



**Programa de Doctorado en Recursos y Tecnologías
Agrarias, Agroambientales y Alimentarias**

**Desarrollo y validación de medios de
cultivo alternativos de alto valor añadido
para su uso en sistemas hortícolas y
forestales en el entorno mediterráneo**

M^a del Pilar Gomis Valero

GIAAMA



**Grupo de
Investigación
Aplicada en
Agroquímica
y Medio
Ambiente
Universidad
Miguel
Hernández**

Directora de la tesis

Dra. M^a Dolores Pérez Murcia

Codirectora de la tesis

Dra. M^a de los Ángeles Bustamante Muñoz

Universidad Miguel Hernández de Elche

Orihuela, 2022



La presente Tesis Doctoral, titulada “Desarrollo y validación de medios de cultivo alternativos de alto valor añadido para su uso en sistemas hortícolas y forestales en el entorno mediterráneo”, se presenta bajo la modalidad de **tesis por compendio** de las siguientes **publicaciones**:

- **USE OF LIVESTOCK WASTE COMPOSTS AS NURSERY GROWING MEDIA: EFFECT OF A WASHING PRE-TREATMENT. 2021.** Bustamante, M. A.; Gomis, M. P.; Pérez-Murcia, M. D.; Gangi, D.; Ceglie, F. G; Paredes, C.; Pérez-Espinosa, A.; Bernal Calderón, M. P.; Moral, R. *Scientia Horticulturae* (Q1, IF: 3.463, Horticulture (JCR 2020)). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109954>
- **DEVELOPMENT AND VALIDATION OF ALTERNATIVE PALM-DERIVED SUBSTRATES FOR SEEDLING PRODUCTION. 2022.** Gomis, M. P.; Pérez-Murcia, M. D.; Barber, X.; Martínez-Sabater, E.; Moral, R.; Bustamante, M.A. *Agronomy* (Q1, IF: 3.417, Agronomy (JCR 2021)). <https://doi.org/10.3390/agronomy12061377>



Otras publicaciones que forman parte de la presente Tesis Doctoral son las siguientes:

- **USO DE DIFERENTES MATERIALES ORGÁNICOS ESTABILIZADOS COMO INGREDIENTES DE MEDIOS DE TRANSICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPECIES UTILIZADAS EN REFORESTACIÓN. 2019.** Gomis, M. P.; Pérez-Murcia, M. D.; Pérez, A.; Agulló, E.; Andreu, F. J.; Bustamante, M. A. USO DE. GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS. PONIENDO EN MARCHA LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA SOCIEDAD. 6^{as} Jornadas de la Red Española de Compostaje, pp. 515 - 520. Valencia, Comunidad Valenciana (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-09-09152.
- **ASEGURAMIENTO DE LA SUPERVIVENCIA NUTRICIONAL DE ESPECIES VEGETALES PARA REFORESTACIÓN EN ENTORNOS MEDITERRÁNEOS: ESTUDIO COMPARATIVO DE MEDIOS ORGÁNICOS DE TRANSICIÓN. 2017.** Gomis, M. P.; Domene, M. A.; Segura, M. D.; Pérez-Murcia, M. D.; Bustamante, M. A.; Agulló, E.; Pérez-Espinosa, A.; Paredes, C.; Moral, R. RECICLANDO LOS RESIDUOS PARA MEJORAR LOS SUELOS Y EL MEDIO AMBIENTE. V Jornadas de la Red Española de Compostaje, pp. 231 - 234. Sevilla (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-617-9214-6.



La Dra. Dña. *Juana Fernández López*, Coordinadora del Programa de Doctorado en Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias (ReTos-AAA) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH)

INFORMA:

Que Dña. *M^a Pilar Gomis Valero* ha realizado bajo la supervisión de nuestro Programa de Doctorado el trabajo titulado **“Desarrollo y validación de medios alternativos de alto valor añadido para su uso en sistemas hortícolas y forestales en el entorno mediterráneo”** conforme a los términos y condiciones definidos en su Plan de Investigación y de acuerdo al Código de Buenas Prácticas de la Universidad Miguel Hernández de Elche, cumpliendo los objetivos previstos de forma satisfactoria para su defensa pública como tesis doctoral.

Lo que firmo para los efectos oportunos, en Orihuela a 13 de julio de 2022

Prof. Profa. Dra. Dña. *Juana Fernández López*

Coordinadora del Programa de Doctorado en Recursos y Tecnologías Agrarias,
Agroambientales y Alimentarias



La Dra. Dña. **M^a Dolores Pérez Murcia**, directora, y la Dra. Dña. **M^a Angeles Bustamante Muñoz**, codirectora de la tesis doctoral titulada **“Desarrollo y validación de medios de cultivo alternativos de alto valor añadido para su uso en sistemas hortícolas y forestales en el entorno mediterráneo”**

INFORMAN:

Que Dña. **M^a del Pilar Gomis Valero** ha realizado bajo nuestra supervisión el trabajo titulado **“Desarrollo y validación de medios de cultivo alternativos de alto valor añadido para su uso en sistemas hortícolas y forestales en el entorno mediterráneo”** conforme a los términos y condiciones definidos en su Plan de Investigación y de acuerdo al Código de Buenas Prácticas de la Universidad Miguel Hernández de Elche, cumpliendo los objetivos previstos de forma satisfactoria para su defensa pública como tesis doctoral.

Lo que firmamos para los efectos oportunos, en Orihuela a 13 de julio de 2022.

Directora de la tesis

Dra. Dña. **M^a Dolores Pérez Murcia**

Codirectora de la tesis

Dra. Dña. **M^a Angeles Bustamante Muñoz**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi directora Mariló Pérez Murcia por todo el trabajo extraordinario que ha hecho, su constancia y su apoyo. Agradecer a M^a Ángeles Bustamante los conocimientos transmitidos, consejos y su inestimable ayuda. Gracias a las dos por su enorme paciencia y gran esfuerzo que han realizado para que esta Tesis vea la luz. Realizáis una tarea admirable y cualquier elogio se quedaría corto, por eso os estoy enormemente agradecida.

A Raúl Moral por darme la oportunidad, por aquél entonces, de realizar el Máster y conocer el grupo de investigación y que con el tiempo ha acabado en esta Tesis. Gracias al Departamento y a todos los miembros del grupo de investigación GIAAMA por su gran labor, sabiduría, humildad y apoyo. A Conchi, Aurelia, Enrique, Javier, Marisol, Jose y Encarni. Sé que he estado rodeada de personas extraordinarias que me habéis permitido aprender y habéis contribuido a todo esto. Así que gracias por ser un grupo excelente.

A todos aquellos con los que he coincidido por aquí o por allá por sus ánimos, colaboración y compañía.

A mi familia, *“als meus pares i ma germana, Manoli. La seua ajuda ha sigut indispensable, sobretot quan m’envaïen unes ganes terribles de trencar l’ordinador”*.

A mis amigos que están a mi lado y me sirven de guía. A la rubita, por las aventuras pasadas y futuras. A ellos que me animan con sus palabras y tontunas cuando decae el ánimo.

DEDICATORIA

Als meus pares, Manolo i Pilar



Nunca debes tener miedo de lo que estás haciendo cuando es correcto

Marie Curie

ÍNDICE/INDEX

Resumen.....	1
Summary	5
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Sustratos para el cultivo sin suelo.....	11
1.1.1 Tipología y propiedades.....	13
1.1.2 Problemática asociada y alternativas al uso de la turba como sustrato de cultivo.	24
1.1.3 Normativa aplicable a los compost y vermicompost como sustratos de cultivo	26
1.2 Los residuos orgánicos	29
1.3 Compostaje y vermicompostaje como medio de producción de sustratos orgánicos	52
1.3.1 Definición y características del proceso de compostaje.....	53
1.3.2 Principales factores que influyen en el proceso de compostaje	55
1.3.3 Definición y características del vermicompostaje	60
1.3.4 Evaluación de la calidad del compost y del vermicompost	61
1.4 Materiales alternativos a la turba como sustrato en los sectores hortícola y forestal ...	63
2. OBJETIVOS.....	73
3. PUBLICACIONES.....	76
4. RESUMEN DE MATERIAL Y MÉTODOS.....	137
5. RESUMEN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	148
6. CONCLUSIONES GENERALES	158
7. PERSPECTIVAS DE FUTURO	162
8. BIBLIOGRAFÍA.....	166

Resumen

El cultivo sin suelo es aquel que se realiza fuera de su ambiente natural, el suelo. Surge por la necesidad de ahorrar recursos, como agua y fertilizantes, solucionar problemas relacionados con las plagas e insectos del suelo y facilitar las tareas de cultivo. Frente al cultivo tradicional, este sistema exige una inversión más alta, sistemas de riego muy precisos, buena calidad de agua y mano de obra especializada, etc.

En España, las zonas donde más se ha desarrollado este tipo de cultivo son Andalucía y Murcia. Los sistemas de cultivo sin suelo se clasifican en cultivos hidropónicos (en solución acuosa con nutrientes) y cultivos en sustratos (orgánicos y/o inertes).

El sector del cultivo sin suelo está constituido por diversos subsectores, como son el viverismo, planta joven, propagación, cultivo en contenedor, planta ornamental, jardinería urbana y particular, así como en horticultura intensiva, ya sea en semillero o para producción.

Este sector anualmente demanda un importante volumen de materiales que puedan actuar como soporte de la planta y, de forma adicional, que actúen como medio para permitir la nutrición mineral adecuada de las plantas y el intercambio de fluidos (aire y agua). Como ingrediente mayoritario se utiliza de forma casi única la turba (básicamente *Sphagnum*), un recurso considerado no renovable debido a su lenta tasa de reposición. Las turberas son humedales de alto valor ecológico que actúan como sumideros de carbono al almacenar y secuestrar el carbono atmosférico (Maher y col., 2008), por lo que su explotación-extracción-descomposición-mineralización contribuyen de forma clara al incremento de gases de efecto invernadero (Bullock y col., 2012). Por todo ello, como consecuencia del importante impacto medioambiental que implica la explotación y uso de la turba, algunos gobiernos están tratando de reducir su uso como sustrato y enmienda del suelo, así como impulsar la reutilización de los residuos orgánicos como constituyentes del sustrato (Moral y col., 2013; Ceglie y col., 2015). Existe, por tanto, una demanda creciente en el sector del cultivo sin suelo, de materiales alternativos para emplearlos como medio de cultivo en sustitución de la turba, recurso empleado tradicionalmente junto con la perlita.

Por otra parte, la generación de residuos orgánicos ha crecido ampliamente durante los últimos años, hecho que asociado a una gestión inadecuada conlleva no sólo un importante impacto medioambiental, sino también una importante pérdida de materiales y energía. Por

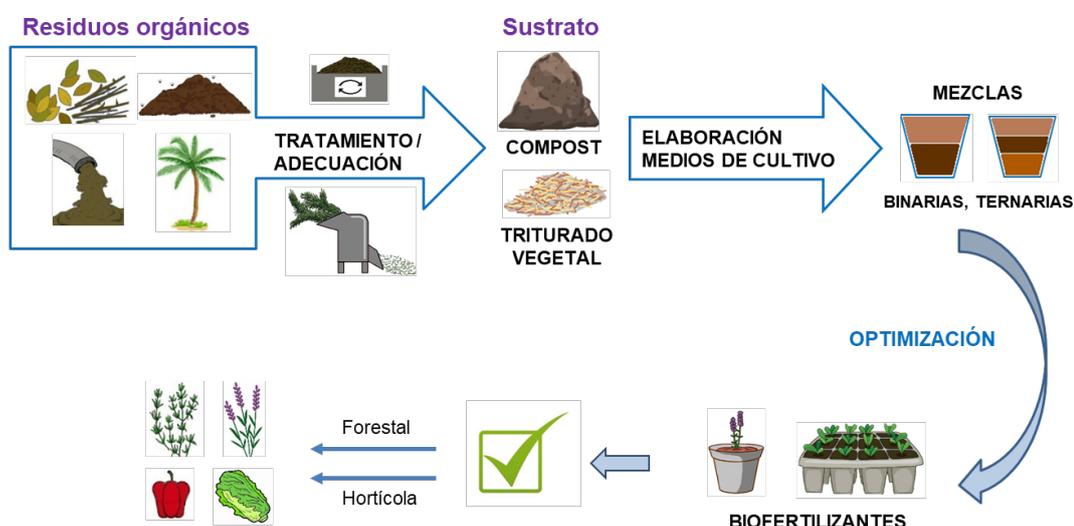
todo ello, el uso de los residuos orgánicos, principalmente estabilizados mediante compostaje y/o vermicompostaje, como sustitutos totales o parciales de la turba en medios de cultivo, supone no sólo la gestión de estos materiales, sino también su valorización. Diversos estudios previos han mostrado la idoneidad para dicho fin de diferentes residuos orgánicos (Ceglie y col., 2015), como los compost de origen agroindustrial y ganadero (Bustamante y col., 2008; Medina y col., 2009; Rinaldi y col., 2011; Tittarelli y col., 2009; Ceglie y col., 2011).

También debemos tener en cuenta que estrategias como la restauración de suelos degradados y el aseguramiento de una cobertura vegetal mínima contribuyen de manera eficaz a evitar la erosión y desertificación del suelo (Cala y col., 2005). La optimización de dichas estrategias está basada no sólo en una adecuada selección de las especies vegetales más eficientes en ambientes áridos y semiáridos, sino en su germinación-desarrollo, así como su supervivencia nutricional en dichos entornos. Por ello, el desarrollo de medios de cultivo de transición basados en materiales orgánicos que se apliquen junto al trasplante en áreas repobladas puede permitir aumentar la pervivencia de las especies implantadas, al aumentar la reserva de agua y nutrientes en el medio radicular adyacente al alveolo de trasplante, lo cual es esencial en sistemas de trasplante donde la actuación es puntual, la pervivencia depende de la zona y de las condiciones ambientales del área, siendo el mantenimiento-gestión poco frecuente.

En este sentido, materiales orgánicos, como el compost o el vermicompost pueden presentar adecuadas propiedades físicas, físico-químicas y químicas, que los pueden hacer idóneos para su uso como componente de sustratos (Bustamante y col., 2008), ya sea en medios de cultivo empleados en sistemas hortícolas o como medios de transición en sistemas forestales. Por otra parte, las fibras vegetales residuales no vinculadas al sector agrícola, como aquellas procedentes de especies palmáceas, ya sea tras un ligero procesado previo para reducir el tamaño de partícula (como un picado o triturado) o mediante un tratamiento de estabilización (como el compostaje) también pueden presentar propiedades que los hacen idóneos para su uso como sustratos o componentes de sustratos.

Sin embargo, todavía se precisa más información que permita establecer un procedimiento en el que se optimicen las proporciones de los materiales utilizados en el medio de cultivo, así como el tipo de material orgánico utilizado, fundamentalmente en las condiciones del entorno mediterráneo y en los diferentes subsectores del cultivo sin suelo, especialmente en el empleo de semilleros o para el cultivo en contenedor, ya que dicha solución afecta de forma significativa al éxito del trasplante y a la supervivencia de la planta.

En este marco se planteó este trabajo de investigación, donde se proponen soluciones sostenibles para reducir el uso de turba en el sector del cultivo sin suelo basadas en el uso de residuos orgánicos compostados o no, como ingrediente de sustratos.



En el compendio de publicaciones que compone esta tesis se ha abordado el desarrollo y la validación de sustratos alternativos a la turba para su uso en el sector hortícola (Experimentos 1 y 2), así como para su uso en especies utilizadas en reforestación y aromáticas (Experimentos 3 y 4).

En el **primer trabajo** (Experimento 1) se estudió el efecto del lavado sobre la calidad del compost como sustrato. Se ensayaron diferentes tipos de compost lavados y no lavados, elaborados principalmente a base de estiércol y digeridos de estiércol, que se emplearon como material alternativo a la turba en proporciones de sustitución de 25%, 50% y 75% (v:v) para el cultivo de pimiento (*Capsicum annum* L. cv. Largo de Reus Pairal) en un semillero comercial. Estos sustratos mostraron adecuadas propiedades para su uso como sustitutos de la turba, siendo la salinidad reducida con el tratamiento de lavado previo, aunque esta pérdida de elementos solubles no tuvo efecto negativo sobre el cultivo.

En el **segundo trabajo** (Experimento 2) se valoraron materiales residuales del sector urbano, elaborándose medios de cultivo con uno o dos ingredientes que incluían compost elaborados a base de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas y residuos de palmera (hojas y tronco), restos de palmera triturados y fibra de coco obteniendo combinaciones con diferentes proporciones, que iban de 0% al 100% (v:v). Estas mezclas se emplearon para el cultivo en semillero de lechuga (*Lactuca sativa* L. cv. «Senna»). El material sin compostar a base de hoja de palmera presentó una alta germinación, pero un bajo nivel

de biomasa; sin embargo, el material a base de tronco de palmera mostró una buena respuesta de las plántulas.

En el **tercer trabajo** (Experimento 3) se desarrollaron y validaron sustratos con presencia reducida de turba para el desarrollo en semillero de especies forestales autóctonas. Los materiales alternativos a la turba fueron dos compost elaborados a base de palmera y lodo de depuradora y un vermicompost de residuos vegetales. Los sustratos fueron utilizados en diferentes especies forestales, como la adelfa (*Nerium oleander*), muy utilizada en zonas degradadas para su recuperación por su rápido crecimiento y resistencia, la efedra (*Ephedra fragilis*), y el ciprés (*Tetraclinis articulata*), especies presentes en el área mediterránea. La siembra tuvo lugar en bandejas ubicadas en un vivero forestal, cuando presentaron un tamaño adecuado, fueron transplantadas al suelo para realizar un seguimiento de su desarrollo. Las mezclas mostraron unas propiedades adecuadas para su uso como sustrato y se obtuvieron buenos resultados en todas las especies.

En el **cuarto ensayo** (Experimento 4) se desarrollaron y validaron sustratos orgánicos como medios de cultivo de transición para el crecimiento en contenedor de especies aromáticas para asegurar la supervivencia de las plantas en la reforestación. Como material alternativo a la turba se utilizaron compost elaborados con diferentes materiales residuales del sector urbano y ganadero utilizándose hasta cinco compost diferentes (dos de ellos se utilizaron en forma de pellets). Los sustratos se elaboraron a base de compost y turba en proporción de un 25% compost - 75% turba (v:v). Las mezclas fueron usadas en contenedores para el crecimiento de lavanda (*Lavandula angustifolia*) y tomillo (*Thymus vulgaris*), especies aromáticas autóctonas, que fueron desarrolladas en invernadero. El sustrato orgánico de transición mostró propiedades adecuadas y mejoró aspectos químicos como la capacidad de cambio catiónico y el contenido nutriente con respecto a los tratamientos inorgánicos de liberación lenta.

Summary

Soilless cultivation is conducted outside of its natural environment, the soil. It appears from the need to save resources, such as water and fertilizers, solve problems related to plagues and insects in the soil and facilitate cultivation tasks. Compared to traditional cultivation, this system requires a higher investment, very precise irrigation systems, good water quality and specialized labour, etc.

In Spain, the areas where this type of cultivation has been most developed are Andalucía and Murcia. Soilless growing systems are classified into: water crops (hydroponics), substrate crops (inert substrates and organic substrates).

The soilless cultivation sector is constituted by several subsectors, such as nursery, young plant, propagation, container cultivation, ornamental plant, urban and private gardening, as well as intensive horticulture, either in seedlings or for production.

This sector requires annually a very important volume of materials that work as support to the plant and, additionally, as media that allows adequate mineral nutrition of the plants and the exchange of fluids (water and air). As the main ingredient, peat (basically *Sphagnum*) is used almost exclusively, a non-renewable resource due to its slow replacement rate. Peatlands are wetlands of high ecological value that act as carbon sinks by storing and sequestering atmospheric carbon (Maher et al., 2008), so its exploitation-extraction-decomposition-mineralization clearly contribute to the greenhouse gases increase (Bullock et al., 2012). For all these reasons, because of the significant environmental impact that the exploitation and use of peat implies, several governments are trying to reduce its use as a substrate and soil amendment, as well as promoting the reuse of organic waste as components of the substrate (Moral et al., 2013; Ceglie et al., 2015).

Therefore, there is an increasing demand in the soilless cultivation sector for alternative materials to be used as growing media to replace peat, a resource traditionally used together with perlite.

On the other hand, the generation of organic wastes has increased considerably over the last years, a fact that associated with inadequate management implies, not only a significant environmental impact but also a significant loss of materials and energy. Therefore, the use of organic waste, mainly stabilized by composting and/or vermicomposting, as total or partial

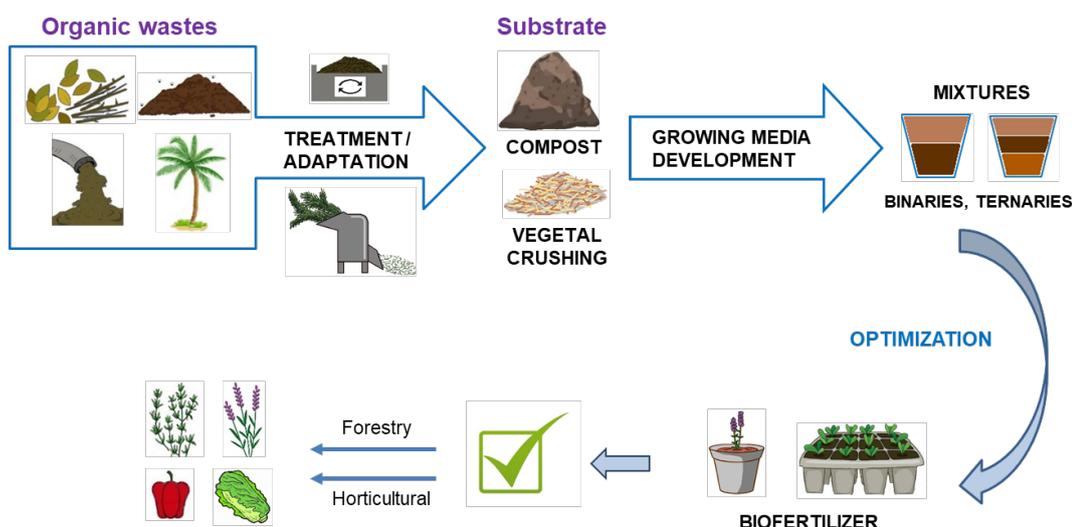
substitutes for peat in growing media, involves not only the management of these materials, but also their valorization. Various previous studies have shown the suitability for this purpose of different organic residues (Ceglie et al., 2015), such as compost of agro-industrial and livestock origin (Bustamante et al., 2008; Medina et al., 2009; Rinaldi et al., 2011; Tittarelli et al., 2009; Ceglie et al., 2011).

We must also consider that strategies such as the restoration of degraded soils and the assurance of a minimal vegetation cover, effectively contribute to avoiding soil erosion and desertification (Cala et al., 2005). The optimization of these strategies is based not only on an adequate selection of the most efficient plant species in arid and semi-arid environments, but also on their germination-development, as well as their nutritional survival in such environments. Thus, the development of growing media based on organic materials, which are applied together with transplantation in repopulated areas, can increase the survival of the implanted species. This is based on the increase of the reserve of water and nutrients in the root environment adjacent to the alveolus of transplantation, which is essential in transplant systems where action is punctual and survival depends on the area, the environmental conditions and where maintenance-management is unusual.

In this sense, organic materials, such as compost or vermicompost, can have adequate physical, physical-chemical and chemical properties, which can make them ideal for use as a component of substrates (Bustamante et al., 2008), either in growing media used in horticultural systems or as transitional media in forest systems. On the other hand, residual vegetable fibers not related to the agricultural sector, such as those from palm species, either with a slight previous processing (such as chopping) to reduce the particle size, or with a stabilization treatment (such as composting) they can also show properties that can make them suitable for use as substrates or substrate components.

However, more information is still needed to establish a procedure in which the proportions and the type of organic material used in the growing media are optimized, mainly in the Mediterranean conditions and in the different subsectors of soilless cultivation, especially in the use of seedbeds or container cultivation, since this solution significantly affects transplant success and plant survival.

In this framework, this research work was strategized, where sustainable solutions are proposed to reduce the use of peat in the soilless cultivation sector, based on the use of organic waste composted or not, as an ingredient in substrates.



In the compendium of publications that constitutes this Doctoral Thesis, the development and validation of alternative substrates to peat for use in the horticultural sector (Experiments 1 and 2), as well as for use in species used in reforestation and aromatic (Experiments 3 and 4) has been tackled.

In the **first work** (Experiment 1), the effect of washing on the quality of the compost as substrate was studied. Different types of washed and unwashed composts were tested, made mainly by manure and digested from manure, which were used as an alternative material to peat in substitution proportions of 25%, 50% and 75% (v:v) using it in the cultivation of pepper. (*Capsicum annum L. cv. Largo de Reus Pairal*) in a commercial seedbed. These substrates showed adequate properties for their use as substitutes for peat, the salinity being reduced with the previous washing treatment, though this loss of water-soluble elements had no negative effect on the crop.

In the **second work** (Experiment 2), residual materials from the urban sector were valued, developing growing media of one or two ingredients that included compost made from sludge and palm tree residues (leaves and trunk), crushed palm tree residues and coconut fiber, obtaining combinations with different proportions, ranging from 0% to 100% (v:v). These mixtures were used to grow lettuce (*Lactuca sativa L. cv. "Senna"*) in a seedbed. The uncomposted material based on palm leaves showed high germination, but a low level of biomass; however, the material based on palm trunks showed a good response from the seedlings.

In the **third work** (Experiment 3), substrates were developed and validated with a reduced presence of peat for the seedbed development of native forest species. The alternative

materials to peat were two composts made from palm trees and sewage sludge and a vermicomposts made from green wastes. Substrates were used in different forest species, such as oleander (*Nerium oleander*), widely used in recovery tasks in degraded areas due to its rapid growth and resistance, ephedra (*Ephedra fragilis*), and cypress (*Tetraclinis articulata*), species present in the Mediterranean area. The sowing took place in trays located in a forest nursery, when they reached an adequate size, they were transplanted to the ground to monitor their development. The mixtures showed adequate properties for use as a substrate and good results were obtained in all species.

In the **fourth work** (Experiment 4), organic substrates were developed and validated in transitional growing media for container growth of aromatic species to ensure the survival of plants in reforestation. As an alternative material to peat, compost made with different waste materials from the urban and livestock sector were used, using up to five different compost (two of them were used in the form of pellets). The substrates were made from compost and peat in a proportion of 25% compost - 75% peat (v:v). The mixtures were used in containers for lavender (*Lavandula angustifolia*) and thyme (*Thymus vulgaris*) native aromatic species, which were developed in a greenhouse. The organic transition substrate showed adequate properties and improved chemical aspects such as the cation Exchange capacity and the nutrient content compared to the slow-release inorganic treatments.

1. INTRODUCCIÓN





1.1 Sustratos para el cultivo sin suelo

El **empleo de los sustratos** surge de la **necesidad** de cultivar las plantas en un medio diferente al natural, en macetas o contenedores, con la **finalidad** de producir una planta de calidad y abundante cosecha, con la mayor celeridad posible y los menores costes de producción (Abad y col., 1993) y con la premisa de que la obtención y eliminación del sustrato, tras ser empleado, no debería provocar un importante impacto medioambiental (Abad y col., 1992).

Un sustrato **debe estar constituido** por un material sólido, poroso, natural o de síntesis, tanto mineral como orgánico, distinto del suelo “in situ”, puro o en forma de mezcla, que colocado en un contenedor **actúe** como soporte físico permitiendo el anclaje del sistema radicular y posibilite la toma de nutrientes esenciales, agua y oxígeno necesarios para el correcto funcionamiento de la planta (Abad y col., 2004; Abad y col., 2005). El sustrato, según sea su origen y composición, puede participar de forma directa o no en la nutrición del cultivo, es decir, puede aportar nutrientes a la planta o no.

En el cultivo sin suelo, los sustratos **se emplean** en un contenedor, donde el espacio está limitado y se debe asegurar el riego y la nutrición, por eso deben cumplir ciertos requisitos. Este método de cultivo se emplea mayormente en el cultivo en sustrato de plantas hortícolas y ornamentales, aunque también es fundamental para el desarrollo de plantas en viveros, semilleros, horticultura intensiva, jardinería y paisajismo, como se indica en el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo (BOE, 2010). La turba Sphagnum y/o la fibra de coco, debido a sus excelentes propiedades, han permanecido como los principales medios de cultivo para plantas ornamentales en contenedor, así como en semilleros hortícolas, y en viveros de producción de especies de interés tanto agrícola como forestal.

Entendemos por **cultivo sin suelo** a cualquier sistema de cultivo que no necesita disponer del suelo como medio para el desarrollo vegetal (Baixauli y Aguilar, 2002). Este sector ha mostrado en los últimos años un crecimiento considerable, ocupando superficies muy importantes en países del norte de Europa y en el área mediterránea. En España, la superficie destinada a los cultivos sin suelo durante 2009 se calcula en unas 5500 ha (Urrestarazu, 2013), concentradas básicamente en el sudeste. El cultivo en sustrato está sustituyendo progresivamente al cultivo tradicional debido al desarrollo de la horticultura intensiva que permite ejercer un mayor control sobre este tipo de cultivos y mejorar el aspecto económico. Esto ha provocado el aumento de la demanda de los sustratos que, junto a un mayor interés y respeto por el medio ambiente y la

preocupación por el agotamiento de los recursos no renovables, ha fomentado el aprovechamiento de materiales considerados residuos o subproductos, de escaso valor o no deseables, como posibles sustratos.

Así, residuos generados en actividades agrarias, industriales o urbanas, tales como: restos de poda, cortezas de árboles, lodos de almazaras, orujos de alcoholera, residuos sólidos urbanos, lodos de depuradoras, etc., convenientemente transformados (compostaje, digestión anaerobia, triturado, etc), están siendo utilizados con éxito como constituyentes de medios de cultivo en contenedor, solos o mezclados, lo que supone la revalorización de dichos productos, además de resolver un problema medioambiental .

A estos materiales, que pueden reemplazar a los empleados habitualmente en horticultura como sustratos en el cultivo sin suelo, se les denomina sustratos alternativos y previo a su uso es necesaria una caracterización y una valoración para asegurar que cumple con las propiedades adecuadas. El empleo de estos materiales residuales estabilizados como sustratos de cultivo aporta un valor añadido y una mejora en la gestión de los residuos, contribuye a cerrar el ciclo natural de materia orgánica y nutrientes e impulsa el desarrollo sostenible y la economía circular en este sector.

Para que un cultivo sin suelo sea óptimo, se debe buscar la mayor eficacia y rentabilidad de este sistema de producción. Esto se puede lograr con un estudio previo de los materiales y los sistemas de cultivo, teniendo en cuenta que un medio de cultivo puede comportarse de forma diferente según el contenedor, la especie vegetal, las condiciones climáticas o las técnicas de cultivo. Se debe tener también en cuenta que el material que va a ser usado como sustrato puede ser utilizado puro o mezclado con otros materiales, cuya combinación le dé mayor calidad al producto.

Existen diferencias significativas en el uso de sustratos frente a los suelos naturales cuando se trata del cultivo en contenedor, asociadas sobre todo a sus propiedades físicas y que gracias a ello es posible el desarrollo del cultivo en un espacio reducido:

- Respecto a porosidad: los sustratos son en general más porosos que los suelos, sus partículas poseen poros en su interior, además de los poros entre partículas. El porcentaje de poros de tamaño grande es más elevado en los sustratos que en el suelo. En ellos se genera más espacio disponible para el agua y aire que en un volumen idéntico de suelo.

- Respecto a la retención de agua: los sustratos retienen agua con menor fuerza, por lo que el agua disponible para la planta es mayor.

1.1.1 Tipología y propiedades

Las características que debe reunir un sustrato varían en función de las necesidades del material vegetal a cultivar, de los medios y las instalaciones de la explotación y otros factores no controlados por el agricultor. El cultivo en sustrato proporciona un mayor control de los factores de producción relacionados con las raíces de la planta gracias a las características y al volumen reducido de los materiales empleados (Terés, 2001).

Existe una gran variedad de materiales que pueden ser empleados como sustrato único, o bien en combinación con otros, por ello la selección debe realizarse basándose en la ausencia de fitotoxicidad, disponibilidad, ausencia de malas hierbas o patógenos, facilidad de manejo, coste, etc. Para clasificar los sustratos nos podemos basar en el origen de los materiales, en su naturaleza, en sus propiedades, etc.

Así, los sustratos **según su naturaleza** pueden ser **sustratos orgánicos** (de origen natural o de síntesis o subproductos de desecho) o **sustratos inorgánicos** (de origen natural con y sin manufacturación previa) y ambos a su vez. Los **sustratos orgánicos de síntesis** son polímeros orgánicos no biodegradables, obtenidos por síntesis química como el poliestireno expandido, espuma de poliuretano, etc. Los **sustratos orgánicos de origen natural** están sujetos a descomposición biológica. La turba Sphagnum es un componente muy utilizado en los medios de cultivo de plantas en contenedor (Terés, 2001; Carmona y Abad, 2008). También se utilizan subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas: residuos de podas urbanas, fibra de coco, serrín, restos de cosechas, cáscara de arroz, estiércoles y purines, caña de río (*Arundo donax*), residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora tras un proceso necesario de adecuación mediante compostaje para poder utilizarlos como sustratos. Entre los **sustratos inorgánicos de origen natural** sin manufacturar se encuentran las gravas, las arenas, tierras de origen volcánico etc. Como **sustratos inorgánicos de síntesis química** se incluyen la perlita, la vermiculita, la lana de roca, etc.

Según su reactividad puede distinguirse entre **sustratos inertes químicamente** denominados así por no intervenir directamente en el proceso de nutrición como perlita, arcilla expandida,

lana de roca, o bien, **sustratos activos químicamente** que actúan como una reserva de nutrientes (turbas, vermiculita, materiales lignocelulósicos, compost, etc). En cualquier caso, podría ser necesario añadir fertilizantes para compensar posibles desajustes nutricionales y que se produzca el correcto desarrollo de las plantas.

Entre los sustratos orgánicos más utilizados actualmente podemos encontrar:

- **Turba.** Es el material más utilizado, con diferencia, como sustrato en los medios de cultivo. Se genera por la descomposición incompleta (por exceso de agua y falta de oxígeno) de la vegetación de la turbera, donde nuevos materiales orgánicos se van depositando sobre otros más antiguos. Por las condiciones excepcionales para su formación (proceso natural desarrollado en unas zonas húmedas y pantanosas concretas) se considera un recurso no renovable. La necesidad de importación desde las zonas de formación a los lugares de utilización tiene consecuencias económicas, con aumento de costes, y medioambientales, derivadas de su extracción y transporte como el incremento de los gases de efecto invernadero. Por estos motivos la búsqueda de materiales que puedan ser empleados como sustitutos de la turba es esencial para este sector. Las turbas se pueden clasificar en dos grupos: rubias y negras. Las turbas rubias (*Sphagnum*) tienen mayor contenido en materia orgánica y están menos descompuestas, mientras que las turbas negras están más mineralizadas y cuentan con un menor contenido en materia orgánica.
- **Lodos de depuradora.** Se obtienen en la depuración de aguas residuales tras eliminar las partículas en suspensión. Para que el fango resultante sea un material manejable, es tratado para reducir su capacidad de fermentación y su volumen. Sin embargo, la presencia de patógenos y una baja relación C/N nos sugiere usarlo tras un proceso de estabilización e higienización, junto con otros componentes en un sustrato. Su empleo como sustrato, por ejemplo, tras un proceso de compostaje, va a permitir el desarrollo íntegro del cultivo.
- **Estiércol.** Los estiércoles tras una adecuación mediante compostaje o digestión anaerobia pueden emplearse como alternativa a la turba para su uso como medio de cultivo. Un compost elaborado a partir del digerido de la digestión anaeróbica del estiércol de vaca presenta unas características de aireación y contenido en agua similares a las de la turba, por lo que podría emplearse como sustituto de esta (Chen y col., 1983).

- **Fibra y corteza de madera.** Son recursos renovables obtenidos por técnicas especializadas a partir de la madera. Ésta puede ser madera fresca o restos que no presenten sustancias nocivas, una de las más utilizadas es la madera de abeto rojo. La fibra de madera se obtiene a partir de troncos, por lo que no contiene apenas partes de corteza, el material es empujado a través de una abertura a alta presión y temperatura. En esas condiciones el producto está libre de patógenos para las plantas. Los sustratos a base de corteza presentan mayor peso que las turbas, por lo que son idóneos para recipientes altos, que necesiten drenaje y estabilidad.
- **Corteza de pino compostada.** Es un subproducto de la industria maderera, muy utilizado en los últimos años como sustrato, sobre todo en países sin gran disponibilidad de turba. Varios autores coinciden en que este material por sí solo no presenta las condiciones indispensables para el crecimiento vegetal (Abad y col., 1997; Zapata y col., 2005) y recomiendan usarlo mezclado con otros ingredientes, entre los que se indican compost de residuos urbanos, compost de lodos y otros residuos según la disponibilidad en el área a emplearlo.
- **Residuos sólidos urbanos.** Tiene una composición muy heterogénea, dado que el origen es muy diverso. Los compost generados a partir de la materia orgánica separada en origen podrían reunir las características necesarias para utilizarse como sustrato mezclado con otros ingredientes.
- **Restos vegetales urbanos.** Entre los residuos generados en el núcleo urbano, aquellos procedentes del cuidado de la vegetación de los jardines como restos de poda, de césped, hojas, etc. tienen una especial consideración. Estos materiales pueden ser utilizados como abono orgánico o sustrato de cultivo tras someterse al proceso de compostaje y pueden emplearse tanto solos como mezclados con lodos de depuradoras urbanas (Burés, 1999).
- **Fibra de coco.** Es un material vegetal obtenido de los desechos de producción de la industria del coco. La cáscara contiene aproximadamente el 75% de fibra y 25% de material fino (bonote). La cáscara es triturada y la fibra larga se emplea en la fabricación de productos industriales, siendo la paja que sobra utilizada como sustrato. Es un material con una porosidad total muy elevada (más del 93%) y ligero, por lo que está bien aireado y presenta cantidades aceptables de agua fácilmente disponible; cuando se deja secar, se contrae poco (Abad y col., 2005).

