

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PROCEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE VID MEDIANTE CO-COMPOSTAJE



Maria Torres Omedes

2022

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PROCEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE VID MEDIANTE CO-COMPOSTAJE



Vº Bº DIRECTOR

MARIA
DOLORES |
PEREZ |
MURCIA

Firmado
digitalmente por
MARIA DOLORES |
PEREZ | MURCIA
Fecha: 2022.09.21
12:50:24 +02'00'

María Dolores Pérez Murcia

VºBº CODIRECTOR

ENCARNACION |
MARTINEZ |
SABATER

Firmado digitalmente
por ENCARNACION |
MARTINEZ | SABATER
Fecha: 2022.09.21
13:16:55 +02'00'

Encarnación Martínez Sabater

ALUMNO

Firmado por MARIA TORRES
OMEDES - el día
21/09/2022 con un certificado
emitido por ACCVCA-120

María Torres Omedes



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a al alumna **D^a. Maria Torres Omedes**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Valorización de residuos procedentes de la producción de plántulas de vid mediante co-compostaje”, bajo la dirección de D^a. Maria Dolores Pérez Murcia y de D^a. Encarnación Martínez Sabater, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 21 de julio de 2022

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

CONCEPCION | PAREDES | GIL
Firmado digitalmente por
CONCEPCION | PAREDES | GIL
Fecha: 2022.07.21 20:48:52

Fdo.: Concepción Paredes Gil

| TRIBUNAL | |
|-------------|--------|
| FECHA: | |
| PRESIDENTE: | FIRMA: |
| VOCAL: | FIRMA: |
| VOCAL: | FIRMA: |

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Maria Torres Omedes

Título: Valorización de residuos procedentes de la producción de plántulas de vid mediante co-compostaje

Title: Recovery of waste from the production of vine seedlings through co-composting

Director/es del TFM: María Dolores Pérez Murcia y Encarnación Martínez Sabater

Año: 2022

Titulación: Máster Universitario en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos

Tipo de proyecto: Experimental

Palabras claves: sarmientos, vid, compost, compostaje

Keywords: vine branch, vineyard pruning waste, grape vine cane, vine shoot pruning, grape vine stalk, compost, composting

Nº citas bibliográficas: 104

Nº de planos: 0

Nº de tablas: 32

Nº de figuras: 36

Nº de anexos: 0



RESUMEN

El objetivo del trabajo es estudiar la valorización, mediante compostaje, de sarmientos de vid junto con destríos de cítrico y caqui y gallinaza con la finalidad de mejorar su gestión y la calidad del producto obtenido, así como investigar la minimización en el uso de estiércol en las mezclas de compostaje.

Para alcanzar los objetivos planteados se diseñan tres ensayos de compostaje a escala real con diferentes proporciones de los ingredientes, aumentando la cantidad de destríos y disminuyendo la de gallinaza.

El diseño experimental seguido consiste en la caracterización inicial de los residuos a compostar, el establecimiento de la mezcla a compostar, el desarrollo del sistema de compostaje mediante tres pilas volteadas y el análisis de las características fisicoquímicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso, así como del producto final obtenido.

El compostaje con mayor diversidad de ingredientes mejora la calidad y capacidad fertilizante de los compost en comparación con la mezcla binaria, lo que permitirá reducir la aplicación de fertilizantes minerales complementarios. Además, permite disminuir la cantidad de estiércol utilizado en el compostaje y, con ello, los costes para el agricultor que necesite gestionar los residuos derivados de su actividad económica.

ABSTRACT



The objective of the work is to study the recovery, through composting, of vine shoots together with citrus and persimmon waste and chicken manure in order to improve its management and the quality of the product obtained, as well as to investigate the minimization in the use of manure in composting mixes.

In order to reach the stated objectives, three full-scale composting trials are designed with different proportions of the ingredients, increasing the amount of waste of fruits and decreasing the amount of chicken manure.

The experimental design followed consists of the initial characterization of the waste, the establishment of the mixture to be composted, the development of the composting system using three overturned piles and the analysis of the physical-chemical and chemical characteristics of the materials to be composted throughout the process, as well as the final product obtained.

Composting with a greater diversity of ingredients improves the quality and fertilizing capacity of the composts compared to the binary mixture, which will reduce the application of complementary mineral fertilizers. In addition, it allows to reduce the amount of manure used in composting and the costs for the farmer who needs to manage the waste derived from his economic activity.

AGRADECIMIENTOS

A mi directora, la Dra. María Dolores Pérez Murcia por sus orientaciones y apoyo.

A la Dra. Encarnación Martínez Sabater, co-directora de este trabajo, por el trabajo realizado.

A los miembros del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente al dejarme hacer uso de sus instalaciones y equipos.

A mi familia, por su ánimo y comprensión.





INFORME DE EVALUACIÓN DE INVESTIGACIÓN RESPONSABLE DE 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)

Elche, a 27 de julio del 2022

| | |
|--|--|
| Nombre del tutor/a | Maria Dolores Pérez Murcia y Encarnación Martínez Sabater |
| Nombre del alumno/a | Maria Torres Omedes |
| Tipo de actividad | 6. Actividad de investigación técnica (publicable y no aplican las opciones 7-11) |
| Título del 2. TFM (Trabajo Fin de Máster) | Valorización de residuos procedentes de la producción de plántulas de vid mediante co-compostaje |
| Código/s GIS estancias | - |
| Evaluación Riesgos Laborales | Conforme |
| Evaluación Ética | No procede |
| Registro provisional | 220721195305 |
| Código de Investigación Responsable | TFM.MGT.MDPMYEMS.MTO.220721 |
| Caducidad | 2 años |

Una vez atendidas las observaciones/condiciones mencionadas en el informe adjunto del Servicio de Prevención de Riesgos Laborales, en caso de que las hubiera, se considera que el presente proyecto/contrato/prestación de servicios carece de riesgos laborales significativos para las personas que participan en el mismo, ya sean de la UMH o de otras organizaciones y, por tanto, es conforme.

La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: **Valorización de residuos procedentes de la producción de plántulas de vid mediante co-compostaje** ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: "TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)" y "Condiciones de prevención de riesgos laborales" (si procede). Es importante destacar que si la información aportada en dichos formularios no es correcta este informe no tiene validez.

Por todo lo anterior, **se autoriza** la realización de la presente actividad.

Atentamente,

Alberto Pastor Campos
Secretario del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Domingo L. Orozco Beltrán
Presidente del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Información adicional:

- En caso de que la presente actividad se desarrolle total o parcialmente en otras instituciones es responsabilidad del investigador principal solicitar cuantas autorizaciones sean pertinentes, de manera que se garantice, al menos, que los responsables de las mismas están informados.
- Le recordamos que durante la realización de este trabajo debe cumplir con las exigencias en materia de prevención de riesgos laborales. En concreto: las recogidas en el plan de prevención de la UMH y en las planificaciones preventivas de las unidades en las que se integra la investigación. Igualmente, debe promover la realización de reconocimientos médicos periódicos entre su personal; cumplir con los



procedimientos sobre coordinación de actividades empresariales en el caso de que trabaje en el centro de trabajo de otra empresa o que personal de otra empresa se desplace a las instalaciones de la UMH; y atender a las obligaciones formativas del personal en materia de prevención de riesgos laborales. Le indicamos que tiene a su disposición al Servicio de Prevención de la UMH para asesorarle en esta materia.

La información descriptiva básica del presente trabajo será incorporada al repositorio público de Trabajos fin de Grado y Trabajos Fin de Máster autorizados por la Oficina de Investigación Responsable de la Universidad Miguel Hernández en el curso académico 2020/2021. También se puede acceder a través de <https://oir.umh.es/tfg-tfm/>



ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS ORGÁNICOS | 1 |
| 1.2. SECTOR DE LA PRODUCCIÓN DE PLANTONES DE VID EN ESPAÑA | 4 |
| 1.2.1. Descripción del sector | 4 |
| 1.2.2. Procesos y productos | 5 |
| 1.2.3. Gestión y tratamiento de los residuos orgánicos generados | 7 |
| 1.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE | 8 |
| 1.3.1. Definición y etapas del proceso | 8 |
| 1.3.2. Condiciones para el proceso de compostaje | 9 |
| 1.3.3. Sistemas de compostaje | 11 |
| 1.3.4. Evaluación de la calidad del compost | 13 |
| 1.3.5. Utilización del compost | 17 |
| 1.4. ESTUDIOS PREVIOS SOBRE COMPOSTAJE DE SARMIENTOS | 19 |
| 2. OBJETIVOS | 21 |
| 3. MATERIAL Y MÉTODOS | 23 |
| 3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL | 23 |
| 3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL | 26 |
| 3.2.1. Características de los residuos utilizados | 26 |
| 3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado | 28 |
| 3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL | 29 |
| 3.3.1. Cálculo y preparación de la mezcla | 29 |
| 3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje | 31 |
| 3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas | 32 |
| 3.4. PARÁMETROS ANALIZADOS Y MÉTODOS ANALÍTICOS | 34 |
| 3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS | 36 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 37 |
| 4.1. EVOLUCIÓN DE FACTORES RELATIVOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTAJE | 37 |
| 4.1.1. Temperatura | 37 |
| 4.1.2. Humedad | 42 |
| 4.1.3. Densidad aparente | 44 |
| 4.2. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE | 46 |
| 4.2.1. pH | 46 |
| 4.2.2. Conductividad eléctrica | 48 |

| | |
|--|----|
| 4.2.3. Polifenoles | 50 |
| 4.3. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA | 51 |
| 4.3.1. Evolución del contenido de materia orgánica | 51 |
| 4.3.2. Pérdida de materia orgánica | 53 |
| 4.3.3. Carbono orgánico total (Corg) | 54 |
| 4.3.4. Nitrógeno total (NT) | 56 |
| 4.3.5. Relación Corg/NT | 57 |
| 4.3.6. Contenido de fósforo, potasio y sodio | 60 |
| 4.4. CALIDAD DEL COMPOST | 64 |
| 4.4.1. Madurez del compost: Índice de germinación y humificación | 64 |
| 4.4.2. Estabilidad de compost: test autocalentamiento | 67 |
| 4.4.3. Riesgos medioambientales: contenido en metales pesados | 67 |
| 4.5. VALOR ECONÓMICO DEL COMPOST | 74 |
| 5. CONCLUSIONES | 76 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 78 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Riesgos relacionados con los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995). | 1 |
| Tabla 1.2. Condiciones deseables durante el proceso de compostaje (Fermor, 1993; Rynk y col., 1992). | 11 |
| Tabla 1.3. Ventajas y desventajas de los sistemas de compostaje. | 13 |
| Tabla 3.1. Características de los materiales utilizados en los procesos de compostaje. | 27 |
| Tabla 3.2. Proporción de ingredientes de las pilas y cantidades tratadas. | 30 |
| Tabla 3.3. Dimensiones, volumen y peso iniciales de las pilas estudiadas. | 31 |
| Tabla 3.4. Calendario de las operaciones realizadas durante el experimento. | 33 |
| Tabla 4.1. Índices de evolución de seguimiento térmico del proceso. | 41 |
| Tabla 4.2. Niveles de higienización propuestos en Reglamento (UE) 2019/1009 - Fertilizantes UE. | 42 |
| Tabla 4.3. Datos medios de humedad (%) según el factor tiempo y tipo de compost. | 44 |
| Tabla 4.4. Datos medios de densidad aparente (kg/l) según el factor tiempo y tipo de compost. | 46 |
| Tabla 4.5. Datos medios de pH según el factor tiempo y tipo de compost. | 47 |
| Tabla 4.6. Datos medios de CE (dS/m) según el factor tiempo y tipo de compost. | 50 |
| Tabla 4.7. Datos medios de polifenoles (mg/kg) según el tipo de compost. | 51 |
| Tabla 4.8. Datos medios de materia orgánica (%) según el factor tiempo y tipo de compost. | 53 |
| Tabla 4.9. Datos medios de pérdida de MO total (%) según el factor tiempo y tipo de compost. | 54 |
| Tabla 4.10. Datos medios de Corg total (%) según el factor tiempo y tipo de compost. | 55 |
| Tabla 4.11. Datos medios de nitrógeno total (%) según el factor tiempo y tipo de compost. | 57 |
| Tabla 4.12. Datos medios de relación Corg/NT total según el factor tiempo y tipo de compost. | 59 |
| Tabla 4.13. Datos medios de fósforo (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 62 |
| Tabla 4.14. Datos medios de potasio (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 63 |
| Tabla 4.15. Datos medios de sodio (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 63 |
| Tabla 4.16. Evaluación de índices de estabilización de compost maduro. | 66 |
| Tabla 4.17. Índices de estabilización en los compost obtenidos. | 66 |
| Tabla 4.18. Datos medios de cadmio (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 68 |
| Tabla 4.19. Datos medios de cobre (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 69 |

| | |
|--|----|
| Tabla 4.20. Datos medios de níquel (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 70 |
| Tabla 4.21. Datos medios de plomo (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 71 |
| Tabla 4.22. Datos medios de zinc (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 72 |
| Tabla 4.23. Datos medios de cromo (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost. | 73 |
| Tabla 4.24. Concentración de metales pesados en los compost. | 74 |
| Tabla 4.25. Valor económico (€/t) de los compost obtenidos. | 74 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Distribución de la superficie de viñedo destinada a la propagación vegetativa por comunidades autónomas. | 5 |
| Figura 1.2. Evolución de la superficie dedicada a la propagación vegetativa de viñedo en España, 1992-2019. | 5 |
| Figura 1.3. Proceso general para la producción de planta estándar de vid (Urbina, 1999). | 7 |
| Figura 3.1. Sarmiento. | 24 |
| Figura 3.2. Destrío de cítrico. | 24 |
| Figura 3.3. Destrío de caqui. | 24 |
| Figura 3.4. Gallinaza. | 24 |
| Figura 3.5. Maquinaria utilizada para el montaje y volteo de las pilas (retroexcavadora y mezcladora kingnT170). | 28 |
| Figura 3.6. Detalle del proceso de volteo y mezclado de las pilas. | 28 |
| Figura 3.7. Montaje de las pilas (a) y riego inicial (b y c). | 31 |
| Figura 3.8. Pilas al inicio del experimento (de derecha a izquierda: GVA 175, GVA 176 y GVA 177). | 31 |
| Figura 3.9. Volteo final (día 122). | 32 |
| Figura 3.10. Muestreo final. | 33 |
| Figura 4.1. Evolución de la temperatura de la pila GVA 175 (en oC) y del incremento térmico experimentado durante el proceso de compostaje. | 40 |
| Figura 4.2. Evolución de la temperatura de la pila GVA 176 (en oC) y del incremento térmico experimentado durante el proceso de compostaje. | 40 |
| Figura 4.3. Evolución de la temperatura de la pila GVA 177 (en oC) y del incremento térmico experimentado durante el proceso de compostaje. | 41 |
| Figura 4.4. Evolución de la humedad durante el proceso de compostaje. | 43 |
| Figura 4.5. Evolución de la densidad aparente durante el proceso de compostaje. | 45 |
| Figura 4.6. Evolución del pH durante el proceso de compostaje. | 47 |
| Figura 4.7. Evolución de la conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje. | 49 |
| Figura 4.8. Evolución de la concentración de polifenoles durante el proceso de compostaje. | 51 |
| Figura 4.9. Evolución de la materia orgánica total durante el proceso de compostaje. | 52 |
| Figura 4.10. Evolución de la pérdida de materia orgánica total durante el proceso de compostaje. | 54 |
| Figura 4.11. Evolución del carbono orgánico total durante el proceso de compostaje. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.12. Evolución del nitrógeno total durante el proceso de compostaje. | 57 |
| Figura 4.13. Evolución de la relación Carbono orgánico total y nitrógeno total. | 59 |
| Figura 4.14. Evolución del contenido de P durante el proceso de compostaje. | 61 |
| Figura 4.15. Evolución del contenido de K durante el proceso de compostaje. | 62 |
| Figura 4.16. Evolución del contenido de Na durante el proceso de compostaje. | 63 |
| Figura 4.17. Resultados del índice de germinación del proceso de compostaje. | 65 |
| Figura 4.18. Evolución del contenido de Cd durante el proceso de compostaje. | 68 |
| Figura 4.19. Evolución del contenido de Cu durante el proceso de compostaje. | 69 |
| Figura 4.20. Evolución del contenido de Ni durante el proceso de compostaje. | 70 |
| Figura 4.21. Evolución del contenido de Pb durante el proceso de compostaje. | 71 |
| Figura 4.22. Evolución del contenido de Zn durante el proceso de compostaje. | 72 |
| Figura 4.23. Evolución del contenido de Cr durante el proceso de compostaje. | 73 |



1. INTRODUCCIÓN

1.1. RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

Cada año, los europeos generan más de 2.000 millones de toneladas de residuos, lo que no solo causa problemas ambientales, sino que también representa una pérdida económica. Los biorresiduos representan más del 34% de los residuos sólidos urbanos generados, ascendiendo a 86 millones de toneladas en 2017 en la UE-28 (EEA, 2020). A estos residuos orgánicos hay que añadir los producidos en la ganadería, agricultura (415 millones de toneladas) (Van-Camp y col., 2001) y en actividades agroindustriales (30 millones de toneladas).

Cuando se habla de riesgos para el medio ambiente, hay que situarse en la precisión limitada en el sistema, subsuelo, suelo y plantas, así como los efectos que pueden llegar al hombre. El suelo es un componente de los ecosistemas relativamente frágil, de difícil y larga recuperación, así como de extensión limitada. Por ello, a pesar de presentar una gran capacidad depuradora, una vez degradado resulta muy complejo establecer su reconstitución. Es un recurso no renovable a corto plazo y por ello cualquier adición de residuos (al igual que otro tipo de acciones sobre él) debe ser bien estudiada antes de realizarla (Navarro y col., 1995).

Los residuos derivados de procesos de transformación de productos agrícolas y ganaderos, así como los residuos urbanos (RSU y lodos), son los materiales a los que se debe mostrar una mayor atención por la posible presencia de factores contaminantes y componentes no biodegradables (Navarro y col., 1995).

1.1.1. Tipos de riesgos medioambientales

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

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

1.1.2. Principales agentes contaminantes

Los agentes que inducen los riesgos medioambientales anteriormente citados son:

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

En la Tabla 1.1 se muestran los principales agentes contaminantes, así como una correlación entre éstos y los diferentes residuos comentados, con el fin de evaluar su mayor o menor presencia en cada residuo.

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

| RESIDUO | Metales pesados | Sustancias tóxicas | Microorganismos Patógenos | Excedencia/demanda de nutrientes | Materiales no biodegradables | Sales en exceso |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Residuos ganaderos | | | X | X | | |
| Abonado verde | | | | X | | |
| Residuos de cosechas | | X | | X | | |
| Agroindustriales | X | X | X | X | X | X |
| Basuras urbanas | X | X | X | X | X | X |
| Lodos de depuradora | X | X | X | X | X | X |

■ Metales pesados

Los metales pesados son elementos tóxicos y peligrosos por su incidencia en procesos bioquímicamente activos en los organismos vivos. Los lodos de depuradora, los RSU y los agroindustriales son los materiales residuales en los que los metales pesados centran el interés de su poder contaminante. Los metales, y otros elementos que se incluyen en este grupo, que en mayor concentración o potencial contaminante podemos encontrar en los residuos orgánicos son Pb, Cr, Ni, Cu, Cd, Zn, Hg, así como el As y elementos traza como Co, Mo, Ba, V, Se, Ba, Ag, Sr y S que resultan esenciales para los organismos en pequeñas concentraciones. Los metales se concentran en el compost debido a la degradación de la materia orgánica, excepto si sufren procesos de lixiviación.

■ Sustancias tóxicas

Son numerosos los compuestos a los que debemos prestar atención, pero podemos reseñar como los más importantes los agrupados en la siguiente lista:

- Derivados halogenados de uno o dos átomos de carbono.
- Parafinas doradas
- Agentes tensioactivos
- Nitrosamines
- Esteres ftálicos
- Compuestos aromáticos halogenados
- Compuestos aromáticos halogenados con oxígeno
- Amino aromáticas
- Hidrocarburos poliaromáticos
- Plaguicidas y sus derivados

Los contaminantes orgánicos pueden ser biodegradados por los microorganismos durante el proceso de compostaje produciendo constituyentes inorgánicos.

■ Organismos patógenos

La existencia de patógenos (bacterias, virus, protozoos, nemátodos, céstodos), que puedan afectar al hombre y que constituyen un riesgo para los ecosistemas, es uno de los problemas más importantes que pueden darse en algunos residuos orgánicos. Por ello es importante realizar procesos de acondicionamiento que permitan controlar y eliminar este riesgo. El compostaje permite la eliminación de patógenos mediante el mantenimiento de temperaturas elevadas durante un tiempo requerido para cada organismo.

■ Exceso o demanda de nutrientes

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

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

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

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

■ Salinidad

La presencia de sales solubles en los residuos orgánicos puede influir negativamente sobre determinadas prácticas culturales ya que la salinización, acumulación excesiva de sales en el suelo, afecta a la absorción hídrica de los cultivos. Este proceso depende de la cantidad total de sales más que de los distintos iones que la componen.

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

■ Otros agentes

Este otro conjunto de riesgos no recogidos en los anteriores apartados puede deberse a causas como la existencia de semillas de vegetales no deseables. Estas semillas pueden eliminarse con las altas temperaturas alcanzadas durante el compostaje.

1.2. SECTOR DE LA PRODUCCIÓN DE PLANTONES DE VID EN ESPAÑA

1.2.1. Descripción del sector

La vid (*Vitis vinífera* L.) es una planta cultivada desde la antigüedad y es uno de los cultivos leñosos perennes más importante y relevantes del mundo. La superficie mundial dedicada al cultivo de la vid ronda las 7,9 millones de ha y el número de variedades de *Vitis vinífera* L. registradas en el mundo y surgidas por evolución natural es de alrededor de 5.000 (Tessier y col., 1999). Más del 60% (4.900.000 ha) de la superficie de viñedo se encuentra en Europa, seguido de Asia con un 20,4% (1.727.000 ha), América con un 12,1% (967.000 ha), África un 4,5% (395.000 ha) y finalmente Oceanía con un 2,2% (192.000 ha) (Fregoni, 2007).

En el caso de España, la vid es un cultivo característico de la cultura y el paisaje agrario en la mayor parte del territorio, además, es uno de los cultivos más importantes en España, país que se sitúa a la cabeza mundial en cuanto a extensión del cultivo de la vid con 938.391 ha, un 13% del total de la superficie dedicada al cultivo en el mundo y un 30% del total en Europa. La vid ocupa el 5,5 % de la superficie cultivada en España, estando en el quinto lugar en extensión de los cultivos españoles, detrás del cereal, el olivo, los frutales no cítricos y las plantas forrajeras. De la superficie de producción de vid en España, un 98,1% corresponde a los viñedos de uva para vinificación, seguida del viñedo para uva de mesa (1,56%), el viñedo para uva de pasificación (0,18%) y, por último, un 0,16% correspondiente a los viveros de viñedo (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2020).

Las comunidades con mayores superficies (ha) dedicadas al viñedo son, en primer lugar, Castilla la Mancha con una superficie del 47% del total, seguida por Castilla y León (8,7%), Extremadura (8,4%), la Comunidad Valenciana (7%), Cataluña (6%) y la Rioja (5%) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2020).

En cuanto al viñedo destinado a la propagación vegetativa de vid, en 2019 hubo plantadas 1.503 ha, siendo la Comunidad Valenciana la principal productora con el 43% de tal superficie, seguida por Navarra, Andalucía, Cataluña y Castilla-La Mancha (Figura 1.1) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2020).

Producción de viñedo por comunidades autónomas, 2019

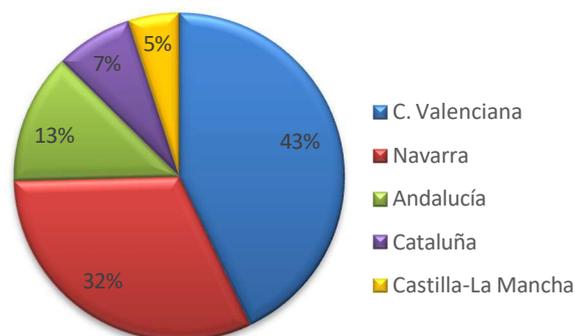


Figura 1.1. Distribución de la superficie de viñedo destinada a la propagación vegetativa por comunidades autónomas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Anuario de Estadística 2020 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

La superficie total destinada a viveros de plantas de vid en España (Figura 1.2) ha ido variando a lo largo del tiempo con fuertes descensos en su superficie en 1998, 2005, 2006 y 2010. Desde entonces, ha ido aumentando paulatinamente hasta alcanzar la superficie de producción actual de 1.503 ha, cifra todavía lejana a la máxima alcanzada en 2004 de 3.974 ha (Anuarios de Estadística 1992-2020, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

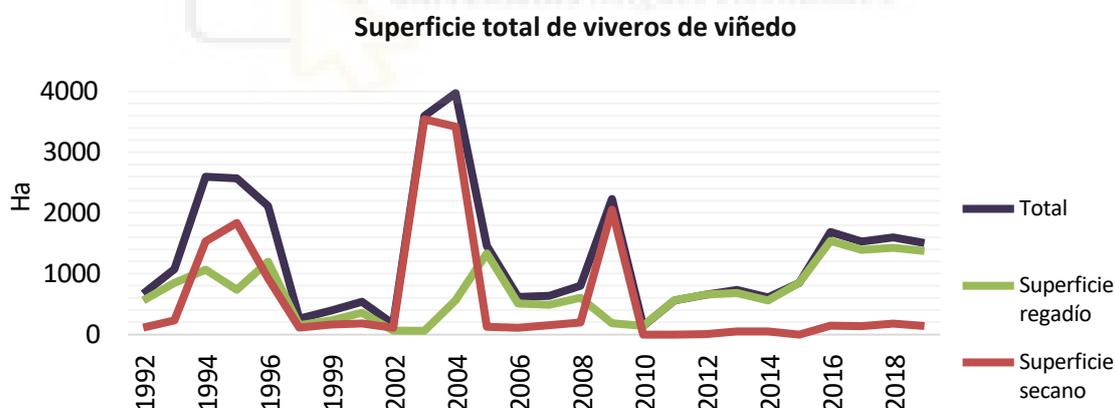


Figura 1.2. Evolución de la superficie dedicada a la propagación vegetativa de viñedo en España, 1992-2019. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de los Anuarios de Estadística 1992-2019.

