONES



5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos han permitido debatir sobre el desarrollo térmico del proceso, sobre la consecución de la higienización del compost y sobre la calidad agronómica del compost final obtenido.

- La mezcla testada de destrío de granada-plantón de naranjo-estiércol de oveja (63,3:31,6:5,1 % vol.) mostro unas características adecuadas para el compostaje, consiguiendo un rápido desarrollo de la temperatura, así como el incremento necesario de esta para asegurar la **higienización** del compost final.
- La **exotermia** del proceso evaluada a través del índice exotérmico EXI^2 (sumatorio del incremento diario de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiente durante el periodo de fase bio-oxidativa) y $EXI^2/días$ f. bio-oxid. indica una intensa actividad biodegradativa de la materia orgánica.
- El elevado valor de **pH** limita el uso del compost en sistemas de cultivo en contenedor y en etapas tempranas del cultivo, sugiriéndose su uso como enmendante. Respecto a la conductividad eléctrica el compost presentó valores adecuados para su uso agrícola.
- Los procesos de **estabilización y humificación** de la materia orgánica se desarrollaron de forma adecuada como queda demostrado por la evolución de la relación C/N, de la capacidad de cambio de cationes, por las concentraciones de ácidos húmicos y fúlvicos y los índices de humificación.
- El contenido de NPK se incrementó durante el proceso de compostaje. El compost maduro mostró una **riqueza fertilizante NPK** con valores de unidades fertilizantes (N-P₂O₅-K₂O) de 1,32-0,74-2,92 respetivamente, destacando su contenido en potasio.
- El **valor económico** estimado considerando el contenido nutriente NPK (€/t, expresado como N, P₂O₅ y K₂O) es de 22,68 €/t.
- Además, el compost no presenta **fitotoxicidad** según se deduce de los valores de índice de germinación (IG) obtenido, empleando berro (*Lepidium sativum*).

Como conclusión final, la adecuada gestión y tratamiento de los residuos hortícolas generados en las instalaciones de Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias de Elche (IVIA) mediante compostaje, permite convertirlos en un recurso para aplicar como enmendante en los suelos de la finca, contribuyendo así al ahorro en materias primas fertilizantes, a la conservación de los recursos naturales y, en definitiva, a una mayor sostenibilidad del centro.



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

- Abrisqueta, C., & Romero, M. (1969). Digestión húmeda rápida de suelos y materiales orgánicos. *Anales de edafología y agronomía.*, 27:855-867.
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C. R., & Thami Alami, I. (2018). Composting parameters and compost quality: a literatura review. *Organic. Agriculture*, 8:141-158.
- Banco Mundial. (s.f.). Obtenido de <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=12&moneda=eur&mercancia=cloruro-de-potasio> (Consultado en diciembre de 2019)
- Beffa, T., Blanc, M., Lyon, P., Vogt, G., Marchiani, M., Fischer, J., & Aragno, G. (1996). Isolation of thermus strais from hot compost (60 to 80 °C). *Appl. Environ. Microbial*, 62 (5): 1723-1727.
- Bernal, M., Albuquerque, J., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* , 100,5444-5453, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>.
- Bernal, M., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresour. Thecnol*, 63:91-99.
- Bertoldi, M., Vallini, G., & Pera, A. (1983). The biology of composting. *Waste Manag.Res*, 1,157-176.
- Bueno, P., Díaz, M., & Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. En J. Moreno Casco, & R. Moral Herrera, *Compostaje* (págs. 95-109). Mundi- Prensa.
- Bustamante, M. (2013). Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Journal of Cleaner Production*, 47, 61-69, <https://doi/10.1016/j.jclepro.2012.018>.
- Bustamante, M., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M., & Moral, R. (2008). Co-composting distillery wastes with animal manure: carbon