Entre los sustratos inorgánicos más utilizados tenemos:

- **Perlita.** Es un sustrato muy empleado, solo o mezclado (con más frecuencia) en semilleros y plantas de maceta. La perlita natural es una roca volcánica de naturaleza silíceo que contiene entre un 2 y un 5% de agua y una vez se ha triturado a la granulometría adecuada, se calienta hasta 900-1000°C, momento en el cual se produce la evaporación brusca del agua atrapada, expandiéndose el material para formar una espuma. Presenta una superficie rugosa que contiene numerosas muescas, esto le confiere una gran área superficial y le permite retener agua en su superficie, además del agua ya retenida en los poros internos (Burés, 1997).
- **Lana de roca.** Es ligeramente alcalina, inerte y biológicamente no degradable. Se obtiene a partir de un 60% de diabasa, 20% de carbón de coque y 20% de piedra caliza. Estos materiales se funden en un horno alcanzando temperaturas de 1.600° C. La masa fundida pasa después a través de unas ruedas giratorias, saliendo en forma de fibras con un grosor aproximado de 0,005 mm. Presenta una gran capacidad de retención de agua libre (< 95% de espacio poroso) lo que hace que este material sea el segundo más empleado como sustrato tanto en España como en Europa.
- **Gravas.** Las más utilizadas como sustratos son grava de cuarzo, grava de piedra pómez y granito molido. Las gravas de cuarzo han de ser de gránulos no muy gruesos y con aristas suaves. Las propiedades físicas de la grava de cuarzo la hacen poco recomendable, además de su alto precio. El granito molido también posee unas características poco convenientes, pero con el problema de ser aún más caro. Las gravas de piedra pómez, por el contrario, presentan muy buenas cualidades físicas.
- **Vermiculita.** Es un silicato de magnesio, hierro y aluminio de apariencia similar a las micas, que proviene de un material que presenta una estructura trilaminar, con moléculas de agua atrapadas entre láminas. Este material se trata a elevadas temperaturas, alrededor de los 1000° C y el agua, al convertirse en vapor, separa los estratos formando trozos pequeños y porosos como esponjas con la forma de una semilla. Presenta gran capacidad de retención de agua y alta capacidad de intercambio catiónico.
- **Arena.** Las arenas son de naturaleza silíceo y proceden de canteras o ríos, su extracción puede causar serios problemas ambientales. Se pueden usar solas o mezcladas con otros materiales, pero en cualquier caso deben estar libres de limos, arcillas y carbonato cálcico para evitar la contaminación de las plantas. Las propiedades físicas van a variar en función del tamaño de las partículas.

Propiedades de los sustratos

Para poder establecer el uso y manejo de un material como sustrato de cultivo es necesario el estudio y la caracterización de sus propiedades que según Burés (1997) estarán influenciadas por las características del material (composición elemental, estructura interna y naturaleza) y la estructura que presentan las partículas del sustrato en el espacio. Conocer las propiedades del sustrato nos va a permitir optimizar la gestión del sistema sustrato-contenedor-planta.

La granulometría muy fina o muy gruesa, el pH alcalino, la salinidad elevada y la tendencia a inmovilizar el nitrógeno son las características más limitantes del sustrato según Abad y col. (2008).

De forma resumida, en la tabla 1.1 se exponen las principales características que deben tener los sustratos de cultivo.

Tabla 1.1. Principales características de los sustratos.

Propiedades físicas
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible. • Suficiente suministro de aire. • Distribución del tamaño de las partículas que mantengan las condiciones adecuadas. • Baja densidad aparente. Elevada porosidad. • Estructura estable, impide la contracción (o hinchazón) del sustrato y fluido.
Propiedades químicas
<ul style="list-style-type: none"> • Moderada capacidad de intercambio catiónico. • Suficiente nivel de nutrientes asimilables. Baja salinidad. • Elevada capacidad tampón y capacidad para mantener constante el pH. • Mínima velocidad de descomposición del sustrato.
Otras propiedades
<ul style="list-style-type: none"> • Libre de semillas de malas hierbas y de patógenos. • Reproductibilidad y disponibilidad. Bajo coste. • Fácil de mezclar. • Fácil de desinfectar y estabilidad ante la desinfección. Resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales.

Fuente: Raviv y col. (1986); Abad y col. (1993).

Propiedades físicas

Las **propiedades físicas** son el conjunto de características que describen el comportamiento del sustrato, en relación con su porosidad, y determinarán las cantidades de agua y de aire de los que va a disponer la planta. Las propiedades físicas del material usado como sustrato dependen del tipo de material que lo componen, por lo que, al elegir un sustrato específico, sus

propiedades físicas quedan ya estipuladas y no se podrán modificar una vez dentro del contenedor, aunque posteriormente haya una degradación física de los componentes. A continuación, se describen algunas de ellas:

- **Densidad real (Dr).** Es el peso del sustrato dividido por el volumen que realmente ocupa, es decir el volumen del sustrato sin tener en cuenta el volumen de los poros (los que hay dentro y entre las partículas del sustrato y los que se encuentran entre el sustrato y las paredes del contenedor). Este valor varía según la materia de que se trate y suele oscilar entre 2,5-3,0 g/cm³ para la mayoría de los sustratos de origen mineral.
- **Densidad aparente (Da).** Es la masa seca de un sustrato por su unidad de volumen aparente, esta estimación tiene en cuenta el volumen de poros, indica indirectamente la porosidad del sustrato y su facilidad de transporte y manejo. A mayor densidad, menor espacio poroso y viceversa (Bunt, 1988). Esta propiedad es importante en el manejo del cultivo, si es baja facilita su transporte, pero no sería adecuado para plantas de alto porte o en plantas ornamentales en exterior sometidas al viento. Valores de densidad aparente óptimos para cultivo en invernadero serían 0,15 g/cm³, mientras que para cultivo al aire libre debería estar entre 0,5 y 0,75 g/cm³ (Abad y col., 1992).
- **Distribución del tamaño de partícula:** la distribución de las diferentes partículas de un sustrato afecta al tamaño de los poros y a la distribución agua-aire para un determinado nivel de humedad. Un buen sustrato debería de tener una textura de media a gruesa con una distribución de partículas entre 0,25 y 2,5 mm (Raviv y col., 1986; Puustjärvi, 1994). La granulometría suele expresarse como un único parámetro: el Índice de Grosor (Abad y col., 2004). Este índice está correlacionado con las características hidrofísicas del sustrato y se define como el porcentaje acumulado (en peso o en volumen) de partículas con diámetro superior a 1 mm.
- **Espacio poroso.** Son los huecos dejados por la fase sólida. El tamaño de los gránulos va a condicionar el comportamiento del sustrato, a medida que aumenta el tamaño de los poros, mayor será la granulometría. Tanto la distribución de los poros y la del tamaño de partícula de los sustratos determinarán el balance entre el contenido de agua y el contenido de aire a cualquier nivel de humedad (Ansorena, 1994; Bunt, 1988; Handreck, 1992; Raviv, 1986).
- **Porosidad Total (PT).** Es el volumen total de sustrato no ocupado por las partículas sólidas, ese espacio estará ocupado por aire o agua en una cierta proporción. La estimación de la porosidad total se puede hacer utilizando las densidades real y aparente, a través de su medida directa en el contenedor, saturándolo con agua. Los poros capilares menores de 30 μm (microporos), retienen agua y los mayores de 30 μm (macroporos) drenan y permiten la

aireación. Para que la porosidad intraparticular participe en el suministro de agua es necesario que haya una comunicación entre el poro del interior de la partícula y los poros exteriores (Fornes y col., 2003). El valor óptimo de porosidad total se sitúa por encima del 85% (Abad y col., 1993), aunque sustratos con una porosidad menor, también pueden ser empleados favorablemente en determinadas condiciones.

- **Contracción en volumen.** Es la pérdida de volumen del sustrato tras someterse a un secado intenso de 105 °C. La contracción del sustrato en el contenedor genera huecos por donde el agua circularía de forma preferente limitando su aprovechamiento. Situación que puede producirse ante choques térmicos.

Las **características hidrofísicas** de los sustratos dependen de las propiedades físicas y son fundamentales para plantear las estrategias de riego. Estas son:

- **Capacidad de aireación (CA).** Es el volumen de aire que queda en el sustrato después de que éste haya sido saturado y drenado (capacidad de contenedor) a 10 cm de columna de agua. Esta mínima cantidad de aire proporciona el oxígeno inicial para la respiración de la planta y equivale al volumen de agua desplazado por una columna de agua de -10 cm de altura (1 kPa) en una caja de tensión. El volumen de aire se incrementa al disminuir el volumen de agua. Una situación sostenida de falta de oxígeno (hipoxia) provoca la muerte de la planta. Los sustratos de naturaleza orgánica contienen microorganismos que también requieren de oxígeno. Los valores óptimos de capacidad de aireación se encuentran entre el 20 y el 30% en volumen (Abad y col., 1993).
- **Capacidad de retención de agua (CRA).** Es el porcentaje de volumen de agua retenida por el sustrato después de ser saturado y haber drenado libremente.
- **Agua fácilmente disponible (AFD).** Es el volumen de agua que se encuentra retenida en un sustrato entre las tensiones de -10 y -50 cm de columna de agua (1 y 5 kPa), es el agua que libera el sustrato al aumentar la tensión y que toman las raíces de las plantas, ya que se requiere menor energía para extraerla del sustrato. La buena disponibilidad de agua y un nivel de aireación adecuado proporciona las condiciones hídricas para un crecimiento óptimo de las plantas. Su valor óptimo varía entre el 20 y el 30 % del volumen (Abad y col., 1993).
- **Agua de reserva (AR).** Es el volumen de agua que se encuentra entre -50 y -100 cm de tensión de columna de agua (5 y 10 kPa). Esta agua aún está disponible en el sustrato para la planta, sin embargo, las raíces necesitan mayor energía para extraerla. El nivel óptimo oscila entre el 4 y el 10% del volumen. En cultivo ornamental es preferible no sobrepasar el

límite de 100 cm de tensión, sin embargo, en hortalizas se puede llegar a los 300 cm sin que afecte de forma significativa el crecimiento vegetal.

- **Agua difícilmente disponible (ADD).** Es el agua que se encuentra retenida en el sustrato a tensiones superiores a -100 cm de columna de agua (1 m). La planta no puede extraerla del sustrato.

Intervalos óptimos para las propiedades físicas de los sustratos de cultivo

En la tabla 1.2 se detallan los intervalos óptimos para las propiedades físicas de un sustrato ideal.

Tabla 1.2. Intervalos óptimos para las propiedades físicas de los sustratos de cultivo. Abad y col. (1992) y Noguera y col. (2003).

Propiedad física	Unidades	Nivel óptimo
Tamaño de las partículas	mm	0,25 - 2,50
Densidad aparente	g cm ⁻³	< 0,4
Densidad de partícula	g cm ⁻³	1,45 - 2,65
Espacio poroso total	% vol	> 85
Retención de agua a potencial:		
-1 kPa	%vol.	55-70
-5 kPa	%vol	31-40
-10 kPa	%vol	25-31
Capacidad de aireación ¹	% vol	20 - 30
Agua fácilmente disponible ²	% vol	20 - 30
Agua de reserva ³	% vol	4 - 10
Agua total disponible ⁴	%vol	24-40
Contracción ⁵	% vol	< 30

¹Contenido de aire a potencial de -1 kPa. ²Contenido de humedad entre potenciales de -1 y -5 kPa. ³Contenido humedad entre potenciales de -5 y -10 kPa. ⁴Contenido humedad entre potenciales de -1 y -10 kPa. ⁵Pérdida de volumen respecto al volumen aparente inicial al secarse a 105 °C.

De forma general, los materiales que se empleen para elaborar medios de cultivo deben presentar: una granulometría gruesa (entre 0,25 y 5 mm) que genere un tamaño medio de poros grande (entre 30 y 300 mm) y una alta porosidad total (>75 o 85% en volumen). La alta porosidad es muy importante, ya que las paredes del contenedor restringen el crecimiento de las raíces, por lo que la relación volumen radicular/volumen sustrato es superior a la observada en los

suelos. Con un volumen radicular mayor se tendrá limitada la aireación en el contenedor. Además, la base del contenedor restringe el drenaje del agua, creando condiciones de saturación, que generan un problema de aireación. En esos casos se debería modificar con materiales de granulometría gruesa, cuyos poros puedan drenar a bajas tensiones con facilidad, o con contenedores con una relación volumen/altura que sea más adecuada. Sin embargo, el uso de materiales de granulometría gruesa implica algunos inconvenientes, relacionados con la disponibilidad de agua y la nutrición hídrica de la planta.

Propiedades físico-químicas y químicas

Las propiedades **físico-químicas y químicas** determinan la transferencia de materia (iones, átomos y moléculas) entre el sustrato y la disolución del sustrato donde las plantas toman los nutrientes a través de las raíces: reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (propiedades químicas), reacciones de intercambio de iones (propiedades físico-químicas), y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (propiedades bioquímicas) (Abad y col., 2004, 2005).

En los materiales químicamente activos (materiales orgánicos y arcillosos) tiene lugar intercambio de minerales entre sustrato y solución, y en los materiales químicamente inertes el intercambio es nulo o muy reducido. Este tipo de reacciones provoca alteraciones en el pH y en la composición química de la solución nutritiva, lo cual dificulta el control de la nutrición de la planta y limita la programación y el manejo del sistema de fertilización aplicado al sustrato (Cadahía, 2005; Raviv y Lieth, 2008).

Se describen a continuación algunas de las propiedades físico-químicas y químicas de los sustratos:

- **pH.** Es una medida de la acidez o alcalinidad del medio. Este parámetro es fundamental para la elección del material como medio de cultivo debido a que puede afectar a la disponibilidad de iones para la planta. En el intervalo óptimo de pH del sustrato (5,2 - 6,3), la mayoría de los nutrientes mantiene su máximo nivel de solubilidad. Por debajo de 5 puede haber deficiencias de N, K, Ca, Mg o B y por encima de 6,5 disminuye la disponibilidad de P, Fe, Mn, Zn y Cu. Además, los óxidos de algunos metales solubles por debajo de 5 pueden resultar fitotóxicos (Masaguer y col., 2015). La adición de dolomita o caliza al sustrato soluciona los problemas de pH bajos del sustrato y la adición de azufre los de pH alcalino.
- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC).** Es la cantidad de cationes presentes en la superficie del sustrato y que pueden intercambiarse con los cationes de la solución nutriente

y llegar así a un equilibrio. Depende del pH. Esta propiedad se considera importante en los sustratos, cuando se aplica fertirrigación intermitente o un abonado de base y de cobertura, sin embargo, en algunas ocasiones se prefieren utilizar sustratos inertes o muy poco activos y utilizar una fertirrigación continua (Masaguer y col., 2015).

- **Materia orgánica total.** La presencia de materia orgánica en los sustratos provocará mejoras en la estructura física, debido a la mejora de la estabilización de la temperatura, mejora la acción enzimática y aumenta la capacidad de intercambio de nutrientes. Su estado es transitorio, presenta diferentes estados de descomposición.
- **Relación C/N.** Es la relación entre el carbono y el nitrógeno, se emplea para indicar el grado de descomposición de la materia orgánica. En esta descomposición intervienen los microorganismos, que consumen el nitrógeno y oxígeno. Observando esta relación se puede valorar el estado de degradación del material en un determinado momento. Es utilizado como indicador de madurez y estabilidad de los compost. Algunos autores establecen el intervalo óptimo entre 20 y 30, sin embargo, en materiales muy lignificados (corteza de pino o fibra de coco) puede llegar a duplicarse. Este factor influye en el comportamiento físico del sustrato: relaciones inferiores a 30 pueden ser materiales de rápida velocidad de mineralización, con pérdida de estructura en el tiempo que colmataría los poros más finos. Materiales con C/N entre 50-60 tienen una descomposición más lenta y provocan menor perturbación del medio físico (Peñuelas y Ocaña, 2000).
- **Salinidad.** Hace referencia a la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. Es esencial que la conductividad eléctrica de un sustrato sea baja para evitar problemas de estrés hídrico o de fitotoxicidad en el cultivo y facilitar el manejo de la fertilización. En caso de que aumente, se puede corregir mediante lixiviación controlada. Los materiales que sean más salinos pueden acondicionarse mediante lixiviación de sales o mezcla con otros materiales menos salinos.

En la tabla 1.3 se muestran los rangos óptimos de las diferentes propiedades físico-químicas y químicas en un sustrato ideal.

Propiedades biológicas

Una característica fundamental de los materiales usados como sustratos es que posean una alta estabilidad biológica, ya que su biodegradación dentro de los contenedores durante el cultivo generará inconvenientes como: fuerte consumo de oxígeno y ambiente reductor en la rizosfera; inmovilización de N; producción de sustancias fitotóxicas; y alteración de las propiedades físicas por disminución del tamaño de las partículas, cambios en el

empaquetamiento de las mismas, y, consecuentemente, apelmazamiento y reducción del tamaño de los poros y de la porosidad total (Carmona y Abad, 2008).

Así, algunos investigadores estiman oportuno usar como índice de estabilidad biológica la relación C biodegradable/N. En el caso de los residuos forestales como cortezas de árboles, virutas de madera, etc., aunque presentan elevadas relaciones C/N, su alto contenido en fibra (lignocelulosa), rica en C de difícil biodegradación, los hace muy estables.

Tabla 1.3. Intervalos óptimos para las propiedades físico-químicas y químicas de un sustrato de cultivo (Abad y col., 1992; Noguera y col., 2003).

Propiedad	Unidad	Intervalo óptimo
pH (pasta saturada)	-	5,2 - 6,3
CE (extracto saturado)	dS m ⁻¹	0,75 - 3,5
Capacidad de cambio catiónico	meq/100g	> 20
Materia orgánica total	%	> 80
Cenizas	%	< 20
Relación C/N	-	20 - 40
Elementos asimilables (extracto saturado):		
N-NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	100 - 199
N-NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	0 - 20
P	mg L ⁻¹	6 - 10
K	mg L ⁻¹	150 - 249
Ca	mg L ⁻¹	> 200
Mg	mg L ⁻¹	> 70
Fe	mg L ⁻¹	0,3 - 3,0
Mn	mg L ⁻¹	0,02 - 3,0
Mo	mg L ⁻¹	0,01 - 0,1
Zn	mg L ⁻¹	0,3 - 3,0
Cu	mg L ⁻¹	0,001 - 0,5
B	mg L ⁻¹	0,05 - 0,5
Cl ⁻	mg L ⁻¹	< 180
SO ₄ ²⁻	mg L ⁻¹	< 960
Na ⁺	mg L ⁻¹	< 115

CE: conductividad eléctrica.

Por otro lado, sustratos orgánicos como los compost pueden mostrar capacidad de supresión frente enfermedades fitopatológicas de los cultivos, y/o efectos biofertilizantes y bioestimulantes que mejoran el crecimiento de las plantas y el aumento de componentes biológicamente activos en los cultivos que pueden proporcionar beneficios para la salud en los

consumidores. Estas capacidades como biocontrol, biofertilizante y bioestimulante pueden ser mejoradas mediante la incorporación de determinados componentes y/o materiales durante el proceso de compostaje.

1.1.2 Problemática asociada y alternativas al uso de la turba como sustrato de cultivo

El sector de cultivo sin suelo emplea como sustrato casi exclusivamente la turba, concretamente la turba de Sphagnum. Debido a que la tasa de reposición de la turba es muy lenta con respecto su extracción, ésta se considera un recurso no renovable.

Las turberas, también llamadas suelos orgánicos, son los ecosistemas terrestres más densos en carbono del mundo, por su alta eficiencia en el secuestro de carbono. Están formadas por restos vegetales parcialmente descompuestos que se han estado acumulando durante miles de años en condiciones de encharcamiento casi constante, con la consiguiente falta de oxígeno que ralentiza su descomposición por los microorganismos, resultando la materia orgánica (turba). Los suelos de turbera abarcan el 3% de la superficie terrestre y se estima que contienen 650 mil millones de toneladas (Gt = Pg) de carbono, un depósito de carbono que es igual en magnitud a la cantidad de carbono en la vegetación de la Tierra, y más de la mitad del carbono en la atmósfera (Yu y col., 2010; Page y col., 2011; Dargie y col., 2017; FAO, 2020). Por tanto, las turberas desempeñan un papel fundamental en el ciclo global del carbono y en la regulación del clima. La capacidad de las turberas que permanecen intactas para retener el carbono de la atmósfera y poder almacenarlo a largo plazo es clave para su papel en la mitigación del cambio climático. Cada año, la degradación de las turberas es la responsable de liberar anualmente dos mil millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera (Joosten y col., 2012), contribuyendo al efecto invernadero y por tanto al calentamiento global.

Las turberas son sistemas muy vulnerables, de bajísima resiliencia, cualquier alteración puede acelerar la descomposición de la materia orgánica acumulada y la degasificación masiva, acelerando a su vez el calentamiento climático inducido (García-Rodeja y col., 1999). Su drenaje para cambios de uso como la agricultura, silvicultura, extracción de turba, etc., facilita la degradación microbiana del carbono almacenado durante milenios que se libera a la atmósfera en cuestión de décadas, principalmente en forma de dióxido de carbono (CO₂).

La velocidad de acumulación de turba en las turberas es muy lenta. En las turberas del norte, la tasa de formación es aproximadamente de 1 m de turba cada mil años y actualmente, tras

varios milenios alcanzan 5 m o más de profundidad (Yu y col., 2010). En los trópicos, debido a la mayor productividad de las plantas los depósitos de turba superan los 15 m en algunas de ellas (Page y col., 2011).

Se consideran ecosistemas de elevado valor medioambiental y de gran importancia científica. Al tratarse de una descomposición lenta de la materia orgánica, se conservan restos vegetales y maderas semifosilizadas que sirven para el estudio de la vegetación y el clima del pasado. Se reconocen como un recurso económico y ecológico; contribuyen a la diversidad biológica por la rareza y singularidad de su flora, al ciclo hídrico mundial (contienen el 10% de agua dulce, debido fundamentalmente a las características histológicas de los esfagnos, que actúan como esponjas, capaces de acumular agua hasta 20 veces su peso) y al almacenamiento mundial de carbono (Ramsar, 1971), por lo que se reconocen internacionalmente como sumideros de carbono.

Las turberas se encuentran en lugares donde la precipitación es alta y la evaporación es baja, donde rara vez hay sequías de verano. El impacto negativo que ha ejercido el ser humano sobre las turberas viene desde muchos años atrás. El área total de las turberas se ha visto reducida en el último siglo por varias actividades: repoblaciones forestales, drenaje para la agricultura, construcción de infraestructuras o cosechas no sostenibles y también por la explotación de turba como sustrato agrícola y para jardinería. Esta extracción de turba no es sostenible, destruye las turberas y altera la hidrología; además, como se ha comentado anteriormente, su tasa de formación es muy baja. Las turberas naturales no vuelven a ser funcionales tras la explotación debido a que se alteran las condiciones físicas e hidrológicas adecuadas para el musgo *Sphagnum* (Heathwaite, 1994; Price 1996). Esta degradación de las turberas contribuye a serios problemas medioambientales, su desecación es la causa de la pérdida de funciones como el almacenamiento de carbono y la mitigación del cambio climático. Por eso es importante actuar para evitar la degradación de estos humedales.

Con respecto al N, los humedales, entre ellos las turberas, son receptores del exceso de nitrógeno, fundamentalmente procedente de los fertilizantes, y son ambientes ideales para la desnitrificación por lo que tienen importancia en el balance global (Mitsch y Gosselink, 1993).

Por estos motivos de aumento en la demanda de sustratos y dependencia de recursos no renovables, es necesaria la búsqueda de un material alternativo a la turba para resolver la problemática tanto económica como medioambiental. La sustitución de un recurso como la turba por nuevos materiales orgánicos estabilizados puede ser gradual, de esta forma se reciclan restos orgánicos de manera sostenible, el coste de los sustitutos de la turba tendría un precio

inferior y es una buena alternativa debido al papel que desempeñan las turberas en el ciclo del carbono.

Existe una gran cantidad de residuos y subproductos orgánicos producidos en diferentes actividades que, tras un proceso de compostaje, se transforman en compost apto para su uso como medio de cultivo para fines hortícolas o plantas ornamentales. Ésta es una forma de contribuir a la sustitución de la turba y al mismo tiempo favorecer la valorización de los residuos.

La aparición de materiales nuevos autóctonos que se emplean para sustituir parcialmente a los usados de forma tradicional encaja perfectamente en la sensibilización social para afrontar el agotamiento de los recursos no renovables. Este aspecto recobra más importancia cuando, en algunos casos, la utilización de materiales autóctonos alternativos puede presentar unos costes de adquisición más económicos (López-Cuadrado y col., 2006).

Una cuestión muy importante para los consumidores de sustratos es la homogeneidad del material. Si bien las características físicas, químicas y biológicas de un determinado residuo derivan en gran medida de la naturaleza de los residuos de los que procede, no siempre existe una homogeneidad elevada entre partidas del mismo material, siendo frecuente encontrar diferencias significativas en algunos parámetros. Éstas pueden ser debidas al distinto origen geográfico de los residuos, a la particular manipulación y tratamientos físicos y químicos recibidos en la industria que los generó, o a la forma de dirigir el proceso de compostaje en cuanto a: temperatura alcanzada, sistema de aireación, duración del proceso, elementos fertilizantes aportados, cambios en las proporciones al mezclar materiales, etc. Esta falta de homogeneidad puede ser un problema para horticultores y viveristas que se planteen reemplazar turba por un compost cualquiera. Por ello, un control frecuente de las características de los residuos procesados, así como de la marcha del compostaje, permitirá asegurar unos estándares mínimos de calidad en el compost final utilizado como sustitutivo total o parcial de los ingredientes del medio de cultivo (Carmona y Abad, 2008).

1.1.3 Normativa aplicable a los compost y vermicompost como sustratos de cultivo

El uso de los sustratos de cultivo está muy extendido en los cultivos tanto hortícolas como ornamentales. Esto ha requerido de un marco legislativo donde productores, administración central y comunidades autónomas han debatido para definir y tipificar los sustratos de cultivo, dando lugar inicialmente al **Real Decreto 865/2010**, sobre sustratos de cultivo, que establece

las directrices necesarias para el empleo eficaz del medio de producción como sustituto del suelo tradicional y las normas necesarias de coordinación con las comunidades autónomas. El citado RD cuenta con siete anexos, donde se especifican las características técnicas y otros requisitos que deben cumplir los sustratos para ser utilizables en la agricultura y jardinería. Dicho Real Decreto ha sido modificado en sus anexos I, II, IV, VI por la **Orden PRA/1943/2016**, de 22 de diciembre (BOE, 2016).

En el anexo I se incluye la clasificación de productos que pueden ser utilizados como sustratos de cultivo o componente de los sustratos de cultivo. Donde se indica la denominación del tipo de producto, su descripción, especificaciones, declaraciones obligatorias y opcionales. Se establecen cinco grupos:

Grupo 1: Productos orgánicos como sustratos de cultivo o componentes de los mismos: compost, compost de restos vegetales del cultivo de hongos, compost de estiércol, compost vegetal, corteza de pino envejecida, compostada o esterilizada en caliente, fibra o corteza de coco, fibra de madera, turba sphagnum, turba herbácea, vermicompost o humus de lombriz y cáscara de arroz.

Grupo 2: Productos minerales como sustratos de cultivo o componentes de los mismos: arcilla, arcilla cocida, arcilla expandida, arcilla granulada, arena y gravillas, arena y gravillas silíceas, arenas y gravillas volcánicas, cerámica triturada, perlita, grava, grava volcánica, recuperado de construcción y demolición, sepiolita, tierra natural, vermiculita.

Grupo 3: Productos de síntesis como sustratos de cultivo o componentes de los mismos: espuma de urea formaldehído, lana mineral granulada, poliestireno expandido.

Grupo 4: Productos preformados como sustratos de cultivo: espuma de polifenol (rígida no granular), espuma de poliuretano (rígida no granular), espuma de urea formaldehído (rígida no granular), lana mineral (rígida no granular).

Grupo 5: Sustratos de cultivo de mezcla: sustrato de mezcla, tierra vegetal, sustrato de mezcla a demanda.

Los compost y vermicompost se incluyen en el Grupo 1. En la tabla 1.4. se expone la descripción, especificaciones y las declaraciones obligatorias y opcionales del compost, compost de estiércol y vermicompost, según se especifica en el Anexo I del RD 865/2010 del 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.

Tabla 1.4. Descripción, especificaciones y declaraciones obligatorias y opcionales del compost especificado en el Anexo I del RD 865/2010 del 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.

Denominación del tipo de producto	Compost	Compost de estiércol	Vermicompost o humus de lombriz
Descripción	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo V, recogidos separadamente.	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), de estiércol con o sin adición de materiales vegetales, bajo condiciones controladas	Producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices, bajo condiciones controladas
Especificaciones	Materia orgánica sobre materia seca >20% (m/m)	Materia orgánica sobre materia seca >20% (m/m)	Materia orgánica sobre materia seca >30% (m/m)
Declaraciones obligatorias	<ul style="list-style-type: none"> - Principales componentes (más del 10% (v/v)), ordenados en orden decreciente de porcentaje. - Materia orgánica sobre materia seca. - Conductividad eléctrica, CE. - pH. - Cantidad de volumen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Principales componentes (más del 10% (v/v)), ordenados en orden decreciente de porcentaje. - Materia orgánica sobre materia seca. - Conductividad eléctrica, CE. - pH. - Cantidad de volumen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Materia orgánica sobre materia seca. - Conductividad eléctrica, CE. - pH. - Cantidad en volumen.
Declaraciones opcionales	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad aparente seca. - Volumen de aire. - Volumen de agua a 1,5 y 10 KPa. - Materia seca. - Espacio poroso total. - Granulometría. 	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad aparente seca. - Volumen de aire. - Volumen de agua a 1,5 y 10 KPa. - Materia seca. - Espacio poroso total. - Nombre de la(s) especie(s) animal(es). Si procede de aves indicar «gallinaza» - Granulometría. 	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad aparente seca. - Volumen de aire. - Volumen de agua a 1,5 y 10 KPa. - Materia seca. - Espacio poroso total. - Granulometría.

En el anexo VI también se especifican los requisitos que debe verificar cualquier material para poder ser empleado como sustrato de cultivo (tabla 1.5.) según el RD 865/2010 del 2 de julio. Esta normativa es más restrictiva que la normativa sobre productos fertilizantes, fundamentalmente en relación a la calidad higiénico-sanitaria de los compost, así como en relación a las clases de material (clase A y clase B).

Tabla 1.5. Valores límite de diversos parámetros que deben cumplir los compost especificados en el Anexo VI del RD 865/2010 del 2 de julio.

Parámetro	Clase A	Clase B
Microbiológicos		
<i>Salmonella</i>	Ausente en 25 g producto elaborado	
<i>Listeria monocytogenes</i>	Ausente en 1 g materia bruta en cultivo para la alimentación	
<i>Escherichia coli</i>	< 1000 NMP/g producto elaborado	
Metales pesados (mg/kg de materia seca)		
Cadmio	0,7	2
Cobre	70	300
Níquel	25	90
Plomo	45	150
Zinc	200	500
Mercurio	0,4	1,5
Cromo total	70	250
Cromo VI	0,5	0,5

Clase A: Sustratos de cultivo cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A.

Clase B: Sustratos de cultivo cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B.

Los productos de la clase B no podrán aplicarse en cultivos hortícolas comestibles.

1.2 Los residuos orgánicos

Bajo el concepto de **residuo** se denominan y agrupan una cantidad muy variada de materiales y productos que no tienen valor comercial en el momento de su generación y cuya recolección y eliminación es necesaria, principalmente por motivos de salud, para evitar acumulaciones y ocupaciones innecesarias de espacio. En la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (BOE, 2022) se define “Residuo: cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar”. Este concepto es muy amplio, por lo que nos centraremos en los **residuos orgánicos** que son residuos biodegradables, de origen vegetal o animal, susceptibles de degradarse biológicamente y transformarse en otra materia orgánica. Los residuos orgánicos se generan principalmente en el ámbito urbano (biorresiduos domésticos y comerciales, lodos de depuradora, podas urbanas, algas y arribazones, etc), agroforestal y ganadero (restos de cultivos, podas,

estiércoles, purines, etc.) y de la industria de transformación y especialmente en el sector agroalimentario (lodos de la transformación y procesado de frutas y verduras, destriós, etc).

1.2.1. Producción y composición

Actualmente la generación de residuos va en aumento, asociado a un continuo crecimiento de la población mundial que requiere un aumento de la producción de alimentos y al desarrollo industrial para satisfacer las formas y ritmo de consumo que demanda la sociedad actual. La gestión inadecuada de los residuos en diferentes sectores ha provocado una contaminación ambiental importante que se refleja en una preocupación colectiva. A continuación, se detallan aspectos de producción y composición de los residuos orgánicos generados en diferentes sectores productivos y que están relacionados con los trabajos de investigación desarrollados en esta tesis doctoral, como son el sector ganadero, agroforestal, urbano y agroalimentario.

Residuos orgánicos de origen ganadero

Consideramos en este apartado las deyecciones animales que constituyen las excreciones sólidas o líquidas de las especies ganaderas solas o mezcladas con la cama. Puede incluir también restos de alimentos del ganado y todo tipo de materiales orgánicos que entren en el establo.

Las características físicas de los residuos ganaderos han evolucionado a lo largo de la historia. En los sistemas agrícolas y ganaderos tradicionales se presentaban en forma sólida; se trataba de una mezcla de las deyecciones con la cama del ganado que se utilizaba, como abono que aportaba nitrógeno y otros nutrientes, en el mismo lugar donde se producía, sin generar problemas medioambientales. La industrialización ha propiciado la expansión de explotaciones ganaderas de cría de ganado intensivo, instalaciones que generan cantidades considerables de residuos en zonas con insuficiente suelo para reciclarlos como se hacía de forma tradicional. Por otra parte, el cambio en el manejo de los residuos ganaderos al realizar la limpieza de los establos utilizando agua a presión ha provocado su dilución y el incremento en el volumen final obtenido, esto junto a la disminución del suelo disponible para la actividad agroganadera ha generado problemas de acumulación (Santos y col., 2016a; Santos y col., 2016b). Además, los fertilizantes químicos han contribuido a la recesión en la utilización de estiércoles, dada su facilidad de manejo, concentración de nutrientes, especialmente NPK, y en muchas épocas un precio de mercado muy bajo. La excesiva utilización de fertilizantes químicos, necesarios para un mayor rendimiento de las cosechas, ha producido una importante disminución de la materia

orgánica presente en los suelos de cultivo, provocando una pérdida de la capacidad productiva de los mismos. Ante la situación de cambio climático en la que estamos inmersos y como contribución a la economía circular, el reciclaje de los residuos para el desarrollo de una fertilización racional y sin efectos contaminantes en suelos, agua y atmósfera, adquiere gran importancia e interés por parte de científicos y agricultores.

En la tabla 1.6 se muestra la clasificación de los **residuos ganaderos**, en función de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) y del código LER (lista europea de residuos).

Tabla 1.6. Clasificación de los residuos ganaderos.

CNAE ¹	Cód. LER ² : Descripción	Ejemplos
0141 Explotación de ganado bovino para la producción de leche	02 Residuos de la gricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la reparación y elaboración de alimentos	<i>Estiércol</i>
0142 Explotación de otro ganado bovino y búfalos		<i>Purín</i>
0143 Explotación de caballos y otros equinos		<i>Gallinaza</i>
0144 Explotación de camellos y otros camélidos	02 01 02 Residuos de tejidos de animales.	
0145 Explotación de ganado ovino y caprino	02 01 06 Heces de animales, orina y estiércol [incluida paja podrida] y efluentes recogidos selectivamente y tratados fuera del lugar donde se generan.	
0146 Explotación de ganado porcino		
0147 Avicultura		
0149 Otras explotaciones de ganado		

¹CNAE: Clasificación Nacional de Actividades Económicas. Rev.2

²LER: Lista Europea de Residuos (anteriormente denominada Catálogo Europeo de Residuos) (Decisión 2000/532/EC del 3 de mayo de 2000 modificada por 2001/118/EU, 2001/119/EU, 2001/573/EU, 2014/955/UE; transpuesta por Orden MAM/304/2002).

La producción de estiércol y purines a nivel mundial no está contabilizada con precisión. En la tabla 1.7 se presenta una estimación a nivel nacional (www.probiogas.es). Hay una variación considerable en las deposiciones diarias por tipo y tamaño de animal, gestión, etc., lo que impide tener un valor exacto de la producción de estos residuos. Entre los residuos ganaderos, la mayor cantidad producida es la de purines de origen porcino, casi duplicando la de estiércoles de vacuno. Según Eurostat (2015), España es el país con la segunda mayor producción porcina de Europa (después de Alemania).

Existen diversas expresiones para denominar a las deyecciones producidas en una explotación en intensivo, algunas de ellas son:

- ✓ **Estiércol:** Todo excremento u orina de animales de granja, incluidas las aves, con o sin cama, el agua de lavado y restos de pienso, las aguas para la limpieza de las instalaciones de estabulación, de almacenaje de leche y de ordeño, en proceso de cambio biológico. Su humedad es inferior al 85%. En función del sistema de producción tendrán diferentes contenidos de agua, dando lugar a los estiércoles sólidos, semisólidos o líquidos.
- ✓ **Purín:** Estiércol líquido con más de un 85% de humedad.

Tabla 1.7. Estimación de residuos ganaderos en España.

Deyecciones ganaderas	Generación (t/año)
Purín de cerdo	23.430.166
Estiércol vacuno	14.146.063
Gallinaza³	3.024.831
Otras especies ganaderas	8.323.058

Fuente: proyecto Probiogas-AINIA (2010)

El **purín** es el principal tipo de estiércol, generado por el ganado porcino, resultado de la excreta durante la crianza que es recogido en una fosa. El purín consta de dos fracciones, una líquida (de la orina y agua de lavado) que contiene materiales minerales y orgánicas disueltas y otra fracción sólida (material fecal sólido y restos de comida). La cantidad exacta de purín que se genera no es fácil de calcular, depende del animal y su dieta, aunque se puede estimar en cerca de 7 litros/día por cerdo de engorde.

En la fosa de recogida, el purín suele precipitar formando estratos: en el fondo se encuentra una capa de material sedimentado, en la parte central se encuentra la fracción líquida y en la superficie el material celulósico forma una costra. Por este motivo, los minerales no se distribuyen de manera uniforme. El P y N orgánico se concentran en el fondo.

La **gallinaza** sólida es el producto de la fermentación, en este caso predominantemente aerobia, de los excrementos de los pollos de engorde con un material orgánico, de naturaleza lignocelulósica, utilizado como cama. Dicha fermentación tiene lugar en las instalaciones donde se crían los pollos. Su composición depende principalmente de la dieta, de la edad y del sistema de alojamiento, dando lugar a una mezcla de las deyecciones, de restos de alimento, huevos rotos y plumas, presentando un elevado contenido de humedad. En cuanto a la cantidad,

depende de varios factores como la edad del ave (las jóvenes producen menos deyecciones) y la línea de engorde (mezcla de deyecciones y cama).