1.2.2. Procesos y productos

A finales del siglo XIX se inició la invasión de la filoxera en las viñas españolas. Este insecto existente en el suelo destruye el sistema radicular de las variedades de vid europeas (*Vitis vinifera*). Por ello, para la replantación de las viñas, la propagación de la vid es necesaria realizarla mediante la técnica del injerto entre una planta de vid resistente a la enfermedad con la variedad que se quiere cultivar.

El proceso de producción de plantas injertadas de vid se desarrolla durante varios años o estaciones de cultivo.

En el primer año del proceso, de marzo a octubre se realizan las labores, cuidados y tratamientos fitosanitarios propios tanto a las cepas madre que proporcionan los portainjertos como a las que producen las yemas (injertos).

De diciembre a marzo se podan y recogen los sarmientos en los campos de cepas madre. Los destinados a la producción de portainjertos o estacas, la parte de mayor grosor, se cortan en fragmentos entre 40-42 cm de largo y se limpian de nietos y zarcillos. El resto del sarmiento con menos de 7 mm de diámetro se destina a estaquilla para la producción de barbados o portainjertos. La estaca se conserva en cámaras de frío hasta el momento de ser injertada. En cambio, la estaquilla se entierra en zanjas hasta que esté en condiciones de ser plantada en vivero. Los sarmientos de las cepas madre que producen yemas se fraccionan en púas de una yema.

En marzo y abril se realiza el injertado, operación que consiste en la unión de la púa y el patrón mediante máquinas en taller y posterior parafinado. Previamente a este proceso, se preparan los patrones quitando las yemas de invierno mediante abrasión y se sumergen en agua unos días antes del injertado. Una vez injertados se dejan en cámaras de calor a 25°C durante 20 días aproximadamente para obtener una buena simbiosis o ligazón (formación del callo y enraizamiento). Posteriormente, desde abril a mayo, el material injertado se planta en campos de vivero y se deja crecer hasta octubre. Durante este período se realizan trabajos de escarda, riegos y tratamientos fitosanitarios.

De diciembre a marzo del segundo año, se procede al descuaje o arranque de la planta cuando llega la época de madurez o letargo (caída del pámpano). Se comprueba la solidez de la soldadura y el desarrollo de las raíces y el tallo. Se envasan las plantas y se conservan en cámaras frigoríficas a 3-4°C hasta el momento de ser suministrada (de marzo hasta finales de mayo) (Viveros Lorente).

Los viveros de plantas de vid producen plantas injertadas de vid para vinificación y para uva de mesa, además de portainjertos a partir de varios tipos de material vegetal como estacas, estaquillas y yemas que se recogen de cepas madre portainjertos y de cepas madre de *Vitis vinífera* de diferentes variedades. Los portainjertos se sirven con una longitud de entre 60 a 62 centímetros, más brote y las raíces correspondientes recortadas. También se puede suministrar con los brotes podados a dos o tres yemas y convenientemente parafinados para su mejor conservación.

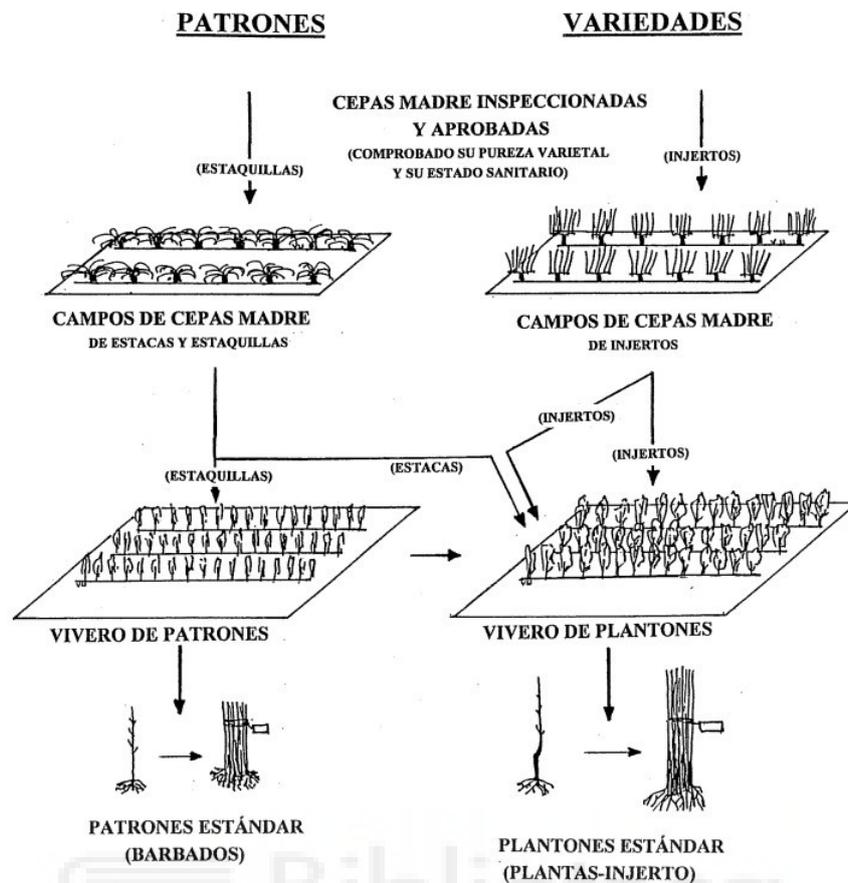


Figura 1.3. Proceso general para la producción de planta estándar de vid (Urbina, 1999).

1.2.3. Gestión y tratamiento de los residuos orgánicos generados

Los trozos de sarmientos no utilizables para los procesos de producción, por ser de un diámetro o tamaño inferior al necesario, o porque las estacas se encuentran muy sombreadas, con doble nudo, bifurcaciones o con mal aspecto (estas malformaciones podrían ser síntomas de virus) se desechan, lo cual genera una gran cantidad de material inservible. Este residuo, de forma generalizada, se solía quemar en zonas específicas de los viveros. Las emisiones de la incineración de residuos de poda (CO_2 , CH_4 , CO , N_2O , NO_x , SO_x , butano, propano, etano y NH_3) son una de las principales contribuyentes a la huella de carbono del vino (Laca y col., 2021).

La Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural publicó una nueva prohibición de carácter indefinido de las quemaduras de los residuos agrícolas (DOGV, 2018). Por este motivo, hay interés en desarrollar una alternativa a este proceso que no cause un impacto medioambiental y que permita reutilizar el material vegetal sobrante para otros usos como abonados orgánicos.

Un cambio en las prácticas agrícolas, es decir, compostar los restos de poda en lugar de incinerarlos, sería la mejor manera de reducir la huella de carbono de la industria de la producción de uva (Laca y col., 2021).

1.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE

El compostaje constituye un procedimiento adecuado de la valorización de los residuos orgánicos, incluyendo la fracción orgánica de los RSU, residuos agroindustriales, agrícolas, ganaderos y lodos procedentes del tratamiento de las aguas urbanas. Este sistema de tratamiento de residuos orgánicos ocasiona un beneficio ambiental ya que evita los riesgos de contaminación provocados por otras alternativas como la incineración, el vertido o el depósito en vertedero, y así facilita un mejor aprovechamiento de los recursos.

Los principales objetivos del proceso de compostaje son:

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

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

1.3.1. Definición y etapas del proceso

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

El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos, que requiere una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido. Implica el paso por una etapa termófila y una producción temporal de fitotoxinas, dando como productos de los procesos de degradación, CO₂, agua, minerales y compost, una materia orgánica estabilizada, libre de fitotoxinas, con un alto valor fertilizante, fácilmente manipulable, cuyo empleo directo en el suelo no debe provocar efectos adversos (Costa y col., 1991).

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

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

microorganismos se multiplican más rápidamente que otros, predominando en el medio de descomposición.

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

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

2. Etapa termófila. Alcanzados los 40°C, la actividad mesófila para y se comienza una etapa termófila, en la que se distinguen dos fases:

- Una fase inicial en la cual la temperatura se eleva progresivamente, la acidez del medio evoluciona hacia un aumento del pH, consecuencia directa de la presencia del ion amonio como producto de degradación.

- En una segunda fase, más lenta, hay un incremento mayor de la temperatura, alcanzándose los 75°C. En esta etapa se produce la destrucción de microorganismos patógenos y bacterias termofílicas. El aumento de la temperatura puede provocar pérdida de nitrógeno amoniacal y el pH desciende ligeramente.

3. Etapa de enfriamiento. La temperatura desciende provocando la ralentización de la reacción y el calor generado es menos que el que se pierde. Al descender tanto la temperatura, se recuperan las condiciones térmicas ambientales. El pH no sufre modificación apreciable.

4. Etapa de maduración. Tiene lugar a temperatura ambiente. En esta etapa se producen reacciones secundarias de condensación y de polimerización, las cuales dan lugar al humus como producto final. La etapa de maduración precisa de un período de tiempo más extenso que las etapas anteriores. Se detecta la presencia de sustancias dotadas de actividad antibiótica y la desaparición de patógenos.

1.3.2. Condiciones para el proceso de compostaje

Como el compostaje es un proceso bio-oxidativo y depende fundamentalmente de la actividad microbiana, es de suma importancia controlar diferentes factores para conseguir la optimización de esta actividad. Estos factores están directamente relacionados con la naturaleza del sustrato o con las condiciones de desarrollo del mismo. Tanto unos como otros aparecen tan íntimamente ligados entre sí que es difícil de hacer una consideración individualizada. En la Tabla 1.2 se recogen las condiciones óptimas para llevar a cabo un proceso de compostaje.

La naturaleza del sustrato sobre el que actúan los microorganismos es otro factor relevante. Las características físicas y fisicoquímicas del sustrato que influyen en el compostaje son:

- Tamaño de las partículas. Cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano más rápida y completa será la reacción (mayor actividad química por unidad de masa). La

experiencia demuestra que el tamaño debe de estar entre 1 y 5 cm de diámetro (Biddlestone y Gray, 1991).

- Porosidad del sustrato. Los sustratos con poca porosidad es conveniente mezclarlos con otros materiales que confieran la estructura apropiada para la aireación y la capacidad de retención hídrica, y que además serán preferentemente inertes, desde el punto de vista químico, con el fin de que no presenten reacciones simultáneas (Costa y col., 1991).

- Relación superficie/volumen de las partículas. Esta relación tiene una influencia directa en la forma y la velocidad de degradación. La relación aire/agua en los intersticios de las partículas es igualmente importante; agua y oxígeno son indispensables para la actividad microbiológica y cuando la proporción es menor del nivel crítico, el metabolismo y la respiración disminuyen y se paralizan (Costa y col., 1991).

- Relación C/N. Los valores recomendables de esta relación para un rápido y eficiente proceso de compostaje están comprendidos entre 25 y 35 (Saña y Soliva, 1987; Costa y col., 1991). Si la relación tiene valores menores se produce pérdida de nitrógeno en forma de amonio y si por el contrario, la relación inicial es elevada, el proceso se prolonga siendo necesaria la adición de nitrógeno para rebajarla.

- Contenido en nutrientes. Los microorganismos del proceso del compostaje precisan en poca cantidad elementos esenciales para su nutrición, desarrollo y reproducción. Entre estos están algunos micronutrientes (boro, manganeso, zinc, cobre, hierro, molibdeno y cobalto), que pueden llegar a ser tóxicos a concentraciones elevadas. Estos elementos desempeñan un importante papel en la síntesis de enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte intracelular y extracelular (Biddlestone y Gray, 1991).

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

En el siguiente apartado se consideran las condiciones ambientales, incluyendo aquellos parámetros cuya correcta evolución es necesaria para que se desarrolle adecuadamente el proceso de compostaje. Son los siguientes:

- Temperatura. Varía durante el proceso de compostaje marcando las diferentes etapas que determinan el grado evolutivo del material compostado. Desde el punto de vista termodinámico, la biodegradación se desarrolla a través de un proceso global exoenergético, constituido por diferentes etapas (mesófila, termófila, de enfriamiento y de maduración). Se consideran óptimas las temperaturas del intervalo 35-55°C ya que a temperatura más alta los microorganismos mueren o se inactivan. Por otra parte, la generación de temperaturas demasiado altas implica una mayor mineralización que conduce a la obtención de productos finales (Saña y Solvia, 1987).

- pH. La acidez inicial es la propia de los residuos a compostar y posteriormente desciende, para alcanzar y superar la neutralidad. En la etapa inicial del compostaje, los microorganismos actúan sobre la materia orgánica más lábil, liberando ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH. Posteriormente, debido a un aumento en la concentración del ión amonio el

pH va aumentando. Conviene tener en cuenta que aumentos grandes en los valores de pH acompañados con elevadas temperaturas supone la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco (Costa y col., 1991).

- Aireación. Es imprescindible asegurar la presencia de oxígeno para el desarrollo del proceso de compostaje, pero siempre dentro de unos límites, ya que el exceso de aireación puede provocar el enfriamiento de la masa con la consiguiente disminución de la actividad microbiana. El nivel de oxígeno óptimo está dentro del intervalo 10-18% extracelular (Biddlestone y Gray, 1991). El oxígeno no sólo es necesario para la respiración de los microorganismos y el metabolismo aerobio sino también para oxidar algunas moléculas presentes en la masa a compostar. La aireación también sirve para la evacuación de humedad excedentaria y para la evacuación del calor resultante del proceso de descomposición.

- Humedad. Los microorganismos necesitan un nivel adecuado de agua para su metabolismo. El nivel óptimo de humedad está situado entre un 40 y 60%. La actividad microbiana se reduce considerablemente cuando el contenido en humedad está por debajo del 30%. Por debajo del 12% la actividad microbiana cesa y el proceso es extremadamente lento (Saña y Solvia, 1987).

Tabla 1.2. Condiciones deseables durante el proceso de compostaje (Fermor, 1993; Rynk y col., 1992).

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

1.3.3. Sistemas de compostaje

La fase de descomposición del proceso de compostaje requiere un control especial y existen diferentes tecnologías para su consecución. Los sistemas de compostaje se diferencian en su nivel de complejidad, grado de control del proceso, método de ventilación empleado y que sean abiertos o cerrados. Los diferentes sistemas de compostaje se pueden agrupar en dos grandes tipologías (Chica y García, 2008):

Sistemas abiertos:

a) Compostaje en pilas estáticas. Consiste en la formación de pilas de reducida altura que se dejan sin movimiento. La aireación ocurre por convección natural y difusión. Puede producirse en algunas zonas de la pila anaerobiosis generando malos olores, gases y líquidos no deseables. Por esto debe tenerse especial cuidado en la realización de la mezcla inicial,

eligiendo materiales que permitan tener una adecuada porosidad de la pila durante el proceso. Es un proceso lento y no permite la obtención de un producto de alta calidad.

b) Compostaje en pilas o hileras volteadas. El material se agrupa en pilas alargadas cuyo tamaño y forma dependerá del clima, material utilizado y la maquinaria disponible. Las pilas deben ser volteadas de forma regular condicionados por la temperatura, nivel de oxígeno y/o humedad en el interior de la pila.

c) Compostaje en pilas estáticas aireadas en forma pasiva. En este sistema las pilas no se voltean y son aireadas pasivamente. Suelen contar con ayudas pasivas a la aireación como tuberías perforadas o cámaras de aire que están colocadas en la parte inferior de la pila. La altura recomendada de la pila es de entre 1 a 1,5 metros. Se coloca una cubierta porosa (turba) para permitir un flujo adecuado de aire y así evitar la emisión de olores ya que la turba presenta afinidad por las moléculas que lo causan y controlar la humedad.

d) Compostaje en pilas aireadas forzadamente. En este sistema se colocan los materiales sobre un conjunto de tubos perforados o una solera porosa conectados a un sistema que aspira o insufla aire a través de la pila. La aireación forzada suministra oxígeno, enfría la pila y elimina el vapor de agua, CO₂ y otros productos de descomposición. Este tipo de compostaje necesita una serie de equipamientos como un compresor, red de tuberías, válvulas y sistema de control de presión de aire, temperatura y humedad, por lo que tiene un alto valor económico. La altura de las pilas oscila entre 3 y 4 m.

Sistemas cerrados:

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

Por último, en la Tabla 1.3 se indican las ventajas y desventajas de los distintos tipos de sistemas de compostaje.

Tabla 1.3. Ventajas y desventajas de los sistemas de compostaje.

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

1.3.4. Evaluación de la calidad del compost

La calidad de un compost está relacionada con el grado de madurez y estabilidad alcanzado, así como su composición química.

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

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

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

La diversidad y complejidad de los procesos que tienen lugar en el compostaje hace que cualquier parámetro evaluado pueda suministrar una información valiosa sobre las características y evaluación del material en función del tiempo. A continuación, se detallan diversos métodos de evaluación del grado de madurez de un compost:

A. Métodos de observación

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

B. Métodos basados en el estudio de la actividad microbiana

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

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

$$D.E.G = 3,166 - 0,011 (\text{Edad}) + 0,059 (\text{COT}) + 0,832 (\text{AE})$$

Siendo:

Edad = días de compostaje

COT = Carbono orgánico total

AE = azúcares extraíbles con agua caliente

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

DEG < 2,4 -> COMPOST MADURO

DEG > 2,7 -> COMPOST INMADURO

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

C. Métodos de análisis físicos y fisicoquímicos

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

1. Contenido de carbono orgánico hidrosoluble: García y col (1992) consideraron que un compost estaba maduro cuando el contenido de carbono orgánico hidrosoluble era <0,5%. Sin embargo, Hue y Liu, (1995) encontraron que el porcentaje de carbono orgánico del extracto acuoso tenía que ser <1% para establecer que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable, mientras que Bernal y col, (1998) propusieron que un compost estaba maduro cuando su contenido en carbono orgánico hidrosoluble era <1,7%.

2. Relación C/N en la muestra sólida. Es el criterio que más se ha empleado para determinar el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica. Algunos autores han propuesto una relación C/N por debajo de 20 como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poinceot, 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) o con un valor menor de 15 (Juste, 1980).

3. Relación C/N en el extracto acuoso. Teniendo en cuenta que la mayor parte de las reacciones que ocurren en el proceso de compostaje son transformaciones bioquímicas de la materia orgánica de los residuos, llevadas a cabo por los microorganismos cuyo metabolismo ocurre en fase acuosa, Hue y Liu (1995) consideraron que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable cuando la relación de C_{org} soluble en agua/ N_{org} total era <0,70; mientras que Bernal y col (1998) consideraron que el valor de esta relación tenía que ser <0,55.

4. Determinación del contenido en polisacáridos. Son progresivamente descompuestos por la microflora desarrollada en el curso de los distintos estadios de termogénesis y maduración. Esta fracción compuesta, fundamentalmente, por mono y disacáridos, desaparece por hidrólisis, mientras que otros polisacáridos lo hacen más lentamente debido a su estructura más resistente (celulosa) (Morel y col., 1979).

5. Variación de pH. Este parámetro ha sido utilizado como marcador del punto final del compostaje debido a que durante este proceso se produce alcalinización o evolución hacia niveles neutros.

6. Ausencia de compuestos indicadores de un medio reductor. Si al final del compostaje se detectase la presencia de compuestos reductores, tales como el amonio y ácido sulfhídrico, indicaría que durante el proceso ha existido un potencial redox inadecuado de los materiales, mostrando que las condiciones de la pila han sido predominantemente anaerobias y que los residuos están todavía en un período de descomposición. De este modo, Zucconi y Bertoldi (1987) establecieron que si el contenido en NH_4^+ en un compost era superior al 0,04% indicaba que éste no estaba lo suficientemente maduro. A este respecto, también Spohn (1978) desarrolló un test cualitativo rápido para determinar la presencia de NH_4^+ y H_2S , por medio de la aplicación de reactivos específicos a un papel de filtro humedecido con un extracto del compost.

7. Nitrificación. Bernal y col. (1998) establecieron que un compost estaba maduro cuando su relación NH_4/NO_3 era $<0,16$.

8. Estudio de la materia orgánica humificada. Los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los compost, a partir de los porcentajes de carbono extraíble (C_{ext}), carbono de ácidos húmicos (C_{AH}) y de los ácidos fúlvicos (C_{AF}) son los siguientes:

-Relación de humificación: $C_{\text{ext}}/C_{\text{OT}} \times 100$

-Índice de humificación: $C_{\text{AH}}/C_{\text{OT}} \times 100$

-Porcentaje de ácidos húmicos: $C_{\text{AH}}/C_{\text{ext}} \times 100$

-Relación de polimerización: $C_{\text{AH}}/C_{\text{AF}} \times 100$

Los valores mínimos de cada uno de estos índices para poder evaluar la madurez del compost, encontrados en el estudio de Roletto y col. (1985) son:

-Relación de humificación: $>7\%$

-Índice de humificación: $>3,5\%$

-Relación de polimerización: >1

Mientras que Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992b) propusieron los siguientes valores:

-Índice de humificación: $>13\%$

-Porcentaje de ácidos húmicos: $>62\%$

-Relación de polimerización: $>1,6$

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

9. Capacidad de intercambio catiónico. Si es >60 meq/100 g, sobre la materia orgánica, indica que el compost está maduro (Harada y col., 1981). Sin embargo, Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992b) encontraron que el valor de este parámetro tenía que ser >67 meq/100 g, sobre la materia orgánica, para considerar al compost maduro. Además, Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992b) propusieron la relación capacidad de cambio catiónica/carbono orgánico total (CCC/C_{OT}) como índice de madurez más fiable que la capacidad de cambio sola,

considerando que un compost es maduro cuando esta relación es $>1,9$; mientras García y col. (1992) encontraron un valor más alto, debía de ser $>3,5$.

10. Estudio del contenido de ácidos volátiles. El proceso de fermentación de la materia orgánica implica el desprendimiento de numerosas sustancias orgánicas volátiles, detectables por técnicas cromatográficas y cuya presencia en mayor o menor grado puede ser considerada como un índice de madurez. De Vleeschauwer y col. (1981) ponen de manifiesto la presencia de ácido acético, propiónico, isobutírico, etc. Según estos autores, una concentración de 300 ppm de acético inhibe el desarrollo vegetal y a partir de 2.000 ppm no se observa germinación.

D. Métodos biológicos

Los ensayos sobre vegetales son los más fiables ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectados por los métodos anteriores.

1. Test de germinación. Zucconi y col. (1981) utilizó semillas de *Lepidium sativum* para calcular un índice de germinación combinando el porcentaje de germinación y la longitud media de las raíces.

2. Test de crecimiento. Supone la evaluación del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el rye-grass, el maíz y la cebada.

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

-Estar basados en la evaluación de parámetros determinables por técnicas analíticas objetivas, sencillas, rápidas y reproducibles.

-No ha de verse afectada su reproducibilidad por manipulaciones y preparaciones previas.

Por último, hay que mencionar que la calidad del producto dependerá principalmente de los materiales de origen y de las condiciones de temperatura, humedad y aireación que existan durante el proceso.

1.3.5. Utilización del compost

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

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

Es necesario garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal o en la mejora de las características del suelo cumplan con dos requisitos fundamentales:

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

La valorización agrícola de los materiales estabilizados mediante compostaje puede realizarse mediante diferentes vías, atendiendo a unos objetivos concretos, entre los que cabe diferenciar su uso como enmienda orgánica o como sustrato de cultivo

Para cada uno de estos usos habrá que atender de forma específica a los factores más determinantes de su eficacia, tanto los derivados de las características del compost como los asociados al escenario edafoclimático y los requerimientos de los cultivos o vegetación. Asimismo, se deberá tener en cuenta el marco legislativo y normativa aplicable en cada caso. Sea cual sea la valorización agrícola, prevista para el compost, su uso y aplicación deberá atenderse a las buenas prácticas agrícolas, tal y como se indican en el RD 999/2017 y el RD 865/2010.

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

1.3.5.1. Uso como enmienda orgánica

Este uso pretende incrementar el contenido en sustancias húmicas del suelo como enmienda de corrección en suelos pobres o de mantenimiento en rotaciones o producciones agrícolas con balance húmico negativo.

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

Los programas de enmienda orgánica de corrección en los sistemas agrícolas se ejecutan generalmente a largo plazo, y consisten en realizar un conjunto de aplicaciones que permitirán un adecuado ajuste de las dinámicas biológicas y de fertilidad del suelo. Sin perjuicio de las limitaciones establecidas en el Real Decreto 999/2017, los productos fertilizantes elaborados con componente de origen orgánico se aplicarán al suelo siguiendo los *códigos de buenas prácticas agrarias*.

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

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

Es de sumo interés conocer tanto el contenido en materia orgánica total del compost, como su contenido en materia orgánica resistente (MOR) que rendirá sustancias húmicas al suelo y utilizar compost que tengan un contenido de nitrógeno orgánico y mineral bajo, y así evitar la contaminación por nitratos.

1.3.5.2. Uso como sustrato de cultivo

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

Para los cultivos sin suelo cuyo objetivo comercial es la puesta en el mercado de plantas en contenedor, se requiere de sustratos físico y químicamente activos, que retengan agua y que posean capacidad de intercambio catiónico. La agricultura intensiva necesita este tipo de insumos en grandes cantidades para el desarrollo de semilleros, viveros, horticultura intensiva protegida, etc. Su uso también se extiende en otros sectores como la jardinería y el paisajismo. El uso de materiales orgánicos como los compost en la elaboración de los sustratos de cultivo permite además del anclaje y crecimiento de la planta, intervenir en su alimentación.

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

a) Materias primas:

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

b) Proceso de compostaje:

- Reduciendo el tamaño de las partículas de los materiales de partida o del producto final mediante afinado o criba.

No obstante, el objetivo principal se basa en realizar un buen compostaje, tanto en la fase de descomposición como en maduración, para producir un compost estable y maduro (Bernal y col., 1998 y 2008).

1.4. ESTUDIOS PREVIOS SOBRE COMPOSTAJE DE SARMIENTOS

Se ha realizado una consulta bibliográfica respecto al compostaje de sarmientos de vid, encontrando 23 estudios al respecto, de los cuales 4 se realizaron en compostadores de 350 litros (Wang y Schuchardt, 2010; Bustamante y col., 2013; Morales y col., 2016; y Morales y col., 2017), uno en un sistema cerrado (Pardo y col., 2007) y el resto en pilas abiertas (Shuval y

col., 1991; Kostov y col., 1996; Maniadakis y col., 2004; Manios, 2004; Bernal-Vicente y col., 2012; Bustamante y col., 2012; Blaya y col., 2013; Matei y col., 2016; Malcheva y col., 2018; Viel y col., 2018; Yordanova y col., 2018; Abou y col., 2019; Hernández-Lara y col., 2021; Pérez-Murcia y col., 2021; Bignami y col., 2022; Hernández-Lara y col., 2022).