- and nitrogen transformations and evaluations of compost stability. *Chemosphere*, 72:551-557.
- Bustamante, M., Paredes, C., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Murcia, M., Pérez-Espinosa, A., & Bernal, M. (2007). Co-composting of distillery and winery wastes with sewage sludge. *Water Sci. Technol*, 56(2), 187-192.
- Castaldi, P., Alberti, G., Merella, R., & Melis, P. (2005). Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Manag*, 25:209-213.
- Cegarra, J. (1978). Fraccionamiento de fertilizantes orgánicos y de sus productos de humificación. Tesis Doctoral. CEBAS-CSIC. Murcia.
- Comisión Europea. (18 de diciembre de 2014). Obtenido de Boletín oficial del estado: <https://www.boe.es/doue/2014/370/L00044-00086.pdf> (Consultado en septiembre 2019)
- Cornell University. (s.f.). Recuperado el 10 de mayo de 2019, de <http://www.cwmi.css.cornell.edu/>
- Costa, F., García, C., Hernández, T., & Polo, A. (1991). Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Consejo superior de investigaciones científicas. Murcia: Centro de edafología y Biología Aplicada del Segura.
- Díaz, L., Savage, G., Gouloque, C., & Alter, H. (1984). Critical review of energy recovery from solid wastes. 251-295.
- Díaz-Raviña, M., Acea, M., & Caballón, T. (1989). Microbiological characterization of four composted urban wastes. *Microbiological Wastes*, 30(2):89-100.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y de Consejo. (19 de noviembre de 2008). Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2008/312/L00003-00030.pdf> (Consultado en diciembre 2019)
- EcuRed Enciclopedia cubana. (20 de noviembre de 2019). Obtenido de https://www.ecured.cu/Residuo_agr%C3%ADcola#Quema_de_Residuos_Agr.C3.ADcolas

- Ekinci, K., Keener, H., & Elwell, D. (2004). Effects of aeration strategies on the composting process: Part I. . Experimental studies. *Trans. ASAE*, 47(5):1697-1708.
- European Commission. The soilonmental quality of natural resource. ENV. B1. Water, the protection communication. DG ENV. Draft october 2001. Directorate B. Environmental quality of natural resource. ENV. B1. Water, the Marine and Soil.
- García Morales, J. L., & Moral Herrero, R. (2015). De Residuo a recurso. El camino de la sostenibilidad. I Recursos orgánicos. 3 Residuos agroalimentarios. Madrid: Mundi-Prensa.
- García, C., Hernández, T., Costa, F., & Ayuso, M. (1992). Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Comun. Soil Sci. Plant Anal.* 23:1501-1512.
- Guendez, R., Kallithraka, S., Makris, D., & Kefalas, P. (2005). Determination of low molecular weight polyphenolic constituents in grape (*Vitis vinifera* sp.) seed extracts: correlation with antiradical activity. *Food Chem.* 89:1-9.
- Harada, Y., & Inoko, A. (1980a). Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city of city refuse compost. *Soil Sci. Plant Nutr.* 26:353-362.
- Hogg, D., Barth, J., Favoino, E., Centemero, M., Caimi, V., Amlinger, F., Antler, S. (2002). Comparison of compost standards within the EU, North American, and Australasia: Main report. Banbury, Uk: Waste and Resources Action Programme.
- Hogg, D., Favoino, E., Centemero, M., Caimi, V., Amlinger, F., Deuliegheer, W., Antler, S. (2002). Comparison of compost standards whith the Eu North American and Australian. The waste and Resource Action Programme (WRAP), Oxon.
- Huerta, O., Gallart, M., soliva, M., Martínez, & López, M. (2011). Effect of collection system on mineral content of biowaste. . *Resour Conserv Recycl*, 55:1095-1099. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.008>.

- Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity. A review. *Biol. Wastes*.
- Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1991). Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-Exchange capacity. *Resour. Conserv. Recycl*, 6: 45-60.
- Iglesias jiménez, E., & Pérez García, V. (1992b). Composting of domestic refuse and sewage sludgge. II. Evolution of carbon and some " Humication" indexes. *Resour. Conserv. Recycl*. 6:243-257.
- Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1992c). Determination of maturity indices for city refuse compost. *Agric. Ecosystems Environ*, 38:331-343.
- Iglesias Jiménez, E., Barral Silva, M., & Marhuenda Egea, F. (2008). Indicadores de la estabilidad de un compost. En J. Moreno Casco, & R. Moral Herrera, *Compostaje* (págs. 245-283). Mundi-Prensa.
- Instituto nacional de estadística. (29 de Noviembre de 2018). INE. Obtenido de https://www.ine.es/prensa/cma_2016_res.pdf (Consultado en noviembre 2019)
- IPCC. (2019). Special Report. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/SRCCL-leaflet.pdf> (Consultado en noviembre 2019)
- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M., Bustamante, M., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López-Lluch, D., Moral, R. (2017). Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: suitability of the obtained compost for seedling production. *J. Clean. Prod.* 141.1349-1358.
- Jeris, J. S., & REgan, R. W. (1973). Controlling Environmental Parameters for Optimun Composting. *.Compost Sci.* , 8-15.
- Jhorar, B., Phogat, V., & Malik, E. (1991). Kinetics of compostig rice straw whith glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil*, 5:297-306.

- Klitsch, R., & Mellon, M. (1944). Colorimetric determination of P as a molybdovanadato phosphoric acid. *Journal of industrial and Engineering Chemistry (Analytical Section)*, 16:379-383.
- Labrador, J., Guiberteau, A., López, L., & Reyes, J. (s.f.). Ministerio de Agricultura pesca y Alimentación. Obtenido de La mateía org: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_03.pdf
- Labrador, J., López, L., Guiberteau, A., & Reyes, J. (20 de noviembre de 2019). Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Obtenido de La materia orgánica en los sistemas agrícolas manejo y utilización: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_03.pdf
- Laos, F. (2003). Compostaje de residuos orgánicos de actividades productivas y urbanas en la región Andino Patagónica: determinación de índices de madurez para su utilización agronómica. Tesis doctoral Universidad nacional del Comahue, Argentina., 148pp.
- Lasardi, K., Protopapa, I., Kotsou, M., Pilidis, G., & Kyriacou, A. (2006). Quality assessment of compost in the Greek market: the need for standards and quality assurance. *J. Environ. Manag*, 80,58-65.
- Lasaridi, K., & Stentiford, E. (1998). A simple respirometric technique for assessing compost stability. *Water Res.* 31:609-625.
- Lax, A., Roig, F., & Costa, F. (1986). A method for determining the cation exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil*, 94:349-355.
- Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados. (28 de julio de 2011). boletín oficial del estado. Obtenido de <https://boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-4117> (Consultado en diciembre 2019)
- Ley 6/2003 de 4 de marzo de la ganadería de la Comunidad Valenciana. (s.f.). Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es-vc/l/2003/03/04/6> (Consultado en diciembre 2019)