La **composición de los estiércoles** depende del animal, de su tamaño y edad, de su dieta, tasa de dilución, estado fisiológico, de su establo y si se recogen en forma líquida o sólida, de lo que se desprende una necesidad de estudios locales para optimizar su reciclaje. Cualitativamente todos los estiércoles poseen: alta humedad, pH básico, salinidad alta, elevados contenidos en materia orgánica, macronutrientes (N, P y K), elementos secundarios (Ca, Mg, Na) y oligoelementos (Cu, Zn y Fe, principalmente). Todos los estiércoles presentan un alto contenido de P en comparación con el N, lo que da lugar a una relación N/P no equilibrada para nutrir a una planta. A modo de ejemplo, el estiércol licuado de porcino presenta contenidos en N total, N amoniacal, P y Ca superiores a los del estiércol de bovino. El Cu en el estiércol porcino y el Zn en el porcino, ovino y bobino, así como en aves de corral, puede presentarse en cantidades altas. Dentro de una misma especie, depende del estado fisiológico; así, en el porcino, los estiércoles de explotaciones de engorde tienen mayores concentraciones de N total, P, K y Ca, debido a una alimentación más abundante y de mejor calidad. La gallinaza en comparación con otros estiércoles, es más rica en nitrógeno (siendo la gallinaza líquida más rica en elementos minerales que la gallinaza sólida) que se volatiliza rápidamente, generando fuertes olores. La composición de los estiércoles y la gallinaza varía mucho de unas granjas a otras por lo que los valores de los parámetros son orientativos. En la tabla 1.8 se muestra como ejemplo la composición de diferentes estiércoles.

Tabla 1.8. Composición de diferentes estiércoles.

Parámetros	Estiércol vaca ¹	Estiércol oveja/cabra ²	Estiércol caballo ³	Gallinaza ²	Estiércol porcino ⁴
% humedad	68,0	38,5	19,5	20,1	-
pH	7,8	8,5	7,2	7,5	6,6
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	4,1	11,3	16,7	8,5	2,3
% Materia orgánica	-	45,6	57,8	80,5	-
% Carbono orgánico total	35,6	25,2	31,1	39,8	41,6
Nitrógeno total (g/kg)	21	17,7	15,3	32,3	19,4
Relación C/N	16,1	14,3	20,4	12,3	21,4
P (g/kg)	4,1	22	2,3	2,2	15,8
K (g/kg)	5,7	16,5	21,2	13,5	6,3
Cu (mg/kg)	23	51	42	29	226
Zn (mg/kg)	159	185	45	79	413

¹Pettygrove y col. (2010); ²Tortosa y col. (2012); ³Albuquerque y col. (2009); ⁴Moreno-Caselles y col. (2005).

En general, los estiércoles son materiales susceptibles de ser compostados para configurar sustratos de cultivo. En el proceso de compostaje, los estiércoles aportan humedad y nitrógeno, por su baja relación C/N.

En la tabla 1.9 se muestra la composición media del purín de cerdo según Moral y col. (2005). La composición del purín es muy variable, depende de la clase de animal, estructura de la granja, tipo de alimentación, sistema de limpieza, etc. En general, presentan un contenido en agua de hasta el 90%, pH básico y elevada capacidad tampón, alto contenido en nitrógeno amoniacal, una alta demanda de oxígeno y una concentración elevada de macro y micronutrientes.

Tabla 1.9. Composición media de purín de cerdo.

Parámetros	Purín de cerdo
pH	7,43 ± 0,31
Conductividad eléctrica	17,9 ± 8,1
Potencial redox (mV)	-361 ± 72
Densidad (kg m ⁻³)	1006 ± 11
Sólidos sedimentables (mL L ⁻¹)	389 ± 454
Demanda biológica de oxígeno (g O ₂ L ⁻¹)	14,2 ± 9,4
Demanda química de oxígeno (g O ₂ L ⁻¹)	31,6 ± 20,8
Nitrógeno total Kjeldahl (kg N m ⁻³)	2,58 ± 1,29
Nitrógeno amoniacal (kg N m ⁻³)	2,01 ± 1,06
Nitrógeno orgánico (kg N m ⁻³)	0,57 ± 0,48
Potasio (kg K m ⁻³)	2,26 ± 1,27
Fósforo (kg P m ⁻³)	0,76 ± 1,04
Calcio (kg Ca m ⁻³)	10,8 ± 17,6
Magnesio (kg Mg m ⁻³)	1,12 ± 1,17

Fuente: Moral y col. (2005).

Residuos de origen agrícola y forestal

Se entiende por residuos agrícolas y forestales a los producidos en el desarrollo de actividades propias de estos sectores y los que se generan a partir de cultivos de leña o de hierbas. Estos se obtienen principalmente de los restos de cultivo estacional o de limpiezas que se hacen en el campo para evitar la propagación de plagas e incendios y del mantenimiento y mejora de las montañas y masas forestales, mediante podas, limpiezas, etc. Su producción y características varían en función de las características morfológicas de las especies vegetales, de la parte desechada, del método de recolección, de la zona del cultivo, etc. En la tabla 1.10 se

muestra la clasificación de los **residuos agrícolas**, en función de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) y del código LER (lista europea de residuos).

Tabla 1.10. Clasificación de los residuos agrícolas y de la silvicultura.

CNAE ¹	Cód. LER ² : Descripción	Ejemplos
0111 Cultivo de cereales (excepto arroz), leguminosas y semillas oleaginosas 0112 Cultivo de arroz 0113 Cultivo de hortalizas, raíces y tubérculos 0114 Cultivo de caña de azúcar 0115 Cultivo de tabaco 0116 Cultivo de plantas para fibras textiles 0119 Otros cultivos no perenes 0121 Cultivo de la vid 0122 Cultivos tropicales y subtropicales 0123 Cultivo de cítricos 0124 Cultivo de frutos con hueso y pepita 0125 Cultivo de otros árboles y arbustos frutales 0126 Cultivo de frutos oleaginosos 0127 Cultivo de plantas para bebidas 0128 Cultivo de especias, plantas aromáticas, medicinales y farmacéuticas 0129 Otros cultivos perennes 0130 Propagación de plantas 0164 Tratamiento de semillas para reproducción	02 Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos 020103 Residuos de tejidos vegetales	<i>Pajas</i> <i>Tallos</i> <i>Hojas</i> <i>Cascarillas</i> <i>Plantas verdes</i> <i>Restos de podas</i>
0210 Silvicultura y otras actividades forestales 0220 Explotación de la madera 0230 Recolección de productos silvestres	02 Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos 020107 Residuos de la silvicultura	<i>Pies no maderables</i> <i>Ramas</i> <i>Matorrales</i>

¹CNAE: Clasificación Nacional de Actividades Económicas. Rev.2

²LER: Lista Europea de Residuos (anteriormente denominada Catálogo Europeo de Residuos) (Decisión 2000/532/EC del 3 de mayo de 2000 modificada por 2001/118/EU, 2001/119/EU, 2001/573/EU, 2014/955/UE; transpuesta por Orden MAM/304/2002).

Los cultivos producidos a nivel mundial en mayor cantidad son la caña de azúcar, el maíz, el arroz y el trigo (FAO, 2015). El arroz, el maíz y el trigo juntos suministran más del 42% de todas las calorías consumidas por toda la población humana (Ria y col., 2019). En Europa, los cultivos más significativos son el trigo, con 128 millones de toneladas en la cosecha 2017/2018 (Ria y col., 2019), el arroz, la cebada, la avena, el centeno, el maíz y la soja.

En España, los cultivos más característicos y que generan mayor cantidad de residuos son los cereales. La producción de cereales en 2017 fue de 20,1 millones de toneladas, siendo la cebada el cereal de mayor producción (6,7 millones toneladas), seguida del trigo blando (5,4 millones toneladas) y el maíz (4,5 millones toneladas).

Los cereales son los productos agrícolas más producidos y consumidos en el mundo, generándose una gran cantidad de biomasa residual de naturaleza fibrosa, como pajas, vainas o cáscaras, cuyo componente principal es la lignocelulosa, lo que plantea un desafío para tratarlos. La cantidad de residuos generados por los diferentes cultivos se puede calcular a partir de los datos de producción (tabla 1.11).

Tabla 1.11 Superficie, producción y residuo de los principales cultivos en España.

Cultivo	Superficie ¹ (Miles hectáreas)	Producción ¹ cultivo en España (Miles de toneladas)	Relación entre residuo producido/producción cultivo ²	Residuo (Miles de toneladas)	Tipo de residuo
Cereales					
Cereal grano	6.196,0	20.141,0	1,32	26.586	Paja
Trigo duro	347,9	924,9	1,58	1.461	Paja
Trigo blando	1.828,4	5.437,7	1,58	8.591,6	Paja
Cebada	2.598,8	6.705,1	1,17	7.845	Paja
Maíz	398,2	4.564,4	1,19	5.431,6	Paja
Oleaginosos					
Algodón	63,3	185,4	2,775	514,5	Tallos
Girasol	738,8	769,1	2,0	1.538	Paja
Colza	71,0	149,1	1,86	277,3	Paja
Hortícola y frutícola					
Guisante seco	161,7	193,3	1,0	193,3	Paja
Patata	71,6	2.284,0	0,28	8.157	Tallo
Remolacha azucarera	37,6	3.605,1	0,83	2.992,2	Hojas
Almendro	487,7	209,0	3,17	656,3	Podas
Naranja	135,8	3.086,8	0,07	216,1	Podas
Mandarino	100,1	2.018,8	0,07	141,3	Podas
Viñedo (Uva de mesa)	14,4	270,7	0,43	116,4	Podas
Viñedo (Uva vino)	932,6	5.528,4	0,43	2.377,2	Podas
Oliva (Almazara)	2.271,5	6.811,6	1,13	7.697,1	Podas
Oliva (Aceituna de mesa)	161,1	540,5	1,13	610,8	Podas

¹ Datos de producción de cultivos del Informe Anual de Indicadores año 2017. ² Relación entre residuo y producción tomados de López y Boluda (2008).

En España, el sector agrario intensivo, que abarca unas 75.000 ha y que se encuentra concentrado principalmente en el sur peninsular, presenta una gran actividad (tabla 1.12), con varios ciclos de cultivo al año y esto genera gran cantidad y diversidad de residuos (Vargas y col., 2014). En la tabla 1.13 pueden observarse las características de diferentes residuos agrícolas, según diferentes autores. En general, los residuos agrícolas como podas y pajas presentan baja humedad, pH variable entre ácido y neutro, salinidad baja, elevado contenido en materia orgánica y carbono orgánico, elevada relación C/N por el bajo contenido en N que suelen

presentar, bajo contenido en fósforo y medio en potasio. El papel de esta biomasa residual en los procesos de compostaje es como estructurante y fuente de carbono.

Tabla 1.12. Producción de residuos en cultivos intensivos del sur peninsular.

Cultivo	Biomasa residual (t/ha)
Berenjena	27
Calabacín	20
Col china	43
Judía	23
Melón	33
Pepino	24
Pimiento	28
Sandía	24
Tomate	49

Tabla 1.13. Composición de diferentes residuos agrícolas.

	Sarmiento vid ¹	Poda granado ²	Poda olivo ³	Poda naranjo ⁴	Poda caqui ⁴	Restos girasol ³	Paja arroz ⁴	Paja trigo ⁵
Densidad (kg/l)	0,140	0,190	-	0,133	0,239	-	0,025	-
Humedad (%)	9,52	10,5	5,9	19,6	20,5	7,9	25,1	12,9
pH	7,10	5,6	5,5	7,10	7,2	5,9	7,4	-
CE (dS/m)	1,27	2,47	1,33	2,38	1,69	10,2	2,75	-
MOT (%)	92,9	92,8	90,4	88,7	89,4	80,2	84,2	88,6
C _{OT} (%)	58,2	48,3	47,8	45,9	46,3	38,9	40,9	51,2
N _T (%)	1,04	0,50	0,76	1,10	0,9	1,60	1,1	0,47
Relación C _{OT} /N _T	56,0	96,4	62,9	40,1	52,1	24,3	35,6	109
P (g kg ⁻¹)	0,70	1,50	-	0,89	1,37	-	0,94	0,47
K (g kg ⁻¹)	3,47	6,35	-	7,48	5,27	-	6,73	0,42
Na (g kg ⁻¹)	1,44	1,60	-	1,87	1,47	-	1,99	0,98
PolH (mg kg ⁻¹)	2.533	8.759	-	7.053	1.768	-	2.955	-

DA: densidad aparente; CE; conductividad eléctrica; MOT: materia orgánica total; COT: carbono orgánico total; PolH: polifenoles hidrosolubles. ¹Pérez-Murcia y col. (2018); ²Sanchez-García y col. (2018); ³Bernal y col. (2018); ⁴Pérez-Murcia y col. (2020).

Los **residuos forestales** se presentan en forma de arbustos, ramas, cortezas o serrín como consecuencia de los trabajos de cuidado de los montes. Los restos forestales están compuestos fundamentalmente por materiales leñosos y de lenta mineralización. Son obtenidos por procesos de poda y clareo, como a través de otras labores que se practican en silvicultura.

También en el proceso de elaboración de artículos de madera se obtienen como subproductos, aproximadamente el 50% (Ria y col., 2019). Considerando esta relación y la producción mundial de madera, los desechos forestales de madera dura (árboles de hoja caduca, roble, arce, nogal y abedul) y blanda (árboles de hoja perenne, pino, abeto y enebro) serían de aproximadamente 58 y 166 millones de m³, respectivamente. Los desechos de madera generados a partir de procesos de fabricación primarios incluyen corteza, losas, aserrín, astillas, residuos gruesos, virutas de cepillado, núcleos de troncos peladores y recortes de extremos. Los desechos de madera generados por procesos de fabricación secundarios incluyen astillas, aserrín, polvo de lijadora, recortes de extremos, paletas usadas o desechadas, residuos gruesos y virutas de cepillado (Ria y col., 2019). La corteza comprende del 8% al 12% del porcentaje total en las maderas; del 11% al 15% del aserrín y del 30% al 40% de los residuos pulverizables (losas o cantos) (Ria y col., 2019). La madera se compone de sustancias estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina) y sustancias no estructurales (compuestos orgánicos solubles e inorgánicos). Las sustancias estructurales constituyen la mayor parte de la composición de la madera. Generalmente, la madera contiene celulosa entre el 40%-45%, hemicelulosa entre 20-30% y lignina entre 20-32%, aunque esto puede variar dependiendo de cada parte del árbol (Ria y col., 2019). La biomasa residual forestal suele tener un bajo contenido en nutrientes y un alto contenido en materia orgánica, en ellos, destaca su capacidad estructurante y absorbente lo que los hace buenos candidatos para los procesos de compostaje junto con otros materiales más húmedos y con una baja relación C/N como lodos o purines. También pueden transformarse en serrín, pudiéndose emplear como sustrato de cultivo, con poca intervención en la nutrición de la planta, pero con una alta capacidad de retención hídrica. Este tipo de material también suele utilizarse en jardinería como acolchado superior de plantas ornamentales para evitar pérdidas de agua en jardines. En la tabla 1.14 se presentan algunos ejemplos de composición de subproductos de la madera.

Tabla 1.14. Composición del serrín y de las astillas de madera (Nolan y col., 2011).

Parámetro	Serrín	Astillas de madera
pH	4,9 ± 0,09	6,0 ± 0,19
Materia seca (%)	84,2 ± 3,0	89,6 ± 2,4
Nitrógeno (%*)	0,1 ± 0,01	0,8 ± 0,004
Carbono (%*)	48,8 ± 0,2	47,2 ± 0,08
C/N	466,5 ± 58,6	513,4 ± 24,1
Densidad aparente (kg·m⁻³)	40,2 ± 1,6	45,2 ± 4,3
Cenizas (%*)	0,3 ± 0,02	0,3 ± 0,04

*: peso seco.

Residuos orgánicos de origen urbano

La principal característica de los residuos urbanos es su heterogeneidad y su cada vez mayor volumen de producción. Este tipo de residuos suelen incluir tanto los residuos municipales (también llamados residuos sólidos urbanos), así como los lodos de depuradora, mayoritariamente procedentes de aguas residuales urbanas.

Los **residuos sólidos urbanos (RSU)** se clasifican en fermentables (restos alimenticios de origen domiciliario y restaurantes susceptibles de ser sometidos a compostaje), combustibles (restos de papel, cartón, madera, plásticos, materiales susceptibles de ser sometidos a incineración) e inertes (vidrios, metales, escorias, ...). La generación de estos residuos está claramente vinculada a aspectos sociológicos, culturales y económicos, siendo un reflejo de la realidad social de los países, las ciudades y la ciudadanía. La composición de los RSU está íntimamente relacionada con el poder adquisitivo. Cuanto más desarrollado sea un país, mayor es la tendencia a consumir los bienes elaborados, reduciendo la fracción orgánica e incrementando las fracciones complementarias de vidrio, papel, cartón y plásticos. La producción de residuos sólidos urbanos depende de varios factores como el nivel de vida, la zona de la población (tanto rural como urbana), industrias presentes, clima, estación del año, etc. La cantidad de residuos urbanos generados en el año 2017 en España se muestra tabla 1.15.

Tabla 1.15. Cantidad de residuos urbanos generada en España en el año 2017.

Código LER - RESIDUO	Subsector	Generación (t/año)
20 03 01	Mezclas de residuos municipales ¹	17.646.563
20 01 08	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes ¹	736.377
20 02 01	Residuos biodegradables de parques y jardines ¹	273.640
19 08 05	Lodos de depuración ²	1.082.669

¹Memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal. 2018. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. ²Plan Estatal Marco de Residuos (PEMAR 2016-2022).

Concretamente, la **fracción orgánica (FO) biodegradable** de los residuos sólidos generados en el entorno urbano incluye:

- ✓ **Residuos orgánicos de origen alimentario y de cocina:** restos de la preparación de la comida o manipulación y elaboración de los productos alimentarios, restos sobrantes

de comida, alimentos en mal estado y excedentes alimentarios que no se han comercializado o consumido (separados de su envase o embalaje). Por su naturaleza y origen, no es una fracción uniforme y está ligada a los cambios estacionales y hábitos alimentarios. Es el residuo de competencia municipal más inestable, debido a su elevado contenido en agua y en materia orgánica, lo cual lo hace más fácil de degradar por los microorganismos, generando lixiviados y malos olores durante su gestión. Presenta una densidad bastante elevada y variable, entre 0,6-0,8 t/m³, lo que le confiere una baja compactabilidad.

- ✓ **Residuos vegetales:** procedentes de las zonas verdes y de vegetación privadas y públicas, formada por restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso procedentes de jardinería y poda (pequeñas ramas, poda, malas hierbas, césped, hojarasca, etc.). Esta fracción vegetal, considerada como similar a la FORS, puede gestionarse también “in situ” o de forma independiente a los restos de comida, según la configuración de los servicios de recogida y los niveles de generación.
- ✓ **Podas:** formada por restos vegetales de jardinería y poda de mayor tamaño y de tipo leñoso. Por sus características requiere una gestión específica por cuestiones relacionadas con logística de recogida, el tratamiento y la temporalidad de generación (frecuencia y periodo).

La **fracción orgánica (FO) biodegradable** de los residuos urbanos presenta unas características especiales que condicionan su separación en origen, su recogida y su posterior tratamiento. En la tabla 1.16 se muestran algunos ejemplos de composición de estos residuos, que se caracterizan por su alto contenido orgánico.

La FORS respecto a la biomasa residual vegetal tiene mayor humedad y densidad, su contenido en N es mas alto lo que determina su menor relación C/N, y también, su contenido en fósforo es mayor. Estos residuos suelen tener carácter ácido y salinidad alta en el caso de la FORS y variable en los restos vegetales dependiendo de la especie.

Tabla 1.16. Composición de residuos urbanos.

Parámetro	FORSP ¹	Poda jardinería urbana ¹	Hojas de palmera ²
Humedad (%)	68,2	28,0	35,1
Densidad aparente (kg L ⁻¹)	0,409	0,103	-
pH	5,6	5,1	6,8
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	5,17	0,87	7,3
Materia orgánica total (%)	80,1	96,4	91,4
Nitrógeno total (%)	2,5	0,85	2,0
Carbono total (%)	45,4	51,6	44,1
Relación C _T /N _T	18,3	61,5	24,2
P (g kg ⁻¹)	12,4	0,73	1,7
K (g kg ⁻¹)	10,4	9,0	19,9
Na (g kg ⁻¹)	9,9	0,51	4,8
Polifenoles hidrosolubles (mg kg ⁻¹)	4175	2563	-

¹Fernández-Suárez y col. (2018); ²Vico y col. (2018). FORSP: fracción orgánica de residuos sólidos recogida puerta a puerta.

Por su parte, los **lodos de depuradora** son una mezcla de sólidos y agua que resultan de aplicar una serie de tratamientos a las aguas residuales urbanas generadas en hogares, restaurantes, comercios y oficinas y a las aguas de composición similar, principalmente las procedentes de la industria agroalimentaria, con la finalidad de eliminar materia orgánica sedimentable y no sedimentable tanto de origen orgánico como inorgánico. Su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual a tratar, de la tecnología y proceso de depuración empleado, del tratamiento al que es sometido el lodo, de la época del año, etc. En general, los lodos de depuradora presentan una humedad elevada (75-80%) que depende del tratamiento a que se someta y un pH próximo a la neutralidad (pH=7). Su salinidad adquiere mayor importancia cuando han sido tratados con productos floculantes como tricloruro de hierro, cloruro de calcio, etc., ya que podrían presentarse problemas de toxicidad en cultivos sensibles a los cloruros. El valor medio de CE es de 2,3 dS/m con un amplio rango de variación (1-9 dS/m) por lo que es un parámetro que controlar para el cálculo de la dosis a aplicar. Su contenido en nitrógeno y fósforo, les confiere un importante valor fertilizante. En el lodo pueden encontrarse valores medios de N del 5%, de P₂O₅ del 2% y de K₂O del 0,5%. Además, constituyen una fuente importante de otros elementos esenciales para las plantas como calcio, magnesio, potasio y micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, zinc y boro). La mayoría de los lodos presentan contenidos en materia orgánica superiores al 50%. Los lodos contienen metales pesados que constituyen la principal limitación de sus aplicaciones agrícolas debido a los riesgos

de toxicidad que implican para plantas, personas y animales. La concentración de metales pesados presentes en los lodos de depuradora en los últimos años ha disminuido de manera importante. Esto se debe fundamentalmente a un mayor control del vertido de aguas residuales industriales a la red de saneamiento. En los lodos podemos encontrar un elevado contenido de microorganismos, algunos de los cuales son potencialmente patógenos. Su origen está asociado a las excretas humanas donde el contenido de microorganismos puede estar próximo al 55 % del peso seco total de la fracción sólida de estas. Los procesos de estabilización y compostaje de los lodos de depuradora reducen en gran número la cantidad de microorganismos, incluyendo bacterias patógenas (por ejemplo, *Salmonella*, *Shigella* y *Campylobacter*), parásitos, protozoos y virus, aunque no es seguro que se eliminen de forma completa (Chen y col., 2011). En la tabla 1.17 se presenta la composición media de los lodos de depuradora del sureste español.

Tabla 1.17. Composición media de los lodos de depuradora del sureste español, (Pérez-Murcia y Moreno-Caselles, 2008).

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

CE: Conductividad eléctrica.

Residuos orgánicos de industrias agroalimentarias de origen vegetal

La industria agroalimentaria genera residuos vegetales y residuos líquidos procedentes del procesado de frutas y verduras, además de lodos y aguas residuales procedentes de la transformación y procesado de los alimentos. Este tipo de industria transforma, conserva, manipula o prepara materias primas agrarias para obtener productos agrarios finales o intermedios que resulten aptos para la alimentación o para ser utilizados en otros procesos industriales. La industria agroalimentaria es primordial y uno de los sectores más grandes en Europa, abarca un gran número de actividades y genera gran cantidad de residuos que pueden suponer un grave problema medioambiental. Los vertidos presentan una gran heterogeneidad (volumen y composición) por la variedad de materias primas utilizadas, los procesos empleados, las instalaciones y la tecnología disponible y la estación del año. En la tabla 1.18 se muestra la composición de diversos residuos agroalimentarios que se generan durante los destríos o como consecuencia de los procesos de transformación de la materia prima y en la tabla 1.19 se muestra la composición de los lodos de la industria agroalimentaria. Los residuos agroalimentarios tienen una humedad y densidad muy variable dependiendo del tipo de producto originario, el pH en general suele ser ácido en la mayoría de productos y la salinidad elevada. Su contenido orgánico es bastante elevado y suelen contener un buen contenido nutriente (NPK).

Tabla 1.18. Composición de diversos residuos agroalimentarios.

Parámetros	Tallo ajo	Hoja aguacate	Pimiento	Tomate	Puerro
Densidad (kg/l)	0,07	0,13	0,88	1,02	0,64
Humedad (%)	18,9	24,9	88,5	92,1	91,3
pH	5,56	6,09	5,22	5,56	9,72
Conductividad eléctrica (dS/m)	5,18	6,16	6,77	11,3	12,7
Materia org. total, MOT (%)	87,6	91,9	82,1	74,8	71,0
Carbono org. total, C _{OT} (%)	31,2	65,4	67,1	55,8	50,8
Nitrógeno total, N _T (%)	2,17	2,57	3,61	3,64	2,81
Relación C _{OT} /N _T	14,4	25,4	18,6	15,3	18,1
P (g kg ⁻¹)	1,15	2,51	3,30	5,35	4,38
K (g kg ⁻¹)	21,5	12,0	35,3	31,4	54,4
Na (g kg ⁻¹)	3,22	1,56	3,73	5,81	0,30
Polifenoles hidrosol. (mg kg ⁻¹)	1548	2829	3401	1689	1400

Pérez-Murcia y col. (2018).

Los lodos EDARI se caracterizan por su elevada humedad, pH y salinidad variables, materia orgánica alta (50-80%) y alto contenido en nitrógeno lo que determina una relación C/N baja. A nivel de compostaje se suele usar como fuente de nitrógeno.

Tabla 1.19. Características de diversos lodos de la industria agroalimentaria.

Parámetros	Lodo EDARI ¹ Procesado pimiento	Lodo EDARI Procesado alcachofa/ pimiento ²	Lodo EDARI Procesado pera ¹
Humedad (%)	86,3	-	91,8
pH	5,6	7,6	7,2
Conductividad eléctrica (dS/m)	5,5	15,1	5,1
Materia org. total, MOT (%)	81,5	53,4	52,4
Carbono org. total, C_{OT} (%)	50,5	-	34,5
Nitrógeno total, N_T (%)	6,7	3,82	3,3
Relación C_{OT}/N_T	7,5	7,93	10,4
P (g kg⁻¹)	17,4	8,6	5,9
K (g kg⁻¹)	13,3	2,4	5,7
Na (g kg⁻¹)	8,2	-	14,6

¹Pérez-Murcia y col. (2016); ²Morales y col. (2016). EDARI: estación depuradora de aguas de la industria agroalimentaria.

1.2.2 La gestión de residuos orgánicos en el entorno de economía circular

Según la Directiva de residuos de la UE, 2008/98/CE (última modificación 30 de mayo de 2018), “residuo” es cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse. Pero si atendemos al concepto de desarrollo sostenible, muchos residuos se pueden considerar como un recurso útil en la producción de nuevos productos, de esta forma se reduce el uso de materias primas en los procesos de fabricación y el impacto ambiental causado por la acumulación de residuos (Ria y col., 2019).

Hoy en día somos testigos de la sobreexplotación de los recursos finitos que ha llevado a comprometer seriamente su disponibilidad para el desarrollo de actividades. Este hecho ha generado impactos negativos que han afectado a la sociedad y al medio ambiente. El clásico sistema lineal de producción que se está llevando a cabo todos estos años basado en *producir, consumir, utilizar y tirar* no es sostenible. Es un sistema agresivo con el medio que acabará agotando las fuentes materiales y energéticas, es un modelo que está quedando obsoleto. El

aumento del consumo, una mayor demanda energética y unas emisiones contaminantes crecientes, piden un cambio hacia un sistema mejorado, que evite la generación de tantos residuos y reduzca los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana.

Ahora el modelo económico debe dirigirse hacia una economía sostenible, donde los materiales se procesen y los residuos se *recuperen, rehabiliten, reparen, reutilicen y reciclen*. El concepto de economía circular aparece en los últimos años y surge como una forma de lograr esa sostenibilidad. La dependencia de las materias primas genera incertidumbre en el suministro, eleva los precios de las mismas y su volatilidad, reduciendo de forma significativa el capital natural, con las consiguientes pérdidas económicas (Swagemakers y col., 2017).

La aplicación efectiva del **principio de jerarquía en la gestión de residuos** (Directiva 2008/98/CE Marco de residuos, última modificación 30 de mayo de 2018) es clave para avanzar en la economía circular. Promover la prevención de su generación, fomentar la preparación para la reutilización, fortalecer el reciclado, valorizar energéticamente o de otras formas aquellos residuos que no pueden ser reciclados, así como favorecer su trazabilidad, reduciendo el abandono de residuos en el medio ambiente y su llegada al mar son las claves del principio de jerarquía.

La **economía circular** se define como un sistema regenerativo en el que los residuos, las entradas, las emisiones y las pérdidas de energía son minimizadas mediante un cierre de los bucles de materia y energía (Geissdoerfer y col., 2017). Se propone como respuesta a los desafíos globales como el cambio climático, la sostenibilidad y la conservación de la biodiversidad. Se centra en mantener el valor de los recursos disponibles, tanto materiales como energéticos, tanto tiempo como sea posible en el proceso productivo, reincorporándolos cuando llegan al final de su uso, reduciendo así la generación de residuos y aumentando el aprovechamiento de aquellos cuya generación no se haya podido evitar. Es una corriente de materiales en un ciclo cerrado en el sistema de producción (figura 1.1). Este proceso empieza al principio del ciclo de vida del producto con un diseño del producto que ayude a conservar los recursos y un proceso de producción inteligente que reduzca la generación de residuos, evitando una gestión de residuos ineficaz además de crear nuevas oportunidades de negocio. Para lograr este resultado, los productos deben ser concebidos para que sean reutilizables, reparables, actualizables, con un mayor tiempo de vida útil, y reciclables cuando se convierten en residuos; así los materiales que se emplearon en su fabricación estarán en el ciclo el mayor tiempo posible.



Figura 1.1. Corriente de materiales en un ciclo cerrado en el sistema de producción. Fuente: *Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa*. Comisión Europea (2014).

En el cambio hacia una economía circular tenemos que empezar a pensar en que no existen los residuos, solo los recursos. Los residuos ya no deben ser rechazados sino transformados en recursos que serán usados una y otra vez en los ciclos del producto, aunque esto requiera mayores esfuerzos. Es decir, para eliminar los residuos se les debe dar un mayor valor añadido que el que ya tenían.

En 2015, la Comisión Europea diseñó su **Plan de Acción para la Economía circular en Europa 2015** [COM (2015) 614 final], bajo el lema “**cerrar el círculo**”, donde se establecieron las líneas de actuación básicas y los objetivos para conseguir un desarrollo integral a nivel económico y social en la Unión Europea. Este plan de acción se presentó como una respuesta al reto del desarrollo sostenible y al cambio climático. La transición hacia una economía circular contribuirá a cumplir con los objetivos de la **Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible** y permitirá a la Unión Europea aumentar su sostenibilidad y competitividad, creando un sistema económico capaz de adaptarse a la escasez de recursos materiales y energéticos, e impulsar la innovación empresarial. Entre los objetivos se encuentran reducir las emisiones de carbono, incrementar el uso de las energías renovables y aprovechar los recursos de una forma más eficaz. Para conseguir la integración de la economía circular en la unión europea se requiere de la colaboración y el compromiso gubernamental a escala nacional, regional y local, ya que pequeños cambios pueden contribuir a conseguir los retos globales actuales.

Dicho Plan incluía un total de 54 medidas, que a la finalización del Plan se habían llevado a cabo en su totalidad y que afectaban, por una parte, a las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos (diseño y producción, consumo, gestión de residuos y aprovechamiento de los

recursos contenidos en los residuos mediante su reintroducción en la economía) y, por otra, a cinco áreas que la Comisión consideró prioritarias (los plásticos, el desperdicio alimentario, las materias primas críticas, la construcción y la demolición y la biomasa y productos con base biológica).

En cuanto a las acciones realizadas por la Comisión bajo dicho plan y relacionadas con la **gestión de residuos orgánicos** destacan:

- **Propuesta legislativa sobre los fertilizantes.** El 17 de marzo de 2016, la Comisión propuso un Reglamento para la creación de un mercado único de fertilizantes elaborados a partir de materias primas secundarias recuperadas (en particular, nutrientes reciclados), convirtiendo así los problemas de gestión de residuos en oportunidades económicas para las empresas innovadoras, reduciendo al mismo tiempo el volumen de residuos, el consumo de energía y los daños al medio ambiente. En dicho documento se indica que hoy en día solo el 5 % de los biorresiduos se reciclan y que, si se reciclasen más biorresiduos, podrían sustituir hasta el 30 % de los abonos inorgánicos. Cada año, la UE importa alrededor de 6 millones de toneladas de fosfatos, cuando podría sustituir hasta el 30 % de este total por su extracción a partir de lodos de depuración, residuos biodegradables, harina de carne y huesos o estiércol. Con estas normas se puede conseguir que el sector de los fertilizantes no requiera tanto de las importaciones de materias primas más críticas. Esta propuesta de la Comisión se materializó en 2019 en el **Reglamento (UE) 2019/1009 de 5 de junio 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. Este Reglamento ayudará a convertir problemas en oportunidades para los agricultores y las empresas. El Reglamento establece normas para la libre circulación de todos los productos fertilizantes con el mercado CE en toda la UE, en particular para los productos fertilizantes orgánicos. El Reglamento armoniza las normas de la UE para los productos derivados de los residuos orgánicos y los subproductos, y establece normas para el reciclaje de nutrientes en materias primas secundarias. En él se definen los requisitos de seguridad, calidad y etiquetado que deben cumplir todos los productos fertilizantes para ser objeto de libre comercio en toda la UE. Los productores tendrán que demostrar que sus productos cumplen dichos requisitos y se ajustan a los límites de contaminantes orgánicos, contaminantes microbianos e impurezas físicas antes de colocarles el mercado CE. La nueva normativa se aplicará a

todos los tipos de abonos a fin de garantizar el máximo nivel de protección del suelo. El Reglamento fija límites estrictos para el cadmio en los abonos fosfatados. Los límites se harán más rigurosos, pasando de 60 mg/kg a 40 mg/kg después de tres años y a 20 mg/kg al cabo de doce años, reduciéndose así los riesgos para la salud y el medio ambiente. Cuando los residuos orgánicos cumplen las estrictas normas de recuperación, pueden convertirse en un componente de los productos fertilizantes con marcado CE con libre acceso al mercado único. Por lo que respecta a los fertilizantes sin marcado CE, los Estados miembros de la UE podrán seguir comercializando esos productos en sus mercados nacionales con arreglo a sus normas nacionales.

- **Transformación de residuos en energía.** El 25 enero de 2017 la Comisión realizó una Comunicación sobre los procesos de transformación de residuos en energía y su papel en la economía circular, respetando firmemente la jerarquía de residuos de la UE. La Comunicación examina también cómo puede optimizarse la función de los procesos de transformación de residuos en energía para participar en la consecución de los objetivos fijados en la Estrategia de la Unión de la Energía y en el Acuerdo de París.
- **Biomasa y bioproductos (30/11/2016):** la Comisión adoptó una serie de criterios de sostenibilidad para todos los usos bioenergéticos, con el fin de limitar la presión sobre los limitados recursos de biomasa, y propuso que solo la conversión eficiente de biomasa en electricidad debe recibir apoyo público. Esto facilitará las sinergias con la economía circular en los usos de la biomasa, en particular la madera, que puede utilizarse para una serie de productos, así como para la energía. En la **DIRECTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables** se fija un objetivo vinculante para la Unión en relación con la cuota general de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión en 2030. Establece también normas sobre las ayudas financieras a la electricidad procedente de fuentes renovables, el autoconsumo de dicha electricidad, y el uso de energías renovables en los sectores de calefacción y refrigeración y del transporte, la cooperación regional entre Estados miembros y entre Estados miembros y terceros países, las garantías de origen, los procedimientos administrativos y la información y la formación. Define criterios de sostenibilidad y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para los biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa.

En 2020, la Comisión planteó un nuevo **Plan de Acción de Economía Circular**, [COM (2020)

98 final] bajo el lema “**por una Europa más limpia y más competitiva**”, para promocionar la prevención de generación de residuos. Para ello, introduce medidas encaminadas a potenciar la durabilidad y reutilización, combatir la obsolescencia o promocionar la remanufactura, entre otras. También incrementa los esfuerzos para empoderar a los consumidores o robustecer el mercado de materias primas secundarias. El Plan fija el foco de atención en aquellos sectores con mayor repercusión ambiental como el textil, la construcción, la electrónica, vehículos y baterías y alimentación, junto con materiales de alto impacto de uso tales como el acero, cemento y productos químicos, con especial atención a microplásticos y plásticos en materiales de la construcción y automoción.

Con relación a los residuos orgánicos, se prevé el desarrollo de un **plan integrado de gestión de nutrientes** con el fin de asegurar una aplicación más sostenible de los nutrientes y de estimular los mercados de los nutrientes recuperados. En este contexto, considerará también la conveniencia de revisar las **directivas sobre el tratamiento de las aguas residuales y los lodos de depuradora**, y examinará **medios naturales de eliminación de nutrientes, como las algas**.

En España, el 2 de junio del 2020, el Consejo de Ministros aprobó la **Estrategia Española de Economía Circular 2030** (EEEC). Los ejes de actuación sobre los que se focalizarán las políticas e instrumentos de la Estrategia de Economía Circular y sus correspondientes planes de actuación son: producción, consumo, gestión de residuos, materias primas secundarias y reutilización y depuración del agua. Los objetivos cuantitativos que se pretenden alcanzar para el año 2030 son:

- ✓ Reducir en un 30% el consumo nacional de materiales en relación con el PIB, tomando como año de referencia el 2010.
- ✓ Reducir la generación de residuos un 15% respecto de lo generado en 2010.
- ✓ Reducir la generación residuos de alimentos en toda cadena alimentaria: 50% de reducción per cápita a nivel de hogar y consumo minorista y un 20% en las cadenas de producción y suministro a partir del año 2020.
- ✓ Incrementar la reutilización y preparación para la reutilización hasta llegar al 10% de los residuos municipales generados.
- ✓ Mejorar un 10% la eficiencia en el uso del agua.