Para la comparación con los datos obtenidos en el presente trabajo solamente se han tenido en cuenta los estudios realizados en condiciones similares (pilas abiertas). En estos se han compostado los sarmientos solos (Kostov y col., 1996; Bernal-Vicente y col., 2012; Blaya y col., 2013) o mezclados con estiércoles (Manios, 2004; Matei y col., 2016; Abou y col., 2019), digestato de materiales vegetales y estiércol (Bustamante y col., 2012; Bignami y col., 2022), digestato de aguas residuales (Shuval y col., 1991) y residuos agroindustriales (Maniadakis y col., 2004; Malcheva y col., 2018; Viel y col., 2018; Yordanova y col., 2018; Hernández-Lara y col., 2021; Pérez-Murcia y col., 2021; Hernández-Lara y col., 2022).



2. OBJETIVOS

Las actividades humanas son generadoras de grandes cantidades de residuos orgánicos, sobre todo en sectores como la agricultura, ganadería, industria agroalimentaria y en entornos urbanos (RSU, lodos de depuración de aguas residuales, restos de poda).

Una de las prioridades de la política de medio ambiente de la Unión Europea es la gestión de los residuos generados ya que, a pesar de ser una fuente potencial de contaminación, pueden llegar a ser un valioso recurso secundario. Por tanto, la política de gestión de residuos de la UE se ha desarrollado teniendo en cuenta tres principios básicos como son impedir la generación de residuos, recuperar los ya generados y eliminarlos de forma segura.

El compostaje de los residuos orgánicos supone una alternativa para el reciclado y aprovechamiento de este tipo de materiales. Este proceso es interesante ya que reduce el volumen de los residuos y genera un producto estabilizado, el compost, que puede utilizarse con fines agrícolas (como enmienda orgánica o fertilizante y para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos), y permite recuperar y aprovechar la materia orgánica y los nutrientes que contienen estos materiales, y reducir el uso de la fertilización inorgánica y los problemas asociados a ella (salinización de suelos, contaminación de acuíferos, pérdida de propiedades físicas, etc.). Además, el compost se puede usar en la formulación de sustratos de cultivo lo que permite la disminución del uso de turba, recurso no renovable, la explotación de la cual genera problemas ambientales tales como emisiones de gases de efecto invernadero debidas a su extracción y mineralización.

En el presente trabajo se plantea como objetivo principal el estudio de la valorización mediante co-compostaje de sarmientos de vid, resultantes de la producción de plantones de vid, con la adición de residuos de la industria agroalimentaria frutícola, destrío de cítrico y caqui, y de la industria ganadera, gallinaza, utilizando el sistema de compostaje de pila móvil abierta, con volteos periódicos, con la finalidad de mejorar su gestión y obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido, así como estudiar la valorización agronómica y ambiental de los compost obtenidos para diferentes usos. También se investiga la minimización en el uso de estiércol mediante la sustitución por otros materiales alternativos como son los destríos agroindustriales.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterización inicial de los residuos utilizados para el proceso.
2. Desarrollo de tres pilas de co-compostaje mediante el sistema de pila abierta móvil, con diferente composición según la pila:
 - Pila GVA 175: sarmiento y gallinaza
 - Pila GVA 176: sarmiento, destrío de cítrico, destrío de caqui y gallinaza
 - Pila GVA 177: sarmiento, destrío de cítrico y gallinaza
3. Seguimiento y control de los parámetros relativos al propio proceso de compostaje, a nivel de temperatura, humedad y aireación.

4. Estudio de la evolución de parámetros fisicoquímicos y químicos de las mezclas de residuos a lo largo del proceso de compostaje, así como del producto final obtenido (compost).
5. Estimación económica del valor de los productos obtenidos.



3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este trabajo experimental se pretende estudiar el proceso de co-compostaje, mediante pila móvil abierta con ventilación natural y con volteos periódicos, de sarmientos de vid junto con otros residuos como gallinaza y restos vegetales procedentes del destrío de cítrico y del destrío de caqui, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido, y establecer sus posibles usos.

Este trabajo está incluido en el proyecto Agrocompostaje que es una iniciativa de la Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica de la Generalitat Valenciana y la Universidad Miguel Hernández de Elche para desarrollar un entorno integral a largo plazo de investigación, experimentación y transferencia en compostaje. Incluye acciones de formación, acompañamiento y demostración.

Para el desarrollo del estudio, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en 4 fases:

Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.

Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.

Fase 3: Desarrollo del sistema de compostaje mediante tres pilas volteadas

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

Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar

En primer lugar, se pretende conocer la naturaleza de los residuos que van a intervenir en el proceso de co-compostaje, con el fin de establecer una estrategia de compostaje adecuada en función de la tipología de estos materiales. En este ensayo se han caracterizado cuatro materiales distintos:

1. Sarmiento de vid: residuo de origen vegetal originado con la poda de cepas madre de *Vitis vinífera* para la obtención de yemas para injertar y generar nuevos plantones para la producción de uva de mesa o vino. Los sarmientos utilizados (Figura 3.1) los proporciona la empresa Viveros Plantvid, S.L., ubicada en Aiello de Malferit, provincia de Valencia. Esta empresa genera 300 t/año de sarmientos como resultado de su actividad de producción de plantones. Este residuo tiene escaso valor fertilizante debido a su elevado contenido en carbono y escaso en nitrógeno. Por ello, la mayoría de los productores no lo aprovechan como enmienda orgánica, sino que se quema, lo que conlleva la emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes.

Para mejorar su compostaje, debido a su elevada relación C/N, es necesario mezclarlo con otros materiales complementarios que aporten nitrógeno y equilibren la relación C/N de la mezcla. Los sarmientos utilizados fueron triturados en el vivero para disminuir su tamaño de partícula.

2. Destrío de cítrico: residuo de origen vegetal procedente de la actividad de la cooperativa COFRUDECA, COOP.V., situada en Bélgida (Valencia). Este residuo estuvo compuesto por una mezcla homogénea de destrío de limón, naranja y pomelo, junto con algunas hojas y tallos (Figura 3.2).

3. Destrío de caqui: residuo de origen vegetal constituido por destrío de caqui junto con algunas hojas y tallos (Figura 3.3). Procede de la cooperativa COFRUDECA, COOP.V.

4. Gallinaza: residuo de origen animal que resulta de la crianza de pollos de engorde en una explotación avícola de Aielo de Malferit (Figura 3.4). La gallinaza tiene buenas propiedades desde el punto de vista agronómico por sus contenidos de macronutrientes (N, P, K) y MO, pudiendo usarse como enmienda orgánica.



Figura 3.1. Sarmiento.



Figura 3.2. Destrío de cítrico



Figura 3.3. Destrío de caqui.



Figura 3.4. Gallinaza.

Muestreo de los materiales iniciales:

Previamente al inicio del proceso de compostaje, en las diferentes empresas se tomaron muestras de los residuos propuestos para la elaboración de las mezclas. De cada residuo se cogió una muestra representativa a través del método del cuarteo para su análisis inicial en el laboratorio.

Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar

Las proporciones de los residuos para cada pila se establecieron siguiendo el criterio de la relación C/N, además de tener en cuenta la densidad y humedad de los materiales. Con ello se quiso asegurar que las mezclas a compostar tuvieran unas adecuadas características físicas, fisicoquímicas y químicas, condicionantes del proceso de compostaje, para garantizar un correcto desarrollo del proceso.

Fase 3: Desarrollo del sistema de compostaje mediante tres pilas volteadas

Una vez establecida la mezcla de materiales a compostar, se desarrolla el sistema de compostaje en pilas móviles de 2 m de anchura; 1,50-1,80 m de altura y 3-6 m de longitud, donde se controlan las condiciones de entorno a nivel de temperatura, aireación y humedad en las que deberá estar comprendida la mezcla a compostar en el sistema para el correcto desarrollo del proceso. La aireación se controla mediante volteos periódicos realizados con retroexcavadora y mezcladora, la humedad de forma cualitativa con la técnica del puño y con riego manual, y la temperatura con mediciones periódicas tomadas con sonda de temperatura realizadas por personal de Viveros Plantvid, encargados de la toma de datos.

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

En las muestras de los materiales iniciales se determinó:

- Densidad aparente
- Humedad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica total (MO)
- Carbono orgánico total (Corg)
- Nitrógeno total (NT)
- Relación Corg/NT
- Polifenoles hidrosolubles
- Sodio
- Macronutrientes, micronutrientes y metales pesados: P, K, Fe, CaO, MgO, S, Mn, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr

Se estudia la evolución de la mezcla durante todo el proceso, desde el inicio hasta la obtención del compost maduro, monitoreando diferentes parámetros indicativos del proceso de compostaje:

- Asociados al propio proceso de compostaje: temperatura, humedad y aireación.
- Asociados a la evolución de la materia orgánica: materia orgánica total, carbono orgánico total, pérdida de la materia orgánica, nitrógeno total, relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total, carbono extraíble, carbono de ácidos húmicos, carbono de ácidos fúlvicos y polifenoles hidrosolubles.
- Asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble: pH y conductividad eléctrica.
- Asociados a la presencia y evolución de diferentes componentes: nutrientes para plantas y Na, de interés para la nutrición vegetal a nivel agronómico, y metales pesados.
- Asociados a la madurez del compost: índice de germinación, índices de humificación y test de autocalentamiento.

3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.2.1. Características de los residuos utilizados

En el presente trabajo se han utilizado cuatro residuos diferentes: sarmientos de vid, destrío de cítrico (limón, naranja y pomelo), destrío de caqui y gallinaza. Los sarmientos proceden de la empresa Viveros Plantvid, S.L.; el destrío de cítrico y caqui, de la cooperativa COFRUDECA, COOP.V., y la gallinaza, de una granja de pollos de engorde de Aiello de Malferit. Las características de los ingredientes utilizados en los procesos de co-compostaje ensayados se exponen a continuación en la Tabla 3.1.

La densidad aparente (Da) del sarmiento es baja (0,075 kg/l) lo cual le proporciona buenas propiedades como material estructurante para compostaje, pero podría suponer un problema para su gestión, encareciéndola, si se tuviera que transportar. El resto de residuos tienen DA superiores.

Respecto a la humedad, el sarmiento utilizado en este ensayo presenta una humedad baja (25,3%) como corresponde a este tipo de material. La gallinaza tiene una humedad media (39,8%) y el destrío de cítrico y caqui presentan humedades elevadas (87,6 y 81,1%, respectivamente) por lo cual estos materiales se complementan con los sarmientos, pudiendo compensar la humedad de las mezclas, aunque habrá que aportar agua para que alcancen la humedad óptima. El contenido óptimo de humedad para la actividad de los microorganismos está situado entre un 50 y un 60%. Cuando la humedad es baja, inferior al 40%, disminuye la actividad microbiana y el proceso se ralentiza, y con valores superiores al 70% se dificulta el intercambio de gases y la difusión de oxígeno creándose zonas anaerobias que impiden el desarrollo correcto del proceso.

En cuanto al pH, el sarmiento tiene un pH ligeramente básico (7,3), la gallinaza es ligeramente ácida (6,6) y el destrío de cítrico y caqui presentan un pH bastante ácido (3,9).

Referente a la salinidad, la gallinaza posee una salinidad muy elevada (9,99 dS/m) mientras que en el resto de residuos el contenido salino es moderado.

Tal como puede observarse, los materiales presentan altos contenidos en materia orgánica, cercanos al 90% para los sarmientos y el destrío de cítrico, del 95,5 % en el destrío de caqui y del 83,5% para la gallinaza. Los contenidos de carbono orgánico (Corg) también son elevados entre 40 y 45,8%, siendo los sarmientos los que contienen mayor Corg, seguido por el destrío de caqui (42,6%), la gallinaza (40,7%) y el destrío de cítrico (40%).

Respecto a la relación Corg/NT, la de los sarmientos es alta, cercana a 60. Con una relación C/N elevada la actividad biológica no puede desarrollarse correctamente por lo cual se ralentiza la etapa de descomposición, además de no alcanzar temperaturas elevadas necesarias para la higienización de la mezcla. Por ello, es recomendable mezclar los sarmientos con otros materiales con relación Corg/NT inferior, como el destrío de cítrico (29,8), el destrío de caqui (48,4) y la gallinaza (11,6), para equilibrar dicha relación y la mezcla inicie el proceso con una relación C/N cercana a la óptima de 25-35.

Tabla 3.1. Características de los materiales utilizados en los procesos de compostaje (datos expresados sobre materia seca).

| Origen: | Agrícola | Agroindustrial | Agroindustrial | Ganadero |
|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| Municipio: | Aielo de Malferit | Bélgida | Bélgida | Aielo de Malferit |
| Tipo de material: | Sarmiento (S) | Destrío cítrico (DC) | Destrío caqui (DQ) | Gallinaza (G) |
| Parámetros: | | | | |
| DA (kg/l) | 0,075 | 0,448 | 0,666 | 0,312 |
| Humedad (%) | 25,3 | 86,7 | 81,1 | 39,8 |
| pH | 7,3 | 3,9 | 3,9 | 6,6 |
| CE (dS/m) | 1,25 | 3,56 | 3,03 | 9,99 |
| MOT (%) | 89,9 | 87,7 | 95,5 | 83,5 |
| Corg (%) | 45,8 | 40,0 | 42,6 | 40,7 |
| NT (%) | 0,8 | 1,3 | 0,9 | 3,5 |
| Corg/NT | 59,3 | 29,8 | 48,4 | 11,6 |
| Na (g/kg) | 1,38 | 0,11 | 0,09 | 1,50 |
| K (g/kg) | 28,4 | 10,6 | 11,4 | 23,9 |
| P (g/kg) | 1,12 | 0,80 | 1,05 | 7,85 |
| PH (mg/kg) | 1959 | 13102 | 4252 | 7322 |
| CaO (%) | - | 1,90 | 0,14 | 2,18 |
| MgO (%) | - | 0,26 | 0,10 | 0,81 |
| S (%) | - | 0,10 | 0,06 | 0,30 |
| Fe (mg/kg) | - | 945 | 37,4 | 453 |
| Mn (mg/kg) | - | 31,2 | 14,6 | 288 |
| Cr (mg/kg) | - | 5,89 | 0,26 | 7,51 |
| Co (mg/kg) | - | 0,54 | 0,05 | 0,44 |
| Ni (mg/kg) | - | 2,14 | 1,71 | 3,22 |
| Cu (mg/kg) | - | 15,6 | 0,85 | 32,5 |
| Zn (mg/kg) | - | 21,4 | 3,18 | 1566 |
| Cd (mg/kg) | - | 0,08 | 0,01 | 0,32 |
| Pb (mg/kg) | - | 1,42 | 0,18 | 0,94 |

DA: densidad aparente; CE: conductividad eléctrica; MOT: materia orgánica total; Corg: carbono orgánico total; NT: nitrógeno total; PH: polifenoles hidrosolubles.

El contenido de nutrientes N y P es mayor en la gallinaza (3,5% y 7,8 g/kg, respectivamente) que en el resto de materiales (0,8% y 1,12 g/kg en los sarmientos), mientras que el contenido en K es mayor en sarmientos y gallinaza que en los destríos. El contenido de

Na es similar en los sarmientos y la gallinaza (1,38 y 1,50 g/kg, respectivamente) y escaso en ambos destríos.

El contenido de polifenoles es muy alto en el destrío de cítrico, 13102 mg/kg. El valor más bajo en polifenoles se obtuvo para el sarmiento, 1959 mg/kg.

Con relación a los metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr), todos los materiales complementarios tienen cantidades muy inferiores a los límites máximos permitidos en los productos elaborados con materias primas de origen orgánico, determinados por el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado

El proceso de compostaje objeto de este estudio se ha llevado a cabo en una finca localizada en Aielo de Malferit, propiedad de Viveros Plantvid, S.L., sobre suelo compactado no impermeabilizado. El suelo se ha acondicionado para que esté lo más compacto posible y así evitar que durante el trabajo con los materiales iniciales y futuros volteos se mezcle suelo.

Para realizar el montaje de las pilas se utilizó una retroexcavadora con pala de 0,6 m³ de volumen (Figura 3.5), así como herramientas manuales como palas.

En este sistema de compostaje la aireación de las pilas estuvo garantizada mediante volteos periódicos realizados con una mezcladora, modelo kingnT170, que mezcla y tritura el material simultáneamente (Figuras 3.5 y 3.6).

El riego de las pilas se hizo manualmente mediante una manguera, al principio del experimento y a demanda durante el periodo de degradación.

El seguimiento de las temperaturas de las pilas lo realizó el personal de Viveros Plantvid, S.L. de forma semanal, mediante un termómetro con sonda con el que se tomaron medidas en cuatro puntos diferentes alrededor de las pilas para obtener un promedio de datos representativos. Las medidas se enviaron al equipo de la UMH encargado del proyecto de Agrocompostaje para su análisis y posterior toma de decisiones sobre los volteos y riegos.



Figura 3.5. Maquinaria utilizada para el montaje y volteo de las pilas (retroexcavadora y mezcladora kingnT170).



Figura 3.6. Detalle del proceso de volteo y mezclado de las pilas.

3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se comentan los procesos y pasos seguidos para la realización de los procesos de compostaje, la preparación de las mezclas a compostar, la conformación de las pilas, así como su seguimiento analítico a lo largo del tiempo de experimentación. Por ello, se presenta este desarrollo experimental en diferentes pasos:

1. Cálculo y preparación de las mezclas a compostar.
2. Seguimiento de los procesos de compostaje.
3. Muestreo del material.

3.3.1. Cálculo y preparación de las mezclas a compostar

Tal como se ha comentado anteriormente, el experimento consistió en estudiar la idoneidad de la utilización de sarmientos de vid en procesos de compostaje. Para ello se prepararon tres pilas de diferente composición con sarmientos, residuo principal del estudio, junto con gallinaza, destrío de cítrico y de caqui:

- Pila GVA 175 = Sarmientos + Gallinaza
- Pila GVA 176 = Sarmientos + Gallinaza + Destrío de cítrico + Destrío de caqui
- Pila GVA 177 = Sarmientos + Gallinaza + Destrío de cítrico

La cantidad de cada material a mezclar se calculó en función de la relación Corg/NT, la humedad y la densidad aparente de cada ingrediente.

Para el cálculo de la relación Corg/NT se utilizaron las expresiones siguientes:

Ecuación (1): $P = A + B + C + D$

Ecuación (2):

$$C/N = \frac{A * (\%C_A * \%MS_A) + B * (\%C_B * \%MS_B) + C * (\%C_C * \%MS_C) + D * (\%C_D * \%MS_D)}{A * (\%N_A * \%MS_A) + B * (\%N_B * \%MS_B) + C * (\%N_C * \%MS_C) + D * (\%N_D * \%MS_D)}$$

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.

D = Peso del componente D, en kg.

C_A, C_B, C_C, C_D = Carbono (%) de componente A, B, C y D, respectivamente.

N_A, N_B, N_C, N_D = Nitrógeno (%) de componente A, B, C y D, respectivamente.

MS = Materia seca (%) del material A, B, C o D.

En la Tabla 3.2 se expone la proporción de cada componente en las mezclas y las cantidades tratadas. Con estas cantidades se obtuvo una relación Corg/NT de 24,6 para la pila GVA 175 y 24,7 para la GVA 176, cercanas al rango óptimo de 25-35 para el buen desarrollo del proceso, y 26,3 para la GVA 177.

Tabla 3.2. Proporción de ingredientes de las pilas y cantidades tratadas.

| Mezcla | Sarmiento (S) | Destrío cítrico (DC) | Destrío caqui (DQ) | Gallinaza (G) |
|-----------------------------|---------------|----------------------|--------------------|---------------|
| Compost GVA 175 | | | | |
| % vol. | 81,6 | | | 18,4 |
| % s.m.f. | 51,6 | | | 48,4 |
| % s.m.s. | 56,9 | | | 43,1 |
| Kg procesados fresco | 459 | | | 430,5 |
| Compost GVA 176 | | | | |
| % vol. | 50,2 | 25,8 | 3,1 | 21,0 |
| % s.m.f. | 15,8 | 48,3 | 8,5 | 27,4 |
| % s.m.s. | 32,8 | 16,7 | 4,5 | 46,0 |
| Kg procesados fresco | 517,5 | 1585,9 | 279,7 | 898,6 |
| Compost GVA 177 | | | | |
| % vol. | 56,4 | 19,0 | | 24,6 |
| % s.m.f. | 20,7 | 41,9 | | 37,3 |
| % s.m.s. | 35,9 | 12,0 | | 52,1 |
| Kg procesados fresco | 774 | 1566 | | 1395 |

Vol: volumen; s.m.f: sobre materia fresca; s.m.s: sobre materia seca.

Una vez establecidos los porcentajes de mezcla de los residuos sujetos a compostaje, se procedió al montaje de las pilas. Se colocó el material a compostar directamente sobre el terreno en capas intercaladas (sistema sándwich) según la composición de cada pila, depositando sobre el suelo una primera capa de sarmientos triturados, seguida de una segunda de gallinaza y, en el caso de la pila GVA 176 y la GVA 177, terminando con otra de destrío de caqui y de cítrico o solamente de cítrico. Las capas de residuos se aplastaron con la retroexcavadora para triturar los materiales, se humedecieron mediante riego manual y, posteriormente, se realizó un volteo para empezar el proceso con una mezcla inicial lo más homogénea posible en todas las pilas (Figura 3.7).

Se formaron tres pilas longitudinales de 2 m de base, una altura de 1,5-1,8 m y 3-6 m de longitud, dependiendo de los materiales aportados (Figura 3.8 y Tabla 3.3). La cantidad de residuos tratados en la pila GVA 175 fue de 889,56 kg, en la GVA 176 de 3281,7 kg y en la GVA 177 de 3735 kg. La cantidad de cada residuo en las diferentes pilas se puede consultar en la Tabla 3.2. El volumen total de residuos utilizados fue de 7,5 m³ para la pila GVA 175; 13,74 m³ para la GVA 176 y 18,3 m³ para la GVA 177.

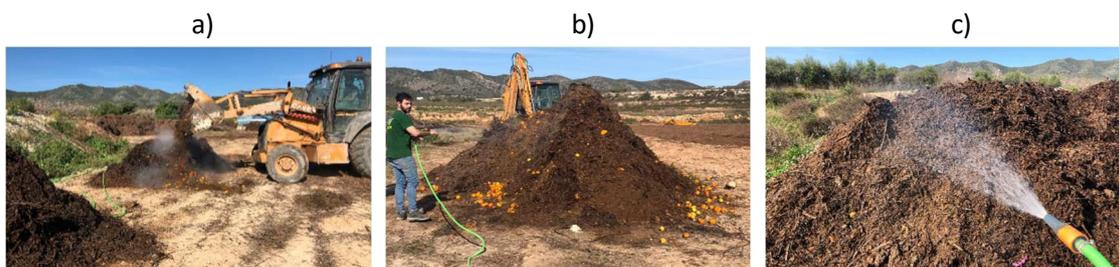


Figura 3.7. Montaje de las pilas (a) y riego inicial (b y c).



Figura 3.8. Pilas al inicio del experimento (de derecha a izquierda: GVA 175, GVA 176 y GVA 177).

Tabla 3.3. Dimensiones, volumen y peso iniciales de las pilas estudiadas.

| Pila | Anchura (m) | Altura (m) | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso (kg) |
|---------|-------------|------------|--------------|---------------------------|-----------|
| GVA 175 | 2 | 1,5 | 3 | 7,5 | 889,6 |
| GVA 176 | 2 | 1,7 | 4 | 13,7 | 3281,7 |
| GVA 177 | 2 | 1,8 | 6 | 18,3 | 3735,0 |

3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje

Una vez elaboradas las pilas se empezó el seguimiento realizado durante el proceso de compostaje basado en el control de parámetros relacionados con la evolución de dicho proceso como son la temperatura, la humedad y la aireación.

La temperatura de las pilas se registró semanalmente, mediante un termómetro con sonda y siempre por la mañana. Se midió en cuatro puntos a lo largo de la sección longitudinal de las pilas y a una altura que correspondía con el centro de la masa en cada pila.

La humedad fue controlada de forma cualitativa mediante la técnica del puño, que consiste en coger una muestra de material de la zona central de las pilas y apretarla con la mano. Si caen unas gotas y al abrir la mano el material queda apelmazado sin disgregarse y la mano está mojada, la humedad es la correcta. En caso contrario, debe corregirse mediante riego. Cuando la medida de la humedad se consideró insuficiente, las pilas se regaron hasta alcanzar la humedad adecuada. Se realizaron riegos durante los primeros 31 días y en los días 55, 58 y 83 del proceso. También se llevó un registro de la precipitación local de la zona de compostaje mediante un pluviómetro.

Se realizaron volteos cuando se detectó un descenso notable de la temperatura de las pilas con la finalidad de mejorar la aireación y proporcionar el oxígeno necesario para reactivar

el proceso, a la vez que se homogeneizan las pilas. Las pilas se voltearon tres veces desde el inicio del proceso, durante la fase bio-oxidativa, los días 15, 48 y 122 (Figura 3.9).

La fase bio-oxidativa del compostaje se consideró finalizada cuando la temperatura de las pilas fue similar a la ambiental y no se observó reactivación tras el volteo. La duración de esta fase fue de 169 días en las tres pilas. Finalmente, las pilas se dejaron madurar durante aproximadamente un mes y una semana (38 días). En esta última etapa no se realizaron volteos, riegos ni medición de la temperatura.



Figura 3.9. Volteo final (día 122).

3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas

El muestreo de las pilas se realizó al inicio del proceso (día 0), al final de la etapa bio-oxidativa (día 168) y tras la etapa de maduración (día 206).

Las muestras se obtuvieron a partir de un número representativo de submuestras tomadas en diferentes puntos de las pilas, considerando todo el perfil (desde la parte superior hasta la parte inferior de las pilas) y a tres profundidades diferentes de modo que la muestra final tomada fuese representativa de la totalidad del material en el momento de la recogida. El número de submuestras a tomar depende del peso de la pila (Reglamento (CE) nº 2003/2003):

- Pilas con peso < 2,5 toneladas, se toman 7 submuestras.
- Pilas con peso > 2,5 toneladas y < 80 toneladas se toman $(20 \times \text{toneladas de la pila})^{1/2}$

El peso de las pilas fue de aproximadamente 890 kg en la GVA 175; 3,3 t en la GVA 176 y 3,74 t en la GVA 177. Por tanto, se tomaron 7 submuestras en la GVA 175, 8 submuestras en la GVA 176 y 8,5 en la GVA 177, en cada muestreo. Las diferentes submuestras de cada pila se homogeneizaron y se tomó una muestra final, mediante el método de cuarteo. Previamente a su análisis las muestras de compost se secaron con estufa de aire a 60°C y se molieron a 0,5 mm para su análisis.