- Listado Europeo de Residuos. (19 de febrero de 2003). Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2002-3285> (Consultado en noviembre 2019)
- López, M., & Boluda, R. (2008). Residuos Agrícolas. En J. Moreno, & R. Moral, Compostaje (págs. 489-518). Madrid: Mundi-Prensa.
- López, M., Canet, R., Huerta, O., Gea, M., Pérez, M., & Martínez, F. (2014). De Residuo a Recurso. El camino de la sostenibilidad. Madrid: Mundi-Prensa.
- Madejón, E., Díaz, M. J., López, R., & Cabrera, F. (2001). Co-compo matter nature of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Biore. Technol*, 85:73-78.
- Manios, V., Tsikalas, P., & Siminis, H. (1987). Phytotoxicity of olive tree leaf compost. En d. B. M, *Compost Production, Quality and Use* (págs. 296-301). Elsevier. Barking.
- Masaguer, M., & Benito Capa, M. (2008). Evaluación de la calidad del compost. En J. Moreno Casco, & R. Moral Herrera, *Compostaje* (págs. 287-304). Mundi-Presa.
- Michael, F., Pecchia, J., & Rigot, J. (2004). Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util*, 12(4):323-334.
- Ministerio para la Trascición Ecológica. (6 de junio de 2018). www.miteco.gob.es. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/pae2017_completo_reducido_tcm30-484531.pdf (Consultado en octubre 2019)
- Misterio de Agricultura, P. y. (2019). Obtenido de Guia práctica de la fertilización racional de los cultivos de España: [https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/publicaciones/02_FERTILIZACIÓN\(BAJA\)_tcm30-57891.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/publicaciones/02_FERTILIZACIÓN(BAJA)_tcm30-57891.pdf) (Consultado en noviembre 2019)
- Morel, J., Colin, F., J.C., G., Godin, P., & Juste, C. (1985). Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost. En J. Gasser, *Composting of Agricultural and other Wastes* (págs. 56-72). London & New York.
- Moreno Casco, J., & Mora Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Madrid: Mundi-Prensa.

- Moreno Casco, J., & Mormeneo Bernal, S. (2008). Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. En J. Moreno Casco, & R. Moral Herrero, *Compostaje* (págs. 113-140). Mundi-Prensa.
- Moreno, J., Moral, R., García- Morales, J., Pascual, J., & Bernal, M. (2014). *De Residuo a Recurso, el camino de la sostenibilidad, III Recursos orgánicos y agricultura intensiva*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Moreno, J., Moral, R., García, J., Pascual, J., & Bernal, M. (2015). *De Residuo a Recurso. El camino de la sostenibilidad. 3 Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aeróbica. II Proceso de biotransformación de la materia orgánica*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Moreno, J., Moral, R., García-Morales, J., Pascual, J., & Bernal, M. (2014). *De residuo a recurso, el camino de la sostenibilidad. Residuos agrícolas 1. Recursos orgánicos I*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Mustin, M. (1987). *Le compost. Gestion de la matière organique*. Éditions François Dubusc. Paris.
- Navarro, A., Cegarra, J., Roig, A., & Bernal, M. (1991). An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes commun. *Soil Sci. Plant anal*, 22:2137-2144.
- Navarro, A., Cegarra, J., Roig, A., & García, D. (1993). Relationships between organic-matter and carbon contents of organic wastes. *Bioresource technology*, 44:203-207.
- Paredes, C., Bernal, M., Cegarra, J., & Roig, A. (2002). Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 85, 1-8.
- Parra, S., Aguilar, F., & Calatrava, J. (2008). Decision modelling for environmental protection: the contingent valuation method applied to greenhouse waste management. *Biosyst, Eng.*, 99:469-668.
- Pergrín, M., Sáez-Tovar, J., Andreu-Rodríguez, J., Pérez-Murcia, M., Martínez-Sabater, E., Marhuenda-Egea, F., Moral, R. (2018). *Composting of the invasive species*

- Arundo donax with sewage and agri-food sludge: Agronomic, economic and environmental aspects. *Waste Management*, 78:730-740.
- Petric, I., Helic, A., & Audihodzic-Audic, E. (2012). Evolution of process parameters and determination of kinetics for composting of organic fraction of municipal solid waste poultry manure. *Bioresource Technology*, 107-112.
- Real Decreto 1002/2012, de 29 de junio, por el que se establece medidas de aplicación de la normativa comunitaria en la materia de comercialización y utilización de piensos y se modifica el Real Decreto 1409/2009, de 4 de septiembre, . por el que se regula la elaboración, comercialización y uso y control de los piensos medicamentosos. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2012/06/29/1002>
- Real Decreto. (s.f.). 261/1996, 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación por los nitritos procedentes de fuentes agrarias. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/1996/02/16/261>
- Real Decreto. (s.f.). 506/2013 de 28 de junio sobre productos fertilizantes. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506> (Consultado en noviembre 2019)
- Real Decreto. (s.f.). 999/2017 de noviembre por el que se modifica RD 506/2013 de 28 de Junio sobre productos fertilizantes. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2017/11/24/999> (Consultado en noviembre 2019)
- Reglamento (UE). (s.f.). 2019/1009 del Parlamento y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen dispositivos relativos a la puesta en disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE.
- Roig, A., Cegarra, J., Costa, F., & Hernández, M. (1988). Cation-Exchange capacity as a parameter for measuring the humification degree of matures. *Soil Sci.* 146:311-316.
- Roletto, E., Barberis, R., Consiglio, M., & Jodice, R. (1985). Chemical parameters for evaluating compost maturity. *Biocycle*, 26(2):46-47.