- ✓ Reducir la emisión de gases de efecto invernadero por debajo de los 10 millones de toneladas de CO2 equivalente.

La EEEC identifica seis sectores prioritarios de actividad en los que incorporar este reto para una España circular: sector de la construcción, agroalimentario, pesquero y forestal, industrial, bienes de consumo, turismo y textil y confección.

El **I Plan de acción de economía circular 2021-2023 (PAEC)** pretende desarrollar un marco normativo avanzado que revise en profundidad el régimen jurídico básico de la gestión de residuos en España, y que introduzca medidas normativas concretas para flujos de residuos clave. Para ello, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) ha realizado una revisión en profundidad de la normativa en materia de residuos. La **nueva Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular** (BOE, 2022) contiene medidas clave para modernizar la gestión de residuos en España y orientarla hacia un modelo de Economía Circular.

Respecto a la **gestión de residuos orgánicos**, también se prevé la revisión del Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre (BOE, 1990), por el que se regula la **utilización de lodos de depuración en el sector agrario**. En la revisión y modificación de esta normativa se considera necesario incluir requisitos relativos a la higienización y a la estabilización de los lodos, así como otros requisitos necesarios para asegurar la protección de la salud humana y del medio ambiente, y en particular de los posibles recursos naturales afectados teniendo en cuenta las nuevas tecnologías disponibles. Igualmente, para una mayor clarificación de la normativa, es necesario avanzar en la identificación de los lodos de depuración similares a los procedentes de aguas residuales urbanas.

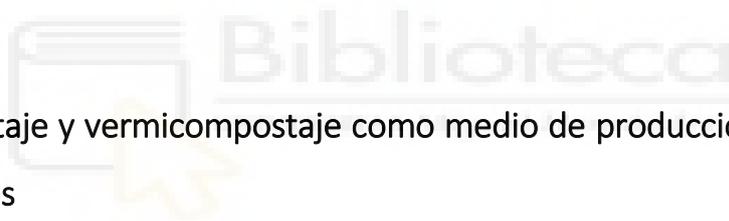
Para facilitar y promover el aporte a los suelos de enmiendas orgánicas de calidad procedentes de biorresiduos, el MITERD pretende elaborar **normativa específica en materia de biorresiduos y otros residuos orgánicos**. De este modo, se definirán los criterios de fin de la condición de residuo para el compost y el digerido, se establecerán unos criterios comunes para la autorización de la operación de valorización de residuos R10 (tratamiento de los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos) y se regulará el compostaje doméstico y comunitario de los biorresiduos. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) será coproponente en lo relativo a la valorización de residuos en suelos agrarios como enmiendas o fertilizantes.

Para alcanzar una economía climáticamente neutra es necesario el esfuerzo de todos los

sectores, por lo que también se desarrollará un paquete de medidas para la **mitigación del cambio climático en el sector de los residuos** encaminadas, fundamentalmente, a la adecuada gestión, especialmente de la fracción orgánica. En este sentido y alineados con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), para contribuir al objetivo europeo con una reducción del 23 % de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en 2030 con respecto a los niveles de 1990, el sector residuos, considerado como sector difuso no energético no sujeto al comercio de emisiones, debe reducir los GEI en un 28 % respecto a los niveles de 2005. El potencial de generación de biomasa residual en los sectores agrícola, forestal, municipal e industrial es enorme, la minimización en la generación y su conversión en un recurso a través de la variedad de procesos de tratamiento y aprovechamiento disponibles (compostaje, digestión anaerobia, pirólisis, gasificación, etc) con los que podemos obtener biofertilizante, bioenergía, bioquímicos, etc, siempre respetando la Jerarquía de Residuos, encajan en el modelo de economía circular. La necesidad de reciclar y reutilizar los residuos para completar su ciclo lleva implícitos unos costes, que en el caso del compostaje serían menores. Los compost obtenidos tras el tratamiento adecuado de residuos orgánicos mediante compostaje suponen beneficios ambientales como: residuo cero, incrementar la fijación de carbono orgánico, minimizar la emisión de gases, disminuir el uso de fertilizantes, mejorar la calidad del suelo y rendimiento y la calidad de los cultivos (Ghisellini y col., 2016, Boluda y col., 2018). La adición de materia orgánica al suelo está considerada como una de las acciones con mayores repercusiones positivas en la lucha contra el cambio climático y es esencial en un modelo de agricultura sostenible con la finalidad de dar solución la disminución de la fertilidad de los suelos, a los efectos de su degradación y contaminación por una mala praxis agrícola debido a un empleo excesivo de agroquímicos y productos fitosanitarios y otros problemas. En diversos artículos científicos (Veaa y col., 2018; Bocken, y col., 2017; Rigueiro-Rodríguez y col., 2018; Swagemakers y col., 2017; Gu y col., 2019) se concluye que la gestión sostenible del suelo, mediante el uso de prácticas agronómicas que incluyen el uso de enmiendas orgánicas, laboreo mínimo y el aprovechamiento de los residuos, entre otras, podría aumentar la producción de alimentos sin perjudicar los recursos hídricos ni el sistema edáfico. Estas prácticas también pueden ofrecer beneficios en forma de emisiones reducidas de gases de efecto invernadero, menor uso de fertilizantes y mayor almacenamiento de carbono en suelos (Vico y col., 2018). El manejo adecuado de residuos sólidos orgánicos mediante compostaje y el empleo del compost obtenido permiten lograr objetivos como: residuo cero, minimizar la emisión de gases, disminuir el uso de fertilizantes, incrementar la fijación de carbono orgánico y mejorar la calidad del suelo, así como el rendimiento y la calidad de productos vegetales (Guisellini y col., 2016).

La mayoría de los residuos orgánicos pueden reciclarse mediante:

- ✓ Uso directo en agricultura como enmiendas o abonos.
- ✓ Compostaje y/o vermicompostaje y uso del compost o vermicompost obtenido en el sector agrícola como ingrediente de sustrato o como enmendante de suelos, viveros, jardinería, y mejora y recuperación de suelos.
- ✓ Acolchado o mulching como capa protectora del suelo con multitud de beneficios: inhibe el crecimiento de hierbas no deseadas, aporta materia orgánica al suelo, retiene humedad reduciendo la cantidad de agua necesaria para los riegos, protege a las raíces de cambios bruscos de temperatura y protege el suelo de la erosión. Se puede elaborar con virutas de madera, serrín, agujas de pino y cortezas de hasta 10 cm de alto y puede durar hasta 3 años o bien con paja o heno hasta 15 cm que dura como máximo un año.
- ✓ La conversión en bioproductos (materiales, químicos, complementos alimentarios, piensos) además de biocombustibles (pélets, astillas, biocarburantes) y bioenergía (energía eléctrica, energía térmica).



1.3 Compostaje y vermicompostaje como medio de producción de sustratos orgánicos

Se ha comprobado que el reciclaje de residuos orgánicos es una alternativa apropiada para el manejo de residuos sólidos, sin embargo, la aplicación al suelo de restos orgánicos requiere de un tratamiento adecuado previo. Desde hace muchos años los agricultores han seguido una práctica consistente en apilar estiércol junto con restos de podas y cosechas, manteniendo la pila a resguardo y volteándola, obteniendo un producto que empleaban como abono en sus terrenos. Esta práctica ha sido transmitida de generación en generación, enriqueciéndose con la experiencia hasta llegar a nuestros días.

Este proceso reduce el volumen y la masa de los residuos aproximadamente al 50%, obteniéndose un producto estable y beneficioso para la agricultura, ya que se recupera la materia orgánica y se aprovechan los nutrientes contenidos en dichos materiales (Dell'Abate y col., 2000; Provenzano y col., 2001). El compostaje es respetuoso con el medio ambiente y sostenible, lo que lo convierte en una alternativa muy atractiva y cada vez más extendida. Las ventajas del compostaje no quedan simplemente en una reducción de volumen de residuos y

reducción de los problemas causados por los vertederos, sino que suponen una nueva vida para los residuos, convirtiéndolos en un recurso, un material valioso que puede utilizarse como sustrato para el cultivo sin suelo.

El objetivo del proceso de compostaje es desintoxicar y estabilizar los residuos orgánicos, eliminar elementos que puedan ser dañinos y conferirle mejores propiedades para su uso en el cultivo de plantas. El compost producido es un producto fácil de manejar, de baja densidad relativa y alta porosidad que tiene un alto valor agronómico y puede ser adecuado como enmienda, para suelos con bajo contenido en materia orgánica (Bertrán y col., 2004). Y ese valor agronómico del compost se puede evaluar en base a la producción del cultivo y a la mejora de las propiedades del suelo. Tampoco debemos olvidar que el reciclaje a través del compostaje o vermicompostaje de restos orgánicos, no sólo puede reducir problemas ambientales, sino que puede disminuir el coste de la eliminación de estos residuos.

1.3.1 Definición y características del proceso de compostaje

El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado en el que intervienen un nutrido y variado número de microorganismos que degrada la materia orgánica y que requiere de sustratos orgánicos heterogéneos y una humedad adecuada. Este proceso debe ser aeróbico para evitar la formación de compuestos fitotóxicos. Además, debe pasar por unas temperaturas elevadas, condiciones termofílicas, para desinfectar, eliminar patógenos y semillas de malas hierbas. El producto que se obtiene es el compost (además de dióxido de carbono, agua y minerales) y contiene materia orgánica estabilizada, por lo que puede ser utilizado como fuente de nutrientes y acondicionador del suelo.

Podemos definir el compostaje como un proceso de descomposición biológica aerobia de la materia orgánica mediante las actividades metabólicas combinadas de una amplia gama de microorganismos, en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, con una posterior estabilización y maduración del producto (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1991). Podríamos dividir el proceso en cuatro etapas desde el punto de vista térmico (figura 1.2):

- La fase inicial o fase mesofílica, en la que el material a compostar está a temperatura ambiente. En el se identifican bacterias y hongos mesófilos, que descomponen fuentes

de carbono solubles y fácilmente degradables, provocando un aumento de la temperatura.

- La fase termofílica, que empieza cuando la temperatura supera los 40 °C, en esta fase los actinomicetos, hongos y bacterias termofílicas serán los encargados de degradar la materia orgánica como proteínas, carbohidratos, lípidos, hemicelulosa, etc., en moléculas más sencillas. En esta etapa también se destruyen los componentes fitotóxicos (amoníaco, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos hidrosolubles, etc).
- La fase de enfriamiento, donde se produce una disminución de la temperatura y también de la velocidad de descomposición, se degradan los compuestos más resistentes, como la celulosa, hemicelulosa y lignina, que se transforman parcialmente en humus (Dell' Abate y col., 2000; Provenzano y col., 2001).
- La fase final o de maduración, donde tiene lugar la estabilización y una cierta mineralización de la materia orgánica, generándose un producto final altamente humificado.

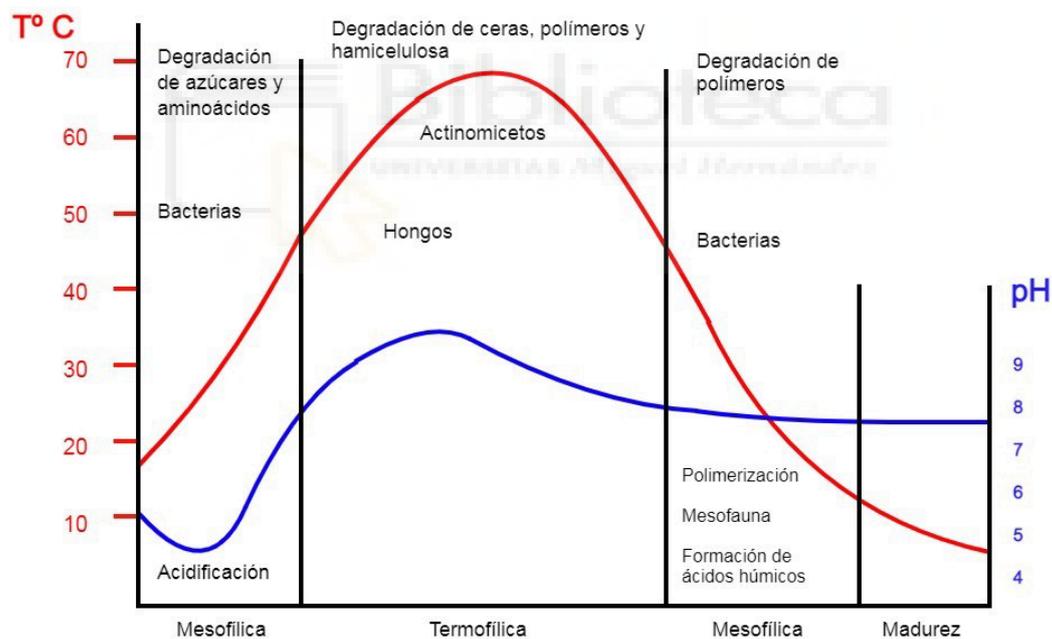


Figura 1.2. Evolución de la temperatura y el pH durante el proceso de maduración. (Laos, 2003; Mustin y col., 1987).

Durante la evolución del proceso de compostaje, la transformación de la materia orgánica mediante procesos microbianos da lugar a la formación de sustancias húmicas. La cantidad de carbono que no se pierde como dióxido de carbono, se incorporará a la fracción húmica final,

como ocurre también con otros elementos importantes, como nitrógeno, fósforo, azufre y elementos traza.

Las tres primeras etapas componen la fase bio-oxidativa del proceso de compostaje, donde tienen lugar simultáneamente dos transformaciones de la materia: la descomposición y la estabilización, primero con reacciones enzimáticas degradativas de las moléculas orgánicas (sobre todo en condiciones termófilas) para finalizar alcanzando una fase de maduración, con reacciones de condensación y polimerización similares al proceso de humificación que tienen lugar en el medio natural, formándose un producto final llamado compost.

El proceso de compostaje consta de cuatro fases, y la duración de éstas, depende de la naturaleza de la materia orgánica que se composte y de la eficiencia del proceso, que está determinado por el grado de agitación y aireación (Tuomela y col., 2000). La diversidad microbiana observada durante todo el proceso de compostaje es función de la temperatura en las distintas etapas del mismo.

1.3.2 Principales factores que influyen en el proceso de compostaje

Prácticamente todos los residuos orgánicos se pueden compostar y aunque parezca una práctica simple, en realidad conlleva un proceso complejo donde intervienen multitud de factores para obtener un producto estable y beneficioso para suelos y cultivo.

Los principales **factores** que influyen en el proceso de compostaje pueden dividirse en dos grupos:

- Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato, que incluye tamaño de partícula, conductividad eléctrica, relación C/N y C/P, nutrientes y materia orgánica, que deben ser adecuados a sus valores óptimos al inicio del proceso (Madejón y col., 2001).
- Parámetros de seguimiento, que incluye aireación, espacio de aire libre, temperatura, humedad y pH (Bueno-Márquez y col., 2008), que deben controlarse para que sus valores se adecuen a los intervalos estimados correctos para cada fase del proceso.

Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato

- ❖ **Tamaño de partícula.** Determina la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa. A mayor superficie expuesta mayor aireación, facilitándose el ataque de los

microorganismos y aumentando así la velocidad del proceso. Pero si se reduce en exceso el espacio entre partículas, se ocasiona un aumento de las fuerzas de fricción (Haug, 1993), obstaculizando la difusión de dióxido de carbono hacia el exterior y de oxígeno hacia el interior, lo cual puede ocasionar en un colapso microbiano. El tamaño óptimo de partícula se sitúa entre 1 y 5 cm (Biddlestone y Gray, 1991).

- ❖ **Porosidad del sustrato.** Determina la relación agua/aire, elementos indispensables para la actividad microbiológica, cuando la proporción es menor del nivel crítico, el metabolismo microbiano y la respiración disminuyen y se paralizan (Costa y col., 1991). La presencia de agua entre los poros del material es necesaria para completar las necesidades fisiológicas de los microorganismos, que emplean el agua como medio de transporte de los productos de deshecho de la reacción y de las sustancias que sirven de alimento a las células (Hoitink y col., 1995). En el caso de sustratos poco porosos, como lodos, purines, etc., es conveniente mezclarlos con otros materiales que confieran estructura apropiada para la aireación y la capacidad de retención hídrica (Costa y col., 1991).
- ❖ **Conductividad eléctrica (CE).** Indica la concentración de sales de un material. Durante el proceso de compostaje la CE generalmente aumenta por la mineralización de la materia orgánica, produciéndose una concentración de nutrientes. Sin embargo puede ocurrir que debido a fenómenos de lixiviación de la masa la CE descienda durante el proceso.
- ❖ **Relación C/N.** Influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por una de N, por ello, el intervalo óptimo para el inicio del compostaje es de 25-35 (Jhorar y col., 1991). Cuando la relación C/N es mayor que 40, la actividad biológica disminuye debido a una insuficiente disponibilidad de N para la síntesis proteica de los microorganismos. Cuando la relación C/N es alta, pero la materia orgánica es poco biodegradable, tenemos una relación C/N real disponible para los microorganismos menor y eso produce que el proceso se acelere rápidamente, por lo que solo afecta a una porción de la masa. Por el contrario, con una relación C/N muy baja el proceso se acelera, pero se libera el exceso de N en forma amoniacal. Durante el proceso de compostaje, la relación C/N disminuye como consecuencia de la degradación de la materia orgánica; esto genera la emisión de

CO₂, y un aumento de la concentración del N al disminuir el volumen de la pila (Bernal y col., 1998).

- ❖ **Contenido en nutrientes.** La disponibilidad de los nutrientes en los residuos con posibilidad de ser compostados marca su interés agronómico (Kiehl, 1985). Entre los elementos que componen el sustrato destacan el C, N y P. El C es fuente de energía para los microorganismos y una pequeña fracción se incorporará a las células. El N también es un elemento crucial para los microorganismos. Es un componente de las proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas y coenzimas necesarias para el crecimiento y funcionamiento celular. Si su presencia es escasa entre el material inicial, será un factor limitante durante el proceso de compostaje y por tanto la degradación será lenta. Por el contrario, si hay exceso de nitrógeno, se perderá en forma de amoníaco y N₂. El fósforo ejerce un papel importante en la formación de compuestos celulares ricos en energía, y es necesario para el metabolismo microbiano (Moreno-Casco y Moral, 2008). En general, las concentraciones de distintos nutrientes aumentan por la pérdida de materia orgánica de la masa durante el compostaje (Díaz y col., 2004; Michel y col., 2004). Los micronutrientes presentes en pequeñas cantidades también son importantes en el metabolismo de los microorganismos, síntesis de las enzimas, y mecanismos de transporte intra y extracelular (Miyatake y col., 2006).
- ❖ **Materia orgánica.** El contenido final se considera como el principal factor para determinar la calidad agronómica de un compost (Kiehl, 1985). Durante el proceso de compostaje, disminuye la materia orgánica al mineralizarse y se produce una pérdida de carbono en forma de CO₂ de casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi y col., 1987). Este descenso transcurre durante las etapas ya comentadas anteriormente de degradación y humificación. Las condiciones físico-químicas del proceso (temperatura, pH, humedad y aireación), los microorganismos que intervienen y la naturaleza física y química de la materia orgánica determinan su velocidad de transformación (Michel y col., 2004).
- ❖ **pH.** Se consideran óptimos los rangos comprendidos entre 5,5 y 8, ya que los hongos soportan rangos de pH (5-8) y las bacterias entre 6 y 7,5 (Costa y col., 1991).

Parámetros de seguimiento

- ❖ **Temperatura.** Se considera la temperatura como la variable fundamental para el control del compostaje. Marca las etapas del proceso y determina el grupo de microorganismos que actúa en cada una de ellas, además nos informa de la eficiencia del mismo. Pequeñas variaciones de temperatura afectan más a la actividad microbiana que pequeños cambios en la humedad, pH o C/N (Liang y col., 2003; Miyatake y col., 2006). Existe una relación directa entre el tiempo que permanece el proceso a altas temperaturas y la degradación, el grado de estabilización y de higienización del material.
 - ❖ **pH.** Debido a la acción que ejerce sobre los procesos microbianos, este parámetro de seguimiento tiene una influencia directa en el compostaje. A través de su seguimiento, se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, observándose que condiciones anaeróbicas liberan ácidos orgánicos, causando el descenso del pH en procesos con mala aireación. La evolución del pH durante el proceso de compostaje presenta tres fases. En la fase mesófila inicial el pH baja debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Posteriormente, la mezcla de materiales se alcaliniza como consecuencia de la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero, 2001). Finalmente, debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón el pH tiende a la neutralidad (Figura 1.8).
- ❖ **Humedad.** En el proceso de compostaje la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de los productos de deshecho de las reacciones que tienen lugar y de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células durante el proceso. El rango ideal para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%. Cuando la humedad es superior del 70% se generan condiciones anaeróbicas perjudiciales para el proceso, además de dar lugar a una disminución de la velocidad y la generación de malos olores. La actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30% (Saña y Soliva, 1987).
- ❖ **Aireación.** Los microorganismos que intervienen en el proceso son aerobios, por lo que para el desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno. El nivel óptimo de oxígeno está dentro del intervalo 10-18% (Biddlestone y Gray, 1991). Una aireación insuficiente provoca anaerobiosis con la aparición de sulfuro de hidrógeno, retardo en la descomposición, y la producción de malos olores (Bidlingmaier, 1996). Por el contrario, un proceso con demasiada ventilación provocaría una alta desecación y el

enfriamiento de la masa con la subsiguiente disminución de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006).



1.3.3 Definición y características del vermicompostaje

El vermicompostaje es un proceso bio-oxidativo de degradación y estabilización de la materia orgánica, mediante la acción combinada de lombrices de tierra y microorganismos, obteniéndose un producto final homogéneo, estabilizado denominado vermicompost o humus de lombriz. Es un proceso parecido al compostaje en el que no se alcanzan temperaturas tan altas y se ha de mantener la humedad apropiada del material orgánico inicial para que las lombrices lo degraden en condiciones mesófilas y aeróbicas.

Entre la gran variedad de lombrices que existen, la más utilizada para el vermicompostaje es la conocida como lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*). Es de color rojizo, mide de 5 a 9 cm, con un diámetro de 3-5 mm y un peso aproximado de 1 g. Las lombrices se separan del vermicompost mecánicamente y se procesan por secado.

Durante el proceso de vermicompostaje los valores de carbono orgánico total disminuyen debido a la mineralización de una parte de la materia orgánica del material inicial. Esta reducción es variable (entre un 10 y un 55%) y depende de la naturaleza del residuo orgánico, su capacidad para ser biodegradable, densidad de población de lombrices y duración del proceso. Compuestos como la hemicelulosa y celulosa se degradan más fácilmente que la lignina, cuyo valor se mantiene o aumenta durante el vermicompostaje (Moreno y col., 2007). La materia orgánica remanente tiende a humidificarse y polimerizarse, durante las etapas finales del proceso, donde los niveles de ácidos húmicos y fúlvicos aumentan (entre un 20-60% respecto a los registrados inicialmente en los materiales de partida). Además, las características químicas y estructurales de los ácidos húmicos formados durante el vermicompostaje, son similares a los del suelo natural (Moreno y col., 2007).

Para conseguir las condiciones óptimas para las lombrices y obtener un buen vermicompost es necesario tener en cuenta ciertos requisitos. Las lombrices no toleran bien la luz por lo que viven debajo de la superficie del suelo, o pueden estar en un recipiente tapado y requieren de una humedad que debe mantenerse (mayor que en el caso del compostaje) para no paralizar la actividad y que se reduzca la población. Las lombrices tienen una alta selectividad, se inclinan por restos vegetales un poco descompuestos, que tengan una relación C/N baja. Por eso es conveniente tomar como material inicial subproductos con una relación C/N adecuada y alto contenido de humedad.

Aunque pueden resistir temperaturas que van desde los 4 a los 30°C, la temperatura óptima debe oscilar alrededor de los 20°C. Incluso si la temperatura es inferior a 7°C, las lombrices podrían seguir produciendo abono, aunque en menor cantidad, pero no se podrían reproducir. No les gusta la acidez, no soportan valores inferiores de pH de 4.5. El vermicompost que se obtiene es un producto muy rico que presenta una granulometría fina y se utiliza de la misma forma que el compost, tanto como abono, como acolchado de la tierra. El tener un pH neutro lo hace idóneo para la mayoría de las plantas.

El vermicompostaje se considera un proceso cuyos costes de inversión, energéticos y de mantenimiento son relativamente bajos y sin impacto ambiental. Los beneficios de este proceso son varios:

- Se reduce la cantidad de materia orgánica que va al vertedero.
- Se produce un ahorro significativo en el transporte y gestión de los residuos.
- Se eliminan desechos orgánicos nocivos, molestos y de difícil digestión.
- Se intensifica la descomposición de la materia orgánica por la acción conjunta de lombrices y microorganismos.
- Las lombrices producen producto final de alta calidad y estable que restauran el equilibrio suelo planta.
- Se evita el uso indiscriminado de productos químicos sobre el suelo que, con el tiempo, da lugar a la pérdida de fertilidad.

1.3.4 Evaluación de la calidad del compost y del vermicompost

El paso de materia orgánica a compost es muy complejo, involucrando gran número de reacciones que generan principalmente dióxido de carbono y agua. Para considerar finalizado este proceso se debe valorar la calidad de la materia orgánica obtenida y para esto debemos considerar aspectos como la “estabilidad biológica” y “humificación”.

Se entiende por estabilidad biológica el grado de descomposición de la materia orgánica y es clave para evitar los problemas en el sistema suelo-planta cuando se produce una rápida oxidación del material en el suelo.

La humificación de la materia orgánica da lugar a formas más resistentes a la biodegradación, lo que incrementa la fertilidad natural de los suelos de cultivo. Ambos términos es lo que supone el concepto de madurez del compost (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1989; Inbar y col., 1990).

La madurez del compost es una característica muy importante a considerar en su uso como medio de cultivo, afecta a la aplicación eficaz en la agricultura y a su impacto sobre el medioambiente. La evaluación de la madurez del compost es la clave para su utilización agronómica, ya que la aplicación a los suelos de cultivo de un compost inmaduro es una de las causas de los fracasos advertidos en la productividad de los cultivos. Se han comprobado diversos efectos perjudiciales causados por la aplicación al suelo de compost no maduros, los que no han alcanzado una estabilización completa de su fracción orgánica (Blanco y Almendros, 1997, González-Vila y col., 1999). Uno de los problemas más importantes es el bloqueo biológico del nitrógeno asimilable del suelo por las poblaciones de microorganismos, esto dará lugar a deficiencias de N en la planta y a una disminución en el rendimiento de los cultivos. Asimismo, al incrementar la biomasa microbiana se puede producir la inmovilización de nutrientes esenciales, como S o P. La aplicación de materia orgánica inmadura al suelo también puede ocasionar una disminución brusca del contenido en oxígeno, lo cual dará lugar a asfixia radicular y a que los organismos anaerobios del suelo utilicen los nitratos como oxidantes, perdiéndose nitrógeno en forma de óxidos gaseosos y N_2 . Este ambiente anóxico que se crea da lugar a un incremento del grado de disponibilidad de los metales pesados potencialmente fitotóxicos que son aportados por ciertos residuos (residuos sólidos urbanos o lodos de depuradora). Los ácidos orgánicos presentes en la materia orgánica inmadura puede también ser una causa de fitotoxicidad en la planta.

En el caso contrario, un compostaje excesivo en materia orgánica podría dar lugar a una pérdida de N y polisacáridos con un importante papel en la agregación del suelo, e inmovilización de nutrientes, principalmente N y P (González-Vila y col., 1999).

Para establecer los parámetros físicos, químicos y biológicos adecuados que indiquen el grado real de la evolución de la materia orgánica durante un proceso de compostaje y saber así también su grado de madurez, es necesario tener un amplio conocimiento de los procesos y de los factores que lo condicionan. En la tabla 1.20 se exponen los índices más empleados para determinar la madurez/estabilidad de los compost, recopilada por Bernal y col. (2009).

Tabla 1.20. Índices de madurez/estabilidad para compost de diferentes materiales (Bernal y col., 2009).

Parámetro	Valores	Referencia
C/N (soluble en H₂O)	5-6; ≤16	Chanyasak y Kubota, 1981
Índice de germinación	>50%	Zucconi y col., 1981
NH₄-N	<0,4 g/kg	Zucconi y de Bertoldi, 1987
C/N	10> <20	Mathur y col., 1993
C/N	<12	Bernal y col., 1998
Ratio producción CO₂	≤120 mg CO ₂ /kg/h	Hue y Liu, 1995
C-orgánico hidrosoluble	≤4 g/kg; ≤ 10 g/kg	Zmora-Nahum y col., 2005
C-orgánico hidrosoluble/N-orgánico total	≤0,70	Bernal y col., 2009
C_{EX}	≤60 g/kg	Bernal y col., 2009
C_{FA}	≤12,5 g/kg	Bernal y col., 2009
C_{EX}/C-orgánico hidrosoluble	≥6,0	Bernal y col., 2009
NH₄-N/NO₃-N	<0,16	Bernal y col., 2009
C-mineralizable en 70 días	<30%	Bernal y col., 2009
NO₃-N/CO₂-C ratio (por día)	>8	Cooperband y col., 2003

Muchos autores coinciden en que no existe un método o técnica que pueda ser utilizada de forma eficaz para evaluar la estabilidad del compost, debido a las grandes diferencias entre los materiales de partida utilizados para elaborarlo, que pueden afectar a su estabilidad biológica. Aunque es posible hacer un uso integrado de diferentes técnicas para obtener una información más completa de la naturaleza y composición del compost y, por tanto, un uso más apropiado del mismo (Baffi y col., 2007).

1.4 Materiales alternativos a la turba como sustrato en los sectores hortícola y forestal

La alta demanda de sustratos en el sector del cultivo sin suelo y su dependencia de recursos no renovables, especialmente de la turba, ha generado una problemática en dicho sector que exige la búsqueda de alternativa viables. Los subproductos o residuos orgánicos procedentes de diferentes sectores y actividades de producción tras una adecuación, pueden ser una opción realmente interesante para su empleo como sustrato de cultivo.

Existe un sinfín de **materiales disponibles** y variados para ser aprovechados como sustratos y que están asociados a diversas actividades de producción y consumo como las agrícolas (restos de cultivos), forestales (cortezas de pino, astillas, etc.), urbanas (restos vegetales de poda y jardinería, lodos de EDAR, etc.), agroindustriales (residuos del procesado de alimentos) o ganaderas (estiércol, gallinaza, purines, etc.). La caracterización de esa biomasa residual es esencial para conocer su comportamiento físico, químico y biológico y, buscar sinergias entre ellos, con el fin de poder elaborar mezclas optimizadas para el uso como sustratos.

En la bibliografía consultada en esta temática se ha observado el uso tanto de residuos agroindustriales (Gavilanes-Terán y col., 2017; Giménez y col., 2019), como de residuos urbanos (Pérez-Murcia y col., 2005; Ostos y col., 2007, Zhang y col., 2013; Greco y col., 2021), agrícolas (Fornes y col., 2013; Mendoza-Hernández y col., 2014) y ganaderos (Jayasinghe y col.; 2010; Cáceres y col., 2015; Vukobratovic y col., 2018) tras un tratamiento de adecuación para elaborar sustratos de cultivo, empleándolos como sustitutos de la turba y en diferentes proporciones.

La **técnica de acondicionamiento** mediante **compostaje** ha sido la más empleada por los autores consultados para la elaboración de sustratos de cultivo a partir de los residuos orgánicos (Bustamante y col., 2008; Ceglie y col.; 2015, Massa y col., 2018, Giménez y col., 2019). En ocasiones, el tratamiento empleado ha sido el **vermicompostaje** (Atiyeh y col., 2001; Fornes y col., 2013; Morales-Corts y col., 2014), proceso también bio-oxidativo que difiere del compostaje en algunos aspectos relevantes que inciden en el ritmo de transformación de la materia orgánica, la calidad de los productos finales y sus posibles usos (Fornes y col., 2013). El digerido procedente del proceso de **digestión anaerobia** de residuos ganaderos también ha sido utilizado como ingrediente de medios de cultivo sustituyendo de forma parcial a la turba (Greco y col., 2021).

Aunque tras someter los residuos al proceso de compostaje y/o vermicompostaje se obtiene una materia orgánica estabilizada y madura, libre de patógenos y fitotóxicos, es posible que para su uso como sustrato sus propiedades finales deban ser corregidas con la adición de perlita o fibra de coco (Fornes y col., 2013; López-Rodríguez y col., 2016; Ceglie y col., 2015). No obstante, los compost y vermicompost generalmente son formulados con turba para obtener un sustrato adecuado para el cultivo (Pérez-Murcia y col., 2005; Gong y col., 2018; Greco y col., 2021).

En los diversos experimentos consultados se han ensayado diferentes **dosificaciones**, creando fórmulas con porcentajes variables de sustitución de turba por compost, que van desde el 5% al 100%. Diversos autores concluyen que los sustratos formulados con un elevado

porcentaje de compost producen efectos negativos en el crecimiento del cultivo respecto al sustrato solo de turba. Sin embargo, cuando las sustituciones están entre un 15% y un 30% ya se observa un resultado comparable con el testigo 100% de turba (Aleandri y col., 2015). Además, en ocasiones, partiendo de los mismos residuos, el uso de vermicompost supera en rendimiento de cultivo al compost, esto puede deberse a la mayor conductividad eléctrica del compost, por lo que las mezclas con vermicompost parecen ser más apropiadas como constituyente del medio, permitiendo su uso en proporciones más altas que el compost (Fornes y col., 2013; Mendoza-Hernández y col., 2014).

En algunos estudios se ha sugerido que la presencia de vermicompost como ingrediente del sustrato podría aumentar la germinación, el crecimiento y la floración de plantas porque aumenta el suministro de nutrientes, la retención de agua, las actividades de enzimas beneficiosas, y el número de microorganismos beneficiosos, y también porque las lombrices de tierra pueden liberar compuestos bioactivos que mejoran el crecimiento de las plantas (Arancon y col., 2008; Azarmi y col., 2008; Chinsamy y col., 2014).

Los **cultivos ensayados** en estudios previos para valorar las capacidades de este tipo de sustratos alternativos a la turba son muy variados, a continuación, destacamos algunos del sector hortícola y forestal. Entre los cultivos hortícolas más ensayados se incluyen el tomate (Herrera y col. 2008; Atiyeh y col., 2001; Gavilanes-Terán y col., 2017; Jara-Samaniego y col., 2017), la lechuga (Giménez y col., 2019; Vukobratov y col., 2018), el pimiento (Gavilanes-Terán y col., 2017; Chrysargyris y col., 2018; Jara-Samaniego y col., 2017), el brócoli (Pérez-Murcia y col., 2005) o el calabacín (Gavilanes-Terán y col., 2017; Jara-Samaniego y col., 2017). Entre los cultivos forestales podemos encontrar la salvia (Greco y col., 2021), el romero (Mendoza-Hernández y col., 2014; Morales-Corts y col., 2014), el ciprés (Hernández-Apaolaza y col., 2005; Benito y col., 2005) o el lentisco (Ostos y col., 2008). En la tabla 1.21 se resumen los principales trabajos sobre el uso de materiales orgánicos como sustratos en el sector hortícola.

Tabla 1.21. Resumen de trabajos previos sobre la utilización de materiales orgánicos para su empleo como sustrato o ingrediente de sustratos en el sector hortícola.

Composición del sustrato		Formulación (% v/v)	Cultivo/Autor
Compost agroindustriales	Residuos de cultivo de flores 50%, serrín 35%, gallinaza 15%	0-100, 25-75, 50-50, 75-25 (compost agroindustrial/turba)	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L. var. Malpica) Calabacín (<i>Cucurbita pepo</i> L. var. Mastil F1) Pimiento (<i>Capsicum annum</i> L. var. Largo de Reus Pairal) Gavilanes-Terán y col. (2017)
	Residuos de cultivo de brócoli 50%, serrín 35% y gallinaza 15%		
	Residuos de cultivo de tomate 50%, serrín 35% y gallinaza 15%		
Turba			
Compost agroindustrial	Residuos de tomate 71%, cebolla 17% y viñedo 12%	0-100, 100-0 (compost agroindustrial/turba)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) Giménez y col. (2019)
Turba			
Vermicompost ganadero	Purín	0-100, 5-95, 10-90, 25-75, 50-50, 100-0 (vermicompost/sustrato comercial)	Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) Atiyeh y col. (2001)
Sustrato comercial	Vermiculita, turba, corteza de fresno y arena		
Compost urbano	Lodos de depuradora	0-100; 15-85; 30-70; 50-50 (compost urbano/ turba)	Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Botrytis</i> cv. Marathon Pérez-Murcia y col. (2005)
Turba			
Compost ganaderos	Estiércol fresco de vaca	50-50, 33-67 (Compost ganadero/turba)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) Pepino (<i>Cucumis sativus</i> L.) Vukobratovic y col. (2018)
	Estiércol semi-maduro de vaca		
	Fracción sólida de purín		
	Estiércol equino		
	Estiércol de pollo		
Turba			
Compost vegetal	Residuos verdes (hojas y restos de jardín)	25-75, 75-25 (compost vegetal/ compost ganadero)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) Cáceres y col. (2015)
Compost ganadero	Fracción sólida del estiércol de ganado		
Compost urbano	FO de los RSU	0-100, 15-85, 30-70, 45-55, 60-40, 100-0 (compost urbano/turba)	Pimiento (<i>Capsicum annum</i> L. cv P14) Chrysargyris y col. (2018)
Turba			
Compost urbano	RSU	0-65-30-5, 30-65-0-5, 0-30-65-5, 30-0-65-5, 65-0-30-5 (compost urbano/turba vieja/ turba rubia/perlita)	Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i> Mill. cv "Atletico") Herrera y col. (2008)
Turba	Vieja y rubia		
Perlita			
Compost vegetal	Restos de poda	90-0-0-10; 0-90-0-10; 0-0-90-10; 45-45-0-10; 45-0-45-10; 0-45-45-10; 60-15-15-10; 15-60-15-10; 15-15-60-10; 30-30-30-10 (compost vegetal/restos palmera/ turba/perlita)	Melón (<i>Cucumis melo</i> L.) Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) Ceglie y col. (2015)
Restos de palmera	Residuos de fibra de tronco de palmera		
Turba			
Perlita			

Tabla 1.22. Resumen de estudios previos basados en la utilización de materiales orgánicos para su empleo como sustrato o componente de sustratos en el sector forestal.