En los materiales iniciales se analizó la densidad aparente, la humedad, el pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, el carbono orgánico total, el nitrógeno total, la relación Corg/NT, los polifenoles hidrosolubles y el contenido de Na, P, K, CaO, MgO, S, Fe y Mn y metales pesados como Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb. Todos los análisis se realizaron por duplicado.



Figura 3.10. Muestreo final.

En las muestras de compostaje se determinaron los parámetros anteriores y además la pérdida de MOT, el carbono extraíble, el carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos y el índice de germinación (IG). Todos los análisis se realizaron por duplicado. En la Tabla 3.4 se muestra el cronograma del manejo realizado durante el proceso de compostaje.

Tabla 3.4. Calendario de las operaciones realizadas durante el experimento.

| Fecha | Día | Operación realizada |
|------------|-----|---|
| 11/02/2020 | 0 | Montaje de las pilas Toma de muestra de todas las pilas Riego |
| 13/02/2020 | 2 | Riego |
| 14/02/2020 | 3 | Riego |
| 20/02/2020 | 9 | Riego |
| 24/02/2020 | 13 | Riego |
| 26/02/2020 | 15 | Riego y volteo |
| 27/02/2020 | 16 | Riego |
| 03/03/2020 | 21 | Riego |
| 04/03/2020 | 22 | Riego |
| 06/03/2020 | 24 | Riego |
| 09/03/2020 | 27 | Riego |
| 11/03/2020 | 29 | Riego |
| 13/03/2020 | 31 | Riego |
| 30/03/2020 | 48 | Volteo |
| 06/04/2020 | 55 | Riego |
| 09/04/2020 | 58 | Riego |
| 04/05/2020 | 83 | Riego |
| 12/06/2020 | 122 | Volteo |
| 28/07/2020 | 168 | Toma de muestras al final de la fase bio-oxidativa |
| 04/09/2020 | 206 | Toma de muestras al final de la fase de maduración |

3.4. PARÁMETROS ANALIZADOS Y MÉTODOS ANALÍTICOS

Los siguientes análisis se realizaron en el laboratorio del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Preparación de la muestra

Las muestras de los ingredientes, de las mezclas y de los compost se secan en una estufa de aire forzado a 105°C. Posteriormente se muelen en un molino y se tamizan a través de una malla de 0,5 mm de luz.

Densidad aparente

Se determina utilizando una jarra de medición tarada. La jarra se llena de la muestra húmeda y se pesa el contenido. Realizamos varias mediciones tarando la jarra de medición en cada una y calculamos la densidad aparente dividiendo el peso medio obtenido entre el volumen de la jarra.

Humedad

Se considera como humedad el porcentaje de agua con respecto a muestra húmeda, por diferencia de peso entre material húmedo y seco.

Medida del pH

Se mide sobre la suspensión acuosa obtenida por agitación mecánica durante dos horas de la proporción 1:10, sólido/líquido, con un pH-metro.

Conductividad eléctrica

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

Materia orgánica total

Se toma como materia orgánica total la pérdida de peso por calcinación a 430°C. Se determina siguiendo el método de Navarro y col. (1993). La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca.

Carbono orgánico total

Medida del dióxido de carbono producido al quemar una muestra a 1020°C en un analizador elemental, previa destrucción de carbonatos (Navarro y col., 1991).

Pérdida de materia orgánica

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

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

Nitrógeno total

Se realiza quemando la muestra a 1020°C en un analizador elemental (Paredes, 1997).

Polifenoles solubles

Se determinan con el método propuesto por Beltrán y col. (1999), realizando una extracción acuosa previa (relación 1:20, p/v).

Determinación de elementos totales

Los elementos totales se determinan mediante espectrometría de emisión por plasma (ICP) tras digestión ácida de las muestras, con ácido nítrico contrato y agua oxigenada al 33%, en microondas. La técnica de ICP está basada en la medición de la emisión atómica por medio de una técnica de espectroscopia óptica. Las muestras se nebulizan y el aerosol formado se transporta hasta la antorcha de plasma en donde tiene lugar la excitación electrónica. Un plasma de radiofrecuencia acoplado inductivamente (ICP) genera los correspondientes espectros de líneas de emisión atómicas. Los haces de luz son dispersados por un espectrómetro de red de difracción y los detectores se encargan de medir las intensidades de las líneas. Las señales originadas en los detectores se procesan y controlan mediante un sistema informático.

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 con H₂SO₄ (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}).

Índice de germinación

Se determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y la longitud de las raíces de semillas de *Lepidium sativum* L., incubadas sobre un extracto acuoso de compost (Zucconi y col., 1985).

3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

El tratamiento estadístico aplicado a los datos obtenidos se realizó mediante un análisis estadístico ANOVA de doble vía, que permitiera evaluar el efecto de las variables consideradas:

- Tiempo de compostaje (0, 168 y 206 días)
- Mezcla de compostaje (GVA 175, GVA 176 y GVA 177)

En todos los parámetros determinados se estudió si la evolución a lo largo del proceso de compostaje fue significativa y si hubo diferencias entre las tres mezclas empleadas. En el caso en el que la *F*-ANOVA mostró significación se empleó la prueba Tukey B como contraste post-hoc para evaluar las diferencias entre las medias específicas, mostrándose en los resultados mediante el empleo de letras para una probabilidad del 95% ($P < 0,05$).



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El compostaje como proceso dinámico y complejo, desde el punto de vista de la sucesión de los microorganismos que actúan, presenta una temperatura, humedad, pH, asimilabilidad de los nutrientes y actividad biológica en constante cambio. Por ello, deben conocerse las posibles variaciones de cada parámetro para interpretarlas correctamente.

A continuación, se analiza la evolución de los parámetros más relevantes en cada una de las tres pilas del presente estudio.

4.1. EVOLUCIÓN DE LOS FACTORES RELATIVOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTAJE

4.1.1. Temperatura

Los residuos orgánicos contienen de forma natural microorganismos que al disponer de las condiciones adecuadas se reproducen, favorecen la aparición de una sucesiva diversidad bacteriana y fúngica (mesófila y termófila) con variedad de funciones y actividades sinérgicas. Estos microorganismos son los responsables del aumento de temperatura durante el proceso de compostaje. El desarrollo de la actividad biológica genera calor que es retenido, ya que los residuos se consideran una masa auto aislante, provocando un incremento de temperatura. Por ello, la temperatura se considera uno de los principales parámetros de seguimiento en el proceso de compostaje (Viel y col., 2018). La temperatura controla el proceso debido a su efecto sobre la tasa metabólica microbiana y la estructura de la población, lo que define las diferentes fases del compostaje, como son las fases mesófila, termófila y de maduración (Hernández-Lara y col., 2022).

El aumento de temperatura es de particular importancia en lo que se refiere a la inactivación de microorganismos patógenos, de origen humano, animal o vegetal, huevos o larvas de insectos y semillas de malas hierbas que portan algunos residuos orgánicos como los lodos biológicos de depuración, los residuos ganaderos o los residuos municipales, y que se consideran perjudiciales para el uso posterior del compost. Las altas temperaturas, superiores a 55°C durante un determinado periodo de tiempo, en la fase termófila son esenciales para alcanzar una buena acción de higienización y así la destrucción de los agentes nocivos (Morales y col., 2016). La higienización ha de impedir el crecimiento y diseminación de patógenos durante el compostaje, destruir los inicialmente presentes y generar un producto final no recolonizable por dichos patógenos.

Además, los microorganismos juegan un papel clave en la transformación de las materias primas en compost (Morales y col., 2017). La temperatura es uno de los factores que influye de forma más crítica sobre la velocidad de descomposición de la materia orgánica durante el compostaje, produciéndose la descomposición de los materiales de forma más rápida en el rango de temperatura termófila (Morales y col., 2016), entre 45°C y 55°C se mejora la tasa de degradación (Viel y col., 2018). Si la temperatura es superior a 59°C se inhibe el desarrollo de gran parte de los microorganismos o provoca su eliminación, con lo que se reduce la tasa de descomposición microbiana. Mantener temperaturas superiores a 70°C puede inactivar a los microorganismos responsables del proceso, y no llegar a los valores dados como óptimos implica no asegurar la higienización del producto.

El perfil de temperatura es un reflejo de la actividad microbiana mediante el cual se puede evaluar si el proceso está evolucionando de forma correcta (Morales y col., 2017). Si la

temperatura no aumenta en la mezcla o si disminuye antes de que la materia orgánica más biodegradable se haya terminado de descomponer puede indicar falta de aireación, humedad incorrecta o escasez de elementos nutritivos. Mientras que un aumento de temperatura debe interpretarse como un buen desarrollo del proceso aeróbico.

Cuando el perfil térmico no sigue la pauta esperada se puede corregir mediante operaciones de volteo. Después de los volteos se produce un aumento de temperatura como consecuencia de la degradación del material externo de la pila. Esto se debe a la reactivación de los microorganismos que disponen de nuevos principios inmediatos para su metabolismo procedentes de la capa superficial y de las zonas cercanas a la ventilación de la pila y que prácticamente no habían sido degradados a causa de la escasa humedad de los materiales en la zona periférica de la pila o por el enfriamiento de la masa cercana a la zona de ventilación (Stentiford y col., 1985). Estas secuencias de variación de temperatura con los volteos generan cada vez un menor incremento de temperatura debido a la presencia cada vez menor de materia orgánica de fácil degradación, en la cual se basa el aumento de microorganismos no especializados.

En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestra la evolución de la temperatura de las pilas GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente, durante el proceso de compostaje de las mezclas, así como la evolución térmica acumulada (índice EXI^2), la temperatura ambiental y los días en que se realizaron los volteos. En la Tabla 4.1 se muestran diversos parámetros térmicos del proceso durante la fase bio-oxidativa como el índice exotérmico (índice EXI^2), la temperatura máxima, la mínima y la promedio, el número de días con fase termófila, entre otros.

Tal y como se indica en la Tabla 4.1, la duración de la fase bio-oxidativa de los procesos de compostaje desarrollados fue de 169 días, debido a la gran cantidad de materia orgánica disponible en las pilas. Dicha fase se detuvo en ese momento para evitar reducir la cantidad de materia orgánica de los compost finales por debajo del 35%, contenido mínimo fijado en el Real Decreto 999/2017 para los compost, y coincidió con el descenso de la temperatura promedio de las tres pilas por debajo de 55°C después del último volteo.

Según se observa en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, en las pilas elaboradas la fase termófila ($T > 40^\circ\text{C}$) se alcanzó desde el inicio y fue más prolongada en la GVA 176 con 138 días, seguida por la GVA 177 con 125 días y la GVA 175 con 114 días. Este hecho podría ser debido a la mayor cantidad de agente estructurante que contienen las GVA 176 y 177, componente lignocelulósico más difícil de degradar que la gallinaza. En todas ellas esta etapa fue discontinua. Así, en la GVA 176, con mayor cantidad de restos vegetales, la fase termófila se mantuvo sin interrupciones desde el inicio hasta el día 69 del proceso. En cambio, en la GVA 177 y la GVA 175 hasta los días 24 y 14, coincidiendo alrededor del primer volteo. Estas pilas recuperaron la temperatura termófila temporalmente el día 29 y el 27, y hasta el día 48 y 50 no volvieron a presentar un período prolongado de temperatura termófila (48-66 y 50-83, respectivamente). La GVA 176 recuperó la temperatura termófila los días 77 y 86. El día 129 de proceso, tras el último volteo, las tres pilas recuperaron la temperatura termófila hasta el día 181 en las GVA 176 y 175, y el día 174 en la GVA 177.

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 y col., 1985). En todas las pilas se realizaron tres volteos en los días 15, 48 y 122 del proceso. En general, después de cada volteo se produjo un incremento de la temperatura de las pilas llegando a alcanzarse los valores

iniciales, excepto tras el primer volteo de la GVA 175 en la cual la temperatura siguió disminuyendo.

En el inicio del experimento la temperatura aumentó rápidamente en todas las pilas, especialmente en la GVA 176 y GVA 177, en las que se alcanzaron valores promedio por encima de 55°C a partir del día 3 hasta el 21 y desde el día 1 hasta el 17, respectivamente. En experimentos de compostaje de sarmientos de vid con residuos agroalimentarios (Hernández-Lara y col., 2022; Pérez-Murcia y col., 2021), lodos de la industria agroalimentaria (Morales y col., 2016; Pérez-Murcia y col., 2021), digestato de purín de cerdo (Bustamante y col., 2013), digestato de estiércol (Bustamante y col., 2012) y estiércol de oveja y restos de poda de jardín (Lecomte y col., 2006) la temperatura también se incrementa rápidamente al inicio del proceso, consiguiendo valores superiores a 50°C durante los primeros días, prolongándose durante semanas en algunos casos, y manteniendo temperaturas termófilas ($T > 40^{\circ}\text{C}$) durante largos períodos, 180 días (Lecomte y col., 2006), 120 y 163 (Hernández-Lara y col., 2022) y 75 días (Bustamante y col., 2012). En otros estudios la fase termófila tiene una duración menor, 21 y 25 días (Malcheva y col., 2018), 20-50 días (Morales y col., 2016), 40 días (Pérez-Murcia y col., 2021) y 6 días (Bustamante y col., 2013).

En la GVA 175 se tardó más en alcanzar valores promedio superiores a 55°C, a partir del día 50.

Las temperaturas máximas fueron similares en las tres pilas (72°C, 75°C y 74°C en GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente), resultados parecidos a los de los autores citados anteriormente, y se alcanzaron a los 3, 17 y 3 días del proceso. La temperatura promedio también fue mayor en la GVA 176 (48,4°C) e iguales en las otras pilas (43°C).

En general, el perfil de la curva de temperatura es similar en las pilas GVA 176 y GVA 177, por la similitud que presentan en su composición, con mayores cantidades de restos vegetales que la GVA 175.

En cuanto a la evolución térmica acumulada de las pilas, se expresa mediante el índice exotérmico cuadrático (índice EXI^2). Está basado en los perfiles térmicos obtenidos de las pilas y se calcula como la suma cuadrática de la diferencia diaria entre la temperatura máxima de la pila y la temperatura ambiente durante la fase bio-oxidativa del compostaje.

En estos procesos de compostaje los valores del índice EXI^2 y de la ratio índice $\text{EXI}^2/\text{días}$ fase bio-oxidativa fueron elevados indicando una exotermia intensa y prolongada en el tiempo. La GVA 176, con mayor presencia de restos vegetales, presenta el valor más elevado de las tres pilas (233217°C² y 1380), seguida por la GVA 177 (194177°C² y 1149) y la GVA 175 (186146°C² y 1101) (con menor presencia de restos vegetales). Estos resultados son muy superiores a los obtenidos por Pérez-Murcia y col. (2021) en compostaje de sarmientos con residuos agroindustriales (16385-29493°C² y 269-483) en los que la fase bio-oxidativa se desarrolló en 60 días.

Con todo ello, se deducen mejores resultados en cuanto a valores térmicos en las mezclas con mayor proporción de residuos agroindustriales, GVA 176 y GVA 177, alcanzando la GVA 176 temperaturas promedio más altas, una fase termófila más prolongada y mayores valores exotérmicos.

Posteriormente a la fase bio-oxidativa, las pilas se dejaron madurar durante 38 días hasta que la temperatura de las pilas fue cercana a la ambiental.

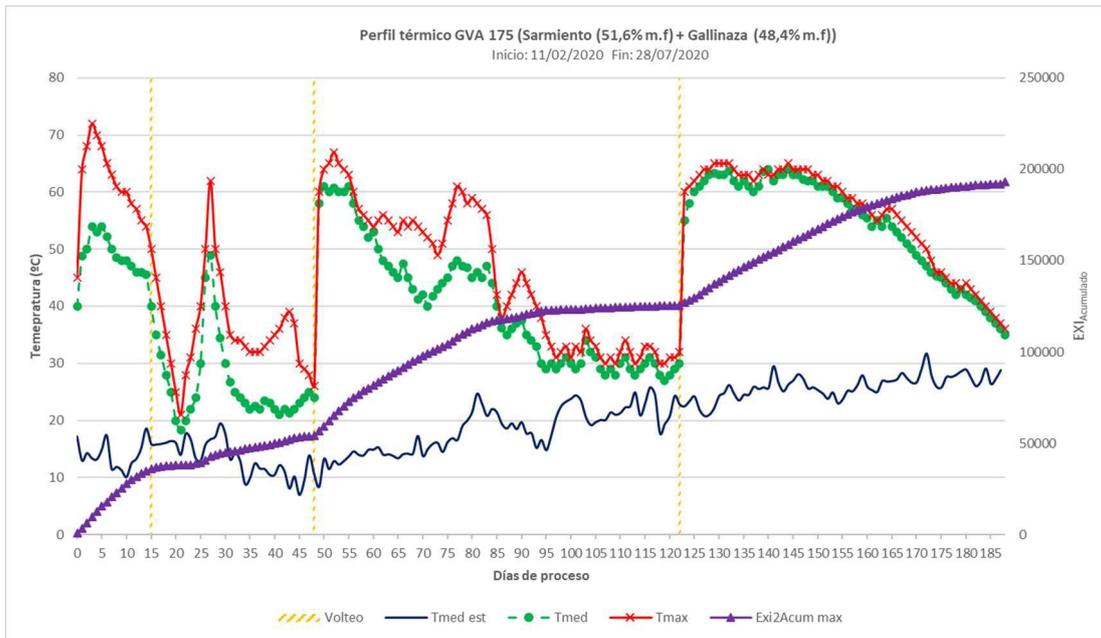


Figura 4.1. Evolución de la temperatura de la pila GVA 175 (en °C) y del incremento térmico experimentado durante el proceso de compostaje.

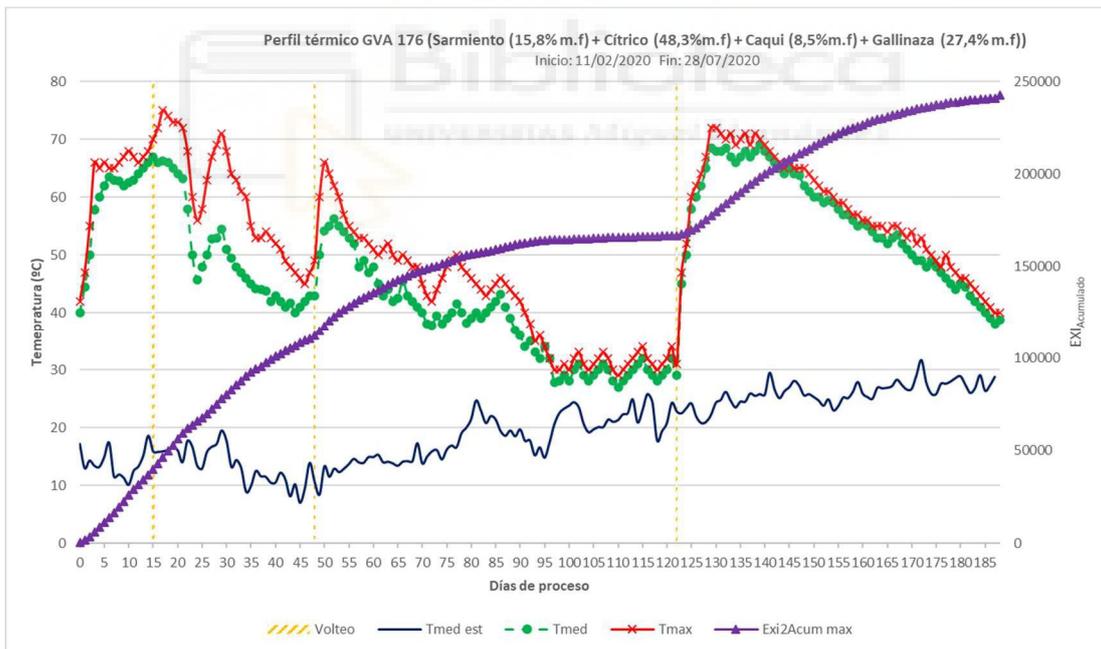


Figura 4.2. Evolución de la temperatura de la pila GVA 176 (en °C) y del incremento térmico experimentado durante el proceso de compostaje.

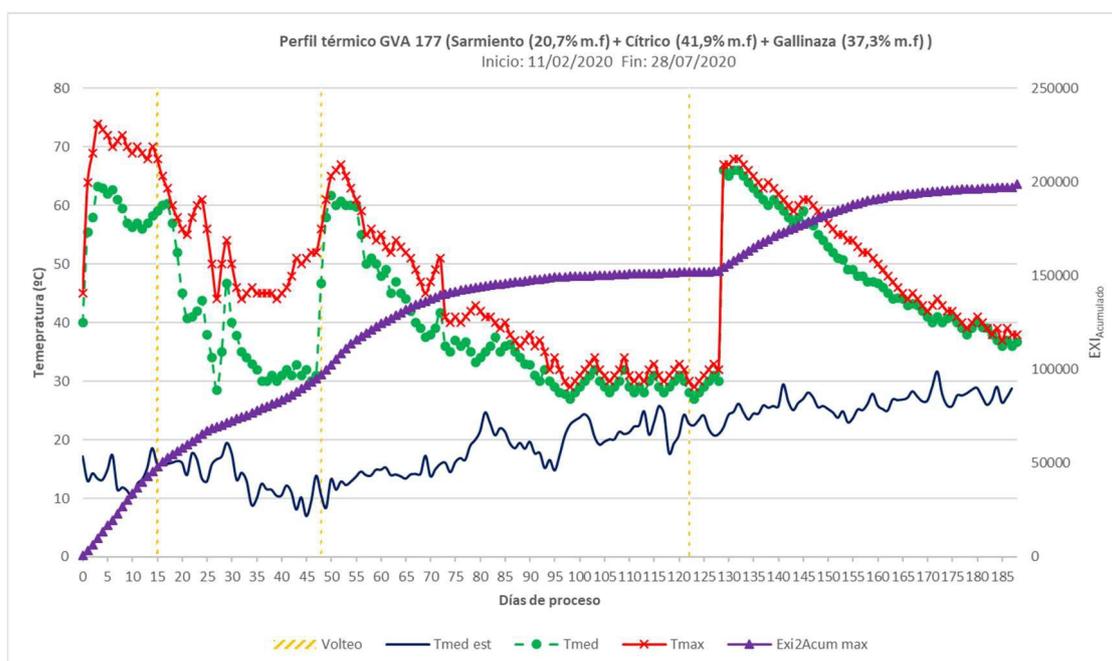


Figura 4.3. Evolución de la temperatura de la pila GVA 177 (en °C) y del incremento térmico experimentado durante el proceso de compostaje.

Tabla 4.1. Índices de evolución de seguimiento térmico del proceso.

| Parámetro | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|--|---------|---------|---------|
| Días fase bio-oxidativa | 169 | 169 | 169 |
| Nº Días F.Bio-oxid/ >40°C | 114 | 138 | 125 |
| Nº Días F.Bio-oxid/ >50°C | 99 | 103 | 86 |
| Nº Días F.Bio-oxid/ >60°C | 53 | 65 | 44 |
| Temperatura máxima pila | 72 | 75 | 74 |
| Temperatura promedio pila | 43,4 | 48,4 | 43 |
| Temperatura mínima pila | 18,3 | 27 | 27 |
| Nº Días >40°C/ Días fase bio-oxidativa | 0,675 | 0,816 | 0,739 |
| Índice EXI ² (°C ²) | 186146 | 233217 | 194177 |
| Ratio EXI ² /días f. bio-oxid. | 1101 | 1380 | 1149 |

Composición en %(vol): Composición en %(vol): GVA 175: 81,6% S + 18,4% G; GVA 176: 50,2% S + 25,8% DC + 3,1% DQ + 21,0% G; GVA 177: 56,4% S + 19,0% DC + 24,6% G.

El seguimiento de los perfiles térmicos de los procesos de compostaje nos permite evaluar la higienización de los compost finales. Los requisitos europeos en materia de saneamiento de compost establecidos en el Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019, establecen que todas las partes de cada lote presentarán uno de los siguientes perfiles de variación de la temperatura en función del tiempo:

- 70°C o más durante al menos 3 días,
- 65°C o más durante al menos 5 días,
- 60°C o más durante al menos 7 días, o
- 55°C o más durante al menos 14 días.

En la Tabla 4.2 se presentan el número de días en los que se alcanzaron dichas temperaturas. Como se puede observar, durante los procesos de compostaje de las pilas GVA 176 y GVA 177 se han conseguido todos los perfiles térmicos y en la GVA 175, tres de ellos. Por tanto, los compost finales obtenidos cumplen con los niveles de higienización requeridos por la legislación europea para asegurar la inactivación de los patógenos presentes en los residuos iniciales.

Tabla 4.2. Niveles de higienización propuestos en Reglamento (UE) 2019/1009 - Fertilizantes UE.

| Temperatura | Días de proceso | | | |
|-------------|--|---------|---------|---------|
| | (Reglamento (UE) 2019/1009 - Fertilizantes UE) | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
| >70°C | 3 | 2 | 17 | 9 |
| >65°C | 5 | 13 | 46 | 26 |
| >60°C | 7 | 54 | 65 | 45 |
| >55°C | 14 | 84 | 83 | 62 |

Composición en %(vol): GVA 175: 81,6% S + 18,4% G; GVA 176: 50,2% S + 25,8% DC + 3,1% DQ + 21,0% G; GVA 177: 56,4% S + 19,0% DC + 24,6% G.

4.1.2. Humedad

El agua es esencial para el desarrollo de los microorganismos durante el compostaje, para favorecer su migración y colonización en cada fase del proceso, para el transporte de sustancias y solubilización de nutrientes, así como para la difusión de los residuos metabólicos. Se considera que el contenido de humedad adecuado está entre 40-60% (Haug, 1993) ya que con valores inferiores al 35-40% las tasas de descomposición se reducen considerablemente y por debajo del 30% se frena la actividad biológica, mientras que valores superiores al 60-70% (según materiales y características físicas) provocan que la tasa de difusión del oxígeno sea insuficiente para reponer el oxígeno consumido lo que puede originar condiciones anaerobias

y generación de malos olores, además de un lavado de nutrientes por lixiviación. Una humedad inicial del 50 al 60% es la óptima para el compostaje debido a que proporciona suficiente agua para mantener la actividad microbiana sin bloquear el intercambio de gases. Conforme avanza el proceso el contenido de humedad se va reduciendo debido al calor de la masa y a la aireación. Por ello, hay que realizar un control de la humedad desde el inicio y corregir su contenido para garantizar el correcto desarrollo del proceso de compostaje.