- Sáez, J., Clemente, R., Bustamante, M., & Yáñez, D. B. (2017). Evaluation of the slurry management strategy and the integration of the composting technology in a pig farm-Agronomical and environmental implications. *Journal of Environmental Management*, 192:57-67.
- Sánchez-Monedero, M., Paredes, C., & Bernal, M. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the compostig mixtures. *Biores. Technol*, 78(3):301-308.
- Sánchez-Monedero, M., Roig, A., Martínez-Pardo, C., Cegarra, J., & Paredes, C. (1996). A Microanalysis methods for determining total organic carbon and oxidable carbon. *Bioresour. Technol*, 57, 291-295.
- Scalbert, A. (1991). Antimicrobial properties of tannis. *Phytochemistry*, 30:3875-3883.
- Senesi, N. (1989). Composted materias as organic fertilizers. *Sci. Total Environ.* 81/82:521-542.
- Soliva, M., López, M., & Huerta, O. (2008). Antecedentes y fundamentos del proceso de compostaje. En J. Moreno, & R. Moral, *Compostaje* (págs. 77-109). Madrid: Mundi-Prensa.
- Stentiford, E. (1996). *Composting control: principles and practice*. En: M. De Bertoldi (ed.), *The Science of Composting. Part I*. Blakie Academic and Professional, Glasgow, UK.
- Stentiford, E., & Mara, D. T. (1985). Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. En: *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Ed: J.K.R. Gasser. Elsevier. Barking. 42-54.
- Study report on End-of-Waste criteria for Biodegradable waste subcted to biological treatment. Draft Final Report, July 2013. (s.f.). Obtenido de <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/waste/documents/IPTS%20EoW%20Biodegradable%20waste%20Draft%20Final%20Report.pdf> (consultado en septiembre 2019)
- Sugahara, K., Harada, Y., & Ikono, A. (1979). Color change of ciy refuse during composting process. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 25:197-208.

- Suler, D., & Finstein, S. (1977). Effect of temperature, Aeration, And Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, Continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Environ. Microbiol*, 33(2):345-350.
- Tchobanogulus, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw-Hill.
- Tomati, U., & Madejón, E. G. (2000). Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Sci. Util*, 8(2):108-115.
- Vargas, M., & Suárez, F. (2008). Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades biológicas del suelo. En J. Moreno, & R. Moral, *Compostaje* (págs. 331-350). Madrid: Mundi-Prensa.
- Vico, A., M.D., P.-M., Bustamante, M. A.-E., Saez, J., Paredes, C. P.-E., & 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., Sayack, D., Peyre, A., & Andre, L. (1987). Optimization of in-vessel composting through heat recovery. *Biological wastes*, 20:167-185.
- Zucconi, F., & De Beryolini, M. (1987). Specifications for solid waste compost. *Biocycle*, 28(5/6):56-61.
- Zucconi, F., Monaco, A., & Forte, M. (1985). Phytotoxins during the stabilization of organic matter composting of agricultural and other wastes. *J.K.R.*
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoldi, M. (1981b). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22:54-57.