Composición del sustrato		Formulación (% v/v)	Cultivo/Autor
Compost agrícola	Residuos de cultivo de tomate 75%, cáscara de almendra molida 25%	100-0, 75-25, 50-50, 25-75, 0-100 (compost/fibra de coco) (compost + vermicompost/fibra de coco) (vermicompost/fibra de coco)	Bonetero del Japón (<i>Euonymus japonicus</i> "Microphylla") Lavanda (<i>Lavandula angustifolia</i>) Fornes y col. (2013)
Compost + vermicompost agrícola			
Vermicompost agrícola			
Fibra de coco			
Compost urbano	FO de los RSU	40-60, 0-100 (compost/ turba) (vermicompost/ turba) (digerido/ turba)	Salvia (<i>Salvia officinalis</i> L.) Greco y col. (2021)
Vermicompost ganadero	Estiércol vacuno y equino		
Digeridoganadero, agroindustrial	Estiércol y residuos agroindustriales		
Turba			
Compost vegetal	Restos de poda y jardinería	0-100, 50-50,100-0 (compost /turba) (vermicompost/turba)	Geranio (<i>Pelargonium zonale</i> L.) Caléndula (<i>Calendula officinalis</i> L.) Gong y col. (2018)
Vermicompost vegetal	Restos de poda y jardinería		
Turba			
Compost urbano	Lodos de depuradora	100-0-0; 85-15-0; 70-30-0; 0-0-100; 0-15-85; 0-30-70 (corteza de pino/compost urbano/fibra de coco)	Pino piñonero (<i>Pinus pinea</i>) Ciprés común (<i>Cupressus sempervirens</i>) Ciprés de Arizona (<i>Cupressus arizonica</i>) Hernández-Apaolaza y col. (2005)
Corteza de pino			
Fibra de coco			
Compost vegetal	Restos verdes	0-100, 10-90, 30-70, 50-50, 70-30, 90-10, 100-0 (compost vegetal/turba)	Calatea (<i>Calathea insignis</i>) Zhang y col. (2013)
Turba			
Compost urbano 1	Restos de poda y RSU	0-0-0-100; 40-0-0-60; 40-0-20-40; 40-0-40-20; 0-40-0-60; 0-40-20-40; 0-40-40-20 (compost urbano 1/compost urbano 2/corteza de pino/turba)	Lentisco (<i>Pistacia lentiscus</i> L.) Ostos y col. (2008)
Compost urbano 2	Restos de poda y lodos de depuradora		
Corteza de pino			
Turba			
Compost vegetal	Restos de poda	100-0-0-0-0; 90-0-0-0-10, 75-0-0-0-25, 60-10-10-0-20, 50-0-0-25-25, 50-00-50-0 (compost vegetal/hojas/arena/compost agroindustrial/turba)	Raigrás (<i>Lolium perenne</i> L.) Ciprés (<i>Cupressus sempervirens</i> L.) Benito y col. (2005)
Compost agroindustrial	Compost de champiñón usado		
Hojas del suelo			
Arena			
Turba			
Compost ganadero,	Estiércol vacuno y astillas de madera,	100-0-0, 60-40-0, 40-60-0, 20-80-0, 0-100-0, 0-0-100 (compost/agregado/turba)	Caléndula (<i>Tagetes patula</i>) Jayasinghe y col. (2010)
Agregados sintéticos	Tierra roja, restos de papel y almidón		
Turba			
Compost agrícola	Residuos de cultivo de tomate 75%, cáscara	100-0, 75-25, 50-50, 25-75, 0-100	Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i> L.)

Composición del sustrato		Formulación (% v/v)	Cultivo/Autor
Compost y vermicompost agrícola	de almendra molida 25%	(compost/fibra de coco) (compost + vermicompost/fibra de coco) (vermicompost/fibra de coco)	Mendoza-Hernández y col. (2014)
Vermicompost agrícola			
Fibra de coco			
Compost vegetal	Restos verdes y de poda	0-0-10-90; 10-0-0-90; 0-10-0-90; 15-0-5-80; 25-0-0-75; 0-25-0-75; 50-0-0-50; 50-15-0-35: 0-0-0-100 (compost vegetal/vermicompost vegetal/compost residuos abejas/turba)	Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i> L.), lechuga (<i>Lactuca sativa</i>), cebolla (<i>Allium cepa</i>), petúnia (<i>Petunia x hybrida</i>), pensamiento (<i>Viola tricolor</i>), ciprés Leyland (<i>Cupressocyparis Leylandii</i>) Morales-Corts y col. (2014)
Vermicompost vegetal			
Compost residuos abejas	residuos de las abejas		
Turba			
Compost vegetal	Restos verdes de invernadero y vivero (seleccionados)	0-100, 30-70, 50-50 (compost vegetal/turba)	Geranio (<i>Pelargonium zonale</i> L.) Massa y col. (2018)
	Restos verdes urbanos y de cultivo (mixto)		
Turba			
Compost agroindustrial	2,5% Residuos de la elaboración de cerveza (levadura y malta), 97,5% podas de limonero	100-0-0, 75-25-0, 50-50-0, 25-75-0, 70-0-25, 50-0-50, 25-0-75, 0-100-0, 0-0-100 (compost agroindustrial/turba/sustrato comercial)	Caléndula (var. Nana Bon-Bon) Calceolaria (dwarf var.C. Dainty) García-Gómez y col. (2002)
	65% Residuos de la fracción sólida de las aguas residuales de la almazara, 35% hojas de olivo.		
Sustrato comercial	Compost de orujo		
Turba			

Los **sustratos formulados con residuos agroindustriales compostados** muestran propiedades físicas con valores similares al sustrato ideal descrito por Abad y col. (2001). Gavilanes-Terán y col. (2017) observaron que el valor del pH, la conductividad eléctrica y el contenido de nutrientes en los sustratos elaborados a base turba y de compost de restos tomate, o compost de restos de pimiento, o compost de restos de flores alcanzaron valores superiores a los presentados por el sustrato de solo turba, aunque el crecimiento de las semillas de calabacín y tomate no se vieron afectados por la introducción de dichos compost en la formulación de los sustratos. En otro estudio de producción de lechuga, comparando el medio de solo turba y el sustrato elaborado con un 100% de compost de residuos de tomate, cebolla y poda de vid, se observó un aumento en el porcentaje de germinación de semillas y una mejora en el rendimiento y la calidad del producto, por la reducción de nitratos y el aumento del contenido de vitamina C de las hojas (Giménez y col., 2019). En el sector forestal, también nos encontramos con ciertas limitaciones debido a la conductividad eléctrica, por lo que el uso como sustrato de los compost de residuos agroindustriales depende de la especie a cultivar (García-Gómez y col., 2002). En dicho estudio, los mejores resultados se encontraron en mezclas del compost de residuos de aceituna con un 50% de turba o sustrato comercial (compost orujo de uva) en caléndula (especies moderadamente tolerantes a la salinidad), en cambio, para calceolaria (especies sensibles a la salinidad), el uso del compost debe restringirse hasta un 25% en la mezcla con turba o sustrato comercial.

Los **sustratos derivados de compost y vermicompost de restos verdes y de poda** de origen urbano presentan excelentes propiedades físico-químicas. El vermicompost en la proporción 25% sería una buena práctica sostenible para la producción de plantas, tanto hortícolas (lechuga, cebolla) como aromáticas (romero, petúnia) (Morales-Corts y col., 2014). Gong y col. (2018) concluyeron que el crecimiento y floración de geranio y caléndula fueron superiores en sustratos con presencia de vermicompost, elaborado con restos verdes, que en el medio de control (turba). En otro ensayo, Massa y col. (2018) evidenciaron la importancia de la selección previa de los residuos verdes a compostar, en la producción de compost de alta calidad para cultivos ornamentales, concluyendo que, para el trasplante de esquejes de geranio, el compost de residuos verdes seleccionados fue más eficaz que el compost de residuos verdes no seleccionados en la formulación de sustratos con turba.

Ceglie y col. (2015) analizaron los datos obtenidos para el cultivo de tomate, lechuga y melón cultivados en diferentes sustratos binarios, ternarios y cuaternarios elaborados a base de perlita combinada con compost de residuos verdes, turba y restos de palmera y predijeron la

composición ideal para la producción dichas plantas hortícolas concluyendo que era la formulada con un 20% compost, 39% restos de palmera, 31% de turba comercial y un 10% de perlita.

El **compost de RSU** combinado con la turba constituye un componente ideal para el crecimiento de plántulas hortícolas y forestales. El uso moderado de estos compost en la formulación de sustratos con turba reduce los efectos negativos del pH y la CE alta. Dosificaciones hasta el 30% permitieron obtener unos resultados comparables a los obtenidos con turba, tanto para el tomate (Herrera y col., 2008) como para el pimiento (Chrysargyris y col., 2018). En ambos casos se consiguió un equilibrio entre el aporte de nutrientes del compost y las características físicas de la turba. Greco y col. (2021) usaron sustratos elaborados con compost de la fracción orgánica de los RSU, mezclados con turba (40%/60%) para el cultivo de salvia, y concluyeron que las propiedades químicas de los sustratos con compost no afectaron al contenido de metales pesados, macro y micronutrientes de las hojas, pero que, debido a su contenido salino, estos deberían utilizarse con precaución.

El uso de **compost de lodos de depuradora**, produce un aumento en la densidad aparente y la conductividad eléctrica de los sustratos. Por otra parte, también aumenta el contenido de nutrientes y metales pesados de las plantas, por lo que su uso como componente de sustrato dependerá de las especies a cultivar. En el caso del cultivo de brócoli, el uso de este compost no afectó a la ratio de germinación (incluso al 50% de sustitución) y el rendimiento del cultivo fue óptimo con un medio de cultivo al 30% de compost de lodos (Pérez-Murcia y col., 2005). Estos autores concluyeron que el medio de cultivo con presencia de compost de lodo posee unas propiedades físicas y físico-químicas adecuadas y un contenido notable de nutrientes en la planta, siendo la CE y la acumulación de elementos tóxicos los principales factores limitantes. Un resultado similar se obtuvo con un cultivo forestal de pinos y cipreses, donde la mezcla de 30% de compost de lodo fue la más conveniente desde un punto de vista medioambiental y económico (Hernández-Apaolaza y col., 2005) y aunque los sustratos presentaban unas buenas características físicas y químicas, se recomendaba el estudio de nuevas combinaciones entre diferentes residuos para obtener mejores resultados. Ostos y col. (2008) observaron para el cultivo de lentisco una mejora en la nutrición y crecimiento de las plantas en los sustratos elaborados con compost, siendo el compost de lodos más eficaz que el compost de poda y RSU, observando también que las concentraciones en planta de elementos traza fueron inferiores a los rangos fitotóxicos establecidos por Chaney y col. (1989).

Los **compost de residuos ganaderos** presentan propiedades que pueden ser satisfactorias como componente de sustratos, excepto la porosidad, cuyo valor es bajo, así como el pH y la CE que pueden ser altos (Vukobratovic y col., 2018). Estos autores comprobaron en un ensayo con lechuga y pepino (especies más y menos sensibles, respectivamente) que ninguna planta brotó en los sustratos con presencia del compost de estiércol equino y del compost de pollo, mezclados con turba en proporciones 1:1 y 1:2, en cambio en el sustrato formulado con turba y compost de la fracción sólida del purín si resultó adecuado en mezclas al 50% de sustitución. También observaron que el compost de estiércol de vaca también puede ser un buen sustituto parcial de la turba. Atiyeh y col. (2001) concluyeron que en medios de cultivo con una sustitución parcial de la turba con vermicompost de estiércol de cerdo entre el 25% y 50%, el crecimiento de las plántulas de tomate es mayor que con 100%, debido a la mayor concentración de sales solubles y la menor porosidad y aireación. Jayasinghe y col. (2010) observaron en el cultivo de caléndula mayor altura, número de flores por planta, peso fresco de brote, peso seco de brote, longitud de raíz, peso fresco de raíz y peso seco de raíz en la mezcla de compost vacuno y de restos de papel y almidón (40%:60%, v/v). Greco y col., (2021) elaboraron sustratos usando vermicompost ganadero y digeridoganadero mezclados con turba (40%/60%) para el cultivo de salvia y observaron que las plantas de salvia no mostraron diferencias significativas en la composición química, ni en el rendimiento ni en la composición de aceites esenciales extraídos, a pesar de que los sustratos obtenidos no afectaron a los parámetros cualitativos de la salvia estos deben ser usados con precaución debido a sus valores de conductividad eléctrica.

Fornes y col. (2013) estudiaron las propiedades de diferentes sustratos elaborados a base de **compost y vermicompost de residuos agrícolas** mezclados con fibra de coco y encontraron características complementarias entre ellos: el compost y vermicompost tenían mayor densidad aparente y menor porosidad total que la fibra de coco, además el compost tenía menor capacidad de retención de agua que los vermicompost y la fibra de coco. La CE fue baja en la fibra de coco y vermicompost y alta en el compost debido al alto contenido en minerales, por este motivo el compost se comportó peor que las mezclas con vermicompost, que parecen ser más apropiadas como constituyente del medio de enraizamiento. En las mezclas que presentaban vermicompost los esquejes de lavanda mostraron un porcentaje de enraizamiento máximo. Con respecto al compost y su mezcla al 25% en fibra de coco, estos sustratos resultaron inadecuados para el enraizamiento de lavanda, alcanzando los valores más bajos, aunque mejoraron al aumentar la proporción de fibra de coco en el sustrato. En cuanto a la parte aérea, el crecimiento fue mayor en los vermicompost que en la fibra de coco, disminuyendo a medida

que aumentaba la proporción de esta en las mezclas. Mendoza-Hernández y col. (2014) comparó el compost y vermicompost de residuos agrícolas como ingredientes en medios de crecimiento para el cultivo de romero y pudieron constatar que el vermicompost supera en rendimiento al compost obtenido simultáneamente de los mismos residuos. El vermicompost se puede usar en altas proporciones (más del 50%) en el medio de crecimiento del romero, mientras que el compost solo se puede usar en proporciones bajas (no superior al 25%). Además, el vermicompost a pesar de sus bajos niveles de nutrientes, mejoró la longitud de la raíz, el enraizamiento y el peso de la raíz de los esquejes, sin embargo, y aunque estos resultados son aceptables, no funcionan tan bien como la turba para el cultivo de romero.



2. OBJETIVOS





2 Objetivos

El cultivo sin suelo requiere de un volumen considerable de sustrato, que en la inmensa mayoría se trata de turba. Este uso importante de turba implica la explotación de las turberas, sistemas de alto valor ecológico y supone un fuerte impacto medioambiental.

Por este motivo, el objetivo principal de esta tesis doctoral es **estudiar y validar diferentes alternativas sostenibles para la sustitución de la turba como medio de cultivo o sustrato en diferentes sistemas hortícolas y forestales desarrollados en el entorno mediterráneo**. Para ello, se han utilizado en la formulación de los sustratos ensayados materiales orgánicos, previamente sometidos a procesos de adecuación física, como la trituración, o de estabilización biológica, como el compostaje o vermicompostaje.

Los objetivos específicos asociados al objetivo general de este trabajo son los siguientes:

- Estudiar el uso de compost derivados de residuos orgánicos procedentes de los sectores agrícola y ganadero, sometidos o no a un pre-tratamiento de desalinización mediante lavado, como sustitutos parciales de la turba en medios de cultivo para el desarrollo de plántulas de una especie hortícola.
- Estudiar la utilización de mezclas binarias compuestas por materiales sostenibles, buscando posibles sustitutos de la turba, comparando la germinación y el desarrollo de las plántulas a nivel comercial de una especie hortícola.
- Estudiar el uso de sustratos con materiales orgánicos avanzados como sustitutos de la turba para el desarrollo en bandeja forestal de plántulas de especies vegetales para reforestación en entornos mediterráneos, evaluando aspectos morfológicos y de rendimiento de las especies, así como, la potencialidad de las mezclas ensayadas como sustratos y como agentes fertilizantes de liberación lenta.
- Estudiar el uso de sustratos orgánicos alternativos a la turba como aditivos en medios de cultivo de transición para el desarrollo en contenedor de especies aromáticas autóctonas para reforestación, evaluando el enraizamiento, el desarrollo vegetativo y la supervivencia de las especies, así como la potencialidad de los medios de transición como sustratos y como agentes fertilizantes de liberación lenta.

3. PUBLICACIONES



**3.1. USE OF LIVESTOCK WASTE COMPOSTS AS NURSERY GROWING MEDIA: EFFECT OF A
WASHING PRE-TREATMENT. 2021**

Bustamante, M. A.; Gomis, M. P.; Pérez-Murcia, M. D.; Gangi, D.; Ceglie, F. G; Paredes, C.;
Pérez-Espinosa, A.; Bernal, M. P.; Moral, R. *Scientia Horticulturae* (Q1, IF: 3.463 (JCR
2020)). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109954>



Highlights

A washing pre-treatment was applied to livestock derived substrates.

The washing pre-treatment did not affected negatively substrate physical properties.

The growing media with washed composts showed positive effects on seedlings.

Abstract

The search for alternative materials for peat substitution in soilless systems has led to an increasing use of compost as ingredient of growing media. These materials may have similar characteristics to peat for their potential use as substitutes of this non-renewable material. However, the high salinity is one of the most usual limiting factors in compost for its use in growing media. This work evaluates the effect of the use of a washing pre-treatment to improve the quality of livestock waste-derived composts as peat substitutes in substrates for pepper (*Capsicum annuum* L.) seedling production. For this, different growing media were prepared using as ingredients five composts from livestock manures and anaerobic digestates (M1, M2, M3, D1 and D2), with or without a washing pre-treatment. Each respective material was mixed with peat in the proportions 25%, 50% and 75% (volume:volume), using as control treatment pure (100%) peat. The main physico-chemical, chemical and physical characteristics of the composts before and after washing and those of the growing media were studied, as well as germination and biomass production of the seedlings. The use of a washing pre-treatment was effective in the reduction of compost salinity, without implying a negative effect on the physical properties and nutrient content of the growing media, which were adequate for being used in seedling production, as reflected in the beneficial effects on the germination and growth of pepper seedlings.

Keywords: compost, salinity reduction, growing media, pepper seedlings, livestock manure, anaerobic digestate.

1. Introduction

In the last years, the environmental concern associated with the extraction and growing demand of peat, as the main component used in growing media for conventional and organic seedling production in the EU, has increased (Ceglie et al., 2015). As a consequence of this, in many countries several restrictions have been established for the use of this material (Moral et

al., 2013). This fact has led to the search for alternative eco-friendly materials, with low cost and high quality as substrate components. A great variety of organic materials has been studied as total or partial ingredients of growing media, such as residual biomasses (Noguera et al., 2003; Medina et al., 2009; Cocozza et al., 2011; Andreu-Rodríguez et al., 2013), as well as other organic wastes after proper composting, such as municipal organic wastes, manures, green wastes and/or agri-food wastes (De Lucia et al., 2013; Ceglie et al., 2015; Restrepo et al., 2013; Bustamante et al., 2008; Lazcano et al., 2009; Sáez et al., 2016; Morales et al., 2017; Jara-Samaniego et al., 2017). Specifically, the composting process improves the characteristics of the waste material, reducing the potential hazardous presence of parasites, pathogens and weed seeds (Bernal et al., 2009). Thus, composts not only can partially substitute mineral fertilisers, but may also improve the properties of the growing media. However, composts may also show several limitations, such as the temporal variability in their properties, poor physical properties, presence of organic phytotoxins and/or heavy metals, high pH and/or high salinity (Rinaldi et al., 2011; Ceglie and Abdelrahman, 2014; Sáez et al., 2016). In fact, the high concentrations of salts or nutrients are usually the reasons that prevent composts for their direct use as substrates for soilless crop cultivation (Abad et al., 2001; Bustamante et al., 2008). The high salinity is a common limiting factor in compost that strongly depends on their origin (Chong, 2005), this aspect being especially relevant in compost from livestock manures (Bustamante et al., 2010). Thus, high salt levels in the substrate is a factor especially critical in seedling production, due to the lower tolerance of the plant to salinity at the first growth stages (Fornes et al., 2007; Fornes et al., 2010).

Several studies have reported different methods to reduce salinity in the composts, such as the use of zeolite (Koushafar et al., 2011) or the application of electrochemical methods, especially to remove sodium ions (Baek et al., 2000). However, the most common methods to reduce salinity in compost are based on its dilution by mixing with other materials (Bustamante et al., 2008; Tittarelli et al., 2009; Restrepo et al., 2013) and the application of leaching techniques prior to or during their use as ingredient of growing media (Fornes et al., 2010; Illera-Vives et al., 2014). The leaching techniques are mainly based on the irrigation with water (Fornes et al., 2010), with an acid or a nutrient solution (Chong, 2005; Mazuela et al. 2005). However, the main drawback of leaching techniques is water consumption and thus, this method requires to be perfectly designed to be a cost-effective and environmentally procedure that minimizes the amount of water used.

Another alternative option to reduce salinity in composts prior to be used as growing media and/or growing media components is their pre-treatment by elution or washing with water, in

which the material is not into a container and it is not irrigated as in the leaching techniques. In this technique, the material is mixed with distilled water in a determined ratio, shaken during a determined time and dewatered (using free drainage and/or mechanical methods such as the centrifugation). However, the use of this technique to reduce compost salinity and its effect on the characteristics of the final materials, especially on the physical properties, have been scarcely studied. Only Liu et al. (2014) used this methodology to reduce salinity in sewage sludge compost prior to its utilization as nursery growing medium, reporting promising results.

In both types of techniques (leaching and washing), the leachates generated must be properly managed and their volume minimised. In this sense, there are several potential options to manage and recycle this effluent, such as the use as liquid fertiliser (Gils et al., 2005; Tejada et al., 2008), in hydroponic cultures (Jarecki et al., 2005) and even as biostimulator (Stirk et al., 2004) and/or disease inhibitor (Scheuerell and Mahaffee, 2002), depending on its characteristics.

Therefore, this work studies the effects of different livestock manure-derived composts, previously pre-treated or not with a washing pre-treatment, in a peat substitution experiment for the seedling production of pepper (*Capsicum annuum* L.). For this, the effects of compost origin, proportion in the substrate and of the application of a previous washing pre-treatment have been studied on parameters associated to the growing media and to the pepper seedlings.

2. Materials and methods

2.1 Growing medium ingredients and washing pre-treatment

Five composts (M1, M2, M3, D1 and D2) derived from livestock wastes were used as organic growing medium components. M1, M2 and M3 were prepared mainly using livestock manures: M1 using pig slurry (PS) obtained from a fattening pig farm in Orihuela (Alicante, Spain), M2 using a mixture at 50:50 of sheep manure and goat manure (SGM) and M3 using PS collected in a sows and piglets farm located in Guazamara (Almería, Spain). D1 and D2 were prepared from the solid fraction of anaerobic digestates from cattle manure (CD) and pig slurry (PD), respectively. In M2, the mixture of sheep manure and goat manure came from the experimental farm of the Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO-Miguel Hernández University). In D1, CD was produced after the continuous, anaerobic co-digestion of cattle slurry in an industrial biogas plant located in Valencia (Spain); while in D2, PD was obtained after the continuous,

anaerobic thermophilic digestion of pig slurry in an industrial biogas plant placed in Lleida (Spain), after mechanical separation by centrifugation without any additive addition. These livestock wastes were mixed with several bulking agents for their composting: cotton gin waste (CW); grass clippings (GC); wheat straw (WS); vine shoot pruning (VP); maize straw (MS). The proportions (on a fresh matter basis) of the initial wastes used in the mixtures and the principal characteristics of the composting processes are shown in Table 1. The composting piles M2, M3 and D2 were prepared at an industrial scale using the turning windrow system, while M1 and D1 were composted by the Rutgers static pile composting system in a pilot plant (2000 kg), with forced aeration on temperature demand, which maintains a temperature ceiling (65 °C) in the pile, involving on-demand ventilation through temperature feedback control. A good development of the bio-oxidative phase was observed in all the mixtures, with a different duration (Table 1), carrying out different turnings depending on the composting system used, to homogenize the mixture and improve the process. In all piles, the bio-oxidative phase of composting was considered finished when the temperature of the piles was stable and near to that of the atmosphere. Then, all the piles were allowed to mature for 2 months. More details about the compost elaboration of M1, M3 and D1 and D2 can be found elsewhere (Santos et al., 2016; Sáez et al., 2017; Bustamante et al., 2012). The composts had pH values close to neutrality, high electrical conductivity values, especially M1 and D2, adequate concentrations of organic matter and total N, and a C/N ratio < 20 (Table 2), limit value established for compost maturity (Bernal et al., 2009).

To decrease salt contents and thus, to improve their quality for their use as growing medium ingredients, a pre-treatment washing with distilled water was applied to all the

composts. For this, 5 L of each compost was mixed with deionised water in a proportion 1:1 (v:v) and shaken for 30 minutes at 25 °C. After that, washed compost samples (labelled LM1, LM2, LM3, LD1 and LD2) were spread on a gauze with a diameter of 10 mm and allowed to drain. Then, the original composts (M1, M2, M3, D1 and D2) and the washed composts (LM1, LM2, LM3, LD1 and LD2) were used as ingredients of the growing media.

2.2 Experimental design

All the composts (original and after washing pre-treatment) were respectively mixed with a commercial peat with no previous fertilisation, a weakly-decomposed *Sphagnum* moss limed (pH = 6.42). The main characteristics of this material are included in Tables 3 and 4. These mixtures resulted in thirty growing media, prepared by mixing the ten composts (M1, M2, M3, D1, D2 and LM1, LM2, LM3, LD1, LD2) with peat in the proportions 25%, 50% and 75% by volume

of compost. Pure peat was used as control treatment (Peat). The growing media used were not fertilised before planting. The experiment was developed in a commercial nursery (Semilleros El Raal-Cox S.L., Alicante).

A horticultural crop (pepper, *Capsicum annuum* L. cv. Largo de Reus Pairal) was selected and raised (a seed per cell) in foamed polystyrene plug trays (70 x 46 cm) with 294 inverted pyramid cells. The treatments (substrates) were conducted in a full randomised plot design, using a tray per treatment (four replicates per treatment). The germination was developed at established conditions ($27\pm 1^\circ\text{C}$ and 95% relative humidity) in an air-conditioned chamber.

The percentage of germination was calculated by counting the number of germinated seeds after 48 hours from seeding (Bustamante et al., 2008). Then, the trays were placed on rails with natural daylight conditions in an unheated polyethylene-covered greenhouse. During the experimental period, the average temperature was 16°C , with a maximum temperature value of 19°C and a minimum value of 7°C , with an average solar radiation of 140 w/m^2 . The plants were irrigated daily with a mobile, sprinkler system and fertirrigated twice a week using an irrigation solution composed of 136 mM N ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$), 49.4 mM P_2O_5 , 23.4 mM K_2O , 22.8 mM CaO, 6.25 mM Fe, 0.24 mM Cu, 3.18 mM Mn, 0.54 mM Zn and, 0.16 mM Mo (Bustamante et al., 2008).

Once most of the plantlets reached the commercial transplanting size (on day 84 after germination), from each plug tray, 16 seedlings were randomly harvested, avoiding the seedlings from the edges. Aerial fresh weight (AFW), shoot height (H) and root fresh weight of the plantlets were determined before washing and drying transplants to determine aerial and root dry weight (ADW and RDW, respectively) (at 55°C in an air-forced oven for 72 h). After this, the shoot samples were ground to a 0.5 mm powder for the analytical determinations.

2.3 Analytical methods

The physical parameters of the substrates were determined following the methodology used by Bustamante et al. (2008). Electrical conductivity (EC) and pH were determined according to EN 13038 (1999) and EN 13037 (1999), respectively. Dry matter was determined by drying at 105°C for 12h, and organic matter (OM) by loss on ignition at 430°C for 24 h (Bustamante et al., 2008). Total nitrogen (TN) and total organic carbon (TOC) were determined by dry combustion at 950°C with a Leco TruSpec C–N Elemental Analyzer (Leco Corp., St. Joseph, MI, USA). P fractions were determined colorimetrically as molybdovanadate phosphoric acid; total P, in the extract obtained after $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ digestion and water-soluble P, in the water-soluble

extract (1:5, v:v). Flame photometry (Jenway PFP7 Flame Photometer, Jenway Ltd., Felsted, UK) was used to determine Na and K, water-soluble fraction in the water-soluble extract (1:5, v:v) and total fraction, after HNO₃-HClO₄ digestion. Sulfates, chlorides and nitrates were determined in the 1:5 (v:v) water-soluble extract using ion chromatography. All the analytical determination were conducted in triplicate.

2.4 Statistical analysis

The univariate linear general model (LGM) was used to study the effects of the factors studied: type of substrate, compost proportion in the mixture and treatment of the compost prior to the elaboration of the mixture (washed and not-washed). The post-hoc contrast was carried out by the Tukey-b test. Principal component analysis (PCA) was carried out to reduce dimensionality and assess the extent of treatment differentiation in relation to the different factors considered. The statistical analyses were determined using STATISTICA v. 8.0 software (StatSoft, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA).

3. Results and discussion

3.1 Effect of the washing pre-treatment on the composts

In general, the washing pre-treatment applied to the composts produced a significant effect on several of the final properties of the materials (Table 2). The pH values slightly increased in all the composts except for M3, whose value remained constant, and compost D1, whose value decreased with the pre-treatment. However, the electrical conductivity (EC) clearly decreased in all the composts after the pre-treatment, with percentages of diminution of 40.7% for M1, 12.8 % for M2, 26.9% for M3, 26.4% for D1 and 31.2% for D2. Thus, this effect was especially remarkable in the composts with the initial highest salinity (M1, D1 and D2), indicating ion removal (Illera-Vives et al., 2014). Also, the contribution of the ions to the EC depends on their total amount leached, their initial concentration in the compost and therefore the leaching efficiency.

Moreover, Carrión et al. (2005), in an experiment of leaching of agricultural waste-derived composts, also reported that the composts showed a different behaviour to salt leaching. This behaviour depended on the initial waste materials, composting process and therefore, compost physical and chemical characteristics, such as particle size, bulk density, total water holding capacity and especially organic matter contents. Concerning the chemical parameters, the washing pre-treatment seemed to produce a reduction of the organic fraction, probably due to

the leaching of the water-soluble organic fraction (Table 2). The total concentration of the main macronutrients (N, P and K) and of Na, one of the main phytotoxic ions together with chloride, also decreased after the washing pre-treatment, especially for K and Na, due to their highly soluble nature in the compost. Fornes et al. (2010) and Illera-Vives et al. (2014) also reported in leaching experiments with different types of compost the highest leaching efficiency for these ions compared to P, possibly due to the chemical binding or adsorption processes of this ion in composts (Guo and Chorover, 2004; Fornes et al., 2010). In addition, Liu et al. (2014) also found that using an elution proportion of 1:1 (compost:water), reduced the Na concentrations to values within the range for plant tolerance in sewage sludge compost.

3.2 Effect on the physical and chemical properties of the growing media

Table 3 shows the incidence of the factors studied (compost type, compost proportion in the growing media and the washing pre-treatment) on the main physico-chemical and physical characteristics of the substrates prepared. The incorporation of the composts to the substrates had a variable effect on the physico-chemical properties depending on the compost type.

The use of manure derived-composts (M1, M2 and M3) induced higher pH (mean values) than those from anaerobic digestates, while the lowest EC values were observed in the growing media prepared with composts M2 and D1. In addition, the increasing compost percentage in the mixtures increases the pH and EC values. This effect was also found in previous studies of peat substitution by compost in substrates (Bustamante et al., 2008; Ceglie et al., 2015; Sáez et al., 2016). In addition, the washing pre-treatment induced an increase of the pH and a reduction of the EC (Table 3), effect that was also observed by other authors (Fornes et al., 2010; Gonani et al., 2011).

Concerning the physical characteristics, in general, the average values were similar to those of pure peat (control treatment) and within or close to the optimum values of an ideal growing medium according to Abad et al. (2001) and Noguera et al. (2003). The washing pre-treatment was the variable that showed the greatest influence, with significant effects on all the physical properties. This could be due to changes in the particle size and pore distribution in the washed composts as shown by the reduction of the air capacity and in the increase in the total pore space, total water holding capacity and shrinkage (Table 3). Previous published papers have studied the effect of different treatments to reduce salinity in organic materials, such as leaching and washing/elution (Carrión et al., 2005; Mazuela et al., 2005; Fornes et al., 2010; Illera-Vives et al., 2014; Liu et al., 2014). However, only Fornes et al. (2010) reported a relationship between

the efficiency of salt displacement when leaching and the type of compost. This fact is due to leaching efficiency, which depends on certain physical properties in porous materials, such as particle size and porosity and the diffusion of solutes within the aggregates (Fornes et al., 2007).

All the factors studied (type of compost, proportion in the substrate and pre-treatment) showed a significant influence on the substrate chemical characteristics (Table 4).

This fact was especially relevant for the concentrations of the water-soluble elements, which augmented with the raising proportion of compost and were higher in the growing media in comparison with peat. However, the opposite behaviour was observed for the washing pre-treatment, showing a decrease in the concentrations of these elements with respect to the original compost. Liu et al. (2014) also reported that this treatment removes most soluble salts from sewage sludge compost, including Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , and Mg^{2+} . Fornes et al. (2010) also observed that the decrease in the soluble mineral elements of composts from lignocellulosic wastes, mainly K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} and Na^+ , coincided with the drop in the electrical conductivity previously commented.

3.3 Seed germination and seedling growth

The factors considered showed a significant influence, especially the compost origin and the washing pre-treatment in the pepper seed germination (Table 5). The incorporation of the composts M1, M3 and D2 in the substrates induced the lowest values of seed germination, coinciding this fact with the highest increase of the salinity produced by these composts when were incorporated in the substrates (Table 3). The compost proportion in the substrates only produced a decrease in the germination at the highest percentage of peat substitution (75%). The reduction of the germination at high proportion of compost in the growing media has been also found in previous studies (Bustamante et al., 2008; Ceglie et al., 2015). However, the washing pre-treatment of the composts had a positive effect on the pepper seed germination, probably due to the effect of salinity reduction. Fornes et al. (2010) also observed a higher growth of the plant species studied (*Calendula officinalis* and *Calceolaria hybrida*) in the growing media obtained with leached composts with respect to the growing media prepared with the original compost. Moreover, Liu et al. (2014) reported that the treatment of water elution was effective for alleviating saline stress on seedling growth.

In addition, the percentage of compost in the substrate and the washing pre-treatment had a significant influence, especially in the aerial and root fresh weight, which showed the highest average values for the percentage of 25% of compost and for the use of the pre-treatment (Table

5). These results show that the washing pre-treatment had a positive effect on the germination, the shoot height and on the seedling biomass production of pepper. Other authors have also reported increases in the seedling biomass production when composts are used as growing medium ingredients (Pérez-Murcia et al., 2006, Bustamante et al., 2008, Sáez et al., 2016), due to the nutrient incorporation, such as N and P, with composts. In this experiment, the increases in seedling biomass production despite the washing pre-treatment indicate that salinity has been reduced, but without implying a negative effect on the germination and growth of the seedlings associated to the decrease of the water-soluble mineral elements.

3.4 Principal component analysis (PCA)

The Principal Component Analysis conducted for all the results indicated that the first two components or factors explained together more than 69% of the total variability (54.03% and 15.14%, respectively) (Table 6). A plot of the first and second factors for the growing media is displayed in Fig. 1. In addition, Fig. 2 shows the contributions of the parameters considered in the analysis: a) parameters associated to the growing media (electrical conductivity (EC), total organic matter (OM), total N (TN), total organic carbon (TOC), C/N ratio (CN), total P (TP), water-soluble P (WSP), nitrates, sulfates, chlorides, water-soluble K (WSK), water-soluble Na (WSNa), total sodium (TNa) and total potassium (TK)); b) parameters related to the seedling quality (shoot height (H), aerial fresh weight (AFW), aerial dry weight (ADW), root fresh weight (RFW) and root dry weight (RDW)). Fig. 1 shows the separation of groups of treatments mainly depending on the compost washing pre-treatment for Factor 2, and the proportion of compost in Factor 1.

In Factor 2 this segregation is defined, showing positive loadings on this axis for the growing media prepared with composts with the washing pre-treatment. Factor 1 classifies the groups depending on the proportion of compost, the mixtures with the highest percentages of compost (50-75%) being associated with the positive side of this Factor. As it is shown in Fig. 2, positive contributors to Factor 1 included all the parameters related to water-soluble and total fractions of elements, while Factor 2 was mainly influenced by the parameters associated to the seedling characteristics.

4. Conclusions

The use of a washing pre-treatment was an effective method to reduce salinity in livestock waste-derived composts before their use as substrate ingredients. This pre-treatment and the percentage of compost in the substrate showed a significant influence in the germination and seedling growth, which showed the highest average values for the percentage of 25% of compost regardless of its origin, and for the use of the pre-treatment. In addition, the washing pre-treatment did not have a negative influence on the physical properties of the substrates obtained, which were adequate for seedling production. Moreover, the loss of water-soluble elements due to the washing treatment did not have a negative effect, as it was reflected in the positive effect on seed germination and seedling biomass production of pepper in the growing media incorporating the washed composts.

5. Acknowledgements

The authors wish to thank Dr. J.A. Sáez and Dr. A. Santos for providing some of the composts used in this experiment and the company Semilleros El Raal-Cox S.L. for its help in the practical fulfilment of this experiment.

Funding: This research has been carried out in the framework of the LIFE+ Programme project MANEV (LIFE9-ENV535 ES-0453) "Evaluation of manure management and treatment technologies for environmental protection and sustainable livestock farming in Europe".

6. References

- Abad, M., Noguera, P., Bures, S., 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresour. Technol.* 77, 197–200.
- Andreu-Rodriguez, J., Medina, E., Ferrandez-Garcia, M.T., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E., Paredes, C., Bustamante, M.A., Moreno-Caselles, J., 2013. Agricultural and industrial valorization of *Arundo donax* L. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 44; 598–609.
- Baek, K., Lee, H.H., Shin, H.J., Yang, J.W., 2000. Electrochemical removal of sodium ion from fermented food composts. *Korean J. Chem. Eng.* 17(2), 245-247.
- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour. Technol.* 100, 5444-5453.