El contenido de humedad inicial de todas las pilas estuvo dentro del intervalo adecuado de entre 45-65% (Bueno-Márquez y col., 2008) (Figura 4.4). Aun así, se realizaron riegos puntuales en todas ellas durante los primeros 30 días de compostaje.

La evolución del contenido de humedad sigue el mismo patrón en las pilas, disminuyendo durante todo el proceso de compostaje, de forma significativa durante la fase bio-oxidativa en todas ellas, llegando a valores próximos a 15%, y en la maduración de la GVA 175 y GVA 177. El contenido final de humedad es mayor en la GVA 176 (12%), seguida por la GVA 175 (9%) y la GVA 177 (7%).

En la Tabla 4.3 se presenta la humedad media teniendo en cuenta el factor tiempo, obtenida agrupando los datos de humedad de las tres pilas por fase del proceso (inicial, final bio-oxidativa y madurez), así como la humedad media teniendo en cuenta el factor tipo de compost de cada pila donde se incluyen los datos de los 3 muestreos realizados. La humedad media de las pilas disminuyó de forma significativa a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 9,3%. La presencia de destríos contribuyó a aumentar la humedad media de la pila, encontrando diferencias significativas entre la humedad media de la GVA 175 (sin destrío) y la GVA 176 (con mayor proporción de destríos).

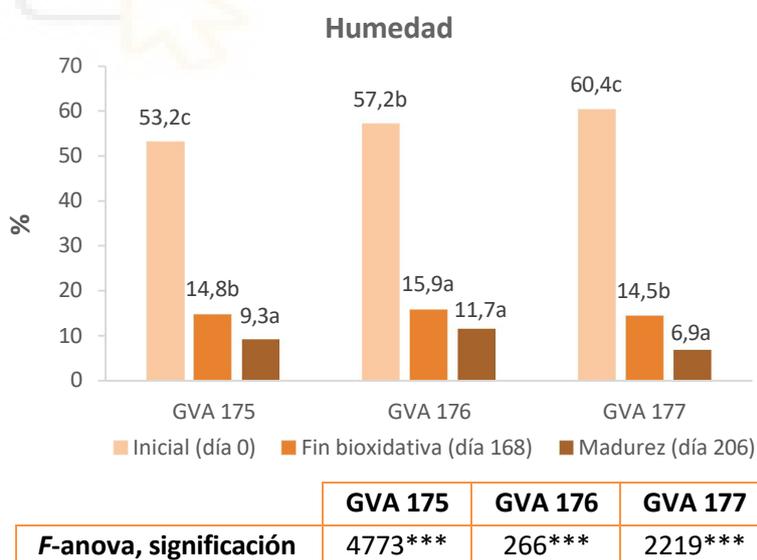


Figura 4.4. Evolución de la humedad durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca.).

Tabla 4.3. Datos medios de humedad (%) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de humedad según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 57,0 c | 15,1 b | 9,3 a | 2116*** |
| Valores medios de humedad según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 25,8 a | 28,3 b | 27,3 ab | 4,9* |

4.1.3. Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) relaciona el peso de un material y su volumen total, y está vinculada con la porosidad y el contenido en humedad. Es un parámetro que tiene interés determinar en los materiales iniciales y también durante el proceso de compostaje ya que su valor condiciona el dimensionamiento de las plantas de compostaje y puede informar, indirectamente, de la adecuación de las mezclas para que sean fáciles de oxigenar y de la transformación de los materiales a lo largo del proceso. Si el material es muy denso, ocupará menos volumen, pero presentará dificultades para ser aireado. Una elevada D_a inicial está asociada a una baja porosidad que puede inducir un deficiente establecimiento del proceso, debido a que se dificulta el paso del aire y a la larga, se obtiene una estabilización inferior de la materia orgánica. En cambio, si la D_a es muy baja, se autoaireará pero correrá el peligro de secarse fácilmente (Huerta y col., 2010). Aunque la D_a inicial no sea favorable, con un buen manejo y volteos periódicos se puede generar una adecuada aportación de aire que mejora el proceso.

La D_a es un parámetro que evoluciona a lo largo del proceso de compostaje. Teóricamente, en un proceso bien desarrollado, la D_a debería aumentar con el tiempo, tanto por el cambio de composición de los materiales (mayor descomposición, pérdida de materia orgánica), ya que la D_a tiene una evolución inversa al contenido en materia orgánica cuando el proceso funciona correctamente, como por la reducción del tamaño de partícula (Huerta y col., 2010). No obstante, la D_a se ve fuertemente afectada por el contenido en humedad, donde a iguales características, un material más seco presentará una menor D_a que uno más húmedo.

En resumen, la D_a se ve afectada por la humedad, la distribución del tamaño de partículas, el contenido en materia orgánica y el grado de descomposición de los materiales, así como por la mezcla realizada (material que aporte estructura). Por lo que, para interpretar los resultados de D_a hay que tener en cuenta estos factores.

El elevado contenido de humedad de los residuos de destrío de cítrico (86,7%) y destrío de caqui (81,1%) podría afectar negativamente al proceso de compostaje. El uso de un agente estructurante seco como son los sarmientos de vid (25,3% de humedad) puede reducir el contenido global de humedad y disminuir la densidad de las mezclas.

En este experimento, las tres mezclas iniciales presentan densidades aparentes bajas (Figura 4.5). Estos valores resultan adecuados para el inicio del proceso de compostaje. La

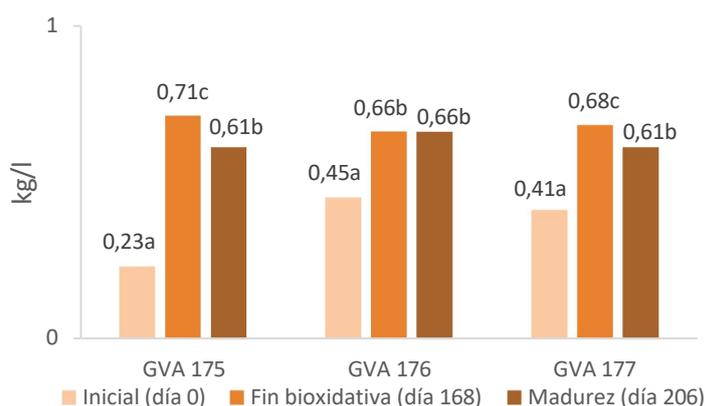
incorporación del destrío de cítrico y de caqui aumenta la Da respecto a la mezcla sin estos materiales (GVA 175). Este hecho no conlleva la obtención de peores condiciones térmicas sino todo lo contrario, tal y como se observa en la Tabla 4.1.

A lo largo del proceso de compostaje la Da aumenta de forma significativa durante la fase bio-oxidativa en las tres pilas, tal y como se esperaría por el efecto de la reducción del tamaño de las partículas y la reducción del contenido de materia orgánica. Durante la maduración, la Da disminuye significativamente en la GVA 175 y la GVA 177 mientras que en la GVA 176 se mantiene estable, lo cual puede ser debido a la mayor disminución de humedad en la GVA 175 y GVA 177. La Da de los compost finales se encuentra entre 0,61-0,66 kg/l, con valores mayores para la mezcla con ambos destríos, GVA 176. En cambio, las densidades aparentes de los compost de la pila con destrío de cítrico, GVA 177, y la GVA 175 son iguales, lo cual no se esperaría teniendo en cuenta el mayor valor inicial de Da de la GVA 177. Este resultado puede ser debido a la mayor reducción del contenido de humedad del compost de la GVA 177, el cual presenta un 6,9% s.m.s de humedad frente a un 11,7% s.m.s en la GVA 176.

La densidad media de las pilas (Tabla 4.4) aumentó durante la fase bio-oxidativa y disminuyó en la fase de maduración, obteniendo un valor medio final de 0,63 kg/l. El aumento de la presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa la densidad media de la pila.

En comparación con otros estudios de compostaje en los que se utilizan sarmientos, los valores de Da de los compost obtenidos en este trabajo son más elevados que los presentados por Bustamante y col. (2012) en compostaje de sarmientos con digestato (0,19 y 0,22 g/cm³), Hernández-Lara y col. (2021) en compostaje de sarmientos con residuos agroindustriales (tomate, puerro y alperujo) (0,17-0,28 g/cm³) y Pérez-Murcia y col. (2021) en compostaje de sarmientos con residuos agroindustriales (lodos, tallos de ajo, hojas de aguacate, restos de pimiento, tomate y puerro) (0,297-0,474 g/cm³). Aunque los valores obtenidos se encuentran en el rango de la mayoría de compost (400 y 700 kg/m³).

Densidad aparente



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 656*** | 148*** | 199*** |

Figura 4.5. Evolución de la densidad aparente durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca.).

Tabla 4.4. Datos medios de densidad aparente (kg/l) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de D_a según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 0,36 a | 0,68 c | 0,63 b | 885*** |
| Valores medios de D_a según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAO_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 0,52 a | 0,59 c | 0,57 b | 39*** |

4.2. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE

4.2.1. pH

La variación del pH a lo largo del proceso de compostaje informa del tipo de cambios que tienen lugar durante su desarrollo. Normalmente, el pH de la mezcla inicial se encuentra entre 5 y 7. El intervalo óptimo de pH para los microorganismos se encuentra entre 5,5 y 8. En general los hongos toleran un rango más amplio que las bacterias, entre 5,5 y 8 mientras que éstas entre 6 y 7,5.

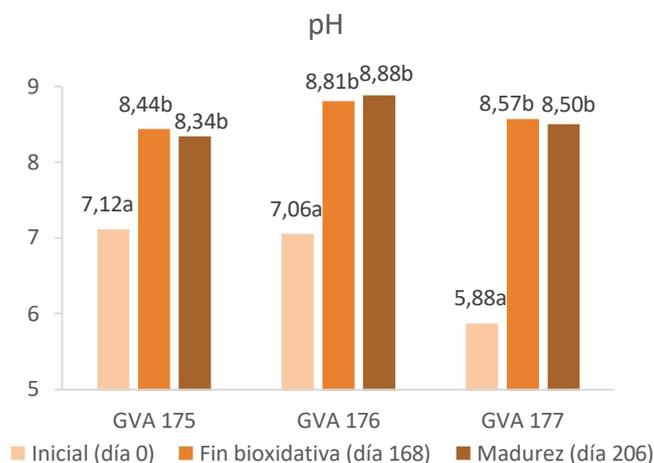
En los primeros días el pH disminuye a 5, o incluso menos, debido a la producción de compuestos orgánicos intermedios, mayoritariamente ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular, procedentes de la descomposición de las fracciones más lábiles de la materia orgánica. Este descenso de pH se manifiesta en un espacio de tiempo muy corto ya que si las condiciones de aireación son las correctas estos ácidos han de ser rápidamente transformados en CO_2 y H_2O e iniciarse la elevación del pH debido al amoníaco desprendido en la descomposición de las proteínas. Cuando el grado de aireación no es el adecuado se producirán condiciones anaerobias, por lo que los ácidos se consumirán más lentamente, acumulándose y generando malos olores, y el pH puede caer a valores por debajo de 5, con una parada del proceso. El mal olor emitido será indicativo del mal funcionamiento.

A medida que la temperatura aumenta y crecen los microorganismos, el pH aumenta hasta valores comprendidos entre 7,5 y 8,5, como consecuencia de la degradación de estos ácidos y la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos a amoníaco (Iglesias y Pérez, 1991), el cual se protonará durante el proceso de amonificación para formar amonio con producción de iones OH^- , lo cual contribuirá a la subida del pH, a la vez que también aumenta la alcalinidad del medio por la generación de CO_2 , que en parte se disolverá en forma de bicarbonato. Éste confiere capacidad tampón a la masa, manteniendo el pH estable hasta el final del proceso, en que puede disminuir ligeramente.

Hacia el final del proceso de compostaje se puede activar un proceso de nitrificación del amonio originado en la etapa anterior, favorecido por la alta concentración de alcalinidad, nitrógeno amoniacal y oxígeno, no consumido por las bacterias debido a la baja concentración de materia orgánica biodegradable y a que los procesos de degradación no son tan intensos. Resultado de ello aumentará la concentración de nitritos y nitratos, y disminuirá el pH por consumo de alcalinidad (carbono inorgánico) hasta valores cercanos a la neutralidad. Estas

condiciones indican que el proceso de descomposición ha alcanzado el nivel de madurez adecuado y, por lo tanto, ha concluido.

Los valores de pH durante el proceso de compostaje para las tres pilas estudiadas se muestran en la Figura 4.6.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 137*** | 238*** | 595*** |

Figura 4.6. Evolución del pH durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca.).

Tabla 4.5. Datos medios de pH según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de pH según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 6,69 a | 8,61 b | 8,57 b | 3321*** |
| Valores medios de pH según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAO_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 7,97 b | 8,25 c | 7,65 a | 248*** |

Inicialmente, el pH de las mezclas GVA 175 y GVA 176 fue cercano a pH neutro (7,12 y 7,06; respectivamente), estando dentro del intervalo de valores de pH adecuado (pH 6-9) para el desarrollo de los microorganismos que degradan la materia orgánica durante el proceso de compostaje (Moreno y Mormeneo, 2008), mientras que la GVA 177 presentó un pH inicial inferior al adecuado (5,88). Las mezclas GVA 176 y GVA 177 tenían en su composición destríos agroindustriales con pH ácido de 3,9 lo cual influyó claramente en el pH de la GVA 177 y no tanto en la GVA 176, aun teniendo la mayor proporción de materiales con carácter ácido. Según Rynk (1992) la acidez inicial podría influir en el desarrollo de la actividad termófila, evitando que se alcancen temperaturas elevadas durante esta fase, hecho que no sucedió en estas pilas.

A lo largo de la fase bio-oxidativa el pH de las pilas aumentó de forma significativa en las tres pilas hasta 8,4; 8,8 y 8,6 en la GVA 175, 176 y 177, respectivamente, alcanzando la GVA 177 valores similares a las otras mezclas.

Durante la etapa de madurez se produjo una ligera disminución no significativa del pH en la GVA 175 y GVA 177 llegando a 8,3 y 8,5 respectivamente, lo cual se podría relacionar con la producción de nitratos durante esta etapa. En la GVA 176 el pH aumentó ligeramente hasta 8,9.

Por tanto, las pilas GVA 175 y GVA 177 siguieron los cambios de pH esperados, aumentando durante la fase bio-oxidativa y disminuyendo en la maduración. Mientras que en la GVA 176 el pH se incrementó a lo largo de todo el proceso de compostaje. Esta pila mostró los mayores valores de pH durante el proceso.

El pH medio de las pilas (Tabla 4.5) aumentó significativamente durante la fase bio-oxidativa y se mantuvo sin diferencias significativas en la fase de maduración, obteniendo un valor medio final de 8,57. El aumento de la presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el pH medio de la pila GVA 176. Las tres mezclas presentaron diferencias significativas entre ellas, obteniéndose el mayor valor de pH medio para mezcla la GVA 176 (8,25) con ambos destríos y menor proporción de sarmiento y gallinaza, seguida por la GVA 175 (7,97) y la GVA 177 (7,65).

El valor de pH del compost maduro de la pila GVA 175 (8,3) y el de la GVA 177 (8,5) está dentro del rango adecuado para su uso agrícola (6,0-8,5) (Hogg y col., 2002) mientras que el pH del compost final de la GVA 176 (8,9) supera los valores recomendados. Estos resultados son similares a los obtenidos en composts realizados a base de sarmientos de vid con residuos agroindustriales (8,07-9,03) (Hernández-Lara y col., 2021; Pérez-Murcia y col., 2021; Hernández-Lara y col., 2022; y Matei y col., 2016) y en composts realizados solamente con sarmientos (Blaya y col., 2013). Aunque, en general, los valores de pH del presente trabajo difieren de la mayoría de estudios realizados con sarmientos mezclados con otros residuos. Así, en varios compost se han encontrado pH ligeramente ácidos (6,35-6,96) (Hernández-Lara y col., 2022; Abou y col., 2019; Bernal-Vicente y col., 2012; Bustamante y col., 2012; Manios, 2004; Kostov y col., 1996; y Shuval y col., 1991) mientras que en otros compost, valores cercanos a la neutralidad (7,03-7,8) (Bignami y col., 2022; Malcheva y col., 2018; Manidiakis y col., 2004; Manios, 2004; Matei y col., 2016; Viel y col., 2018; y Yordanova y col., 2018).

4.2.2. Conductividad eléctrica

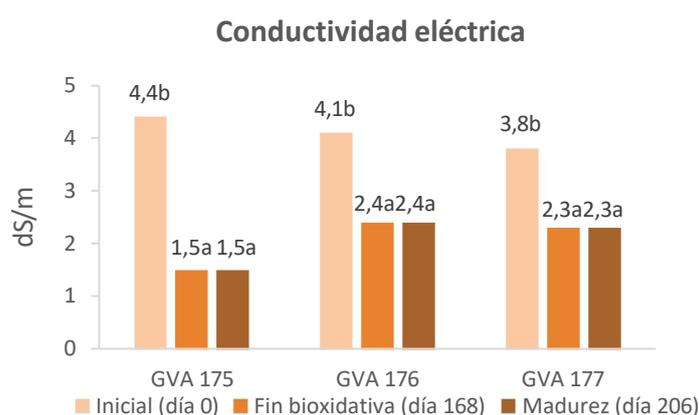
La conductividad eléctrica (CE) normalmente aumenta conforme avanza el proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica, la continua liberación de elementos, principalmente N en forma de $\text{NO}_3\text{-N}$, y al aumento relativo de la concentración de iones debida a la pérdida de masa de la pila (Paredes y col., 2000; Bustamante y col., 2008). Sin embargo, puede suceder que se produzca un descenso de la CE durante el proceso debido a la pérdida de sales solubles por lixiviación, lo cual puede ser provocado por una humectación excesiva de la masa o por la lluvia cuando el proceso se realiza al exterior (Paredes y col., 2001).

Los valores de la CE obtenidos durante los procesos de compostaje se muestran en la Figura 4.7. La CE inicial en las mezclas no era excesivamente elevada (4,4; 4,1 y 3,8 dS/cm en

GVA 175, 176 y 177, respectivamente). En las tres pilas la CE disminuye a lo largo de la fase bio-oxidativa, manteniéndose constante durante la fase de maduración. La mayor reducción de CE se produce en la GVA 175, disminuyendo 2,9 dS/m, hasta los 1,5 dS/m. En las otras pilas, con destríos vegetales, la CE disminuye 1,7 y 1,5 dS/m, obteniendo una CE final de 2,4 y 2,3 dS/m en la GVA 176 y GVA 177, respectivamente. La reducción de la CE pudo ser resultado del lavado de sales en las mezclas producido por las abundantes lluvias caídas desde marzo a junio de 2020, y por los riegos realizados. Otra posible explicación para este fenómeno se puede encontrar en la estructura física de uno de los materiales que conforman las pilas, la gallinaza, material fino y ligero que puede ser fácilmente lavado por la lluvia y el riego. Este descenso en la CE también lo observaron Matei y col. (2016) en el compostaje de sarmientos con gallinaza, aunque en la mayoría de estudios de compostaje de sarmientos se produce un aumento de la CE durante el proceso (Hernández-Lara y col., 2022; Hernández-Lara y col., 2021; Pérez-Murcia y col., 2021; Bustamante y col., 2012 y Maniadakis y col., 2004). También se ha encontrado un aumento durante la fase bio-oxidativa y una pequeña disminución durante la maduración (Hernández-Lara y col., 2022).

La conductividad eléctrica media de las pilas (Tabla 4.6) disminuyó de forma significativa durante la fase bio-oxidativa manteniéndose estable durante la maduración, obteniendo un valor medio final de 2,1 dS/m. El aumento de la presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa la conductividad eléctrica media de la pila.

Los compost obtenidos presentan valores bajos de CE: 1,5 dS/m en la GVA 175 (similares a los de Matei y col., 2016 y Blaya y col., 2013); 2,4 dS/m en la GVA 176 y 2,3 dS/m en la GVA 177, como los encontrados por Abou y col. (2019). Otros autores encuentran CE entre 3,65 y 15,1 dS/m (Bignamini y col., 2022; Hernández-Lara y col., 2022; Hernández-Lara y col., 2021; Pérez-Murcia y col., 2021; Bustamante y col., 2012; Maniadakis y col., 2004 y Manios y col., 2004). Según Lasaridi y col. (2006), el valor de CE que un compost debe tener para no provocar efectos adversos no ha de superar los 4 dS/m. Por tanto, los compost obtenidos presentan valores de CE adecuados para su aplicación y son indicativos de buena calidad del producto.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 1889*** | 423*** | 1153*** |

Figura 4.7. Evolución de la conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.6. Datos medios de CE (dS/m) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de CE según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 4,1 b | 2,1 a | 2,1 a | 716*** |
| Valores medios de CE según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 2,5 a | 3,0 c | 2,8 b | 34*** |

4.2.3. Polifenoles

Los polifenoles son sustancias químicas compuestas por ácidos fenólicos que están presentes en los vegetales para defenderlos de las plagas gracias a su efecto antimicrobiano. Los polifenoles tienen una importante repercusión sobre la inhibición de la germinación de semillas (Manios y col., 1987), la inmovilización del nitrógeno del suelo (Bustamante y col., 2007) y efecto antimicrobiano (Scalbert, 1991) que puede inhibir y limitar la actividad de los microorganismos durante el proceso de compostaje.

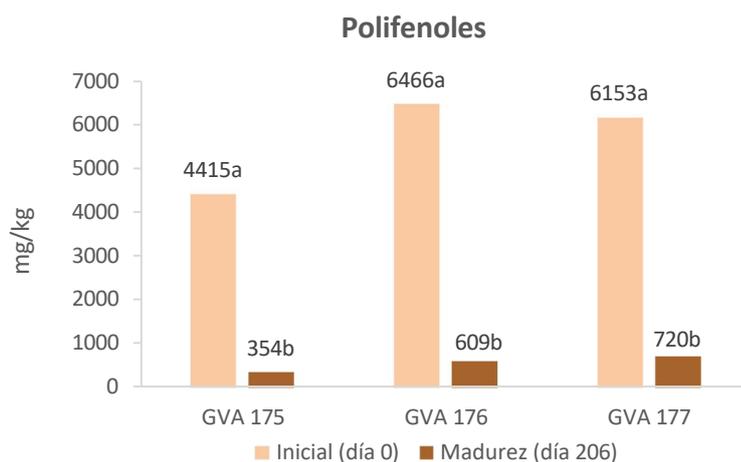
La evolución de los polifenoles durante el proceso de compostaje es un parámetro a tener en cuenta en el uso agrícola del compost, ya que están relacionados con las propiedades fitotóxicas de los materiales a compostar.

Como se puede observar en la Figura 4.8, el contenido inicial en polifenoles fue alto en las tres pilas, presentando la GVA 176 y la GVA 177 la mayor concentración (6466 mg/kg y 6153 mg/kg, respectivamente). Esto es debido a la presencia de destrío de cítrico, ingrediente con alto contenido en polifenoles (13.102 mg/kg), presentado la GVA 176 la mayor proporción de éste en la mezcla, además de contener destrío de caqui que también aporta una elevada cantidad de polifenoles (4252 mg/kg). La GVA 175 fue la pila con menor cantidad de polifenoles inicial (4415 mg/kg) debido a que su componente mayoritario, los sarmientos de vid, contenían una concentración menor de polifenoles (1959 mg/kg). Por lo que se pudieron observar diferencias significativas entre la GVA 176 y GVA 177 con la GVA 175 respecto al contenido de polifenoles medio. A pesar de la elevada concentración inicial de polifenoles, en ninguna de las pilas no supuso un efecto inhibitorio o limitante del proceso de compostaje.

La evolución de los polifenoles fue típica, decrecieron significativamente conforme avanzó el proceso. La disminución de los compuestos de naturaleza fenólica durante el proceso de compostaje se debe al predominio de las vías degradativas de compuestos fácilmente degradables, oxidación de fenoles a compuestos fenólicos de bajo peso molecular y procesos de polimerización frente a la liberación al medio acuoso de sustancias fenólicas (Saviozzi y col., 1987 y Cegarra y col., 2006).

La presencia de destríos contribuyó a aumentar el contenido medio en polifenoles, encontrando diferencias significativas entre la GVA 175 (sin destrío) y las otras dos pilas con destríos (Tabla 4.7).

En los compost finales, el contenido de polifenoles fue bajo: 354 mg/kg en la pila GVA 175; 609 mg/kg en la GVA 176 y 720 mg/kg en la GVA 177.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| F-anova, significación | 128*** | 298*** | 307*** |

Figura 4.8. Evolución de la concentración de polifenoles durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.7. Datos medios de polifenoles (mg/kg) según el tipo de compost.

| Valores medios de polifenoles según el factor tipo de compost | | | |
|--|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 2385 a | 3538 b | 3437 b | 56*** |

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

El análisis de la evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida aporta información acerca de los procesos que ocurren durante el compostaje y de la mayor o menor intensidad de la actividad microbiana durante el progreso de este, aunque los cambios que se observan no son tan claros ni tan rápidos como los que suceden en la fracción orgánica hidrosoluble.

4.3.1. Evolución del contenido de materia orgánica

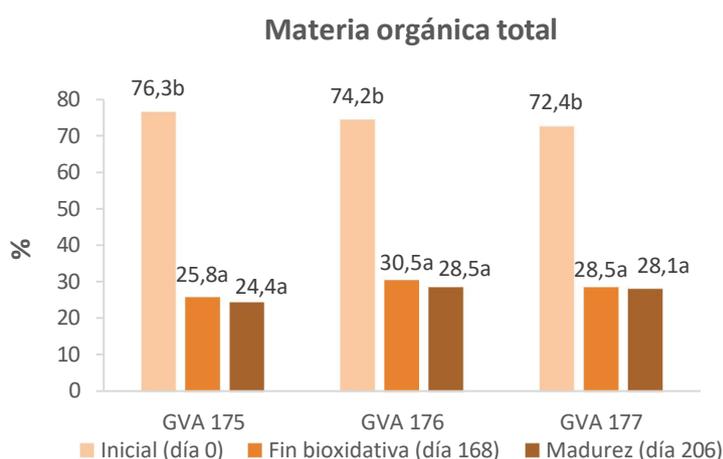
El contenido de materia orgánica (MO) de una mezcla se reduce a lo largo del proceso de compostaje debido a su descomposición, fundamentalmente, en la etapa bio-oxidativa. También aumenta la estabilidad de la MO, por la transformación en sustancias húmicas, con mayor resistencia a posteriores procesos de descomposición; y la concentración relativa de los componentes minerales que no se pierden por lixiviación o volatilización.

El porcentaje final de MO en el compost dependerá del valor en los materiales iniciales, de su degradabilidad y de la transformación que hayan sufrido sus componentes durante el proceso. Pérdidas importantes de MO durante la fase bio-oxidativa indica la estabilidad relativa alcanzada por el producto después de la etapa bio-oxidativa.

Los valores de MO obtenidos durante el proceso de compostaje se muestran en la Figura 4.9. La MO decreció a lo largo del proceso en todas las pilas. Se observa un descenso significativo de la cantidad de MO durante la fase bio-oxidativa del orden de un 50,5% en la GVA 175, un 43,7% en la GVA 176 y un 43,9% en la GVA 177, desde valores iniciales de 72-76% hasta valores de 24-28%. La elevada actividad microbiana asociada en esta etapa promueve una mayor degradación y mineralización de la MO presente. Además, esta disminución se sigue produciendo durante la maduración en todas las pilas, como consecuencia de la continua mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante todo el proceso, aunque en menor intensidad, de forma casi apreciable, indicando la estabilidad del producto después de la fase bio-oxidativa.

La MO media de las pilas (Tabla 4.8) disminuyó significativamente durante la fase bio-oxidativa y continuó disminuyendo sin diferencias significativas en la fase de maduración, obteniendo un valor medio final de 27%. La presencia de destríos contribuyó a aumentar el contenido de MO en los compost finales, sobre todo a dosis más altas.

Los valores de MO en los compost finales son bajos (24,4%; 28,5% y 28,1% en GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente). Con estos contenidos de MO, los compost no cumplen con lo establecido en el Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, ya que no alcanzan el contenido mínimo de MOT de 35%. Este bajo contenido de MO puede ser debido al largo periodo de compostaje que se ha desarrollado (207 días). En cambio, Maniadakis y col. (2004) obtienen un 57,5% de MO en un proceso de compostaje con similares condiciones (195 días de duración y con un 70% de MO inicial). En otros estudios de compostaje de sarmientos de vid también se consigue obtener en el compost un contenido de MO superior al del presente trabajo (56,7% en Pérez-Murcia y col., 2021; 44,5% en Abou y col., 2019; 80% en Bernal-Vicente y col., 2012; y 48% en Shuval y col., 1991), probablemente debido al menor tiempo de compostaje de dichos procesos (60-120 días).



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| F-anova, significación | 1584*** | 1860*** | 2433*** |

Figura 4.9. Evolución de la materia orgánica total durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.8. Datos medios de materia orgánica (%) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de MO según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 74,3 b | 28,3 a | 27,0 a | 1418*** |
| Valores medios de MO según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 42,1 a | 44,4 b | 43,0 ab | 2,5 ns |

4.3.1. Pérdida de materia orgánica

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

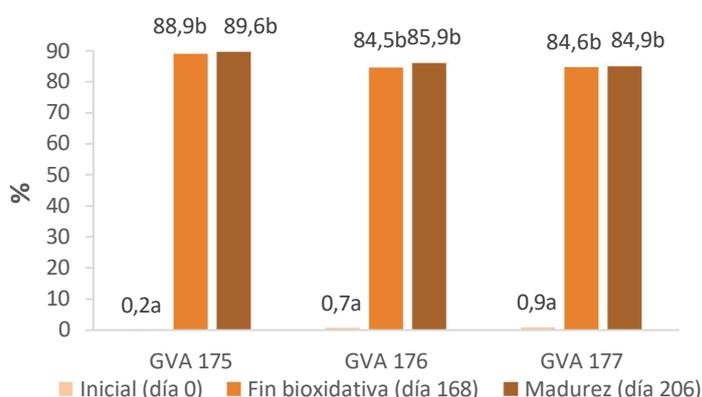
$$\text{Pérdidas de MO (\%)} = 100 - 100 \cdot [X_1 \cdot (100 - X_n) / X_n \cdot (100 - X_1)]$$

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

Como se observa en la Figura 4.10, en todas las pilas del presente estudio, la principal pérdida de MO se produce de forma significativa durante la fase bio-oxidativa, debido a los procesos de degradación desarrollados por la actividad microbiana y a que tras esta etapa los compuestos más sencillos se han degradado y, por lo tanto, la pérdida de MO va disminuyendo. Al final del proceso de compostaje, las pilas mostraron elevados valores de pérdida de MO alcanzándose pérdidas cercanas al 90% en la GVA 175, en torno al 86% en la GVA 176 y del 85% en la GVA 177. Entre las pilas no hubo diferencias significativas en cuanto a pérdida de MO aunque las pilas GVA 176 y GVA 177, con menor proporción de gallinaza y con destríos agroindustriales, experimentaron menor pérdida de MO que la GVA 175 elaborada con mayor proporción de sarmientos de vid y gallinaza. Esto puede ser utilizado como un indicador de la tasa de compostaje. En cambio, la GVA 175 no fue la que experimentó mayor índice de exotermia. Estos valores de pérdida de MO son superiores a los encontrados por diversos autores en otros experimentos de compostaje de sarmientos como Bustamante y col. (2012) que obtuvieron pérdidas de MO de 58-60%, probablemente debido al mayor tiempo de compostaje empleado en nuestras pilas.

La pérdida de MO media de las pilas (Tabla 4.9) aumentó de forma significativa durante la fase bio-oxidativa y siguió incrementándose durante la maduración, obteniendo un valor medio final de 86,8%. La presencia de destríos no influyó en la pérdida de MO media.

Pérdida de materia orgánica



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 216*** | 466*** | 754*** |

Figura 4.10. Evolución de la pérdida de materia orgánica total durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.9. Datos medios de pérdida de MO total (%) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de pérdida de MO según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 0,58 a | 86,0 b | 86,8 b | 182*** |
| Valores medios de pérdida de MO según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 59,5 a | 57,0 a | 56,8 a | 0,17 ns |

4.3.2. Carbono orgánico total

La degradación de la materia orgánica induce en los procesos de compostaje una pérdida de carbono, ya que el proceso final de la descomposición de la materia orgánica es la transformación de materia orgánica en inorgánica, siendo importante la pérdida de carbono en forma de CO₂ atmosférico. Por tanto, el compostaje es una forma de pérdida de carbono en forma orgánica a carbono atmosférico liberado como CO₂. Con el transcurso del tiempo, el porcentaje de carbono orgánico de la pila sufre un progresivo descenso, superior durante la fase bio-oxidativa.

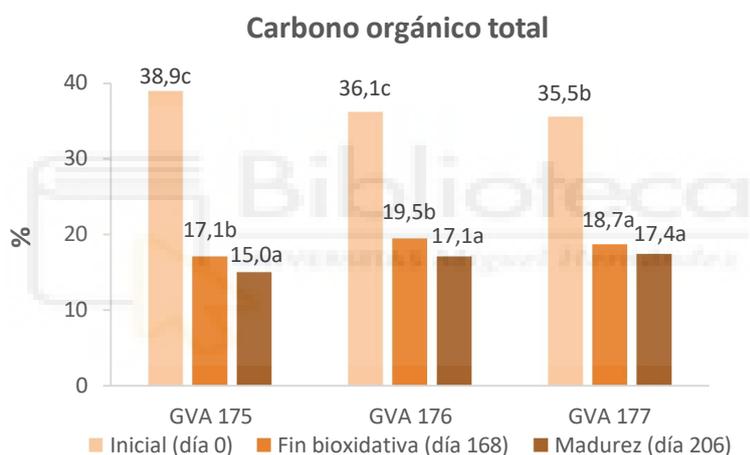
De la misma forma que el contenido de materia orgánica, el contenido de carbono orgánico disminuye a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

Los valores de carbono orgánico total (Corg) obtenidos en los procesos de compostaje se muestran en la Figura 4.11. Como se puede observar, el contenido de Corg decreció en las

tres pilas durante todo el proceso de compostaje. El mayor descenso de Corg se aprecia en la fase bio-oxidativa, debido a la mayor actividad microbiana existente en esta etapa, encontrándose pequeñas disminuciones en el contenido de Corg durante la etapa de maduración, significativas en la GVA 175 y GVA 176.

El Corg medio de las pilas (Tabla 4.10) disminuyó de forma significativa a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 16,5%. La presencia de destríos no influyó en el Corg media de la pila.

Los valores de Corg en los compost finales son superiores en la GVA 177 y GVA 176 (17,4% y 17,1%, respectivamente) que en la GVA 175 (17,8%) aunque no existen diferencias significativas entre las pilas. En comparación con los obtenidos en estudios de compostaje de sarmientos con otros residuos (Bignami y col., 2022; Pérez-Murcia y col., 2021; Blaya y col., 2013; Maniadakis y col., 2004; Manios y col., 2004), nuestros contenidos de Corg son bajos ya que estos autores obtienen valores de Corg entre 25,4-51,5%. En cambio, se asemejan a los obtenidos por Kostov y col. (1996) en compost hecho exclusivamente con sarmientos de vid. Como se ha dicho anteriormente, el largo periodo de compostaje que se ha desarrollado (207 días) ha influido en los resultados obtenidos.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 711*** | 1120*** | 521*** |

Figura 4.11. Evolución del carbono orgánico total durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.10. Datos medios de Corg total (%) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Corg según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 36,8 c | 18,4 b | 16,5 a | 570*** |
| Valores medios de Corg según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 23,7 a | 24,2 a | 23,9 a | |

4.3.3. Nitrógeno total

El nitrógeno es un macronutriente esencial para el desarrollo de las plantas cuya toma se produce en su forma inorgánica. En los residuos orgánicos el nitrógeno se encuentra tanto en forma orgánica como en forma inorgánica, aunque predomina la forma orgánica.

A lo largo del proceso de compostaje, la descomposición de la materia orgánica produce variaciones en los contenidos en las distintas formas de nitrógeno, disminuyendo el nitrógeno orgánico y aumentando el inorgánico. Una parte de las especies inorgánicas se pueden perder por lixiviación con la fase líquida o por volatilización a la atmósfera mediante liberación de amoníaco. Las condiciones de altas temperaturas y pH alcalino que se produce en la fase de descomposición favorecen la formación de NH_3 . Estas pérdidas de N están asociadas a etapas de máxima degradación de la materia orgánica, donde se liberan al medio mayores cantidades de NH_4^+ (Cayuela y col., 2006). La formación de amoníaco durante la descomposición de las proteínas forma parte del proceso, pero escogiendo y adecuando las mezclas iniciales, ha de conseguirse que la velocidad de formación de éste sea tal que se evite al máximo sus emisiones y se facilite su inclusión en la biomasa y en las moléculas formadas semejantes a las sustancias húmicas.

Sin embargo, la pérdida de materia orgánica que se produce durante el compostaje, que conduce a una reducción en el peso de la masa a compostar, hace que las especies nitrogenadas experimenten el llamado "efecto concentración", es decir, al final del proceso de compostaje, aunque se pierde nitrógeno éste estará más concentrado en el compost final debido a la reducción de la masa de la pila. Por tanto, el contenido en nitrógeno aumenta durante el proceso de compostaje debido a un efecto concentración, a la pérdida de peso de la pila por degradación de materia orgánica y a la posible fijación biológica de nitrógeno (Paredes y col., 2002).

El contenido de nitrógeno en los residuos orgánicos condiciona su capacidad fertilizante, por lo que es fundamental minimizar las pérdidas de este elemento durante el compostaje para así incrementar su concentración en el producto final y, por tanto, el valor agronómico y económico, además de disminuir la generación de olores y los problemas ambientales (Bustamante y col., 2012).

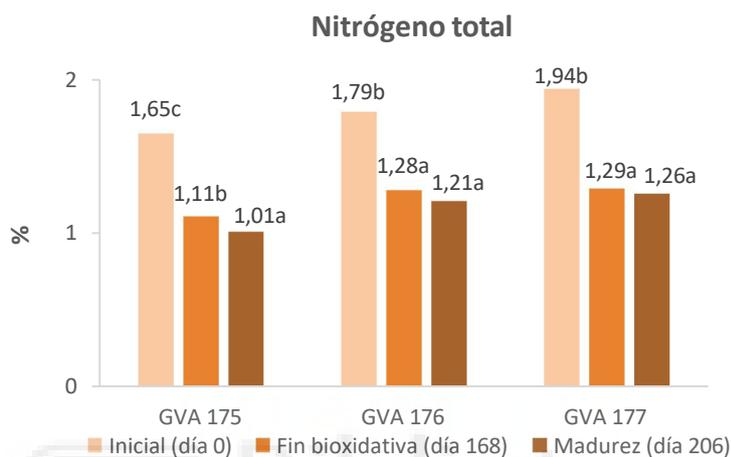
Los valores de nitrógeno total (NT) obtenidos en los procesos de compostaje se muestran en la Figura 4.12. Comparando las tres pilas, la GVA 177 tiene el mayor porcentaje de NT inicial (1,94%) a pesar de no contener la mayor proporción de gallinaza, ingrediente con el porcentaje de NT más elevado. La siguiente pila con mayor NT inicial es la GVA 176 (1,79%) seguida por la GVA 175 (1,65%). Durante la etapa bio-oxidativa, en todas las pilas se produce una disminución significativa del NT. En la maduración se sigue reduciendo el NT en todas, pero solo de forma significativa en la GVA 175. Estas reducciones del contenido de nitrógeno posiblemente se deban a procesos de lixiviación.

El comportamiento del NT en las pilas no es el esperado ya que, teóricamente, según avanza el proceso el contenido de NT debería aumentar por el efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de la materia orgánica (Said-Pullicino y col., 2007) y a la posible fijación biológica de nitrógeno.

El NT medio de las pilas (Tabla 4.11) disminuyó de forma significativa a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 1,16%. La presencia de destríos

contribuyó a aumentar el NT medio de la pila, encontrando diferencias significativas entre las tres pilas, presentando la GVA 177 mayor NT medio, seguida por la GVA 176 y la GVA 175.

Los contenidos de NT en los compost obtenidos en el presente trabajo estuvieron entre 1,21-1,65%. El contenido de NT superior al 1% obtenido en estos compost sugiere que son buenas fuentes de fertilizante nitrogenado. Estos resultados son similares a los de Yordanova y col. (2018) y Kostov y col. (1996) (1,01% y 1,3%), e inferiores a los obtenidos en diversos estudios (Bignami y col., 2022; Pérez-Murcia y col., 2021; Abou y col., 2019; Viel y col., 2018; Maniadakis y col., 2004; Manios y col., 2004; Shuval y col., 1991) presentando valores entre 2-3,7%.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 361*** | 78*** | 291*** |

Figura 4.12. Evolución del nitrógeno total durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.11. Datos medios de nitrógeno total (%) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de NT según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 1,79 c | 1,23 b | 1,16 a | 101*** |
| Valores medios de NT según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 1,26 a | 1,42 b | 1,50 c | 12,7** |

4.3.4. Relación carbono orgánico total/nitrógeno total (Corg/NT)

Los residuos utilizados como sustratos para compostaje deben suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos. En principio, cualquier material de naturaleza orgánica y biodegradable, susceptible de ser utilizado por

microorganismos, es adecuado para compostaje. Pero, los microorganismos implicados en el proceso necesitan que los nutrientes se encuentren en una forma química disponible, a concentraciones adecuadas y en contenidos balanceados. La mayoría de estos elementos se encuentran en niveles adecuados, con la excepción del carbono y el nitrógeno cuyo balance requiere una atención particular.

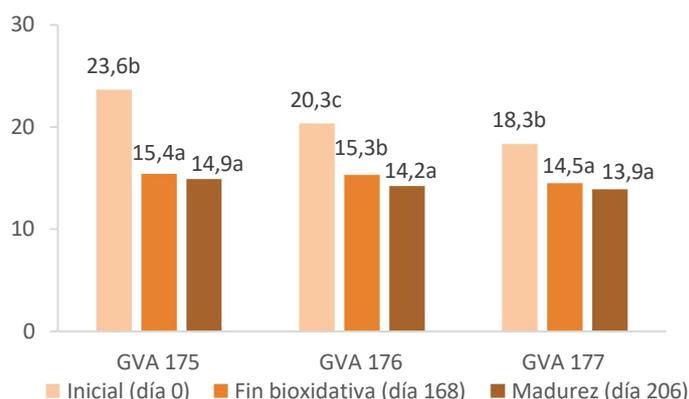
La relación carbono-nitrógeno (C/N) constituye uno de los aspectos más importantes en el balance de nutrientes totales para los sustratos de compostaje. Para la mayoría de sustratos se considera óptima en el material inicial una relación C/N de 25 a 35 (Jhorar y col. 1991), siendo 30 el valor recomendado. Una relación C/N demasiado elevada, superior a 35, implica un exceso de carbono y limita la cantidad de nitrógeno disponible para el crecimiento celular a expensas de la materia orgánica, lo que conduce a la inactivación o ralentización del proceso. Con una relación C/N baja, inferior a 20, el nitrógeno está presente en exceso por lo que se acelera inicialmente el crecimiento microbiano y la descomposición de la materia orgánica lo que agota rápidamente las reservas de oxígeno, dando lugar a condiciones de anoxia. El exceso de nitrógeno además conduce a pérdidas de nitrógeno en lixiviados (nitrato) o en gases (amoníaco) ocasionando malos olores, además de contaminar la atmósfera y reducir el contenido en nitrógeno del producto final limitando su valor como fertilizante orgánico.

Aunque no todos los materiales que tienen similar contenido en los elementos mencionados son compostados de igual forma ya que influye el tipo de moléculas que componen la materia orgánica lo cual determina la biodegradabilidad del material. Por lo cual es conveniente controlar el equilibrio de biopolímeros y la relación C/N, conociendo el grado de resistencia a la degradación que tienen. Las proporciones de C/N y biopolímeros influyen de una manera muy destacable en la velocidad del proceso, en la generación de malos olores y lixiviados, en la pérdida de nitrógeno y en las características del producto final.

La relación C/N disminuye durante el compostaje debido a que parte del carbono se pierde como CO₂ por la respiración microbiana, mientras que la mayor parte del nitrógeno es reciclado. Los valores de la C/N hacia el final del proceso son prácticamente constantes, debido a la estabilización de la materia orgánica. La C/N es, por tanto, uno de los índices más utilizados para estudiar la evolución de la materia orgánica durante el compostaje ya que, por un lado, representa la pérdida de carbono orgánico como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica mientras que, por otro, mide el aumento de la concentración de nitrógeno debido a la pérdida de peso. Generalmente, una relación C/N igual a 12 es el límite aceptado para el compost maduro (Viel y col., 2018).

En la Figura 4.13 se muestra la evolución de la relación C_{org}/N_T de las mezclas estudiadas durante el proceso de compostaje.

Relación Corg/NT



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 76*** | 137*** | 72*** |

Figura 4.13. Evolución de la relación Carbono orgánico total y nitrógeno total (Corg/NT) durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.12. Datos medios de relación Corg/NT total según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Corg/NT según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 20,7 b | 15,0 a | 14,3 a | 49*** |
| Valores medios de Corg/NT según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 18,0 c | 16,6 b | 15,5 a | 7,2* |

Inicialmente, la GVA 175, con la mayor proporción de gallinaza y, por tanto, menor proporción de residuos vegetales, presenta la relación Corg/NT inicial más elevada (23,6) debido a la elevada relación Corg/NT de su ingrediente principal, los sarmientos (59,3).

La GVA 176, con la mayor proporción de residuos vegetales, presenta una Corg/NT inicial de 20,3 y la GVA 177, una Corg/NT de 18,3.

En las tres pilas la relación Corg/NT disminuyó a lo largo de todo el proceso, de forma significativa en la fase bio-oxidativa de todas, coincidiendo con la máxima degradación de la materia orgánica, y en la maduración de la GVA 176. En las otras pilas el descenso durante la maduración no fue significativo.

La GVA 175 presenta la Corg/NT final más elevada (14,9) y la GVA 177 acaba teniendo una Corg/NT similar a la GVA 176 (13,9 y 14,2 respectivamente). La disminución de esta relación es debida a la pérdida de carbono orgánico por la mineralización de la materia orgánica y el incremento del contenido de NT derivado de la pérdida de peso de la pila (Bustamante y col., 2008 y Bustamante y col., 2012), por el efecto concentración.

La relación Corg/NT media (Tabla 4.12) disminuyó de forma significativa durante la fase bio-oxidativa y continuó disminuyendo en la fase de maduración, obteniendo un valor

medio final de 14,3. La presencia de destríos contribuyó a disminuir la Corg/NT media de la pila presentado un menor valor la GVA 177, con inferior cantidad de destríos.

Respecto al resultado final del proceso de compostaje, cabe destacar que un compost se considera maduro cuando el valor de la relación C/N es inferior a 12 (Bernal y col., 1998; Bustamante y col., 2012), <15 (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992b) o está por debajo de 20 (Golueke, 1981 y Yordanova y col., 2018), aunque este parámetro presenta gran variabilidad dependiendo de los materiales de partida por lo que no puede considerarse como un indicador absoluto del estado de maduración. Por lo tanto, la relación Corg/NT es más útil para seguir la evolución de las pilas durante el compostaje que para indicar el grado de madurez alcanzado por los compost. En la legislación española (RD 506/1013) se exige una relación C/N inferior a 20.

En este experimento, los compost presentan valores inferiores a 20 (relación Corg/NT=14,9; 14,2 y 13,9 en los compost de GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente). Según estas consideraciones, los compost elaborados tendrían un grado de madurez aceptable, cumpliéndose con la legislación vigente.

4.3.5. Contenido de fósforo, potasio y sodio

El fósforo (P) es un elemento esencial para las plantas debido a que interviene en el metabolismo y almacenamiento de la energía (ATP y NAD), participa en la fotosíntesis, provee energía a los diferentes procesos internos de la planta y en el transporte de otros nutrientes, es componente del material genético y estimula el desarrollo temprano de la raíz, la floración y la viabilidad de las semillas. Un suministro inadecuado del P en la planta limita estas funciones, llegando a causarle daños severos (Intagri, 2017a).

El potasio (K) es uno de los nutrientes más importantes en el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en diferentes procesos bioquímicos y fisiológicos de los vegetales. Desempeña funciones esenciales en la activación enzimática, síntesis de proteínas, fotosíntesis, osmorregulación, actividad estomática, transferencia de energía, transporte en el floema, equilibrio anión-catión y resistencia al estrés biótico y abiótico (Intagri, 2017b).

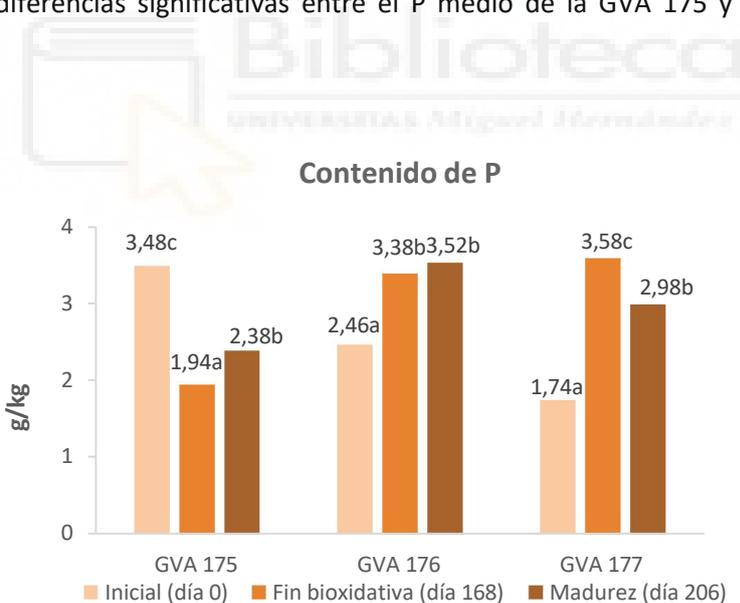
El sodio (Na) no es un elemento esencial para las plantas, pero puede ser usado en pequeñas cantidades, al igual que los micronutrientes, como auxiliar para el metabolismo y la síntesis de clorofila. En algunas plantas, puede ser empleado como sustituto parcial de potasio y es útil en la apertura y el cierre de estomas, lo cual ayuda a regular el equilibrio interno de agua. Aunque en cantidades elevadas pueden competir con elementos beneficiosos (K, Ca, Mg y amonio) para ser absorbidos por las raíces de las plantas, produciendo diversos daños como germinación lenta y desigual de las semillas, marchitamiento, retraso de crecimiento, quemaduras y caídas de hojas, muerte de raíces o muerte de la plantas. Además, el Na produce un impacto negativo en las propiedades físicas del suelo potencialmente enmendado (Promix. 2022).

A lo largo del compostaje, el contenido de estos elementos aumenta debido a un efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la masa por degradación de materia orgánica.

Los contenidos de fósforo, potasio y sodio (P, K y Na) obtenidos en los procesos de compostaje se muestran en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16. Estos elementos presentaron comportamientos distintos dependiendo de la pila analizada. En la GVA 175, los contenidos de P, K y Na disminuyeron durante la fase bio-oxidativa y aumentaron en la maduración, en ambos casos de forma significativa, sin volver a alcanzar los valores iniciales. En la GVA 176, el P y el K se incrementaron durante todo el proceso, de forma significativa en la fase bio-oxidativa. El Na se mantuvo estable hasta la etapa de maduración en la cual se apreció una leve subida significativa. Mientras que en la GVA 177 el P, K y Na aumentaron de forma significativa en la fase bio-oxidativa respecto a los valores iniciales para luego disminuir significativamente en la maduración. El contenido de Na disminuyó escasamente durante la maduración.

En cuanto al contenido de P (Figura 4.14), al inicio del proceso la GVA 175 presentó el valor superior (3,48 g/kg), cosa que se esperaría al tener esta pila el mayor porcentaje sobre masa fresca de gallinaza, material rico en P. La siguiente pila con mayor contenido en P fue la GVA 176 (2,46 g/kg) y la GVA 177 (1,74 g/kg). Al final del proceso, la GVA 176 contuvo la mayor concentración de P (3,52 g/kg), seguida por la GVA 177 (2,98 g/kg) mientras que la GVA 175 pasó a tener el menor contenido (2,38 g/kg).