- Bustamante, M. A., Albuquerque, J. A., Restrepo, A. P., De la Fuente, C., Paredes, C., Moral, R., Bernal, M. P. 2012. Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture. *Biomass Bioener.* 43, 26-35.
- Bustamante, M.A., Paredes, C., Moral, R. Agulló, E., Pérez-Murcia, M.D., Abad, M. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 792-799.
- Bustamante, M.A., Suárez-Estrella, F., Torrecillas, C., Paredes, C., Moral, R., Moreno, J., 2010. Use of chemometrics in the chemical and microbiological characterization of composts from agroindustrial wastes. *Bioresour. Technol.* 101, 4068–4074.
- Carrión, C., Abad, M., Fornes, F., Noguera, V., Maquieira, A., Puchades, R., 2005. Leaching of composts from agricultural wastes to prepare nursery potting media, *Acta Horticulturae* 697, 117-124.
- Ceglie, F.G., Abdelrahman, H.M., 2014. Ecological intensification through nutrients recycling and composting in organic farming. In: Maheshwari D. (eds) *Composting for Sustainable Agriculture. Sustainable Development and Biodiversity*, vol 3, pp. 1-22, Springer.
- Ceglie, F.G., Bustamante, M.A., Amara, M.B., Tittarelli, F., 2015. The challenge of peat substitution in organic seedling production: optimization of growing media formulation through mixture design and response surface analysis. *Plos One* 10(6): e0128600. doi:10.1371/journal.pone.0128600.
- Chong C., 2005. Experiences with wastes and composts in nursery substrates. *HortTechnology.* 15, 739–747.
- Cocozza, C., Parente, A., Zaccone, C., Mininni, C., Santamaria, P., Miano, T., 2011. Chemical, physical and spectroscopic characterization of *Posidonia oceanica* (L.) Del. residues and their possible recycle. *Biomass Bioenergy* 35, 799–807.
- De Lucia, B., Vecchiotti, L., Rinaldi, S., Rivera, C.M., Trinchera, A., Rea, E., 2013. Effect of peat-reduced and peat-free substrates on rosemary growth. *J. Plant Nutr.* 36, 863–876.
- EN 13037 - European Standards, 1999. Determination of pH. Soil Improvers and Growing Media. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 11 pp.
- EN 13038, 1999. Determination of Electrical Conductivity. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 13 pp.

- Fornes, F., Belda, R.M., Carrión, C., Noguera, V., García-Agustín, P., Abad, M., 2007. Pre-conditioning ornamental plants to drought by means of saline water irrigation as related to salinity tolerance. *Sci.Hort.* 113, 52-59.
- Fornes, F., Carrión, C., García-de-la-Fuente, R., Puchades, R., Abad, M., 2010. Leaching composted lignocellulosic wastes to prepare container media: Feasibility and environmental concerns. *J. Environ. Manage.* 91, 1747-1751.
- Gils, J., Chong, C., Lumis, G., 2005. Response of container-grown ninebark to crude and nutrient-enriched recirculating compost leachates. *HortSci* 40(5), 1507–1512.
- Gonani, Z., Riahi, H., Sharifi, K., 2011. Impact of using leached spent mushroom compost as a partial growing media for horticultural plants. *Journal of Plant Nutrition* 34, 337-344.
- Guo, M., Chorover, J., 2004. Solute release from weathering of spent mushroom substrate under controlled conditions. *Compost Sci. Util.* 12, 225–234.
- Illera-Vives, M., López-Mosquera, M.E., Salas-Sanjuan, M.C., López-Fabal, A., 2014. Leaching techniques for saline wastes composts used as growing media in organic agriculture: assessment and modelling. *Environ Sci Pollut Res.* 22 (9), 6854-6863.
- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López, M., López-Lluch, D.B., Gavilanes-Terán, I., Moral, R., 2017. Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: suitability of the obtained composts for seedling production. *J. Clean. Prod.* 141, 1349-1358.
- Jarecki, M.K., Chong, C., Voroney, R.P., 2005. Evaluation of compost leachates for plant growth in hydroponic culture. *J. Plant Nutr.* 28, 651–667.
- Koushafar, M., Khoshgoftarmanesh, A.H., Aghili, F., 2011. Natural zeolite reduces salinity and heavy metal availability of compost produced from sewage sludge-rose residue mixture. *J. Residuals Sci. Technol.* 8(1), 9–14.
- Lazcano, C., Arnold, J., Tato, A., Zaller, J.G., Domínguez, J., 2009. Compost and vermicompost as nursery pot components: effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7(4), 944-951.

- Liu, H.T., Gao, D., Chen, T.B., Cai, H., Zheng, G.D., 2014. Improvement of salinity in sewage sludge compost prior to its utilization as nursery substrate. *Journal of the Air & Waste Management Association* 64(5), 546-551.
- Mazuela, P., Salas, M.C., Urrestarazu, M., 2005. Vegetable waste compost as substrate for melon. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 1557-1572.
- Medina, E., Paredes, C., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Moral R., 2009. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresour. Technol.* 100, 4227–4232.
- Moral, R., Paredes, C., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Bustamante, M.A., 2013. Challenges of composting for growing media purposes in Spain and Mediterranean area. *Acta Hortic.* 1013, 25–40.
- Morales, A.B., Ros, M., Ayuso, L.M., Bustamante, M.A., Moral, R., Pascual, J.A., 2017. Agroindustrial composts to reduce the use of peat and fungicides in the cultivation of muskmelon seedlings. *J. Sci. Food Agric.* 97 (3), 875–881.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Maquieira, A., Noguera, V., 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as a container medium. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34, 593-605.
- Pérez-Murcia, M.D., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., 2006. Used of composted sewage sludge in growth media for broccoli. *Bioresour. Technol.* 97, 123-130.
- Restrepo, A.P., Medina, E., Pérez-Espinosa, A., Agulló, E., Bustamante, M.A., Mininni, C., Bernal, M.P., and Moral, R., 2013. Substitution of peat in horticultural seedlings: suitability of digestate-derived compost from cattle manure and maize silage codigestion. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 44, 668–677.
- Rinaldi, S., De Lucia, B., Salvati, L., Rea, E., 2011. Understanding complexity in the response of ornamental rosemary to different substrates: A multivariate analysis. *Sci. Hortic.* 176, 218–224.
- Sáez, J.A., Belda, R.M., Bernal, M.P., Fornes, F., 2016. Biochar improves agro-environmental aspects of pig slurry compost as a substrate for crops with energy and remediation uses. *Industrial Crops and Products* 94, 97-106.

- Sáez, J.A., Clemente, R., Bustamante, M.A., Yañez, D., Bernal, M.P., 2017. Evaluation of the slurry management strategy and integration of the composting technology in a pig farm- Agronomical and environmental implications. *J. Environ. Manage.* 192, 57–67.
- Santos, A., Bustamante, M.A., Tortosa, G., Moral, R., Bernal, M.P., 2016. Gaseous emissions and process development during composting of pig slurry: The influence of the proportion of cotton gin waste. *Journal of Cleaner Production* 112, 81-90.
- Scheuerell, S., Mahaffee, W., 2002. Compost tea: principles and prospects for plant disease control. *Compost Sci. Util.* 31, 3.
- Stirk, W.A., Arthur, G.D., Lourens, A.F., Novák, O., Strnad, M., van Staden, J., 2004. Changes in cytokinin and auxin concentrations in seaweed concentrates when stored at an elevated temperature. *J. Appl. Phycol.* 16, 31–39.
- Tejada, M., González, J.L., Hernández, M.T., García, C., 2008. Agricultural use of leachates obtained from two different vermicomposting processes. *Bioresour. Technol.* 29, 6228–6232.
- Tittarelli, F., Rea, E., Verrastro, V., Pascual, J.A., Canali, S., Ceglie, F.G., Trinchera, A., Rivera, C.M., 2009. Compost-based nursery substrates: effect of peat substitution on organic melon seedlings. *Compost Sci. Util.* 17(4), 220–228.

Table 1. Proportions of the raw materials in the composts and main characteristics of the composting process.

	M1	M2	M3	D1	D2
<i>Initial mixture composition</i>					
PS (% fw)	87	-	75	-	-
SGM (% fw)	-	85	-	-	-
CD (% fw)	-	-	-	90	-
PD (% fw)	-	-	-	-	90
CW (% fw)	13	-	25	-	-
GC (% fw)	-	8	-	-	-
WS (% fw)	-	7	-	-	-
VP (% fw)	-	-	-	10	-
MS (% fw)	-	-	-	-	10
<i>Composting development</i>					
Duration bio-oxidative phase (days)	103	88	146	95	132
Composting system used	Static pile (Rutgers)	Turning	Turning	Static pile (Rutgers)	Turning
Number of turnings	2	5	5	2	5

PS: solid fraction of pig slurry; SGM: mixture (50:50) of sheep and goat manure; CD: solid fraction of anaerobic cattle manure digestate; PD: solid fraction of anaerobic pig slurry digestate; CW: cotton gin waste; GC: grass clippings; WS: wheat straw; VP: vine shoot pruning; MS: maize straw.

Table 2. Main physico-chemical and chemical properties of the original composts (M1, M2, M3, D1 and D2) and after the washing treatment (LM1, LM2, LM3, LD1 and LD2).

	M1	LM1	M2	LM2	M3	LM3	D1	LD1	D2	LD2
pH	6.49±0.00	6.80±0.00	7.76±0.01	8.05±0.04	7.49±0.00	7.52±0.01	6.88±0.02	6.64±0.01	5.72±0.01	6.03±0.01
EC (dS/m)	10.5±0.8	6.23±0.04	2.74±0.00	2.39±0.02	6.42±0.07	4.69±0.15	8.21±0.05	6.04±0.05	8.93±0.04	6.14±0.14
OM (%)	57.0±1.5	59.1±1.2	62.1±0.9	56.5±0.5	59.7±0.3	55.7±1.5	70.2±0.2	70.2±0.9	51.1±0.05	48.4±0.2
TOC (%)	37.3±0.6	30.2±0.3	34.2±0.1	30.1±0.0	33.0±0.1	28.8±0.8	39.4±0.5	34.6±0.4	29.8±0.4	24.7±0.1
TN (%)	4.20±0.40	3.33±0.12	3.18±0.23	2.70±0.01	3.35±0.31	2.81±0.01	3.72±0.13	2.90±0.03	3.09±0.10	2.60±0.07
C/N ratio	8.9±0.1	9.07±0.06	10.7±0.1	11.1±0.0	9.86±0.05	10.2±0.1	10.6±0.1	11.9±0.1	9.63±0.0	9.50±0.1
TP (g kg ⁻¹)	15.9±0.2	15.7±0.2	12.1±0.5	10.1±0.1	27.8±2.3	22.5±1.5	6.95±0.14	6.58±0.18	32.2±1.2	31.1±0.2
TK (g kg ⁻¹)	37.3±0.0	21.5±0.1	8.73±0.02	8.50±0.01	25.4±0.2	15.0±0.0	16.4±0.1	13.7±0.1	10.5±0.0	7.99±0.13
TNa (g kg ⁻¹)	13.2±1.1	9.12±0.18	9.90±0.18	7.62±0.52	13.6±1.2	10.4±0.2	5.83±0.53	11.2±0.6	12.9±0.2	9.62±0.16

EC: electrical conductivity; OM: organic matter; TOC: total organic C; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; TK: total potassium; TNa: total sodium. Data values reported as mean value ± standard error. M1: 87% PS + 13% CW; M2: 85% SGM + 8% GC + 7% WS; M3: 75% PS + 25% CW; D1: 90% CD + 10% VP; D2: 90% PD + 10% MS. For the abbreviations of the raw materials, see Table 1.

Table 3. Effect of the different factors considered (compost type (C), proportion in the substrate (P) and pre-treatment (W)) in the main physico-chemical and physical properties of the growing media elaborated.

	pH	EC (dS m ⁻¹)	BD (g cm ⁻³)	TPS (% vol)	AC (% vol)	TWHC (mL L ⁻¹)	Shrinkage (% vol)
<i>Compost origin</i>							
IS ^a	5.2-6.3	< 0.5	≤ 0.4	> 85	20-30	550-800	< 30
Peat	6.5b	0.15a	0.209b	85.1b	36.3b	494a	19.9ab
M1	6.8d	2.60e	0.195ab	87.7c	36.2b	522b	27.8c
M2	7.7e	1.15b	0.309d	81.3a	30.6a	512b	21.3ab
M3	7.6e	2.25d	0.297d	81.7a	31.1a	512b	21.8b
D1	6.7c	2.09c	0.188a	87.6c	35.3b	529b	27.5c
D2	6.3a	3.32f	0.260c	84.3b	31.9a	530b	19.4a
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***
<i>Compost proportion</i>							
0% compost	6.5a	0.15a	0.209a	85.1a	36.3c	494a	19.9a
25% compost	6.8b	1.40b	0.240b	84.4a	32.9a	521bc	23.5b
50% compost	7.0c	2.45c	0.251bc	84.7a	34.3b	509ab	22.8b
75% compost	7.2d	3.01d	0.258d	84.5a	31.8a	533c	24.4b
ANOVA	***	***	***	<i>n.s.</i>	***	***	***
<i>Pre-treatment</i>							
Without washing	6.9a	2.6a	0.266b	83.6a	35.4b	488a	22.9a
With washing	7.1b	1.8b	0.230a	85.6b	30.7a	554b	23.9b
ANOVA	***	***	***	***	***	***	*
<i>Interactions among the factors</i>							
C x P	***	***	***	***	***	***	***
C x W	***	***	***	***	***	***	***
P x W	**	***	***	***	<i>n.s.</i>	***	**
C x P x W	**	***	***	***	***	***	*

^aIS: ideal substrate (Abad et al., 2001; Noguera et al., 2003). EC: electrical conductivity; BD: bulk density; TPS: total pore space; AC: air capacity; TWHC: total water holding capacity. M1: 87% PS + 13% CW; M2: 85% SGM + 8% GC + 7% WS; M3: 75% PS + 25% CW; D1: 90% CD + 10% VP; D2: 90% PD + 10% MS. For the abbreviations of the raw materials, see Table 1. *n.s.*: not significant P>0.05; *, **, ***: significant at P<0.05, 0.01 and 0.001, respectively. For each parameter and factor, values in columns followed by the same letter are not statistically significant according to the Tukey-b test.

Table 4. Effect of the different factors considered (compost type (C), proportion in the substrate (P) and pre-treatment (W)) in the main chemical characteristics of the growing media elaborated.

	OM (%)	TOC (%)	TN (%)	WS Na (g L ⁻¹)	WS K (g L ⁻¹)	WS P (g L ⁻¹)	Chloride (g L ⁻¹)	Sulfate (g L ⁻¹)	Nitrate (g L ⁻¹)
<i>Compost origin</i>									
Peat	92.1e	49.1e	1.1a	0.02a	0.08a	0.02a	0.01a	0.10a	0.05a
M1	65.2c	41.9c	3.1d	0.52d	2.55e	0.44e	0.71e	1.30e	5.42d
M2	63.0b	41.0c	2.8c	0.38b	0.94b	0.09c	0.47c	0.56b	1.19b
M3	65.7c	39.4b	2.7c	0.60e	2.15d	0.41d	0.70e	0.76c	1.27b
D1	73.7d	45.5d	2.7c	0.46c	1.21c	0.06b	0.35b	1.32e	2.28c
D2	60.0a	33.6a	2.4b	0.65f	1.12c	0.49f	0.59d	1.09d	5.66d
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***	***	***
<i>Compost proportion</i>									
0% compost	92.1d	49.1d	1.1a	0.02a	0.08a	0.02a	0.01a	0.10a	0.05a
25% compost	73.7c	44.2c	2.3b	0.32b	0.96b	0.22b	0.31b	0.48b	1.69b
50% compost	63.7b	39.8b	2.8c	0.50c	1.62c	0.31c	0.60c	1.15c	3.13c
75% compost	59.1a	36.8a	3.1d	0.75d	2.20d	0.37d	0.78d	1.38d	4.68d
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***	***	***
<i>Pre-treatment</i>									
Without washing	66.7a	40.1a	2.6a	0.60b	1.83b	0.30b	0.69b	1.00b	3.51b
With washing	66.0b	41.1b	2.7a	0.41a	1.25a	0.28a	0.39a	0.95a	2.60a
ANOVA	**	***	<i>n.s.</i>	***	***	***	***	***	***
<i>Interactions among the factors</i>									
<i>C x P</i>	***	***	***	***	***	***	***	***	***
<i>C x W</i>	***	**	***	***	***	***	***	***	***
<i>P x W</i>	<i>n.s.</i>	***	<i>n.s.</i>	***	***	***	***	<i>n.s.</i>	***
<i>C x P x W</i>	***	**	***	***	***	***	***	***	***

OM: total organic matter; TOC: total organic carbon; TN: total nitrogen; WS: water-soluble. *n.s.*: not significant $P > 0.05$; *, **, ***: significant at $P < 0.05$, 0.01 and 0.001, respectively. For each parameter and factor, values in columns followed by the same letter are not statistically significant according to the Tukey-b test. M1: 87% PS + 13% CW; M2: 85% SGM + 8% GC + 7% WS; M3: 75% PS + 25% CW; D1: 90% CD + 10% VP; D2: 90% PD + 10% MS. For the abbreviations of the compost raw materials, see Table 1.

Table 5. Effect of the different factors considered (compost type (C), proportion in the substrate (P) and pre-treatment (W)) in the germination and morphological parameters of the pepper seedlings.

	G (%)	H (cm)	AFW (g)	ADW (g)	RFW (g)	RDW (g)
<i>Compost origin</i>						
Peat	89.4c	8.6d	1.98b	0.22ab	0.54a	0.06a
M1	84.9bc	7.8bc	1.95b	0.22b	0.79b	0.07b
M2	89.8c	8.4cd	2.04b	0.22b	0.80bc	0.07b
M3	69.8a	7.7b	1.98b	0.22ab	0.89c	0.08b
D1	87.1c	8.6d	1.99b	0.23b	0.87bc	0.08b
D2	80.6b	6.9a	1.78a	0.20a	0.86bc	0.08b
ANOVA	***	***	***	***	***	*
<i>Compost proportion</i>						
0% compost	89.4b	8.6bc	1.99bc	0.22a	0.54a	0.06a
25% compost	86.3b	8.8c	2.15c	0.24b	0.91c	0.08b
50% compost	85.1b	8.0b	1.92ab	0.22a	0.82bc	0.07b
75% compost	75.9a	6.8a	1.78a	0.21a	0.81b	0.07b
ANOVA	***	***	***	***	***	**
<i>Pre-treatment</i>						
Without washing	80.5a	7.8a	1.81a	0.20a	0.77a	0.07a
With washing	84.5b	8.0b	2.10b	0.23b	0.90b	0.08b
ANOVA	***	***	***	***	***	**
<i>Interactions among the factors</i>						
<i>C x P</i>	***	***	***	***	***	**
<i>C x W</i>	***	***	***	***	**	**
<i>P x W</i>	<i>n.s.</i>	**	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>
<i>C x P x W</i>	***	***	***	***	*	**

G: germination; H: shoot height; AFW: aerial fresh weight; ADW: aerial dry weight; RFW: root fresh weight; RDW: root dry weight. M1: 87% PS + 13% CW; M2: 85% SGM + 8% GC + 7% WS; M3: 75% PS + 25% CW; D1: 90% CD + 10% VP; D2: 90% PD + 10% MS. For the abbreviations of the compost raw materials, see Table 1.

Table 6. Contribution (%) of the different parameters to each eigenvalue considered in the PCA analysis.

Parameters	F1	F2
WSNa	8.379	0.310
EC	7.953	0.572
Chloride	7.526	0.002
TNa	6.994	0.111
OM	6.176	4.853
WSK	5.840	0.002
TOC	5.835	3.207
AFW	5.829	8.163
H	5.790	1.754
ADW	5.180	8.826
Nitrate	5.119	0.453
CN	5.010	7.837
WSP	4.758	3.852
Sulfate	4.409	0.002
TN	4.371	1.354
TP	4.045	6.251
TK	3.697	2.127
RFW	1.635	23.962
RDW	1.451	26.363

For abbreviations, see Tables 2, 4 and 5.

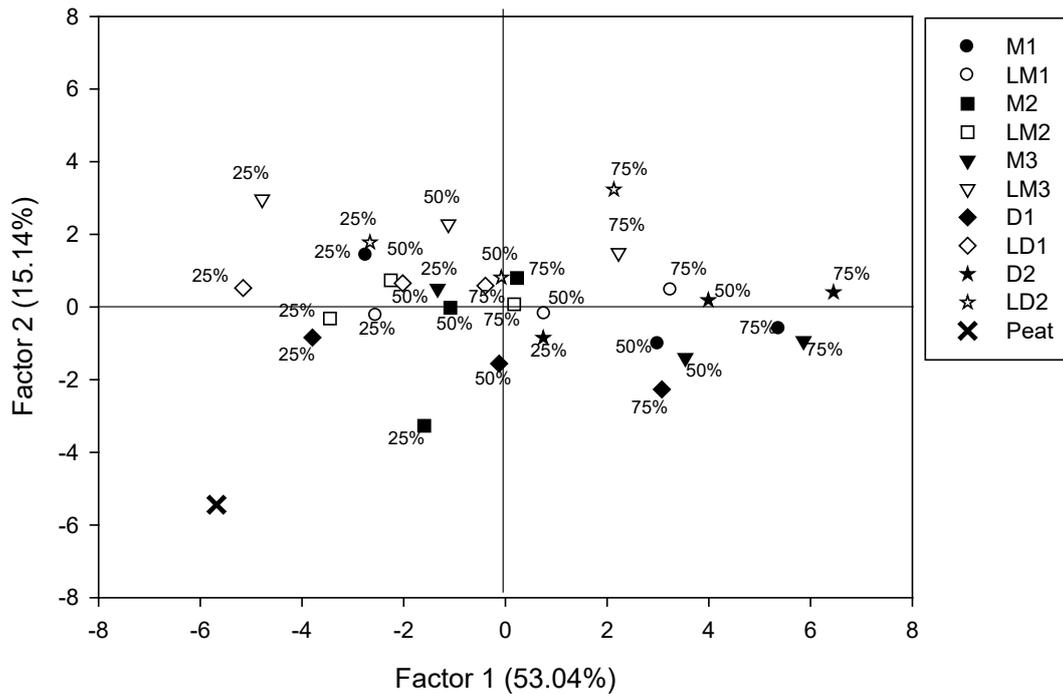


Figure 1. Plot of the first and second factors extracted from principal component analysis of the parameters studied in the growing media and in the pepper seedlings. M1: 87% PS + 13% CW; M2: 85% SGM + 8% GC + 7% WS; M3: 75% PS + 25% CW; D1: 90% CD + 10% VP; D2: 90% PD + 10% MS. PS: solid fraction of pig slurry; CW: cotton gin waste; SGM: mixture (50:50) of sheep and goat manure; GC: grass clippings; WS: wheat straw; CD: solid fraction of anaerobic cattle manure digestate; PD: solid fraction of anaerobic pig slurry digestate; VP: vine shoot pruning; MS: maize straw.

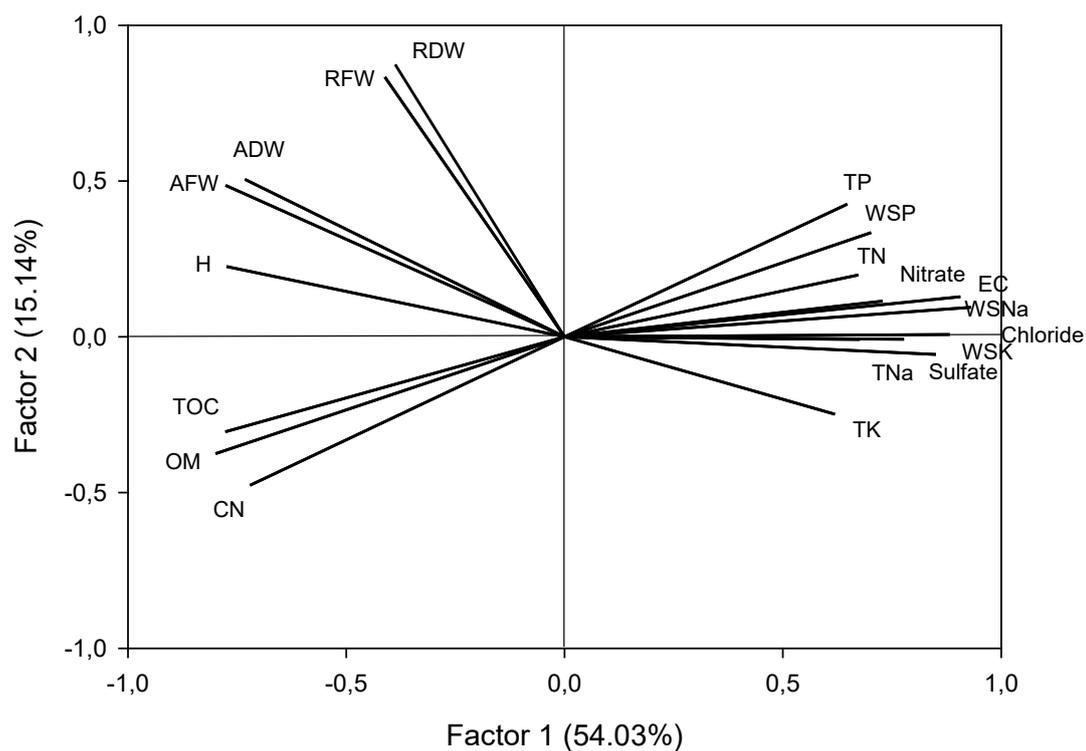


Figure 2. Contribution to each factor of the parameters considered in the PCA analysis. WSK: water-soluble potassium; WSNa: water-soluble sodium; EC: electrical conductivity; OM: organic matter; TOC: total organic C; CN: carbon to nitrogen ratio; TN: total nitrogen; WSP: water-soluble phosphorus; TP: total phosphorus; TK: total potassium; TNa: total sodium; H: shoot height; AFW: aerial fresh weight; ADW: aerial dry weight; RFW: root fresh weight; RDW: root dry weight.



3.2. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF ALTERNATIVE PALM-DERIVED SUBSTRATES FOR SEEDLING PRODUCTION. 2022

Gomis, M. P.; Pérez-Murcia, M. D.; Barber, X; Martínez-Sabater, E.; Moral, R.; Bustamante, M.A. *Agronomy* (Q1, IF: 3.417 (JCR 2020)). <https://doi.org/10.3390/agronomy12061377>



Abstract

The constraints associated with peat use in horticulture has led to a search for alternative materials for their use as growing media. The organic materials derived from palm trees (composted or not) can constitute an alternative due to their ligneous and fibrous character, similar to coir fiber. This work studies the feasibility of using several palm-tree-derived (*Phoenix dactylifera* L.) organic materials as growing media ingredients for the transplant production of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Senna). For this, the following substrates were studied: five mixtures for each palm-derived material (palm trunks and leaves and composts derived from palm trunk and leaves), in the proportions of 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% by volume, mixed with coir fiber. Coir fiber at the proportion 100% was used as the control treatment. Physical, physico-chemical, and chemical analyses were conducted on the substrates, and the germination and morphological parameters of the seedlings were examined. Chemometric tools, such as random forest (RF) and hierarchical cluster analysis (HCA) were also used to evaluate the data obtained. The type and proportion of material used in the growing media principally affected the parameters studied in the lettuce seedlings. The substrates with a percentage of compost lower than 60% showed behavior closer to that observed in the growing media with 100% coir fiber and with the mixture of coir fiber and palm leaves or trunks at all proportions.

Keywords: compost; *Phoenix dactylifera* L.; horticultural crops; coir fibre; growing media; chemometric tools.

1. Introduction

The maintenance activities of palm species (*Phoenix dactylifera*, *Phoenix canariensis*, *Washingtonia robusta*) generate several residue stream fluxes with an urban and periurban typology, which are not associated to the usual management methods of the agricultural sector. This type of green waste constitutes new residues that municipalities are not still prepared to manage in an integrated and sustainable strategy with several non-standardized options and individual approaches due to the lack of specific European guidelines on these issues. The management of this organic waste usually ends in controlled or uncontrolled burning, principally because of the characteristics of this waste (nature and density) and the absence of pre-treatment and concrete management installations, which implies the loss of the resources contained in them. The burning of organic waste generates different impacts on the environment, especially the emission of GHG gases [1].

Palm orchards constitute one of the rising environmental landscapes in Europe, with a regional specificity; Spain, France, Italy, Greece, and Turkey having more than 95% of the palm tree area in Europe [2,3]. Pruning of palm represents a huge amount of biomass per hectare in a yearly average. Calculations of the number and extension of palm species in Europe is a goal due the lack of integrated information, but between 20 and 100 million *Phoenix* species and 10–20 million *Washingtonia robusta* can be estimated in Europe. Considering an average pruning production of 5 kg per year, an estimate is obtained of 500.000 tons of pruning green residue production to be managed [2]. Thus, palm-pruning waste constitutes an important amount of green waste, such as leaves and palm fiber, whose management is an environmental problem [4].

Leaf horticulture, and in particular lettuce production, is a huge sector in Europe. In Spain, around 33,000 ha were planted in 2013, using 2300 million plants and 46,000 m³ of substrate for seedlings, representing about 20% of total substrate consumption in horticulture, with lettuce being among the top seven most produced horticultural crops [5]. The environmental impacts associated to peat exploitation and its nature as a non-renewable resource have increased the search for alternative materials as growing media [6,7]. Thus, raw fiber materials such as coir fiber (CF) are increasingly used in seedlings and soilless cropping [8]. Coir fiber had, in general, similar to other fiber materials, several good properties for its use as a substrate or substrate components, such as high aeration capacity, low bulk density, and a moderate cation exchange capacity, desirable for most growing media [8]. However, these materials also show several disadvantages, such as a lesser stability, lower water holding capacity, and lower contents of micronutrients compared to peat. Especially, in the case of coir fiber, the higher salinity, the great variability in its physical and chemical characteristics, associated to the source and processing [8] and its production, located in Asian countries, can constitute several drawbacks for its use in Mediterranean countries. Thus, a search for indigenous fibers as an alternative media is still ongoing. Moral et al. [9] reported the feasibility of palm biomass as a raw material for soilless uses. Fornes et al. [10] observed the critical importance of size distribution of constituent particles compared to differences in microstructure and porosity characteristics of coconut coir dust to explain the differential physical properties. Moreover, a great number of studies have been conducted using different organic wastes, especially after composting, reporting an important variability in the results obtained, which depended on the plant species used, the characteristics of the materials, and their proportions in the mixture [7]. Fiber composts, as composts in general, can have physical, physico-chemical, and chemical properties similar to peat that make them suitable peat substitutes. However, these organic

materials also can show limiting properties and even potential hazards such as high salinity, phytotoxicity, and/or the presence of contaminants (e.g., heavy met-als) [5,7,8]. However, the development of co-composting strategies oriented to quality is-sues can produce a new generation of compost ready to substitute peat or FC to an in-creasing degree. Thus, the proportion of the ingredients (in this case fiber raw materials and/or compost) in the formulation of the substrates will also have significant importance in the final properties of the designed substrate, since plant response to different growing media mainly depends on the tested species, but also on the type and proportion of the materials used [7].

Therefore, this work aims to study the feasibility of using different palm tree (*Phoenix dactylifera* L.) derived materials (raw or composted) as growing medium ingredients to-gether with coir fiber in binary mixtures for the transplant production of lettuce (*Lactuca sativa* var. Senna). Additionally, innovative chemometric tools, such as random forest (RF) and hierarchical cluster analysis (HCA) were conducted to identify the optimal properties to predict changes in the growing media according to their composition, as well as to classify the growing media to establish the best combination/s.

2. Materials and methods

2.1 Experimental design

Four palm-derived materials were used as components of the growing media stud-ied. These materials were the following: palm trunks (PT) and palm leaves (PL), previous-ly normalized to 0.5 cm in diameter; and two composts derived from this type of waste, LC and TC, derived from palm leaves and trunks, respectively. The main properties of these materials are shown in Table 1. The composition of these composts (on a fresh mat-ter basis) was the following: LC, 72.3% palm leaves + 27.7% sewage sludge and TC, 52.3% palm trunk + 47.7% sewage sludge. Sewage sludge samples were collected after the treat-ment of wastewater using an aerobic biological process with later stabilization with an-aerobic digestion and dehydration using band filters. The composts were prepared using the windrow composting system; more detailed information about the process can be found elsewhere [1]. The composts used had a suitable degree of maturity, in accordance with several chemical and biological criteria [1].

Table 1. Physico-chemical and chemical properties of the ingredients used in the growing media.

Parameter	Coir fibre	PL	PT	LC	TC
Bulk density (g cm ⁻³)	0.072	0.057	0.195	0.306	0.200
pH	6.7	6.3	7.3	6.8	6.1
EC (dS m ⁻¹)	0.33	1.21	2.61	6.51	5.57
OM (%)	93.3	91.9	85.2	46.3	60.1
TOC (%)	43.4	43.9	32.4	18.8	26.4
TN (%)	0.76	1.34	1.27	1.87	3.35
C/N ratio	57.1	32.8	25.5	10.1	7.88
WSK (mg L ⁻¹)	357	1347	2694	3046	3575
WSNa (mg L ⁻¹)	268	397	818	1636	1649
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	5.2	4.6	201	6730	13718
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	199	1057	2387	4011	2898
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	60.4	236	1074	3781	3765

EC: electrical conductivity; OM: organic matter; TOC: total organic carbon; TN: total nitrogen; WSK: water-soluble potassium; WSNa: water-soluble sodium.

PL: palm leaves; PT: palm trunk; LC: palm leaves derived compost; TC: palm trunk derived compost. LC: 72.3% palm leaves + 27.7% sewage sludge; TC: 52.3% palm trunk + 47.7% sewage sludge.

Twenty-one growing media were prepared using the previous materials (PT, PL, LC, and TC) mixed with coir fiber as the diluent in the proportions of 20%, 40%, 60%, and 100% by volume of organic material. A control of coir fiber using ordinary commercial coir, only washed with water (100% coir fiber) was also established. The experiment was conducted at the commercial nursery in the southeast of Spain (Semilleros Baby Plant S.L., Orihuela, Alicante, 38°03'53.4" N 1°03'15.1" W).

The vegetable species selected (lettuce, *Lactuca sativa* cv. Senna) were raised in foamed polystyrene plug trays with 322 inverted pyramid cells (one seed per cell). The substrates were settled in a randomized plot design with three replicates per treatment (one tray per replication). Germination was carried out during 3 days in an air-conditioned chamber at 18 ± 1 °C and 85% relative humidity, determining the percentage of germination after 72 h from seeding by counting the number of germinated seeds. Then, the trays were established in a greenhouse with an automatized climate control system (Climatec©, Phoenix, AZ, USA). When the seedlings reached approximately the commercial transplanting size, on day 45 after seeding, 10 seedlings were randomly harvested from each plug tray, avoiding those placed next to the edges. Shoot height and fresh weight were determined prior to washing and drying the seedlings at 60 °C in an air-forced oven for 72 h to calculate dry weight.

2.2 Analytical methods

In the growing media and initial substrate components (PL, PT, LC, and LC and TC), the physico-chemical parameters, electrical conductivity (EC), and pH were determined in water-soluble extract (1:5, v/v) according to the regulations EN 13038 [11] and 12 EN 13037 [12], respectively. Dry matter was evaluated by drying at 105 °C for 12 h, and organic matter (OM) by loss on ignition at 430 °C for 24 h [13]. Total fractions of organic carbon (TOC) and nitrogen (TN) were determined by dry combustion at 950 °C with a Leco TruSpec C–N Elemental Analyzer (Leco Corp., St. Joseph, MI, USA). In the water-soluble extract (1:5, v:v), water-soluble fractions of Na and K were determined by flame photometry (Jenway PFP7 Flame Photometer, Jenway Ltd., Felsted, UK) and nitrates, sulphates, and chlorides by ion chromatography (ICS-1000 Dionex, Sunnyvale, CA, USA). In the growing media, the physical properties were studied following the methods detailed by Bustamante et al. [13]. All the analyses were carried out in triplicate.

2.3 Statistical methods

The Univariate Linear General Model (LGM) with a post-hoc contrast using the Tukey test was used to determine if there was an interaction effect between the independent variables studied (type of substrate and compost proportion in the mixture) on each dependent variable (the parameters analyzed). This analysis allows to evaluate the effect of the type and proportion of the materials incorporated in the growing media. This statistical analysis was conducted using the IBM SPSS Statistics v. 27.0 statistical software package (IBM Corp. Released 2020. Armonk, NY, USA).

The chemometric analyses were conducted using random forest (RF) and hierarchical cluster analysis (HCA). RF [14] is an algorithm comprising a group of basic classification models, by using the bootstrap sampling method: multiple samples are eliminated from the original sample, and decision tree modeling is completed for every sample. After the preparation of the training set, each tree casts a unit vote for the most popular class, and the final prediction class is based on the maximum votes rendered by individual predictions [15]. HCA is a technique that studies the classification of samples in groups and among groups depicting a hierarchy [16]. The clusters are formed by samples considered similar according to the recognized pattern. The results are presented in the form of dendograms, which allow visualization of the distances between samples [17]. The R software [18] was used to perform the multivariate analysis. Package “randomForest” [19] and “randomForestExplainer” [20] were used to obtain the multi-way importance plot. The Ward distance was used to obtain the hierarchical cluster using the stats package.

3. Results and Discussion

3.1. Physico-chemical and physical characteristics of the growing media

Table 2 shows the effect of the type and proportion of the organic materials used as ingredients in the substrates. Thus, the type of ingredient has a significant effect on both the pH and electrical conductivity (EC) values.

Table 2. Effect of the type and proportion of the organic materials considered for the principal physico-chemical and physical parameters of the growing media.

	pH	EC (dS m ⁻¹)	TPS (% vol)	BD (g cm ³)	TWHC (mL L ⁻¹)	Shrinkage (% vol)	AC (% vol)
Optimal values ¹	5.3–6.5	≤0.5	>85	≤0.4	550–800	<30	20–30
<i>Component type</i>							
Coir fiber	6.71b ± 0.16	0.33a ± 0.03	95.2c ± 0.6	0.072a ± 0.001	520c ± 9	14.3b ± 0.4	43.2b ± 0.9
PL	6.20a ± 0.20	1.03b ± 0.22	95.2c ± 0.9	0.072a ± 0.012	299a ± 101	9.9a ± 3.2	65.2d ± 10.8
PT	7.30c ± 0.23	1.82c ± 0.61	90.6b ± 2.3	0.146b ± 0.036	434b ± 34	10.4a ± 2.0	47.2c ± 1.4
LC	6.16a ± 0.20	4.67c ± 1.57	91.1b ± 2.0	0.153c ± 0.037	427b ± 19	17.8c ± 0.9	48.5c ± 0.5
TC	6.75b ± 0.20	4.42c ± 1.67	88.1a ± 3.3	0.221d ± 0.070	597d ± 67	20.6d ± 3.6	28.4a ± 10.0
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***
<i>Component proportion</i>							
0%	6.71a ± 0.16	0.33a ± 0.03	95.2f ± 0.6	0.072a ± 0.001	520d ± 9	14.3a ± 0.4	43.2a ± 0.9
20%	6.67a ± 0.59	1.55b ± 0.77	93.6e ± 0.8	0.102b ± 0.015	463c ± 28	15.9a ± 2.3	47.3b ± 3.3
40%	6.57a ± 0.52	2.29c ± 1.22	92.5d ± 1.9	0.123c ± 0.036	457c ± 70	14.2a ± 3.5	46.8b ± 8.8
60%	6.58a ± 0.50	3.15d ± 1.76	91.0c ± 2.7	0.151d ± 0.054	444b ± 113	14.4a ± 5.3	46.7b ± 13.8
80%	6.58a ± 0.49	3.96e ± 2.34	89.9b ± 3.7	0.175e ± 0.078	433b ± 151	14.6a ± 6.4	46.7b ± 18.7
100%	6.61a ± 0.51	3.98e ± 2.29	89.1a ± 4.7	0.189f ± 0.092	399a ± 190	14.2a ± 7.9	49.3c ± 23.5
ANOVA	n.s.	***	***	***	***	n.s.	***

¹ According to Abad et al. [21] and Noguera et al. [22]. EC: electrical conductivity; TPS: total pore space; BD: bulk density; TWHC: total water holding capacity; AC: air capacity. PL: palm leaves PT: palm trunk; LC: palm-leaf-derived compost; TC: palm-trunk-derived compost. Mean values (n = 20 for the factor component type and n = 16 for the factor component proportion) ± standard deviation. n.s.: not significant p > 0.05; ***: significant at p < 0.001, respectively. Values in columns followed by the same letter for each factor and parameter are not statistically significant according to the Tukey-b test.

The growing media with the materials derived from palm leaves (PL and LC) showed pH values within the optimal range for a growing medium, whereas the other had pH values slightly higher and close to the reference values, except for the growing media with PT. The type of component had a clear influence on the substrate salt content, due to the great differences observed in the electrical conductivity in the initial materials (Table 1) showing composts with the highest values. Thus, only the substrate with 100% coir fiber had lower EC values than the limit value established [21,22], the substrates with PL showing the lowest EC values of all fiber-

or compost-derived substrates. The greatest EC values were found in the substrates prepared using composts (LC and TC), these values being much higher than the EC limit value, due to these materials having the highest EC values, as it has been previously stated. The component proportion in the growing media did not show any effect on the pH values, but influenced the electrical conductivity values, which significantly increased with the percentage of the component in the growing medium, with no significant difference observed between the percentages of 80% and 100%. The incorporation of the raw materials, and especially of composts, which showed high EC values, to coir fiber that had very low EC values ($<0.5 \text{ dS m}^{-1}$) (Table 1) clearly suggest an increase in the salinity content of the substrates that was higher with higher presence of each component. Ceglie et al. [7] also reported the same trend in a study of peat substitution using green composts and palm trunk fiber waste, similar to Tittarelli et al. [23] and Ceglie et al. [24] using green waste composts as substrate components. Bustamante et al. [13] also reported the increase in the substrate salinity with increasing proportions of winery waste composts due to the higher EC values of these materials compared to peat, while Bustamante et al. [25] also observed an increase in EC values with higher proportions of compost in the growing media.

Regarding the physical characteristics studied in the growing media, comparing with the ideal substrate requirements established by Abad et al. [21], the ingredients used for seedling media met most standards, with values within the optimal range for each parameter. Bulk density in all growing media was below the limit value ($\leq 0.4 \text{ g cm}^{-3}$), despite the great differences observed between the values of this parameter among the raw materials and composts (Table 1). Composts showed the highest values, this fact being usually and probably due to the different particle distribution and size compared to the raw materials, as well as the presence of inorganic material in compost that also increases bulk density [7,8]. However, water-holding capacity was critical, with average values lower than the reference range, except for coir fiber and the substrates with compost from palm trunk, being especially low for the growing media with palm leaves (PL) (Table 2). Low values of the water-holding capacity are related to a higher particle size of the materials used, also implying a higher air capacity [8]. Ceglie et al. [7] also reported the opposite behavior, higher capacity for water retention and lower air volume for coir fiber and palm trunk fiber waste, as was observed in our experiment. Bustamante et al. [25] observed a change in the physical properties of the substrates, especially a decrease in air capacity and an increase in total water-holding capacity, when the substrate components were previously washed to reduce salinity, probably due to changes in particle size and pore distribution.

The proportion of the components in the substrates also had a significant effect on the physical properties, except for shrinkage. However, in general, a clear trend was not observed depending on the component percentage, this fact was only observed with the parameters BD and TPS. These properties are inversely correlated in the substrates, since low bulk density is associated to high free pore space [7]. This was in accordance with the results obtained for these properties, since BD increased with the increasing proportion of ingredients in the growing media composition, while TPS decreased with the proportion.

3.2. Chemical characteristics of the growing media

Regarding the effect of the type and proportion of the ingredients in the growing media studied on their chemical properties (Table 3), the substrates prepared using PL and PT showed the highest organic matter (OM) concentrations, similar or slightly lower than coir fibre. This fact is due to the raw materials also having the highest OM contents compared to both composts (Table 1), which is a consequence of the mineralization processes occurring during the composting process.

Table 3. Effect of the type and proportion of the organic materials considered on the principal chemical characteristics of the growing media.

	OM (%)	TN (%)	WSK (mg L ⁻¹)	WSNa (mg L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)
Optimum values ¹			150–249	<115	100–199	960	<180
<i>Component type</i>							
Coir fiber	93.3d ± 0.5	0.76a ± 0.01	357a ± 19	268a ± 16	1.17a ± 0.18	60.4a ± 2.1	199a ± 14
PL	93.2d ± 0.9	1.06c ± 0.19	1239b ± 372	464b ± 95	1.23a ± 0.34	209b ± 28.5	790b ± 196
PT	86.4c ± 2.2	0.99b ± 0.18	1986c ± 639	697c ± 142	22.8a ± 17.9	661c ± 302	1416c ± 686
LC	66.0b ± 7.1	3.05e ± 0.45	2412d ± 869	1024d ± 409	1920c ± 984	3322e ± 714	2034d ± 828
TC	54.6a ± 8.2	1.75d ± 0.17	2825e ± 858	1644e ± 362	1017b ± 653	2792d ± 892	2110d ± 1255
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***
<i>Component proportion</i>							
0%	93.3e ± 0.5	0.76a ± 0.01	357a ± 19	268a ± 16	1.17a ± 0.18	60.4a ± 2.1	199a ± 14
20%	81.8d ± 10.9	1.35b ± 0.69	1190b ± 376	717b ± 461	216b ± 129	1003b ± 831	667b ± 193
40%	77.7c ± 14.7	1.56c ± 0.74	1671c ± 549	809bc ± 344	457c ± 435	1687c ± 1489	1124c ± 311
60%	73.7b ± 16.5	1.79d ± 0.97	2237d ± 606	916c ± 412	698d ± 494	1818c ± 1500	1492d ± 566
80%	71.2a ± 19.1	1.89e ± 1.01	2665e ± 938	1125d ± 675	1048e ± 837	2007d ± 1575	2067e ± 920
100%	70.9a ± 19.1	1.96e ± 0.87	2813e ± 862	1221d ± 562	1282f ± 975	2214e ± 1649	2588f ± 1128
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***

¹According to Abad et al. [21] and Noguera et al. [22]. OM: organic matter; TN: total nitrogen; WSK: water-soluble potassium; WSNa: water-soluble sodium. PL: palm leaves; PT: palm trunk; LC: palm-leaf-derived compost; TC: palm-trunk-derived compost. Mean values (n = 20 for the factor component type and n = 16

for the factor component proportion) \pm standard deviation ***: significant at $p < 0.001$. Values in columns followed by the same letter for each factor and parameter are not statistically significant according to the Tukey-b test.

On the other hand, the substrates with LC in their composition had the greatest concentration of total nitrogen (TN), much higher than the substrate with 100% coir fibre. The increasing proportion of ingredients in the growing media decreased OM concentrations, finding the opposite trend for TN. The OM decrease with the raising ingredient proportion could be probably due to the higher mineralization grade of several of the components used, especially composts, which is also shown in the initial lowest OM concentrations compared to the raw materials (Table 1). Bustamante et al. [25] reported the same trends in a study using composts from livestock waste as substrate components.

The type of ingredient and their respective proportion in the substrate also showed a significant effect on the water-soluble ions (Table 3). For all the ions studied, the highest concentrations were found in the growing media composed by LC and TC, coinciding with the highest electrical conductivity values found in the substrates with these ingredients, respectively. The increasing proportion of the components in the substrates also increased the concentrations of the water-soluble ions considered (K , Na , NO_3^- -N, SO_4^{2-} , and Cl^-), exceeding the limit values established in previous studies [21,26]. This fact could be due to the higher concentrations, especially of NO_3^- -N, SO_4^{2-} , and Cl^- , observed in the composts used, probably as a consequence of the use of sewage sludge together with the corresponding palm fiber material to prepare the composts. Carlile et al. [8] also reported high concentrations of these ions in substrates prepared with composts from sewage sludge and municipal solid waste.

Only the substrates prepared with coir fiber, PL, and PT showed suitable concentrations of NO_3^- -N and SO_4^{2-} , with values within the adequate range for an optimal substrate [21,26]. Medina et al. [27] also reported a significant increase in the ions from the water-soluble extract when increasing the proportion of spent-mushroom substrates as components in growing media, due to the salt contents of this waste.

3.3. Germination and morphological parameters of the lettuce seedlings

Table 4 shows the plant response (germination, shoot height, aerial and root fresh and dry weight) with the different substrates. The seedlings grown in the substrates with coir fiber, PL,

and PT showed the highest germination percentages, these values being statistically similar among them. The proportion of the ingredients also had a statistically significant effect, decaying the germination with the proportion of component in the substrate, which can be explained by the increasing concentrations of water-soluble ions found, also reflected in the increasing electrical conductivity values. Moreover, the growing media with LC and TC in their composition had the lowest germination percentages, coinciding with the higher salinity contents observed in these substrates and the high contents of phytotoxic elements such as Na and Cl⁻, which are usually present in high concentrations in compost derived from sewage sludge and municipal solid waste [8]. This behavior has also been reported by different studies using palm fiber waste and/or composts from green waste [7] and from livestock manure [25] as substrate components. Medina y col. [27] found a significant decrease in the seed germination for the substrates with the highest proportions of spent-mushroom substrates as components in growing media, due to the high salinity of these materials, which produced an increase in water-soluble ions. Concerning the morphological parameters (Table 4), the greatest values of shoot height were observed in the substrates with coir fiber and a proportion of 20% of ingredients (80% coir fiber). In general, shoot height decreased with the decreasing proportion of components, only showing higher shoot height at 20% of ingredients than 0%, probably due to the incorporation of nutrients, such as N and P, with the organic waste and/or composts, as it has been reported in previous works [13,25,28].

Table 4. Effect of the type and proportion of the organic materials considered in the germination and morphological characteristics of lettuce seedlings.

	GI (%)	H (cm)	AFW (g)	ADW (g)	RFW (g)	RDW (g)
<i>Component type</i>						
Coir fibre	99.5b ± 0.2	2.70e ± 0.05	0.29c ± 0.01	0.029c ± 0.001	0.283e ± 0.008	0.029e ± 0.000
PL	99.1b ± 1.0	1.18a ± 0.37	0.07a ± 0.03	0.006a ± 0.003	0.063a ± 0.027	0.007a ± 0.002
PT	97.2b ± 3.6	1.80b ± 0.37	0.24b ± 0.04	0.024b ± 0.005	0.207b ± 0.041	0.023d ± 0.004
LC	78.3a ± 31.1	2.59d ± 1.21	0.51d ± 0.28	0.033d ± 0.018	0.266d ± 0.140	0.022c ± 0.012
TC	77.4a ± 31.4	2.33c ± 0.97	0.44c ± 0.22	0.029c ± 0.017	0.222c ± 0.112	0.019b ± 0.009
ANOVA	***	***	***	***	***	***
<i>Component proportion</i>						
0%	99.5c ± 0.2	2.70e ± 0.05	0.29b ± 0.01	0.029d ± 0.001	0.283e ± 0.008	0.029e ± 0.000
20%	99.2c ± 1.1	3.01f ± 1.21	0.51d ± 0.36	0.037e ± 0.205	0.280e ± 0.117	0.025d ± 0.009
40%	98.9c ± 1.2	2.42d ± 0.77	0.39c ± 0.24	0.031d ± 0.016	0.257d ± 0.139	0.024d ± 0.012
60%	98.4c ± 1.6	1.87c ± 0.54	0.31b ± 0.19	0.022c ± 0.011	0.190c ± 0.091	0.018c ± 0.008
80%	84.5b ± 14.8	1.42b ± 0.32	0.20a ± 0.10	0.015b ± 0.007	0.134b ± 0.045	0.012b ± 0.005
100%	58.9a ± 39.0	1.15a ± 0.21	0.15a ± 0.07	0.011a ± 0-006	0.085a ± 0.054	0.010a ± 0.007
ANOVA	***	***	***	***	***	***

GI: germination; H: shoot height; AFW: shoot aerial fresh weight; ADW: shoot aerial dry weight; RFW: root fresh weight; RDW: root dry weight. PL: palm leaves; PT: palm trunk; LC: palm leaves derived compost; TC: palm trunk derived compost. LC: 72.3% palm leaves + 27.7% sewage sludge; TC: 52.3% palm trunk + 47.7% sewage sludge. Mean values ($n = 20$ for the factor component type and $n = 16$ for the factor component proportion) \pm standard deviation. ***: significant at $p < 0.001$. Values in columns followed by the same letter for each factor and parameter are not statistically significant according to the Tukey-b test.

Regarding aerial and root fresh and dry weight, the general trend showed a significant effect of the type and percentage of component in the growing media, the substrates with LC and coir fiber showing the highest aerial fresh and dry weight and the greatest root fresh and dry weight, respectively (Table 4). The decreasing proportion of the components in the substrates produced an increase in the values of these morphological parameters, except for the aerial fresh and dry weight, with higher values for the proportion of 20% than 0% of ingredients. Bustamante y col. [25] found this latter effect, with the corresponding proportions of 25% and 0% of compost, probably due to the incorporation of nutrients with the ingredients.

3.4. Chemometric analyses: Random Forest (RF) and hierarchical cluster analysis (HCA)

The plot corresponding to the random forest analysis of the variables determined are shown in Figure 1.

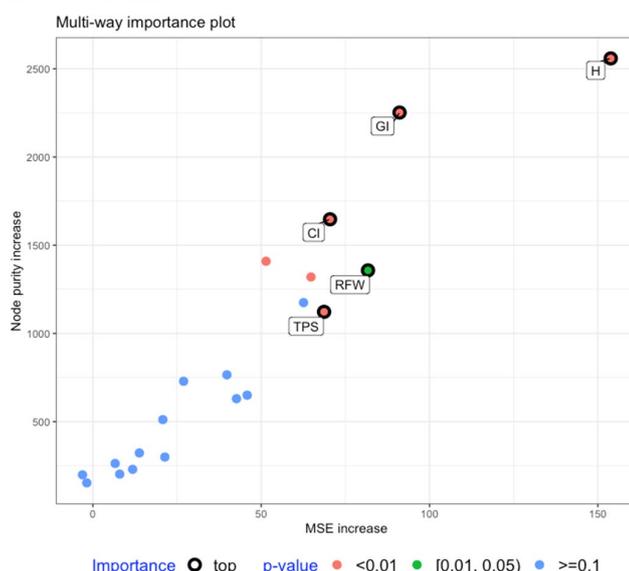


Figure 1. Multiway importance plot of all the parameters studied by the random forest (RF) analysis. MSE: mean squared error. CI: chloride; GI: germination; H: shoot height; RFW: root fresh weight; TPS: total pore

space. The red points correspond to WSK (water-soluble K) and ADW (aerial dry weight). The marked circles correspond to the most relevant variables related to the proportion of coir fiber in the substrates.

This figure shows all the variables analyzed and those marked with a black circle are the most relevant variables to explain the proportion of coir fiber in the growing media, which are H, GI, Cl, TPS, and RFW. The tree-based approach random forest (RF), consisting of algorithms based on rule induction that partitioned the dataset space into several class subspaces [14], was conducted to evaluate the variables that are better related to the proportion of coir fiber in the substrate. The p-value corresponds to the increment in the mean squared error (MSE) of the generated trees. In addition, the red points correspond to the variables WSK and ADW, with importance in the analyses ($p\text{-value} < 0.01$), but which appear in fewer trees than the rest of the mentioned variables. This approach shows that the main variables related to the proportion of component in the mixture are mainly morphological parameters, such as the germination, shoot height, and root fresh weight, as well as chemical and physical parameters, chloride and total pore space, respectively. This result of the model coincides with the results observed, related to the lower germination observed in the seedlings grown in substrates mainly with higher contents of chloride (higher salinity), such as LC and TC. In addition, although with a lesser relevance, water-soluble K and aerial dry weight seem to be related to the percentage of coir fiber in the growing media studied.

Figure 2 shows the dendrogram corresponding to the hierarchical cluster analysis (HCA) of the data obtained from the parameters determined in the substrates and plant seedlings.

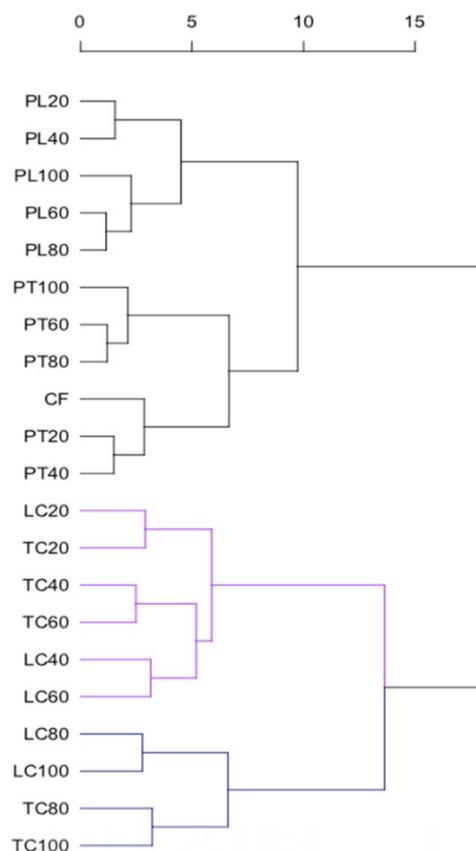


Figure 2. Dendrogram obtained by hierarchical cluster analysis (HCA) of the data of the different parameters studied in the growing media and lettuce seedlings. The x-axis represents the square Euclidean distances; PL: palm leaves; PT: palm trunk; LC: palm-leaf-derived compost; TC: palm-trunk-derived compost.

This chemometric analysis was carried out to study the possibility of grouping the different growing media based on their similar characteristics, depending on the ingredient incorporated and the proportion used. Similarities and dissimilarities were quantified using square Euclidean distance measurements. The results of HCA showed three main groups. Thus, one of them grouped coir fiber (CF) with the growing media constituted by palm leaves (PL) and palm trunk (PT) at all proportions, showing that these components incorporated in the growing media had similar behavior to coir fiber, considering the parameters studied. Moreover, as Figure 2 shows, when the square Euclidean distances (x -axis) are lower among samples, the more similar these samples are. This model confirms the behavior observed in most of the parameters studied in the growing media and in the lettuce seedlings. The second group is composed of the growing media with compost from palm trunk and leaves (TC and LC, respectively), with proportions of

these components similar or lower than 60% and the third group is formed by the substrates with TC and LC in percentages similar or higher than 80% of the component. These results also highlighted the differential effect of the type of material and on the proportion, especially in the case of composts, on the growing media properties and on the plant seedlings characteristics.

4. Conclusions

In general, the growing media prepared with organic materials derived from palm tree (*Phoenix dactylifera* L.) and coir fibre have shown suitable properties for the commercial transplant production of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Senna). The type of and proportion of the ingredients used in the growing media had a clear effect on the substrate properties and on the lettuce seedling germination and morphological characteristics. Lower germination rates were found with the substrates composed of the composts LC and TC and in the highest proportions due to their higher salinity contents compared to the raw fiber materials, which could be a limiting aspect for their use as a substrate component. Only the substrates with LC and TC at proportions lower than 60% had behavior closer to that observed in the growing media with 100% coir fiber. However, the substrates composed of palm leaves (PL) and palm trunks (PT) at all the proportions showed the most similar characteristics and effects on plant response to coir fiber, without any negative effect on the germination and morphological plant parameters. In addition, the chemometric tools used (RF and HCA) allowed to identify the variables that were better related to the proportion of coir fiber in the substrate and to group the growing media that were more similar to coir fiber (PL and PT).

Author Contributions: Conceptualization, M.Á.B., R.M., X.B. and M.D.P.-M.; Data curation, M.P.G., X.B., R.M., and M.Á.B.; formal analysis, M.P.G., M.D.P.-M., and M.Á.B.; funding acquisition, R.M.; investigation, M.P.G., X.B., M.D.P.-M., R.M. and M.Á.B.; methodology, M.P.G., M.D.P.-M, and M.Á.B.; project administration, M.D.P.-M., R.M., and M.Á.B.; resources, M.D.P.-M., R.M., and M.Á.B.; software, X.B. and M.Á.B.; supervision, X.B., M.D.P.-M., R.M., and M.Á.B.; validation, M.D.P.-M., R.M., X.B. and M.Á.B.; visualization, R.M., X.B. and M.Á.B.; writing—original draft, M.P.G., X.B. and M.Á.B.; writing—review and editing, X.B. and M.Á.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation and European Regional Development Funds (FEDER, “*Una manera de hacer Europa*”), Project “PALMRESOURCE” (ref. AGL2013-41612-R).

Institutional Review Board Statement:

Informed Consent Statement:

Data Availability Statement:

Acknowledgments: The authors wish to thank the company Semilleros BabyPlant S.L. for its help in the experimental development of this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Vico, A.; Pérez-Murcia, M.D.; Bustamante, M.A.; Agulló, E.; Marhuenda-Egea, F.C.; Sáez, J.A.; Paredes, C.; Pérez-Espinosa, A.; Moral, R. Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *J. Environ. Manag.* 2018, 226, 408–415.
2. Zaid, A.; Arias-Jimenez, E.J. Date palm cultivation. In *FAO Plant Production and Protection Paper*; 156 Rev.1; FAO: Rome, Italy, 2002.
3. Agoudjil, B.; Benchabane, A.; Boudenne, A.; Ibos, L.; Fois, M. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy Build.* 2011, 43, 491–497.
4. Abid, W.; Magdich, S.; Mahmoud, I.B.; Medhioub, K.; Ammar, E. Date palm wastes co-composted product: An efficient substrate for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedling production. *Waste Biomass Valor.* 2018, 9, 45–55.
5. Moral, R.; Paredes, C.; Perez-Murcia, M.D.; Perez-Espinosa, A.; Bustamante, M.A. Challenges of composting for growing media purposes in Spain and Mediterranean area. *Acta Hortic.* 2013, 1013, 25–40.
6. Rinaldi, S.; De Lucia, B.; Salvati, L.; Rea, E. Understanding complexity in the response of ornamental rosemary to different substrates: A multivariate analysis. *Sci. Hortic.* 2011, 176, 218–224.

7. Ceglie, F.G.; Bustamante, M.A.; Amara, M.B.; Tittarelli, F. The challenge of peat substitution in organic seedling production: Optimization of growing media formulation through mixture design and response surface analysis. *PLoS ONE* 2015, 10, e0128600.
8. Carlile, W.R.; Cattivello, C.; Zaccheo, P. Organic growing media: Constituents and properties. *Vadose Zone J.* 2015, 14.
9. Moral, R.; Bustamante, M.; Ferrández-García, C.E.; Andreu-Rodríguez, J.; Ferrández-García, M.T.; Garcia-Ortuño, T. New biomass sources to reduce peat dependence in Mediterranean substrates: Validation of *Morus alba* L., *Sorghum vulgare* L., and *Phoenix canariensis* pruning wastes. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2015, 46 (Suppl. 1), 10–19.
10. Fornes, F.; Belda, R.M.; Abad, M.; Noguera, P.; Puchades, R.; Maquieira, A.; Noguera, V. The microstructure of coconut coir dusts for use as alternatives to peat in soilless growing media. *Aust. J. Exp. Agric.* 2003, 43, 1171–1179.
11. EN 13038; Determination of Electrical Conductivity. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 1999; p. 13.
12. EN 13037; European Standards. Determination of pH. Soil Improvers and Growing Media. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 1999; p. 11.
13. Bustamante, M.A.; Paredes, C.; Moral, R.; Agulló, E.; Pérez-Murcia, M.D.; Abad, M. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resour. Conserv. Recycl.* 2008, 52, 792–799.
14. Breiman, L. Random forests. *Mach. Learn.* 2001, 45, 5–32.
15. de Lima, M.D.; Barbosa, R. Methods of authentication of food grown in organic and conventional systems using chemometrics and data mining algorithms: A review. *Food Anal. Methods* 2019, 12, 887–901.
16. Granato, D.; Santos, J.S.; Escher, G.B.; Ferreira, B.L.; Maggio, R.M. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective. *Trends Food Sci. Technol.* 2018, 72, 83–90.
17. Gil, M.V.; Calvo, L.F.; Blanco, D.; Sánchez, M.E. Assessing the agronomic and environmental effects of the application of cattle manure compost on soil by multivariate methods. *Bioresour. Technol.* 2008, 99, 5763–5772.

18. Team, R.C. R: A Language and Environment for Statistical Computing (4.0.5) [Computer Software]; R Foundation for Statistical Computing: 2012.
19. Liaw, A.; Wiener, M. Classification and regression by randomForest. *R News* 2002, 2, 18–22.
20. Paluszynska, A.; Biecek, P.; Jiang, Y.; Jiang, M.Y. Package 'randomForestExplainer'. Explaining and Visualizing Random Forests in Terms of Variable Importance. *R Package Version 0.9*. 2017.
21. Abad, M.; Noguera, P.; Bures, S. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresour. Technol.* 2001, 77, 197–200.
22. Noguera, P.; Abad, M.; Puchades, R.; Maquieira, A.; Noguera, V. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as a container medium. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2003, 34, 593–605.
23. Tittarelli, F.; Rea, E.; Verrastro, V.; Pascual, J.A.; Canali, S.; Ceglie, F.G.; Trinchera, A.; Rivera, C.M. Compost-based nursery substrates: Effect of peat substitution on organic melon seedlings. *Compost Sci. Util.* 2009, 17, 220–228.
24. Ceglie, F.G.; Elshafie, H.; Verrastro, V.; Tittarelli, F. Evaluation of olive pomace and green waste composts as peat substitutes for organic tomato seedling production. *Compost Sci. Util.* 2011, 19, 293–300.
25. Bustamante, M.A.; Gomis, M.P.; Pérez-Murcia, M.D.; Gangi, D.; Ceglie, F.G.; Paredes, C.; Pérez-Espinosa, A.; Bernal, M.P.; Moral, R. Use of livestock waste composts as nursery growing media: Effect of a washing pre-treatment. *Sci. Hortic.* 2021, 281, 109954.
26. Abad, M.; Martínez, P.F.; Martínez, M.D.; Martínez, J. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas Hortic.* 1992, 11, 141–154.
27. Medina, E.; Paredes, C.; Pérez-Murcia, M.D.; Bustamante, M.A.; Moral, R. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresour. Technol.* 2009, 100, 4227–4232.
28. Sáez, J.A.; Belda, R.M.; Bernal, M.P.; Fornes, F. Biochar improves agro-environmental aspects of pig slurry compost as a substrate for crops with energy and remediation uses. *Ind. Crops Prod.* 2016, 94, 97–106.

3.3 USO DE DIFERENTES MATERIALES ORGÁNICOS ESTABILIZADOS COMO INGREDIENTES DE MEDIOS TRANSICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPECIES UTILIZADAS EN REFORESTACIÓN. 2019.

Gomis, M.P.; Pérez-Murcia, M.D.; Pérez-Espinosa, A.; Agulló, E.; Andreu, F.J.; Bustamante, M.A. USO DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS. PONIENDO EN MARCHA LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA SOCIEDAD. 6^{as} Jornadas de la Red Española de Compostaje, pp. 515 - 520. Valencia, Comunidad Valenciana (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-09-09152.



Resumen

La supervivencia tras su implantación en el suelo de las especies vegetales utilizadas en tareas de recuperación de suelos degradados y/o con riesgo de erosión o desertificación es un aspecto clave que está influenciado por el medio de transición en el que previamente se han desarrollado. El objetivo de este trabajo fue estudiar la viabilidad del uso de medios de transición alternativos a la turba para el cultivo de tres especies vegetales autóctonas usadas en reforestación en entornos mediterráneos: adelfa (*Nerium oleander*); efedra (*Ephedra fragilis*) y tetraclinis (*Tetraclinis articulata*). Estos medios estuvieron basados en la sustitución parcial de la turba utilizando como ingredientes alternativos un vermicompost de origen ganadero (VT) y dos compost elaborados con residuos de palmera y lodo de depuradora (HP y TP). Adicionalmente, se estudió el efecto de un medio de transición preparado utilizando como ingrediente alternativo un sustrato comercial agotado de un cultivo anterior. Los medios de transición se prepararon mezclando cada uno de los materiales con el sustrato comercial (turba) en las proporciones de 10%, 25% y 50% en volumen de cada material, y su efecto se comparó frente al tratamiento control (100% sustrato comercial). Para ello, se evaluaron las propiedades físicas de las mezclas, así el peso fresco y seco de la parte aérea de las diferentes especies vegetales estudiadas, observándose claras diferencias para cada una de las especies en función del tipo de ingrediente utilizado y de la proporción en cada uno de los medios de transición.

Palabras clave: compost, vermicompost, lodos, sustrato, semillero.

1. Introducción

Los prolongados periodos de sequía estival junto con las tormentas eléctricas son el principal factor para favorecer la aparición de incendios, además de la actividad humana. Ante esta situación es necesaria una actuación de restauración de las zonas afectadas para recuperar la estructura y funcionalidad del paisaje. Para esta repoblación se necesita un material vegetal de calidad, que se ajuste al clima y asegure la supervivencia en el terreno. Por otra parte, el sustrato utilizado habitualmente contiene turba rubia en alto porcentaje, recurso considerado no renovable, por lo que existe una importante demanda de sustratos alternativos para reducir el impacto ambiental (Bustamante y col., 2008). El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la viabilidad del uso de medios de transición alternativos a la turba para el cultivo de tres especies vegetales autóctonas usadas en reforestación en entornos mediterráneos: efedra (*Ephedra fragilis*), adelfa (*Nerium oleander*) y tetraclinis (*Tetraclinis articulata*).

2. Material y Métodos

En este experimento se han utilizado 3 materiales orgánicos estabilizados, un vermicompost de origen ganadero (VT) y dos compost elaborados con residuos de palmera y lodo de depuradora (HP y TP). Adicionalmente, se estudió el efecto de un medio de transición preparado utilizando como ingrediente alternativo un sustrato comercial agotado de un cultivo anterior. El compost HP estaba constituido por un 63,8% de hojas de palmera y 36,2% de lodo procedente de la estación depuradora de aguas residuales de carrizales (Elche, Alicante), mientras que el compost TP se elaboró con un 70,2% de tronco de palmera y 29,8% del mismo lodo de depuradora, respecto a materia fresca. El vermicompost se ha obtenido a partir de restos ganaderos constituyendo el 100% de la masa, expresado sobre materia húmeda, mediante la acción de la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*). Las principales características de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 1. Se prepararon mezclas utilizando cada uno de estos materiales junto con un sustrato comercial principalmente compuesto por un 70% de turba rubia poco descompuesta y un 30% de fibra de coco. El sustrato comercial se mezcló con cada uno de los materiales orgánicos en las siguientes proporciones respecto al volumen (v:v): 0%, 10%, 25% y 50% de material orgánico, utilizando al sustrato comercial como tratamiento control. Las mezclas se dispusieron en bandejas, donde a continuación se procedió a la siembra de las 3 especies seleccionadas, habitualmente utilizadas en reforestación en la zona mediterránea por su resistencia y rápido crecimiento: adelfa (*Nerium oleander* L.), ciprés de Cartagena (*Tetraclinis articulata*) y efedra (*Ephedra fragilis*). A continuación, las bandejas se dispusieron al azar fueron colocadas de forma aleatoria en el vivero.

Tabla 1. Principales características físico-químicas y químicas de los materiales empleados en los sustratos binarios ensayados.

Parámetro	Sustrato comercial	Compost HP	Compost TP	Vermicompost	Sustrato agotado
pH (1:5) (v:v)	4,96	6,15	6,12	7,05	6,06
CE (1:5) (v:v) (dS/m)	0,77	7,81	5,15	2,80	1,05
Materia orgánica total (%)	93,2	61,6	39,2	36,1	85,1
Carbono orgánico total (%)	44,9	30,9	20,3	21,1	44,2
Nitrógeno total (%)	1,22	3,16	1,86	1,58	1,42
Relación C/N	36,8	9,78	10,9	13,4	31,1

CE: conductividad eléctrica.

Los parámetros químicos, físicos y físico-químicos estudiados en los materiales iniciales y en los sustratos elaborados fueron determinados siguiendo los métodos descritos por Bustamante y col. (2008). El análisis estadístico estuvo basado en un análisis MLG-Univariante con contraste

post-hoc Tukey-b, considerando como variables el tipo de ingrediente utilizado en los sustratos y la proporción de sustitución del sustrato comercial, mediante el programa estadístico SPSS 15.0.

3. Resultados y Discusión

3.1 Propiedades físicas de los sustratos

En la Tabla 2 se muestran los principales parámetros físicos determinados en los sustratos elaborados.

Tabla 2. Principales propiedades físicas de las mezclas elaboradas.

<i>Efecto del tipo de material orgánico</i>					
	DA (g/cm ³)	EPT (%)	CA (%)	CRA (mL/L)	Contracción (%)
<i>Sustrato ideal</i> ¹	≤ 0.4	> 85	20-30	≥ 500	< 30
Sustrato comercial	0,082a	94,56d	31,89ab	626,7d	25,23b
Compost HP	0,131b	92,17c	34,90bc	572,7c	20,78ab
Compost TP	0,164d	91,28b	39,46c	518,2b	21,72ab
Vermicompost	0,250e	87,58a	28,48a	590,9cd	17,31a
Sustrato agotado	0,147c	91,03b	44,72d	463,1a	17,22a
<i>F-ANOVA</i>	<i>1799***</i>	<i>894***</i>	<i>44,44***</i>	<i>32,48***</i>	<i>3,137*</i>
<i>Efecto de la proporción de material orgánico</i>					
Proporción	DA (g/cm ³)	EPT (%)	CA (%)	CRA (mL/L)	Contracción (%)
0%	0,083a	94,56d	31,89a	626,7b	25,23c
10%	0,121b	92,82c	37,79b	550,3a	23,43bc
25%	0,166c	90,77b	36,07ab	547,0a	18,55ab
50%	0,232d	87,95a	36,81b	511,5a	15,79a
<i>F-ANOVA</i>	<i>2652***</i>	<i>1744***</i>	<i>0,928ns</i>	<i>6,013*</i>	<i>11,5***</i>

¹Según Abad y col. (2001). DA: densidad aparente; EPT: espacio poroso total; CA: capacidad de aireación; CRA: Capacidad de retención de agua. ***, **, * Significación a P < 0,001, 0,01 y 0,05; ns: no significativo. Los valores en columna con la misma letra no difieren estadísticamente (test de Tukey-b a P < 0,05).

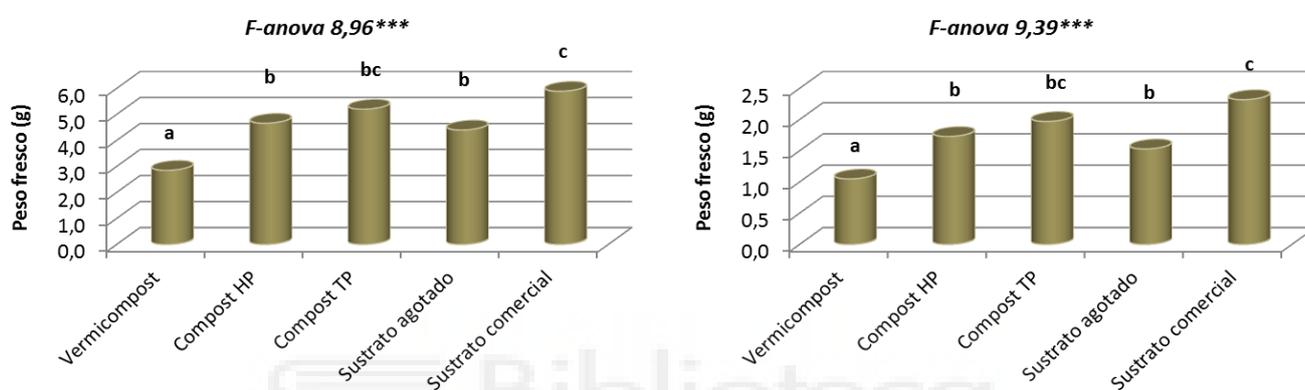
Todas las mezclas mostraron adecuadas propiedades físicas, con valores de las propiedades estudiadas dentro de los rangos establecidos para un sustrato ideal (Abad y col., 2001; Noguera y col., 2003). El tipo de material orgánico utilizado tuvo una mayor influencia a nivel estadístico que la proporción, que no influyó en la capacidad de aireación, siendo esta propiedad similar para todos los porcentajes empleados y también estadísticamente similar a la del sustrato

comercial. Cabe mencionar la modificación en las propiedades físicas al usar el sustrato, lo cual se refleja en las diferencias mostradas entre el sustrato comercial y el agotado tras un ciclo de cultivo.