El contenido medio de P de las pilas (Tabla 4.13) disminuyó de forma significativa durante la fase bio-oxidativa y se mantuvo estable durante la maduración, obteniendo un valor medio final de 3,0 g/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar el P medio de la pila, encontrando diferencias significativas entre el P medio de la GVA 175 y las otras pilas con destríos.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 69*** | 37*** | 97*** |

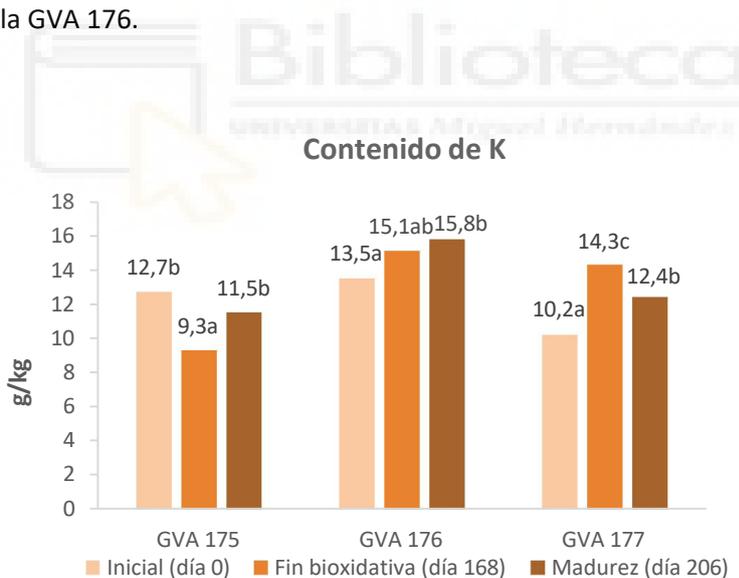
Figura 4.14. Evolución del contenido de P durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC). S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca.

Tabla 4.13. Datos medios de fósforo (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de P según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 2,6 a | 3,0 a | 3,0 a | 4,5 ns |
| Valores medios de P según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 2,6 a | 3,1 b | 2,8 ab | 7,8** |

Respecto al contenido de K (Figura 4.15), la GVA 176 presentó el valor inicial más elevado (13,5 g/kg), lo cual no sería el resultado esperado ya que la GVA 176 no contiene la mayor proporción de materiales ricos en K (sarmiento y gallinaza). La siguiente pila con mayor cantidad de K fue la GVA 175 (12,7 g/kg) y, por último, la GVA 177 (10,2 g/kg). Al final del proceso, la GVA 176 siguió teniendo el valor superior de contenido de K (15,8 g/kg), seguida de la GVA 177 (12,4 g/kg) y la GVA 175 (11,5 g/kg).

El contenido medio de K de las pilas (Tabla 4.14) se mantuvo sin diferencias significativas a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 13,2 g/kg. El aumento de la presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el K medio de la pila GVA 176.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 18** | 6,6* | 25** |

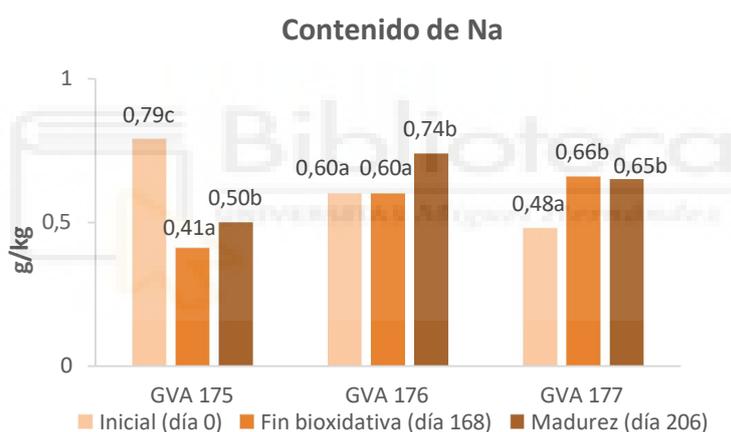
Figura 4.15. Evolución del contenido de K durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC). S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca.

Tabla 4.14. Datos medios de potasio (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de K según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 12,1 a | 12,9 a | 13,2 a | 1,9 ns |
| Valores medios de K según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 11,2 a | 14,8 b | 12,3 a | 19** |

En lo que respecta al contenido de Na (Figura 4.16), en todas las pilas los valores desde el inicio hasta el final del proceso fueron muy bajos, inferiores a 1 g/kg, debido a que los materiales de partida presentaron bajas concentraciones de dicho elemento.

El contenido medio de Na de las pilas (Tabla 4.15) disminuyó de forma significativa durante la fase bio-oxidativa y volvió a aumentar hasta el valor inicial durante la maduración, obteniendo un valor medio final de 0,63 g/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el Na medio de la pila GVA 176.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 111*** | 11* | 12** |

Figura 4.16. Evolución del contenido de Na durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.15. Datos medios de sodio (g/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Na según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 0,63 b | 0,56 a | 0,63 b | 34** |
| Valores medios de Na según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 0,57 a | 0,65 b | 0,60 a | 27*** |

Los compost finales tuvieron porcentajes bajos de estos elementos: 0,6-0,8% de P_2O_5 ; 1,4-1,9% de K_2O y 0,5-0,7 g/kg de Na, resultados similares a los encontrados por Bignami y col. (2022) y superiores a los de diversos estudios de compostaje de sarmientos (Matei y col., 2016; Manios y col., 2004; Kostov y col., 1996). El compost de la GVA 176 presentó los mejores valores de estos nutrientes, seguido por el de la GVA 177 y GVA 175, sin diferencias significativas entre estos últimos.

4.4. CALIDAD DEL COMPOST

4.4.1. Madurez del compost: Índice de germinación y humificación

El grado de madurez se define como la ausencia de fitotoxicidad en el producto final, producida por determinados compuestos orgánicos fitotóxicos como el amoníaco, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos hidrosolubles, etc., que se forman durante la fase activa del compostaje, es decir, la fase bio-oxidativa. Por tanto, la madurez de un compost implica una relación directa con el crecimiento y desarrollo vegetal, por lo que el grado de madurez puede determinarse simplemente mediante la respuesta vegetal. Aunque la fitotoxicidad también puede ser causada por otros factores como la presencia de altas concentraciones de metales pesados potencialmente fitotóxicos y/o una alta concentración de sales solubles.

Además, el nivel de humificación de un compost también debe tenerse en cuenta para determinar su madurez ya que un compost altamente “humificado” cuya materia orgánica ha evolucionado hacia formas más resistentes a la biodegradación es un compost altamente maduro, que carece de sustancias fitotóxicas.

4.4.1.1. Índice de germinación

El índice de germinación (IG) de semillas es un método biológico que proporciona información sobre el grado de madurez alcanzado por un compost. En este trabajo, se ha utilizado el IG propuesto por Zucconi y col. (1981), que consiste en la incubación de semillas de *Lepidium sativum* L., durante 48 horas a 27°C, sobre extracto acuoso del compost. El IG se determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y la longitud media de las raíces. Según este método, el compost está maduro cuando el IG es superior al 50%, valores inferiores indican una alta fitotoxicidad del material y pueden producir daños sobre las plantas una vez se les aplique como fertilizante. Se trata de un bioensayo muy sensible a los efectos inhibidores de las fitotoxinas (fenoles, ácidos grasos, amoníaco, etc.) resultantes de los procesos de mineralización de la materia orgánica.

Los compost obtenidos presentaron valores aceptables del IG: 84,2%; 71,2% y 79,4% en GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente, superiores al valor mínimo establecido por Zucconi y col. (1981) del 50%. Estos resultados indican que los compost muestran ausencia de fitotoxinas y están maduros, por lo que no van a producir efectos tóxicos sobre el crecimiento de las plantas una vez sean aplicados como fertilizante. Así, estos compost se pueden utilizar de forma segura en agricultura sin efectos fitotóxicos.

Comparando las tres mezclas, se observan diferencias significativas entre la GVA 175 y la GVA 176. La GVA 175 con mayor proporción de sarmientos de vid presenta un IG superior a las

otras pilas. Se observa que conforme disminuye la proporción de sarmientos y la gallinaza y se aumenta la de los destríos también disminuye el IG.

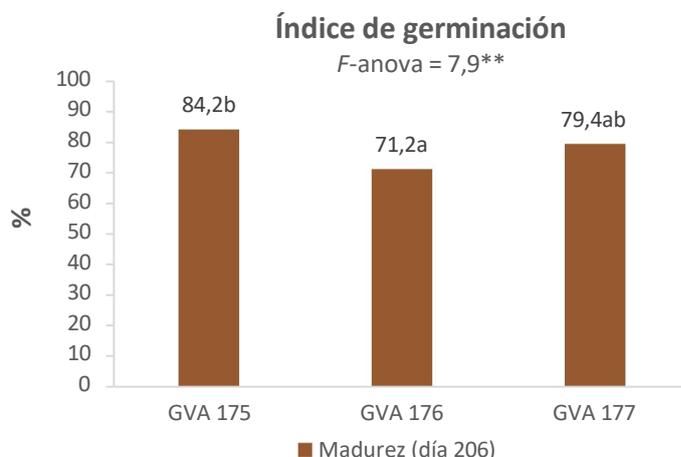


Figura 4.17. Resultados del índice de germinación del proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

4.4.1.2. Índices de humificación

La materia orgánica sufre una mineralización parcial durante el proceso de compostaje y la fracción residual se transforma en nuevos materiales orgánicos, que posteriormente se humifican (Campitelli y col., 2006). El humus es uno de los principales componentes de la materia orgánica del suelo. Esta fracción presenta más resistencia a la degradación microbiana y confiere la mayoría de las propiedades beneficiosas que ésta aporta al suelo, como la capacidad tamponante y la mejora de su estructura.

Los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los compost, a partir de los porcentajes de carbono extraíble (Cex), carbono de ácidos húmicos (Cah) y carbono de ácidos fúlvicos (Caf) son los siguientes:

- Relación de humificación (RH) = $Cex/Corg \times 100$
- Índice de humificación (IH) = $Cah/Corg \times 100$
- Porcentaje de ácidos húmicos (Pah) = $Cah/Cex \times 100$
- Relación de polimerización (RP) = Cah/Caf

Los valores mínimos de estos índices se resumen en la Tabla 4.16. Estos índices sólo serán útiles para seguir el proceso de compostaje de una determinada pila, por lo que se deberá estudiar su evolución en el tiempo más que los valores finales y esto sucede porque dependen de la naturaleza de los materiales originales que se utilicen.

El incremento de estos parámetros durante el compostaje es un buen indicativo del proceso de humificación de la materia orgánica (Bustamante y col., 2013).

Tabla 4.16. Evaluación de índices de estabilización de compost maduro.

| Parámetro | Valor límite | Referencias |
|---|--------------|---|
| Carbono extraíble, C_{ex} (g/kg) | <60 | Bernal y col., 1998 |
| Relación de humificación (RH) (%), $C_{ex}/C_{OT} \times 100$ | >7 | Roletto y col., 1985 |
| Índice de humificación (IH) (%), $C_{ah}/C_{OT} \times 100$ | >3,5 >13 | Roletto y col., 1985 Iglesias-Jiménez y Pérez-García., 1992a |
| Porcentaje de ácidos húmicos (Pah) (%), $C_{ah}/C_{ex} \times 100$ | >62 | Iglesias-Jiménez y Pérez-García., 1992a |
| Índice de polimerización (RP) (%), C_{ah}/C_{af} $\times 100$ | >1 >1,6 | Roletto y col., 1985 Iglesias-Jiménez y Pérez-García., 1992a |

Los resultados de los índices de humificación obtenidos para los compost estudiados se presentan en la Tabla 4.17. La concentración en sustancias húmicas en los compost fue estadísticamente superior en la GVA 176 y la GVA 177 respecto al contenido en la GVA 175. El carbono de ácidos húmicos fue mayoritario frente al de ácidos fúlvicos en todos los compost lo cual es indicativo de la madurez alcanzada en el material.

En relación con los otros índices de humificación (RH, IH, Pah y RP), los compost de la GVA 176 y GVA 177 presentaron valores superiores a los límites establecidos por diversos autores para todos los parámetros (Tabla 4.17), mostrando un buen grado de madurez. En el compost de la GVA 175 la RH, el IH y el RP presentaron valores superiores a los de referencia dispuestos por Roletto y col. (1985) aunque el IH no cumple con el valor límite propuesto por Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992a), mientras que el valor de Pah no alcanzó el valor mínimo establecido. Por tanto, en los compost obtenidos de las pilas GVA 176 y GVA 177 se han podido verificar los criterios de madurez y en el de la GVA 175 dependiendo de las referencias consultadas.

Tabla 4.17. Índices de estabilización en los compost obtenidos.

| Parámetro | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|--|---------|---------|---------|
| Carbono extraíble (%) | 2,7 | 3,9 | 3,8 |
| Carbono de ácidos fúlvicos (%) | 1,2 | 1,3 | 1,3 |
| Carbono de ácidos húmicos (%) | 1,4 | 2,7 | 2,5 |
| Relación de humificación (RH) (%) | 17,7 | 22,9 | 21,7 |
| Índice de humificación (IH) (%) | 9,7 | 15,6 | 14,5 |
| Porcentaje de ácidos húmicos (Pah) (%) | 54,5 | 67,7 | 66,7 |
| Índice de polimerización (RP) (%) | 1,2 | 2,1 | 2,0 |

(GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

4.4.2. Estabilidad de compost: test autocalentamiento

La evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje es un reflejo de la actividad metabólica de los microorganismos implicados en el proceso. Por tanto, este parámetro es un buen indicador del final de la fase bio-oxidativa en la cual el compost ha adquirido cierta madurez, ya que la curva de temperatura se estabiliza definitivamente, no variando con el volteo del material. Por tanto, para que un compost se considere estabilizado biológicamente se debe asegurar al menos su estabilización térmica.

Determinaciones de producción de calor pueden indicar si los cambios metabólicos que acompañan a la aparente estabilización de la materia orgánica se han producido de forma completa o se encuentran en un estado de evolución transitoria (metabolismo latente). Por ello, se han propuesto diversos test de autocalentamiento del compost como criterio de estabilidad, ya que este hecho revela la presencia de un material no estable biológicamente que se basan en el mismo principio: el calor generado por una muestra de compost en un recipiente al vacío con una humedad apropiada durante un período de incubación entre 2 y 9 días, a temperatura constante. La temperatura máxima del material que sube por encima de la temperatura ambiente se utiliza con fines de interpretación. En realidad, el test de autocalentamiento es una medición indirecta del índice respiratorio del compost y se correlaciona bastante bien con la tasa de liberación de CO₂ (Brinton y col., 1995).

En el presente trabajo se utilizó el test de Dewar (Brinton y col., 1995). Clasifica el compost en 5 niveles de intervalos de aumento de temperatura (autocalentamiento) de 10°C cada uno. El nivel IV (aumento de hasta 20°C) corresponde a un compost maduro y el nivel V (aumento de hasta 10°C) corresponde a un compost altamente estabilizado.

Los compost analizados presentaron un incremento de temperatura de 3,5°C (GVA 175); 1,8°C (GVA 176) y 5,9°C (GVA 177) lo que, según el test de Dewar, se corresponde con el nivel V y, por tanto, se puede afirmar que los compost obtenidos presentan un alto grado de estabilidad.

4.4.3. Riesgos medioambientales: contenido en metales pesados

Los metales pesados forman parte de los factores que limitan la utilización agraria de un compost debido a los riesgos asociados que comportan, como toxicidad en las plantas, acumulación en tejidos vegetales y en el suelo, y contaminación en animales y humanos. Por ello, en los compost está limitado la concentración de metales pesados que pueden contener según el Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes y el Real Decreto 865/2010 sobre sustratos.

Estos elementos se concentran en el compost final a causa de la degradación de la materia orgánica, salvo si la masa sufre pérdidas por lixiviación.

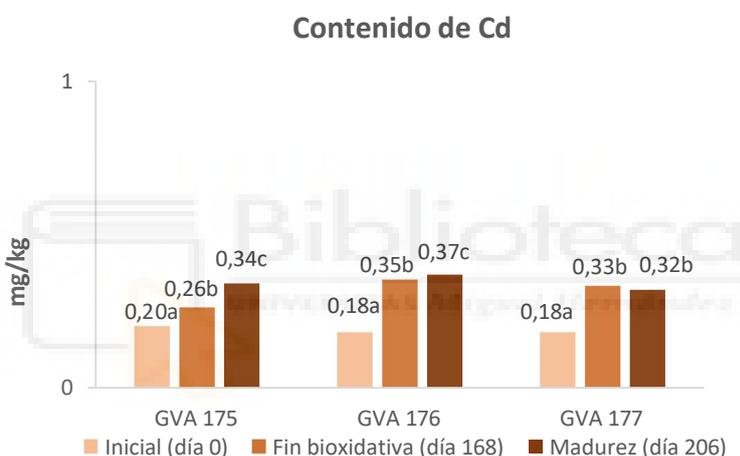
La evolución de los metales pesados se presenta en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23. En general, durante el proceso de compostaje se produce un incremento relativo en la concentración de metales pesados, debido a la pérdida de materia orgánica y su transformación.

En la pila GVA 175 la concentración de cadmio, níquel, plomo, zinc y cromo aumenta de forma significativa conforme avanza el proceso de compostaje, solamente el cobre no muestra variaciones significativas en su concentración a lo largo del proceso.

En la GVA 176 la concentración de todos ellos aumenta conforme avanza el proceso excepto en el Cu que aun incrementando su concentración a medida que avanza el proceso, entre la fase bio-oxidativa y la madurez no presentan diferencias significativas; y el Zn que no incrementa su concentración a partir del final de la fase bio-oxidativa.

En la GVA 177 para Cu y Pb se produce un aumento significativo de su concentración hasta el final de la fase bio-oxidativa y, posteriormente, durante la maduración se observa un descenso, significativo. Cd, Zn, Ni y Cr aumentan su contenido durante el proceso, no encontrándose diferencias significativas entre la fase bio-oxidativa y maduración.

En cuanto al contenido medio de Cd de las pilas (Tabla 4.18), éste aumentó de forma significativa a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 0,34 mg/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el contenido medio de Cd de la pila GVA 176.



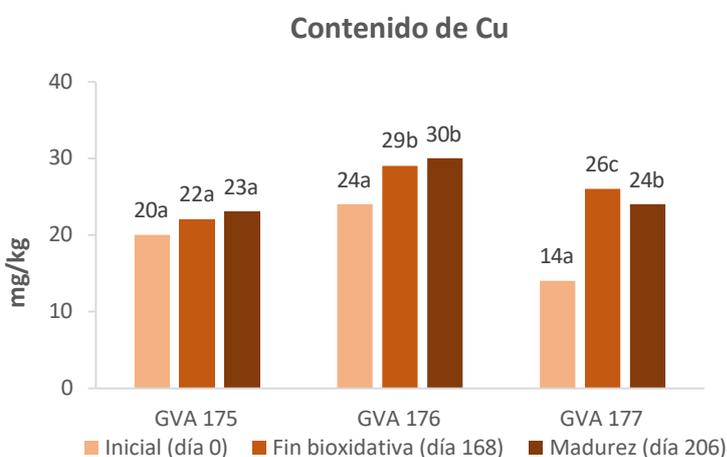
| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 67*** | 1002*** | 144*** |

Figura 4.18. Evolución del contenido de Cd durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.18. Datos medios de cadmio (mg/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Cd según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 0,18 a | 0,32 b | 0,34 c | 467*** |
| Valores medios de Cd según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 0,27 a | 0,30 b | 0,28 a | 18*** |

El contenido medio de Cu de las pilas (Tabla 4.19) aumentó significativamente durante la fase bio-oxidativa y se mantuvo sin diferencias significativas en la fase de maduración, obteniendo un valor medio final de 26 mg/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el contenido medio de Cu de la pila GVA 176.



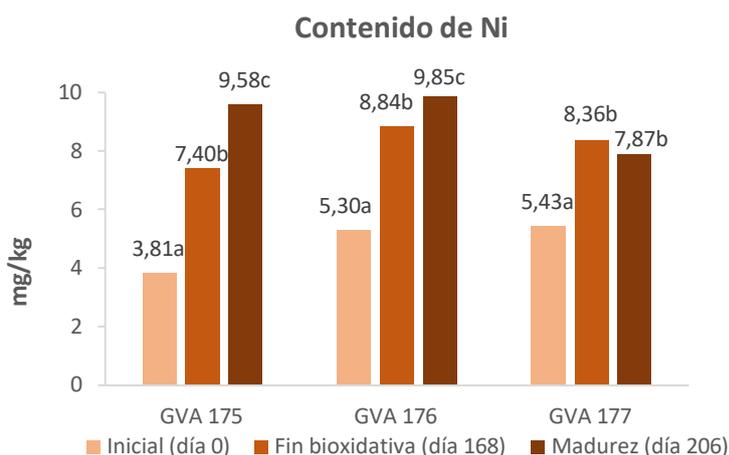
| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 4,3* | 12** | 183*** |

Figura 4.19. Evolución del contenido de Cu durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.19. Datos medios de cobre (mg/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Cu según el factor tiempo | | | |
|---|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova significación |
| 19 a | 26 b | 26 b | 70*** |
| Valores medios de Cu según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 21 a | 28 b | 22 a | 75*** |

El contenido medio de Ni de las pilas (Tabla 4.20) aumentó significativamente a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 9,10 mg/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el contenido medio de Ni de la pila GVA 176.



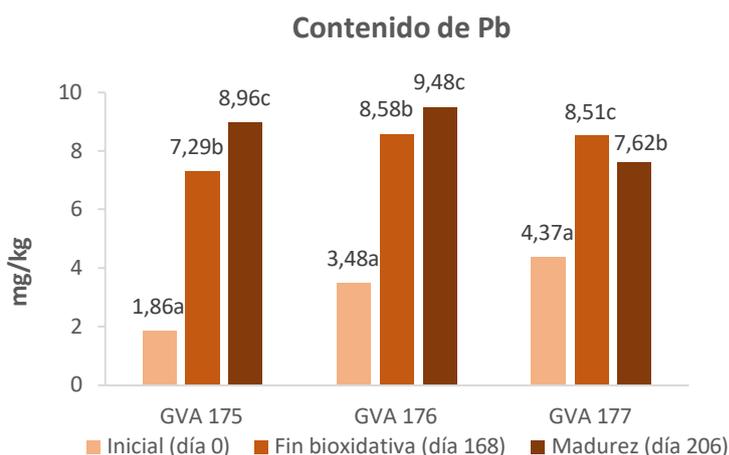
| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 139*** | 793*** | 32** |

Figura 4.20. Evolución del contenido de Ni durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.20. Datos medios de níquel (mg/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Ni según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 4,85 a | 8,20 b | 9,10 c | 313*** |
| Valores medios de Ni según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 6,93 a | 8,00 b | 7,22 a | 19*** |

El contenido medio de Pb de las pilas (Tabla 4.21) aumentó significativamente a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 8,68 mg/kg. El aumento de la presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el contenido medio de Pb de la pila.



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 543*** | 666*** | 924*** |

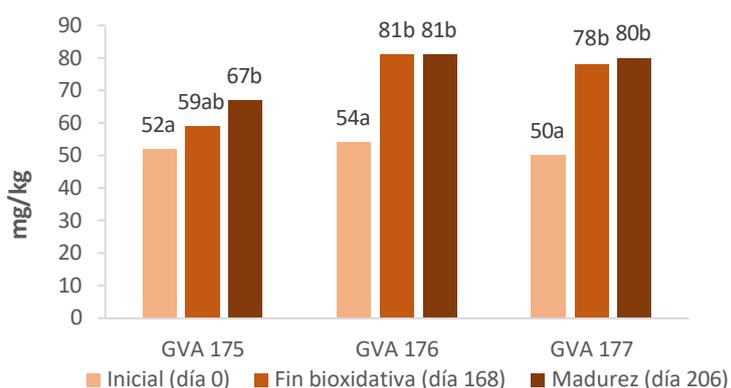
Figura 4.21. Evolución del contenido de Pb durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.21. Datos medios de plomo (mg/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Pb según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 3,24 a | 8,13 b | 8,68 c | 1748*** |
| Valores medios de Pb según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | |
| 6,04 a | 7,18 c | 6,83 b | 66*** |

El contenido medio de Zn de las pilas (Tabla 4.22) aumentó significativamente durante la fase bio-oxidativa y se mantuvo sin diferencias significativas en la fase de maduración, obteniendo un valor medio final de 76 mg/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el contenido medio de Zn de las pilas GVA 176 y GVA 177.

Contenido de Zn



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 9,4* | 17** | 30** |

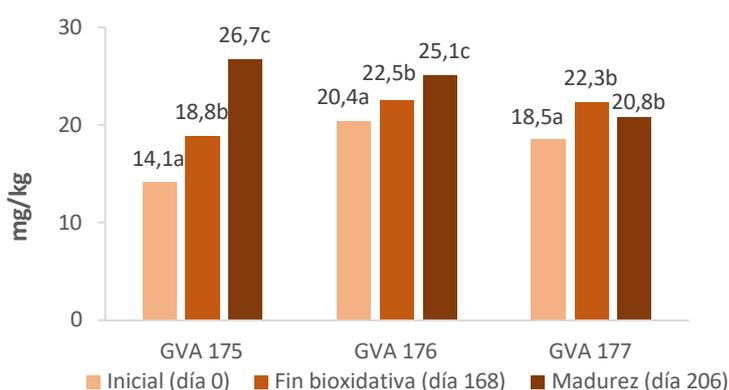
Figura 4.22. Evolución del contenido de Zn durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.22. Datos medios de zinc (mg/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Zn según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 52 a | 73 b | 76 b | 51*** |
| Valores medios de Zn según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | 13*** |
| 59 a | 72 b | 69 b | |

El contenido medio de Cr de las pilas (Tabla 4.23) aumentó significativamente a lo largo del tiempo de compostaje, obteniendo un valor medio final de 24,2 mg/kg. La presencia de destríos contribuyó a aumentar de forma significativa el contenido medio de Cr de la pila GVA 176.

Contenido de Cr



| | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| F-anova, significación | 50*** | 114*** | 16** |

Figura 4.23. Evolución del contenido de Cr durante el proceso de compostaje (GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

Tabla 4.23. Datos medios de cromo (mg/kg) según el factor tiempo y tipo de compost.

| Valores medios de Cr según el factor tiempo | | | |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Inicial | Final bio-oxidativa | Madurez | F-anova, significación |
| 17,7 a | 21,2 b | 24,2 c | 88*** |
| Valores medios de Cr según el factor tipo de compost | | | |
| GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | F-anova, significación |
| SAR52_GAL48 | SAR16_GAL27_CIT48_CAQ_9 | SAR21_GAL37_CIT42 | 17*** |
| 19,9 a | 22,7 b | 20,6 a | |

Las concentraciones de metales pesados en los compost analizados se muestran en la Tabla 4.24. Los productos fertilizantes obtenidos mostraron niveles por debajo del límite máximo permitido por la legislación española para compost utilizados en agricultura, cumpliendo con el Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes según el cual los compost obtenidos en este trabajo se clasificarían como clase A; y para compost utilizados en sustratos, Real Decreto 865/2010 sobre sustratos, según el cual también son clase A.

El compost de la pila GVA 176 presentó las mayores concentraciones para la mayoría de los metales pesados, aun sin contener la mayor proporción de materiales con las más altas concentraciones de metales pesados (destrío de cítrico y gallinaza), que sí contuvo la GVA 177. En el caso del Cr, su concentración final fue superior en la GVA 175. El siguiente compost con mayor concentración de metales pesados fue el de la GVA 175. Estos resultados indican que no hubo efecto dilución de la adición de los sarmientos de vid a las mezclas de compostaje sobre la concentración de metales pesados en los materiales finales.

Tabla 4.24. Concentración de metales pesados en los compost (Datos referidos a materia seca).

| Parámetro | GVA 175 | GVA 176 | GVA 177 | RD 999/2017 | | | RD 865/2010 | |
|-------------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------------|---------|
| | | | | Clase A | Clase B | Clase C | Clase A | Clase B |
| Cd (mg/kg) | 0,35 | 0,38 | 0,32 | 0,7 | 2 | 3 | 0,7 | 2 |
| Cu (mg/kg) | 23,0 | 30,7 | 23,1 | 70 | 300 | 400 | 70 | 300 |
| Ni (mg/kg) | 9,66 | 9,93 | 7,94 | 25 | 90 | 100 | 25 | 90 |
| Pb (mg/kg) | 9,03 | 9,56 | 7,68 | 45 | 150 | 200 | 45 | 150 |
| Zn (mg/kg) | 61,2 | 82,1 | 80,6 | 200 | 500 | 1000 | 200 | 500 |
| Cr (mg/kg) | 26,9 | 25,3 | 20,0 | 70 | 250 | 300 | 70 | 250 |

(GVA 175: 56,9% S + 43,1% G; GVA 176: 32,8% S + 46% G + 16,7% DC + 4,5% DQ; GVA 177: 35,9% S + 52,1% G + 12% DC. S: sarmiento de vid, G: gallinaza, DC: destrío de cítrico y DQ: destrío de caqui. Porcentajes sobre masa seca).

4.5. VALOR ECONÓMICO DEL COMPOST

La evaluación económica de los nutrientes contenidos en los compost se realizó a partir de los precios de los siguientes fertilizantes: urea, fosfato diamónico (DAP) y cloruro de potasio (KCl). Los valores promedio de estos fertilizantes, considerando sus precios en abril de 2022 según lo estipulado por The World Bank, fueron de 854,92 €/t para la urea; 881,72 €/t para el DAP y 519,88 €/t para el KCl. Los valores promedio de las unidades fertilizantes de N, P₂O₅ y K₂O se calcularon como 18,74; 43,59 y 10,50 €/t, respectivamente. Sobre esta base se asignó un valor económico a los nutrientes dentro de los compost, considerando un contenido de humedad del 25% en todos los compost.

La Tabla 4.25 muestra el valor económico de cada nutriente en los compost elaborados, considerando la cantidad de N, P₂O₅ y K₂O en cada compost y el valor de las unidades fertilizantes.

Tabla 4.25. Valor económico (€/t) de los compost obtenidos.

| NUTRIENTE | COMPOST GVA 175 | COMPOST GVA 176 | COMPOST GVA 177 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| N | 14,2 | 17,0 | 17,7 |
| P₂O₅ | 17,7 | 26,5 | 22,2 |
| K₂O | 10,9 | 15,0 | 11,7 |
| Valor combinado total | 42,7 | 58,5 | 51,7 |

El valor combinado del compost de la GVA 176 y GVA 177 fue 16€/t y 9 €/t superior al de la GVA 175 debido al mayor contenido de NT, fósforo y potasio en la GVA 176 y de NT y fósforo en la GVA 177.

Respecto al contenido de nutrientes, el fósforo fue el que más aportó al valor combinado en todos los compost (41%, 45% y 43% en la GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente), el siguiente fue el nitrógeno (33%, 29% y 34% en la GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente) y, por último, el potasio con un 26%, 25% y 23%, en la GVA 175, GVA 176 y GVA 177, respectivamente.

En definitiva, los nutrientes de los compost constituyen una alternativa económica de aporte de macro y micronutrientes, pudiendo reducir requerimientos nutricionales para los cultivos y la aplicación de fertilizantes minerales, con los consiguientes beneficios ambientales asociados a la disminución de su producción y transporte.



5. CONCLUSIONES

En este experimento se han ensayado diferentes procesos de compostaje con proporciones variables de sarmiento, gallinaza y destríos agroindustriales de forma que se puede observar la incidencia de la proporción y relación entre ellos, a fin de poder justificar la realización de compostajes complejos (multiresiduos) y ver la posibilidad de disminuir la proporción de gallinaza que es un recurso exógeno que el agricultor necesita adquirir.

Las principales conclusiones fueron las siguientes:

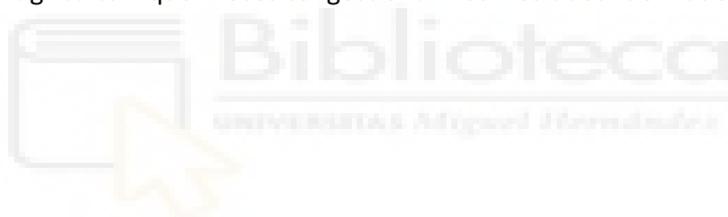
- La mayor proporción de destríos en la pila (GVA 176) permitió alcanzar superiores incrementos de temperatura respecto a la ambiental y generar un mayor índice exotérmico, todo ello, sin inducir mayores pérdidas de materia orgánica, ya que éstas se produjeron en la pila GVA 175 (sin destríos y con mayor proporción de sarmientos y gallinaza). Los requisitos necesarios para permitir una correcta higienización del material se cumplieron en las tres pilas.
- Las pilas presentaron valores medios similares en cuanto a contenido de carbono orgánico y pérdida de materia orgánica. Para el resto de parámetros estudiados las pilas con destríos, GVA 176 y GVA 177, obtuvieron mayores resultados medios que la GVA 175, excepto para la relación Corg/NT y el índice de germinación.
- Las pilas con destríos no presentaron diferencias en cuanto a valores medios de materia orgánica total, fósforo, polifenoles, zinc, índice de germinación y humedad. En cambio, para valores medios de densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, Corg/NT, potasio, sodio y la mayoría de metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb y Cr) la pila GVA 176 con mayor proporción de destríos presentó valores superiores a la pila GVA 177. Solamente el valor medio de nitrógeno total fue superior en la pila GVA 177, seguida de la pila GVA 176.
- Las pilas GVA 175 (sin destríos) y GVA 177 (con menor proporción de destríos) se asemejaron en cuanto al contenido medio de potasio, sodio y metales pesados (Cd, Cu, Ni y Cr).
- Los compost de la pila GVA 175 y GVA 177 mostraron valores de pH en el rango adecuado para el crecimiento vegetal mientras que el pH de la GVA 176 (con mayor proporción de destríos) superó ligeramente el máximo recomendado. El valor de conductividad eléctrica que presentaron estuvo bastante por debajo del adecuado para no provocar efectos adversos.
- Los compost obtenidos presentaron un bajo contenido de materia orgánica, inferior al mínimo requerido por la legislación española del 35%. Por tanto, no pueden ser comercializados como fertilizantes según la legislación española (BOE 2017). Tendrían que suplementarse con otros materiales para alcanzar el contenido adecuado de materia orgánica.
- En cuanto a la concentración de nutrientes, todos los compost presentaron un porcentaje de nitrógeno total superior al 1% lo cual sugiere que son buenas fuentes de fertilizante nitrogenado. Los compost mostraron bajas concentraciones en fósforo

(0,6-0,8% P_2O_5) que tendrían que ser compensadas con fertilizantes inorgánicos según la demanda del cultivo al que se destine, en cambio, mostraron un contenido medio en potasio (1,4-1,9% K_2O), ambos aumentaron con la presencia de destríos.

- Los escasos contenidos en metales pesados permitieron clasificar todos los compost en la mejor opción, la clase A (BOE 2017 y BOE 2010).
- Los resultados del índice de germinación (>70%), la relación Corg/NT (<15), los índices de humificación y el test de autocalentamiento (nivel V) han permitido verificar que todos los compost alcanzaron un nivel de madurez adecuado con ausencia de fitotoxicidad, alto contenido en materia orgánica humificada, sobre todo en los compost con destríos, y un elevado grado de estabilidad estructural.

Cabe destacar que el incremento de la proporción de destríos y, por tanto, la disminución de la cantidad de gallinaza produjo en los compost un aumento de los niveles fertilizantes y, por tanto, de su valor económico respecto al compost sin ellos ya que contuvieron mayor cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio.

De los resultados hallados se puede concluir que el compostaje con mayor diversidad de ingredientes mejora la calidad y capacidad fertilizante de los compost en comparación con la mezcla binaria, lo que reduce la aplicación de fertilizantes minerales complementarios. Además, permite disminuir la cantidad de estiércol utilizado en el compostaje y, con ello, los costes para el agricultor que necesite gestionar los residuos derivados de su actividad económica.



6. BIBLIOGRAFÍA

Abou, E.A., Elbaalawy, A.M. y Hamad, M.M. 2019. Chemical Properties of Compost in Relation to Calcareous Soil Properties and Its Productivity of Wheat. *Egyptian Journal of Soil Science*, 59 (1), 85-97.

Abrisqueta, C. y Romero, M. 1969. Digestión húmeda rápida de suelos y materiales orgánicos. *Anal. Edafol. Agrobiol.*, 27, 855-867.

Beltrán, F.J., García-Araya, J.F. y Álvarez, P.M. 1999. Wine distillery wastewater degradation. 1. Oxidative treatment using ozone and its effect on the wastewater biodegradability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47 (9), 3911-3918.

Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A. y Cegarra, J. 1998. Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63 (1), 91-99.

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

Bernal-Vicente, A., Ros, M. y Pascual, J.A. 2012. Inoculation of *Trichoderma harzianum* during maturation of vineyard waste compost to control muskmelon *Fusarium* wilt. *BioResources*, 7 (2), 1948-1960.

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

Bignami, C., Melegari, F., Zaccardelli, M., Pane, C. y Ronga, D. 2022. Composted Solid Digestate and Vineyard Winter Prunings Partially Replace Peat in Growing Substrates for Micropropagated Highbush Blueberry in the Nursery. *Agronomy*, 12, 337.

Blaya, J., López-Mondéjar, R., Lloret, E., Pascual, J.A. y Ros, M. 2013. Changes induced by *Trichoderma harzianum* in suppressive compost controlling *Fusarium* wilt. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107, 112-119.

Boldrin, A. 2009. Environmental assessment of garden waste management. PhD Thesis, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark. Lyngby, Denmark.

Brinton, W.F., Evans, E., Droffner, M.L. y Brinton, R.B. 1995. Standardized test for evaluation of compost self-heating. *Biocycle*, 36 (11), 64-69.

Bueno-Márquez, P., Díaz, M.J. y Cabrera, F. 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje. En: *Compostaje*. Ed.: Moreno, J. y Moral, R. Mundi-Prensa, 111-140. Madrid.

Bustamante, M.A., Pérez-Murcia, M.D., Paredes, C., Moral, R., Pérez-Espinosa, A. y Moreno-Caselles, J. 2007. Short-term carbon and nitrogen mineralisation in soil amended with winery and distillery organic wastes. *Bioresource Technology*, 98, 3269-3277.

Bustamante, M.A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F.C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M.P. y Moral, R. 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manure: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72 (4), 551-557.

- Bustamante, M.A., Albuquerque, J.A., Restrepo, A.P., de la Fuente, C., Paredes, C., Moral, R. y Bernal, M.P. 2012. Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture. *Biomass and bioenergy*, 43, 26-35.
- Bustamante, M.A., Restrepo, A.P., Albuquerque, J.A., Pérez-Murcia, M.D., Paredes, C., Moral, R. y Bernal, M.P. 2013. Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Journal of Cleaner Production*, 47, 61-69.
- Campitelli, P.A., Velasco, M.I. y Ceppi, S.B. 2006. Chemical and physicochemical characteristics of humic acids extracted from compost, soil and amended soil. *Talanta*, 69 (5), 1234-1239.
- Cárdenas, R.R. y Wang, L.K. 1980. Composting process. En: *Handbook of Environmental Engineering*. Vol. II. The Human Press. New York. Pp. 269-327.
- Cayuela, M.L., Sánchez-Monedero, M.A. y Roig, A. 2006. Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry*, 41 (3), 616-623.
- Cegarra, J. 1978. Fraccionamiento de fertilizantes orgánicos y de sus productos de humificación. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Murcia.
- Cegarra, J., Albuquerque, J.A., González, J., Tortosa, G. y Chaw, D. 2006. Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by product ("alperujo") managed by mechanical turning. *Waste Management*, 26 (12), 1377-1383.
- Chen, Y. e Inbar, Y. 1993. Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*. Ed.: Hoitink, H.A.J. y Keener, H.M. Renaissance Publications. Ohio. Pp. 551-600.
- Chica, A. y García, J.L. 2008. Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje. En: *Compostaje*. Ed.: Moreno, J. y Moral, R. Editorial Mundi-Prensa, Madrid. Pp: 141-164.
- Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. 1991. *Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización*. Ed.: CSIC-CEBAS. Murcia.
- De Vleeschauwer, D., Verdonck, O. y Van Assche, P. 1981. Phytotoxicity of refuse compost. *BioCycle*, 22, 44-46.
- DOGV (2018). Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural. Comunicado de prensa núm. 8224 del 21 de enero del 2018, Valencia. *Diari Oficial de la Generalitat Valenciana*.
- Fermor, T.T. 1993. Applied aspects of composting and bioconversion of lignocellulosic materials: an overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 31, 87-106.
- Fregoni, M. 2007. Viticultura y Cambio Climático. *Revista Enológica*, 1-9.
- García, C., Hernández, T., Costa, F. y Ayuso, M. 1992. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23, 1501-1512.
- Golueke, C.G. 1991. Principles of biological resource recovery. *BioCycle*, 22, 36-40.

- Harada, Y., Inoko, A., Tadaki, M. e Izawa, T. 1981. Maturing process of city refuse compost during piling. *Soil Science Plant Nutrition*, 27, 357-364.
- Haug, R.T. 1993. *The practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, 717.
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Moral, R., Andreu-Rodríguez, F.J., Fernández, J.A., Egea-Gilabert, C. y Pascual, J.A. 2021. The influence of feedstocks and additives in 23 added-value composts as a growing media component on *Pythium irregulare* suppressivity. *Waste Management*, 120, 351–363.
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Cuartero, J., Bustamante, M.A., Moral, R., Andreu-Rodríguez, F.J., Fernández, J.A., Egea-Gilabert, C. y Pascual, J.A. 2022. Bacterial and fungal community dynamics during different stages of agro-industrial waste composting and its relationship with compost suppressiveness. *Science of the Total Environment*, 805, 150330.
- Hogg, D., Barth, J., Favoino, E., Centemero, M., Caimi, V., Amlinger, F., Devliegher, W., Brinton, W. y Antler, S. 2002. Comparison of compost standards within the EU, North America, and Australasia. Main report. Banbury, UK: Waste and Resources Action Programme.
- Hue, N.V. y Liu, J. 1995. Predicting compost stability. *Compost Science and Utilization*, 3 (2), 8-15.
- Huerta, O., López, M. y Soliva, M. 2010. *Procés de compostatge: caracterització de mostres*. Diputació de Barcelona. Pp 431.
- Iglesias, E. y Pérez, V. 1989. Evaluation of city refuses compost maturity: a review. *Biology Wastes*, 27, 115-142.
- Iglesias, E. y Pérez, V. 1991. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 45-60.
- Iglesias, E. y Pérez, V. 1992a. Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 243-257.
- Iglesias, E. y Pérez, V. 1992b. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 38 (4), 331-343.
- Iglesias, E., Barral, M.T. y Marhuenda, F.C. 2008. Indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En: *Compostaje*. Ed.: Moreno, J. y Moral, R. Mundi-Prensa, Madrid. Pp.245-283.
- Intagri. 2017a. Síntomas Visuales de Deficiencia de Fósforo en los Cultivos. *Serie Nutrición Vegetal*, 103, 4.
- Intagri. 2017b. Las Funciones del Potasio en la Nutrición Vegetal. *Serie Nutrición Vegetal*, 100, 4.
- Jhorar, B.S., Phogat, V. y Malik, E. 1991. Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 5, 297-306.

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

Kitson, R.E. y Mellon, M.G. 1944. Colorimetric determination of phosphorus as molybdivanadophosphoric acid. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 16 (6), 379-383.

Kostov, O., Tzvetkov, Y., Petkova, G. y Lynch, J.M. 1996. Aerobic composting of plant wastes and their effect on the yield of ryegrass and tomatoes. *Biology and Fertility of Soils*, 23, 20-25.

Laca, A., Gancedo, S., Laca, A. y Díaz, M. 2021. Assessment of the environmental impacts associated with vineyards and winemaking. A case study in mountain areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 1204-1223.

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

Lecomte, P., Louvet, G., Vacher, B. y Guilbaud, P. 2006. Survival of fungi associated with grapevine decline in pruned wood after composting. *Phytopathologia Mediterranea*, 45, 127-130.

Malcheva, B., Yordanova, M., Borisov, R., Vicheva, T. y Nustorova, M. 2018. Dynamics of microbiological indicators for comparative study of compost variants. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, 62, 649-654.

Maniadakis, K., Lasaridi, K., Manios, Y., Kyriacou, M. y Manios, T. 2004. Integrated Waste Management through Producers and Consumers Education: Composting of Vegetable Crop Residues for Reuse in Cultivation. *Journal of Environmental Science and Health. Part B—Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, B39 (1), 169-183.

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

Manios, T. 2004. The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. *Environment International*, 29, 1079-1089.

Masaguer, A. y Benito, M. 2008. Evaluación de la calidad del compost. En: *Compostaje*. Ed.: Moreno, J. y Moral, R. Mundi-Prensa, Madrid. Pp. 285-304.

Matei, P.M., Sánchez-Báscones, M., Bravo-Sánchez, C.T., Martín-Ramos, P., Martín-Villullas, M.T., García-González, M.C., Hernández-Navarro, S., Navas-Gracia, L.M. y Martín-Gil, J. 2016. Hygienization and control of *Diplodia seriata* fungus in vine pruning waste composting and its seasonal variability in open and closed systems. *Waste Management*, 58, 126-134.

Mathur, S.P., Oen, G., Dinel, H. y Schnitzer, M. 1991. Determination of compost biomaturity. I. Literature review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 10, 65-85.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 2020. Anuario de Estadística 2020. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 2021. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE). Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Moral, R. y Muro, J. 2008. Manejo, dosificación y gestión agronómica del compost. En: Compostaje. Ed.: Moreno, J. y Moral, R. Mundi-Prensa, Madrid. Pp.351-378.
- Morales, A.B., Bustamante, M.A., Marhuenda-Egea, F.C., Moral, R., Ros, M. y Pascual, J.A. 2016. Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained. *Journal of Cleaner Production*, 121, 186-197.
- Morales, A.B., Ros, M., Ayuso, L.M., Bustamante, M.A., Moral, R. y Pascual, J.A. 2017. Agroindustrial composts to reduce the use of peat and fungicides in the cultivation of muskmelon seedlings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 875-881.
- Morel, J., Jacquin, F., Guckert, A. y Barthel, C. 1979. Contribuion a la détermination de test de la maturité des composts urbains. C.R. Contrat, 75-124. Ministère de l'Environnement et Du Cadre Vie E.N.S.A.I.A. Nancy, 32.
- Moreno, C. y Moral, R. 2008. Compostaje. Mundi Prensa. Madrid.
- Moreno, J. y Mormeneo, S. 2008. Microbiología y bioquímica del proceso. En: Compostaje, (eds) Moreno, J. y Moral, R. Mundi-Prensa, pp. 111-140.
- Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A. y Bernal, M.P. 1991. An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22 (19), 2137-2144.
- Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A. y Garcia, D. 1993. Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes. *Bioresource Technology*, 44 (3), 203-207.
- Navarro, J., Moral, R., Gómez, I. y Mataix, J. 1995. Residuos orgánicos y agricultura. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Alicante.
- Pardo, A., Perona, M.A. y Pardo, J. 2007. Indoor composting of vine by-products to produce substrates for mushroom cultivation. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5 (3), 417-424.
- Paredes, C., Roig, A., Bernal, M.P., Sánchez-Monedero, M.A. y Cegarra, J. 2000. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol Fert Soils*, 32(3), 222-7.
- Paredes, C., Bernal, M.P., Roig, A. y Cegarra, J. 2001. Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes. *Biodegradation*, 12, 225-234.
- Paredes, C., Bernal, M.P., Cegarra, J. y Roig, A. 2002. Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting whit agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 85 (1), 1-8.
- Pérez-Murcia, M.D., Martínez-Sabater, E., Domene, M.A., González-Céspedes, A., Bustamante, M.A., Marhuenda-Egea, F.C., Barber, X., López-Lluch, D.B. y Moral, R. 2021. Role of proteins and soluble peptides as limiting components during the co-composting of agro-industrial wastes. *Journal of Environmental Management*, 300, 113701.
- Poincelot, R.P. 1974. A scientific examination of the principles and practice of composting. *Compost Sci*, 15, 24-31.

- Promix. 2022. <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-sodio-y-del-cloruro-en-el-cultivo-de-plantas> (consulta 3/09/2022)
- Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. BOE 296, 119396-119450.
- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. BOE 170, 61831-61859.
- Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 1069/2009 y (CE) n.º 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) n.º 2003/2003. DO, 170, 1-114.
- Roletto, E., Consiglio, M., Jodice, R. y Barberis, R. 1985. Chemical parameters for evaluating compost maturity. *BioCycle*, 26 (2), 46-47.
- Rynk, R. 1992. *On-farm composting handbook*. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension Service.
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F.G. y Gigliotti, G. 2007. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology*, 98 (9), 1822-1831.
- Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Martínez-Pardo, C., Cegarra, J. y Paredes, C. 1996. A microanalysis method for determining total organic carbon in extracts of humic substances. Relationships between total organic carbon and oxidable carbon. *Bioresource Technology*, 57 (3), 291-295.
- Saña, J. y Soliva, M. 1987. *El compostatge. Procés, sistemes i aplicacions*. Ed.: Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient. Barcelona.
- Saviozzi, A., Riffaldi, R. y Levi-Minzi, R. 1987. Compost maturity by water extract analyses. En: *Compost: Production, Quality and Use*. (eds) de Bertoldi, M., Ferranti, M.P., L'Hermite, P., y Zucconi, F. Barking, pp. 359-367.
- Scalbert, A. 1991. Antimicrobial properties of tannis. *Phytochemistry*, 30, 3875-3883.
- Shuval, H., Jodice, R., Consiglio, M., Spaggiarri, G. y Spigoni, C. 1991. Control of enteric microorganisms by aerobic-thermophilic co-composting of wastewater sludge and agroindustry wastes. *Water Science & Technology*, 24 (2), 401-405.
- Soliva, M. 2001. *Compostatge i Gestió de Residus Orgànics. Estudis i monografies*, 21, 111. Diputació de Barcelona. Àrea de Medi Ambient. Barcelona.
- Spohn, E. 1978. Determination of compost maturity. *Compost Sci*, 19, 26-27.
- Stentiford, E.I., Mara, D.D. y Taylor, P.L. 1985. Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. *Composting of Agricultural and Other Wastes*, 42-55.
- Stickelberger, D. 1975. Survey of city refuse composting. En: *Organic Matters as Fertilizers*. Swedish International Development Authority. FAO. Soils Bulletin. 27. Rome. Pp: 185-209.
- Sugahara, K., Harada, Y. e Inoko, A. 1979. Color change of city refuse during composting process. *Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 197-208.

Tessier, C., David, J., This, P., Boursiquot, J.M. y Charrier, A. 1999. Optimization of the Choice of Molecular Markers for Varietal Identification in *Vitis Vinifera* L. *Theoretical and Applied Genetics*, 98, 171–177.

Urbina Vallejo, V. 1999. *Viveros de frutales, cítricos y vid. Monografías de fruticultura: Nº2.* Lleida.

Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazábal, C. y Selvaradjou, S.K. 2001. Reports of the Technical Working Groups Established Under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 2139 EN/3, 872. Office for Official Publications of the European Communities. Luxemburg.

Viel, M., Sayag, D., Peyre, A. y André, L. 1987. Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. *Biological Wastes*, 20 (3), 167-185.

Viel, A., Stellin, F., Carlot, M., Nadai, C., Concheri, G., Stevanato, P., Squartini, A., Corich, V. y Giacomini, A. 2018. Characteristics of compost obtained from winemaking byproducts. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 2021-2029.

Viveros Lorente, S.L. 2022. <https://www.viveroslorente.com> (consulta 09/05/2022)

Wang, Y.Q. y Schuchardt, F. 2010. Effect of C/N ratio on the composting of vineyard pruning residues. *Agriculture and Forestry Research*, 3, (60), 131-138.

World Bank. 2022. <https://www.worldbank.org> (consulta 25/04/2022)

Yordanova, M., Minchev, E. y Borisov, R. 2018. Possibilities for small-scale composting of horticultural plant wastes. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, 62, 649-654.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. y de Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*, 22, 54-57.

Zucconi, F., Monaco, A. y Forte, M. 1985. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Ed.: Gasser, J.K.R. Barking, 73-85.

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