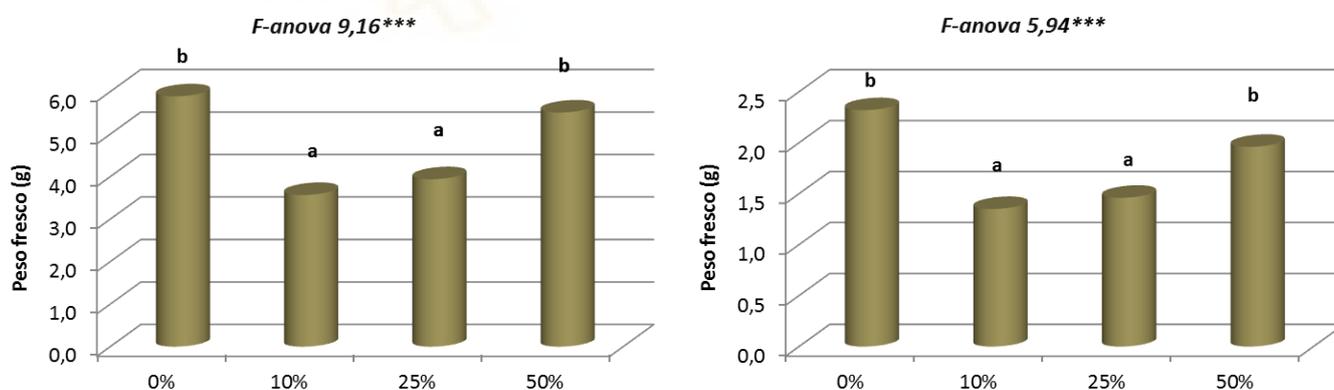
3.2 Efectos sobre el peso fresco y seco de la parte aérea del material vegetal

La figura 1 muestra el efecto de los diferentes factores estudiados (tipo de ingrediente, proporción y tipo de especie vegetal) sobre la biomasa aérea fresca y seca de las tres especies vegetales estudiadas (adelfa, efedra y tetraclinis).

a) Efecto del tipo de ingrediente



b) Efecto de la proporción



c) Efecto del tipo de especie

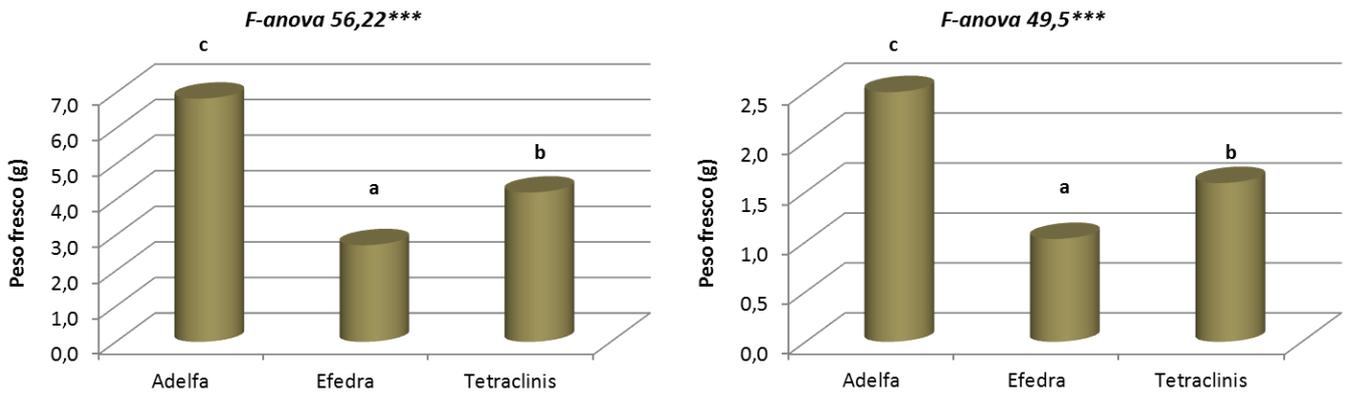


Figura 1. a) Efecto del tipo de componente utilizado; b) efecto de la proporción de material orgánico utilizado; c) efecto del tipo de especie sobre el peso fresco (izquierda) y peso seco (derecha) de la parte aérea.

El sustrato elaborado con el compost elaborado con tronco de palmera y lodo de depuradora (compost TP) fue el que mostró un rendimiento estadísticamente más similar que el sustrato comercial, con el que se obtuvo el mayor peso fresco y seco de biomasa aérea. Sin embargo, el medio de cultivo elaborado con vermicompost fue el que mostró la menor biomasa fresca y seca de la parte aérea, estadísticamente inferior incluso que en la mezcla elaborada con sustrato agotado.

Por otra parte, la proporción al 50% v:v fue la que mostró el mayor peso fresco y seco, mientras que los porcentajes de sustitución al 10 y 25% mostraron los valores más bajos. Adicionalmente, los mejores efectos de sustitución respecto a estos parámetros se observaron en el siguiente orden de especies: adelfa > tetraclinis > efedra.

4. Conclusiones

Todas las mezclas elaboradas con los diferentes materiales orgánicos considerados (compost de residuos de palmera y lodo de depuradora, vermicompost de origen ganadero y sustrato agotado) mostraron unas propiedades físicas adecuadas para su uso como sustratos de cultivo. Cabe mencionar que, aunque las propiedades físicas del sustrato agotado se han visto modificadas con respecto al mismo sustrato sin haber pasado un ciclo de cultivo (sustrato comercial), este hecho no ha tenido un efecto negativo sobre el peso fresco y seco de planta en ninguna de las especies vegetales consideradas. Los compost utilizados, especialmente el

compost elaborado con hoja de palmera y lodo de depuradora (compost HP), así como la proporción de sustitución al 50% (v:v) mostraron los mejores resultados en las tres especies estudiadas, siendo este efecto especialmente destacable en el cultivo de adelfa.

5. Bibliografía

Abad M., Noguera P., Bures S., 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresour. Technol.* 77, 197-200.

Bustamante M.A., Paredes C., Moral R., Agulló E., Pérez-Murcia M.D., Abad M., 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 792-799.

Noguera P., Abad M., Puchades R., Maquieira A., Noguera V., 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as a container medium. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34, 593-605.

6. Agradecimientos



Los autores quieren dar las gracias al personal del vivero forestal de Guardamar del Segura de la Generalitat Valenciana y a su director, Felipe Gil, por permitir el uso de sus instalaciones y por su ayuda en el desarrollo de la experiencia.

3.4 ASEGURAMIENTO DE LA SUPERVIVENCIA NUTRICIONAL DE ESPECIES VEGETALES PARA REFORESTACIÓN EN ENTORNOS MEDITERRÁNEOS: ESTUDIO COMPARATIVO DE MEDIOS ORGÁNICOS DE TRANSICIÓN. 2017.

Gomis, M.P.; Domene, M.A.; Segura, M.D.; Pérez-Murcia, M.D.; Bustamante, M.A.; Agulló, E.; Pérez-Espinosa, A.; Paredes, C.; Moral, R. RECICLANDO LOS RESIDUOS PARA MEJORAR LOS SUELOS Y EL MEDIOAMBIENTE. 5^{as} Jornadas de la Red Española de Compostaje, pp. 231 - 234. Sevilla (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-617-9214-6.



Resumen

En este trabajo se desarrollaron medios de transición que puedan usarse como aditivo-enmienda en el momento del trasplante para asegurar un mayor éxito en la supervivencia de 2 especies vegetales autóctonas de repoblación (*Thymus vulgaris* y *Lavanduleae*). El medio de transición estaba compuesto en un 75% del volumen por un ingrediente estructural fijo (turba y fibra de coco, 50-50% v/v) y como tratamientos ensayados se utilizaron 5 materiales orgánicos diferentes que suponían el 25% restante del volumen de la maceta. Se utilizaron como referencia, fertilizantes inorgánicos de liberación lenta dosificados de tal forma que todos los tratamientos tuvieran el mismo contenido en nitrógeno total. Durante el desarrollo del trabajo se evaluaron la eficiencia en el enraizamiento, el desarrollo vegetativo, y pervivencia de las plantas, así como las propiedades físicas de estos medios de transición y su potencialidad como agentes fertilizantes de liberación lenta.

Palabras claves: repoblación, compost, tomillo, lavanda, sustratos.

1. Introducción

La restauración de suelos degradados, así como el aseguramiento de una cobertura vegetal mínima es una de las estrategias más exitosas para evitar la erosión y desertificación de los medios edáficos. El desarrollo de plántulas eficientes en ambientes áridos y semiáridos incluye no sólo la selección de las especies más adecuadas, su germinación-desarrollo a nivel plantular, pero también el aseguramiento de la supervivencia nutricional puesto que se implantan en suelos en condiciones extremas a nivel físico, hidrofísico y químico. El desarrollo de medios de transición que se apliquen junto al trasplante en áreas repobladas puede permitir aumentar la pervivencia de las especies implantadas en función del aporte de materiales que permitan aumentar la reserva de agua y nutrientes en el medio radicular adyacente al alveolo de trasplante, siendo especialmente importante en sistemas de trasplante donde la actuación es puntual, la pervivencia depende de las condiciones ambientales de la zona y el mantenimiento-gestión es poco frecuente.

2. Material y métodos

En este experimento se prepararon mezclas como medios de cultivo para contenedor de transición de especies arbustivas de repoblación. Se han usado tiestos de 1700 cm³, donde se

implantarón cepellones forestales de 250 cm³ con plantas aromáticas autóctonas, lavanda (*Lavanduleae*) y tomillo (*Thymus vulgaris*), producidas en el centro experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar en El Ejido (Almería). Se planteó la validación de 5 materiales orgánicos como aditivo en medios de transición de uso en repoblación. Los materiales orgánicos ensayados fueron: compost CTP (70,2% Tronco palmera + 29,8% Lodo EDAR), compost CHP (63,8% Hoja palmera+ 36,2% Lodo EDAR), vermicompost (VG, de origen ganadero), material pelletizado del compost CTP (PCTP) y material pelletizado del vermicompost VG (PVG). Los pellets (6 mm diámetro y 25 mm largo) fueron elaborados mediante pelletizadora por extrusionado Zhangqiu-Fadall mod. SKJ450. Como referencia se usaron 2 fertilizantes inorgánicos de liberación lenta NPK 15-15-15 Nutricote® de 3 y 6 meses (FILL3 y FILL6) respectivamente, que se añadieron de forma que se incorporara un gramo de N total por tiesto (en el rango de la entrada de N para los tratamientos orgánicos). El medio de transición estaba compuesto por un ingrediente estructural fijo formado por turba y fibra de coco (50-50% v/v) que componía el 100% del volumen en el caso de los tratamientos con fertilización inorgánica de liberación lenta y para el control/testigo sin fertilizar (B), y el 75% del volumen en los tratamientos con materiales orgánicos, donde el 25% restante lo componían los 5 materiales orgánicos ensayados (CTP, CHP, VG, PCTP y PVG). Se prepararon en total 8 tratamientos con 24 repeticiones por tratamiento y cultivo que se colocaron al azar y se mantuvieron en crecimiento durante 6 meses en invernadero. En los sustratos se determinaron propiedades físicas, físico-químicas, así como iones en el extracto de saturación según los métodos descritos por Bustamante y col. (2008). En ambos cultivos se determinaron el desarrollo vegetativo y la producción de biomasa en raíz, tallo y hojas.

3. Resultados y discusión

Los sustratos con materiales orgánicos como ingredientes mostraron unas adecuadas propiedades físicas, en el rango de los valores considerados como óptimos (Noguera y col., 2003), incluso obteniendo mejores resultados para la CRA respecto al control y los tratamientos inorgánicos FILL 3 y 6 (Tabla 1). La capacidad de cambio catiónico (CCC) aumentó en los medios de transición que incluyen compost-vermicompost, aumentando así su potencial amortiguador a nivel fertilizante. Sin embargo, el contenido en aniones (nitratos-cloruros-sulfatos) en el extracto de saturación fue superior al control y los medios FILL 3 y 6, mostrando riesgo de salinización, confirmado por los valores de conductividad eléctrica. Los cationes también se

mostraron más elevados, siendo en este caso un efecto beneficioso para la nutrición vegetal salvo para el Na⁺. Algunos de los tratamientos (p.ej. CHP, PCTP) favorecieron un mayor contenido de agua útil y en paralelo una menor capacidad de aireación. El pH o el EPT no se vieron afectados en los medios de cultivo por los diferentes tratamientos.

Los tratamientos establecidos a base de la sustitución del 25% del volumen del tiesto con materiales orgánicos no generaron una producción de biomasa comparable a los tratamientos de fertilización inorgánica de liberación lenta (FILL 3 y 6) y sólo fueron superiores al control para CHP en la lavanda. En este cultivo, respecto a los parámetros morfológicos, los tratamientos CTP, PCTP y CHP mostraron valores más próximos a los obtenidos con la fertilización inorgánica de liberación lenta. En el caso del tomillo, la incorporación de los materiales orgánicos en los sustratos tuvo en general un efecto más positivo sobre los parámetros morfológicos que el control y los tratamientos FILL 3 y 6, principalmente para PCTP para el área foliar, CTP y VG para la ratio hoja/raíz (m.s.) y CTP, PCTP, CHP y VG para la ratio hoja+tallo/raíz (m.s.).

4. Conclusiones

Los medios de transición con materiales orgánicos en su composición mostraron adecuadas propiedades físicas y mejoraron aspectos químicos como la capacidad de cambio catiónico y el contenido nutriente con respecto a los tratamientos inorgánicos de liberación lenta, pero también implicaron una mayor salinidad, que pudo influir en la menor producción de biomasa observada en ambos cultivos. Por ello, son necesarios más estudios para optimizar la proporción más adecuada de estos materiales en medios de cultivo de transición.

5. Bibliografía

- Bustamante M.A., Paredes C., Moral R., Agulló E., Pérez-Murcia M.D., Abad M. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 792-799.
- Noguera P., Abad M., Puchades R., Maquieira A., Noguera V. 2002. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as a container medium. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34, 593-605.

6. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro del programa científico de la Cátedra Cajamar de la UMH 2015-2017, así como dentro del proyecto “Desarrollo de nuevos recursos y bioproductos basados en residuos de especies palmáceas orientados al secuestro de carbono y estrategias de mitigación, Palmresource” (Proyecto AGL2013-41612-R), financiado por el MINECO y Fondos FEDER “Una manera de hacer Europa”).



Tabla 1. Caracterización inicial de los medios de cultivo utilizados en el experimento.

Parámetros	B	FILL3	FILL6	CTP	PCTP	CHP	VG	PVG	F anova	Intervalo óptimo ⁴
Densidad aparente (g/cm ³)	0,118 a	0,122 a	0,126 a	0,138 bc	0,155 d	0,138 bc	0,152 cd	0,163 d	25,0 ***	≤ 0,4
EPT ¹ (%vol)	95,1 a	95,0 a	94,61 a	94,3 a	93,0 a	94,0 a	93,5 a	92,6 a	0,80 ns	>85
Contracción (%vol)	20,4 bc	20,9 bc	18,9 ab	17,8 a	20,3 bc	22,4 c	20,7 bc	20,3 bc	5,93 **	<30
CRA ² (mL /L sustrato)	506 a	519 a	537 ab	530 ab	553 bc	580 c	538 ab	516 a	10,2 ***	550-800
Capacidad Aireación (%vol)	44,4 e	43,1 de	40,8 cd	41,2 cd	37,7 ab	36,0 a	39,7 bc	41,0 cd	16,6 ***	20-30
pH _{sat}	7,22 a	6,93 a	6,97 a	7,03 a	7,09 a	6,62 a	7,27 a	7,21 a	0,73 ns	5,3-6,5
CE _{sat}	1,77 a	2,15 ab	2,38 b	5,40 e	4,33 d	5,10 e	4,12 d	3,37 c	108 ***	<0,5
CCC (meq /100 g MO)	28,4 a	29,6 a	30,8 a	35,7 b	37,1 b	37,9 b	37,6 b	35,0 b	9,29 ***	--
NO ₃ ⁻ sat (mg/ kg) ³	271 a	384 b	453 b	1052 e	926 d	866 d	671 c	391 b	151 ***	--
Cl ⁻ sat (mg/ kg) ³	406 a	442 a	460 a	936 c	855 c	873 c	747 b	711 b	75,0 ***	--
SO ₄ ²⁻ (mg/ kg) ³	83 a	124 a	197 b	692 e	303 c	819 f	416 d	341 c	286 ***	--
Na ⁺ sat (mg/ kg) ³	134 a	145 a	151 a	307 c	307 c	272 bc	258 b	258 b	77,5 ***	--
K ⁺ sat (mg/ kg) ³	284 a	345 a	361 a	623 c	584 bc	639 c	620 c	534 b	64,9 ***	--
Ca ²⁺ sat (mg/ kg) ³	49 a	78 b	137 c	390 f	192 d	312 e	145 c	124 c	255 ***	--
Mg ²⁺ sat (mg/ kg) ³	21 a	29 ab	29 ab	117 d	79 c	130 e	80 c	37 b	253 ***	--

¹ Espacio poroso total (%vol); ² Capacidad de retención de agua; ³ Medida sobre extracto saturado. ⁴ Intervalo óptimo para un sustrato de cultivo en contenedor según Noguera y col.

(2003). B: control sin fertilizar; FILL: fertilizante de liberación lenta; CTP: 70,2% Tronco palmera + 29,8% Lodo EDAR; compost CHP: 63,8% Hoja palmera+ 36,2% Lodo EDAR; VG: vermicompost de origen ganadero); PCTP: material pelletizado del compost CTP; PVG: material pelletizado del vermicompost VG.

*, ** y *** indican diferencias significativas a 0,05, 0,001 y 0,0001. En cada fila, valores medios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05).

Tabla 2. Aspectos de producción y morfológicos para lavanda y tomillo en función de los tratamientos (6 meses experimento).

Parámetros	B	FILL3	FILL6	CTP	PCTP	CHP	VG	PVG	F anova
Lavanda (<i>Lavanduleae</i>)									
Materia fresca Hoja (g/planta)	41,4 ab	91,6 d	89,2 d	56,5 bc	62,7 c	70,7 cd	30,3 a	35,5 ab	20,4 ***
Materia seca Hoja (g/planta)	12,9 abc	27,3 e	29,2 e	18,3 bcd	19,5 cd	23,2 de	9,7 a	11,2 ab	15,5 ***
Materia fresca Tallo (g/planta)	21,3 ab	52,8 c	45,5 c	23,7, ab	24,7 ab	29,9 b	15,7 a	23,3 ab	27,5 ***
Materia seca Tallo (g/planta)	9,2 ab	20,8 c	17,4 c	10,7 ab	10,2 ab	12,3 b	6,6 a	9,2 ab	23,6 ***
Materia seca Raíz (g/planta)	12,7 cd	14,2 d	7,9 ab	11,7 bcd	10,3 bc	15,0 d	8,4 ab	5,9 a	12,7 ***
Biomasa fresca total p. aérea (g/planta)	62 ab	144 d	134 d	80 bc	87 bc	100 c	46 a	58 ab	28,2 ***
Biomasa seca total (g/planta)	34,8 ab	62,3 e	54,5 de	40,8 bc	39,9 bc	50,6 cd	24,8 a	26,3 a	24,4 ***
Área foliar (cm ² /g m.f.)	5,14a	6,65e	6,38de	6,09cd	5,70b	5,81bc	5,23a	5,17a	5,1**
Ratio Hoja+Tallo/Raíz (m.s.)	1,78 a	3,45 b	5,91 c	2,4 ab	2,99 ab	2,37 ab	1,96 a	3,57 b	22,4 ***
Ratio Hoja/Tallo (m.s.)	1,41 a	1,32 a	1,69 a	1,77 a	1,91 a	1,90 a	1,48 a	1,26 a	2,43 *
Ratio Hoja/Raíz (m.s.)	1,03 a	1,96 c	3,71 d	1,55 abc	1,91 bc	1,54 abc	1,17 ab	1,99 c	21,8 ***
Tomillo (<i>Thymus</i>)									
Materia fresca Hoja (g/planta)	70,6 a	83,4 a	77,9 a	73,4 a	74,6 a	72,5 a	69,8 a	60,8 a	1,11 ns
Materia seca Hoja (g/planta)	24,2 a	33,9 b	35,2 b	25,4 a	24,6 a	24,6 a	25,4 a	27,0 a	13,6 ***
Materia fresca Tallo (g/planta)	19,9 a	48,3 b	49,4 b	24,9 a	26,6 a	26,6 a	24,9 a	30,1 a	22,5 ***
Materia seca Tallo (g/planta)	10,5 a	24,7 c	26,9 c	9,45 a	13,9 ab	13,9 ab	9,45 a	16,2 b	35,8 ***
Materia seca Raíz (g/planta)	59,0 b	57,40 b	59,9 b	22,2 a	26,4 a	26,4 a	22,2 a	61,5 b	25,7 ***
Biomasa fresca total p. aérea (g/planta)	90 a	131 b	127 b	98 a	101 a	101 a	98 a	102 a	9,98 ***
Biomasa seca total (g/planta)	93 b	116 cd	122 d	57 a	64 a	64 a	57 a	104 bc	43,0 ***
Área foliar (cm ² /g m.f.)	1,74a	2,61c	2,38b	2,43b	3,19d	2,60c	1,73a	2,44b	15,4***
Ratio Hoja+Tallo/Raíz (m.s.)	0,59 a	1,04 b	1,03 b	1,61 c	1,48 c	1,48 c	1,61 c	0,71 ab	23,3 ***
Ratio Hoja/Tallo (m.s.)	2,32 b, c	1,38 a	1,31 a	2,72 c	1,80 ab	1,80 ab	2,72 c	1,66 a	16,1 ***
Ratio Hoja/Raíz (m.s.)	0,41 ab	0,60 b	0,58 ab	1,17 d	0,95 c	0,95 c	1,17 d	0,44 ab	27,2 ***

B: control sin fertilizar; FILL: fertilizante de liberación lenta; CTP: 70,2% Tronco palmera + 29,8% Lodo EDAR; compost CHP: 63,8% Hoja palmera+ 36,2% Lodo EDAR; VG: vermicompost de origen ganadero); PCTP: material pelletizado del compost CTP; PVG: material pelletizado del vermicompost VG.

*, ** y *** indican diferencias significativas a 0,05, 0,001 y 0,0001. En cada columna y cultivo, valores medios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05)

4. RESUMEN DE MATERIAL Y MÉTODOS



4 Resumen de materiales y métodos

Esta tesis se centra en el desarrollo y validación de medios de cultivo de alto valor añadido para su uso en horticultura y en sistemas forestales en al área mediterránea.

Para ello se estableció el siguiente diseño general que incluye:

A. Adecuación de compost y de materiales residuales para su uso como sustrato

Los compost elaborados a base de estiércoles pueden presentar limitaciones asociadas a su alta salinidad para su uso como materiales sustitutivos de la turba en sistemas sin suelo. En este trabajo se ha utilizado el lavado de los compost elaborados con estiércoles como pretratamiento antes de su uso en formulaciones para el cultivo sin suelo. Se han comparado los efectos del uso de compost lavados o no lavados sobre el sustrato y sobre el cultivo de pimiento utilizado.

Por otra parte, los residuos vegetales también pueden utilizarse para la formulación de sustratos. En este estudio se ha utilizado la hoja y el tronco de la palmera, previa adecuación mediante triturado, con la finalidad de reducir y homogeneizar el tamaño de partícula.

B. Formulación de sustratos para especies hortícolas y forestales

Se han formulado una gran variedad de medios de cultivo. Para cultivos hortícolas se han elaborado sustratos a base de turba que parcialmente se sustituyó por materiales orgánicos alternativos como los compost ganaderos, y también se han formulado sustratos con fibra de coco que parcialmente se sustituyó por materiales derivados de la palmera. Para la producción de especies forestales se han elaborado sustratos que incluían un ingrediente estructural fijo a base de turba y fibra de coco que parcialmente se sustituyó por compost de hoja de palmera, compost de tronco de palmera o vermicompost ganadero.

C. Desarrollo y validación de sustratos

Los medios de cultivo formulados se han validado en diferentes escenarios hortícolas y forestales. Se han utilizado para la germinación y desarrollo de cultivos como el pimiento (*Capsicum annum* L. cv. Largo de Reus Pairal) y la lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. «Derby».

Los sustratos orgánicos formulados también se han usado en semillero de plantas aromáticas utilizadas para reforestación en el área mediterránea como adelfa (*Nerium oleander*), tetraclinis (*Tetraclinis articulata*) y Efedra (*Ephedra fragilis*), así como en medios de cultivo de transición para incrementar la supervivencia de especies como lavanda (*Lavandula angustifolia*) y tomillo (*Thymus vulgaris*).

A continuación, se realiza una descripción más detallada del material y métodos de los trabajos científicos que forman parte de esta tesis doctoral.

EXPERIMENTOS DE DESARROLLO DE SUSTRATOS EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Uso de compost de estiércoles como ingrediente de sustrato

El trabajo ***“Use of livestock waste composts as nursery growing media: Effect of a washing pre-treatment”*** fue publicado en la revista *Scientia Horticulturae*.

Se elaboraron cinco tipos de compost a base de estiércol y digeridos de estiércol que fueron mezclados con varios agentes estructurantes para su compostaje, como residuo de algodón, residuo de caña de maíz, residuo de poda de vid, residuo de césped y paja de cereal. La denominación y composición de estos compost utilizados (respecto a peso fresco) fue la siguiente:

- M1: 87% fracción sólida de purín porcino + 13% de residuo de algodón.
- M2: 85% estiércol ovino-caprino (50:50) + 8% residuo de césped + 7% paja de cereal.
- M3: 75% fracción sólida de purín porcino + 25% residuo de algodón.
- D1: 90% fracción sólida de digerido de purín vacuno + 10% residuo de poda de vid.
- D2 90% fracción sólida de digerido de purín porcino + 10% residuo de caña de maíz.

El purín de cerdo del compost M1 fue obtenido de una explotación porcina de engorde en Orihuela (Alicante) y para el M3 fue recolectado en una granja de cerdas y lechones ubicada en Guadamara (Almería). Para el compost M2 la mezcla de estiércol ovino y caprino se recolectó de la granja experimental de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO-Universidad Miguel Hernández). En el compost D1 la fracción sólida del digerido anaeróbico de purín vacuno se produjo tras la codigestión anaeróbica continua de purines bovinos en una planta industrial de biogás ubicada en Valencia, mientras que para el D2 la fracción sólida del digerido anaeróbico de purín de cerdo se obtuvo tras la digestión termofílica anaeróbica continua de purines en una

planta de biogás industrial situada en Lleida, tras la separación mecánica por centrifugación sin ningún aditivo.

Los compost M2, M3 y D2 se prepararon a escala industrial mediante sistema de compostaje en hilera trapezoidal con volteos periódicos, mientras que el M1 y D1 se realizaron mediante sistema Rutgers de pila estática en una planta piloto (2000 kg) y con ventilación forzada a demanda de temperatura, donde la temperatura máxima se mantuvo a 65 °C.

La fase bio-oxidativa del compostaje se consideró terminada cuando la temperatura de las pilas era estable y cercana a la de la atmósfera. Las pilas se dejaron madurar durante dos meses.

Los compost mostraron valores de pH cercanos a la neutralidad, concentraciones adecuadas de materia orgánica y N total, una relación C/N inferior a 20, valor límite establecido para la madurez del compost (Bernal y col., 2009) y altos valores de conductividad eléctrica, especialmente en los compost M1 y D2.

Para reducir el contenido de sales y mejorar la calidad para su uso como ingrediente para medios de cultivo, los compost fueron sometidos a un pretratamiento de lavado con agua destilada. Para ello se mezclaron 5 L de cada compost con agua desionizada en proporción 1:1 (v/v) con posterior agitación durante 30 min a 25 °C. Después de eso, las muestras de compost lavadas (etiquetadas como LM1, LM2, LM3, LD1 y LD2) se extendieron sobre una gasa con un diámetro de 10 mm y se dejaron escurrir.

Los compost iniciales y los compost obtenidos tras el proceso de lavado se emplearon como ingredientes de los medios de cultivo, en sustitución de la turba, en las proporciones de 25%, 50% y 75% (v/v). Se utilizó turba rubia comercial sin fertilización previa, Sphagnum (pH = 6,42) para elaborar las diferentes mezclas y como tratamiento de control, dando como resultado treinta sustratos de cultivo. El ensayo se desarrolló en un vivero comercial (Semilleros El Raal-Cox S.L., Alicante). Se seleccionó un cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.cv. Largo de Reus Pairal) que se cultivó (una semilla por celda) en bandejas de poliestireno (70 x 46 cm) con 294 celdas piramidales invertidas. Los tratamientos (sustratos) se realizaron en un diseño de parcelas completamente aleatorias, utilizando una bandeja por tratamiento (cuatro repeticiones por tratamiento). La germinación se desarrolló en las condiciones establecidas (27 ± 1 °C y 95% de humedad relativa) en una cámara con aire acondicionado. El porcentaje de germinación se calculó contando el número de semillas germinadas a las 48 horas de la siembra. A continuación, las bandejas se colocaron en un invernadero cubierto de polietileno sin calefacción con condiciones de luz natural. Durante este período la temperatura promedio fue de 16 °C, con un valor máximo de 19 °C y un valor mínimo de 7 °C, con una radiación solar promedio de 140

W/m². Las plantas fueron regadas diariamente con un sistema de aspersión móvil y se fertilizaron dos veces por semana utilizando una solución de riego compuesta de 136 N (NO₃⁻ + NH₄⁺), 49,4 P₂O₅, 23,4 K₂O, 22,8 CaO, 6,25 Fe, 0,24 Cu, 3,18 Mn, 0,54 Zn y 0,16 Mo (mM).

Cuando la mayoría de las plántulas alcanzaron el tamaño de trasplante comercial (el día 84 tras la germinación), se muestrearon al azar 16 plántulas de cada bandeja, evitando las plántulas de los bordes. El peso fresco aéreo (AFW), la altura de los brotes (H) y el peso fresco de la raíz de las plántulas se determinaron antes de lavar y secar las plantas, para determinar el peso seco aéreo y radical (ADW y RDW, respectivamente) se empleó un horno a 55 °C durante 72 h. Después de esto, las muestras de brotes se trituraron hasta obtener un polvo de 0,5 mm para las determinaciones analíticas.

Métodos analíticos

Los parámetros físicos de los sustratos se determinaron siguiendo los métodos estandarizados descritos por Bustamante y col. (2008). La conductividad eléctrica (CE) y el pH se determinaron en el extracto soluble (1:5, v/v), de acuerdo con EN 13038:1999 y EN 13037:1999, respectivamente. La materia seca se determinó por secado a 105 °C durante 12 h, y la materia orgánica (MO) por pérdida por ignición a 430 °C durante 24 h (Bustamante y col., 2008). El nitrógeno total (NT) y el carbono orgánico total (COT) se determinaron mediante combustión seca a 950 °C con un analizador elemental Leco TruSpec C – N (Leco Corp., St. Joseph, MI, EE. UU.). Las fracciones de P se determinaron por colorimetría como ácido fosfórico molibdovanadato; el P total, en el extracto obtenido tras la digestión con HNO₃–HClO₄ y el P soluble en el extracto soluble en agua (1: 5, v/v).

Se utilizó la fotometría de llama (Jenway PFP7 Flame Photometer, Jenway Ltd., Felsted, Reino Unido) para determinar el Na y el K, la fracción soluble en el extracto soluble en agua (1: 5, v/v) y la fracción total, después de la digestión de HNO₃–HClO₄. Los sulfatos, cloruros y nitratos se determinaron en el extracto soluble en agua 1: 5 (v/v) mediante cromatografía iónica. Toda la determinación analítica se realizó por triplicado.

Análisis estadístico

Se utilizó un modelo basado en un análisis de la varianza MLG-Univariante para estudiar los efectos de las variables estudiadas: tipo de sustrato, proporción de compost en la mezcla y el tipo de tratamiento del compost previo a la elaboración de la mezcla (lavado y no lavado). El contraste post-hoc se realizó mediante la prueba de Tukey-b. Se llevó a cabo un análisis de componentes principales (ACP) para reducir la dimensionalidad y evaluar el grado de

diferenciación del tratamiento en relación con los diferentes factores considerados. Los análisis estadísticos se determinaron utilizando el software STATISTICA v. 8.0 (StatSoft, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, EE.UU.).

Uso de residuos y compost derivados de palmera como ingredientes de sustratos

El trabajo **“Development and validation of alternative palm-derived substrates for seedling production”** fue publicado en la revista *Agronomy*.

En el ensayo se utilizaron cuatro materiales derivados de palmera como componentes de los medios de cultivo. Los materiales fueron: troncos de palmera (PT), hojas de palmera (PL) y compost derivados de este tipo de residuos, derivados de hojas (LC) y de troncos de palmera (TC). La composición fue la siguiente (respecto a materia fresca):

- LC: compost 72,3% hoja de palmera + 27,7% lodo de depuradora.
- TC: compost 52,3% tronco de palmera + 47,7% lodo de depuradora.
- PL: 100% hojas de palmera.
- PT: 100% tronco de palmera.

Los materiales PT y PL fueron previamente normalizados a 0,5 cm de diámetro. Los compost se prepararon utilizando el sistema de compostaje en hileras y presentaron un grado de madurez adecuado, según diferentes criterios químicos y biológicos.

Se prepararon 21 medios de cultivo utilizando los materiales anteriores (PT, PL, LC y TC) mezclados con fibra de coco como diluyente en las proporciones de 20%, 40%, 60% y 100% en volumen de materia orgánica. También se estableció un control de fibra de coco (100% fibra de coco). La germinación de las semillas y el desarrollo de las plántulas se realizaron en un vivero comercial del sureste de España (Semilleros BabyPlant S.L., Orihuela, Alicante), en invernaderos multitúnel.

La especie vegetal seleccionada fue la lechuga (*Lactuca sativa* cv. Senna) que se cultivó en bandejas de poliestireno expandido con 322 celdas de pirámide invertida (una semilla por celda). Los medios de cultivo se colocaron en un diseño de bandejas al azar con tres repeticiones por tratamiento (una bandeja por repetición). La germinación se realizó durante 3 días en una cámara climatizada a 18 ± 1 °C y 85% de humedad relativa, determinándose el porcentaje de germinación a las 72 h de la siembra mediante el conteo del número de semillas germinadas. Después, las bandejas se emplazaron aleatoriamente en un invernadero con sistema de climatización automatizado (Climatec®). Cuando las plántulas alcanzaron aproximadamente el

tamaño de trasplante comercial, el día 45 después de la siembra, se cosecharon al azar 10 plántulas por bandeja, evitando las situadas junto a los bordes. La altura y el peso fresco se determinaron antes de lavar y secar las plántulas a 60 °C en una estufa de aire forzado durante 72 h para calcular el peso seco.

Métodos analíticos

En los medios de cultivos y los componentes del sustrato iniciales (PL, PT, LC y TC), se determinaron los parámetros fisicoquímicos, conductividad eléctrica (CE) y pH, en el extracto hidrosoluble (1:5, v/v) según las normas EN 13038:1999 y EN 13037:1999, respectivamente. La materia seca se evaluó por secado a 105 °C durante 12h y la materia orgánica (MO) por pérdida por ignición a 430 °C durante 24 h (Bustamante y col., 2008). Las fracciones totales de carbono orgánico (COT) y nitrógeno (NT) se determinaron mediante combustión seca a 950°C con un analizador elemental Leco TruSpec C-N (Leco Corp., St. Joseph, MI, EE. UU.). En el extracto hidrosoluble (1:5, v/v) se determinaron las fracciones hidrosolubles de Na y K por fotometría de llama (Jenway PFP7 Flame Photometer, Jenway Ltd., Felsted, UK) y nitratos, sulfatos y cloruros por cromatografía iónica (ICS-1000 Dionex, Sunnyvale, EE. UU.). En los sustratos se estudiaron las propiedades físicas siguiendo los métodos detallados por Bustamante y col. (2008). Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Para evaluar el efecto del tipo y proporción de los diferentes materiales orgánicos incorporados en los medios de cultivo se utilizó el Modelo General Lineal Univariado (LGM), con un contraste post-hoc mediante el test de Tukey-b. Este análisis estadístico se realizó utilizando el paquete de software estadístico IBM SPSS Statistics v. 27.0.

Los análisis quimiométricos se realizaron utilizando Random Forest (RF) y Hierarchical Cluster Analysis (HCA). RF (Breiman, 2001) es un algoritmo que comprende un grupo de modelos de clasificación básicos, utilizando el método de muestreo de impulso: se eliminan múltiples muestras de la muestra original y se realiza un modelo de árbol de decisión para cada muestra. Después de la preparación del conjunto de formación, cada árbol emite un voto unitario para la clase más popular, y la clase de predicción final se basa en el máximo de votos emitidos por predicciones individuales (de Lima y Barbosa, 2019). HCA es una técnica que estudia la clasificación de muestras en grupos y entre grupos representando una jerarquía (Granato y col., 2018). Los clústers están formados por muestras consideradas similares según el patrón reconocido. Los resultados se presentan en forma de dendogramas, que permiten visualizar las distancias entre muestras (Gil y col., 2008). Para realizar el análisis multivariante se utilizó el

software R (Team R. C., 2012). Se utilizaron los paquetes “randomForest” (Liaw y Wiener, 2002) y “randomForestExplainer” (Paluszynska y col., 2017) para obtener el gráfico de importancia multidireccional. La distancia Ward se usó para obtener el grupo jerárquico utilizando el paquete de estadísticas.

EXPERIMENTOS DE DESARROLLO DE SUSTRATOS PARA ESPECIES VEGETALES UTILIZADAS EN REFORESTACIÓN EN AMBIENTES MEDITERRÁNEOS

Desarrollo de sustratos para la producción de especies utilizadas en reforestación

En el trabajo “Uso de diferentes materiales orgánicos estabilizados como ingredientes de medios transición para la producción de especies utilizadas en reforestación” presentado en las VI Jornadas de la Red de compostaje española se utilizaron tres materiales orgánicos estabilizados con la siguiente composición respecto a materia fresca:

- Vermicompost de origen ganadero (100%).
- Compost HP: 63,8% hojas de palmera + 36,2% lodo de depuradora
- Compost TP: 70,2% hojas de palmera + 29,8% lodo de depuradora.

También se estudió el efecto de un medio de transición cuyo ingrediente alternativo fue un sustrato comercial agotado de un cultivo anterior. Los lodos procedían de la estación depuradora de aguas residuales de Carrizales (Elche, Alicante). El vermicompost se elaboró a partir de restos ganaderos (100%, sobre materia húmeda) y fue obtenido mediante la acción de la lombriz roja de California (*Eisenia fetida*).

Las mezclas se prepararon combinando cada uno de los materiales citados junto con un sustrato comercial compuesto por un 70% de turba rubia poco descompuesta y un 30% de fibra de coco. Las mezclas se realizaron para obtener las siguientes proporciones, respecto al volumen (v/v) de material orgánico: 0%, 10%, 25% y 50%. El sustrato comercial se usó como tratamiento control.

El experimento se desarrolló en el vivero forestal de la Generalitat Valenciana ubicado en Guardamar del Segura (Alicante). Se utilizaron bandejas forestales de 60 alvéolos utilizadas para el cultivo de especies de semilla pequeña en viveros. Se sembraron las 3 especies seleccionadas: adelfa (*Nerium oleander* L.), ciprés de Cartagena (*Tetraclinis articulata*) y efedra (*Ephedra fragilis*), habitualmente utilizadas en reforestación en la zona mediterránea por su resistencia y rápido crecimiento. Las bandejas se dispusieron de forma aleatoria en el vivero.

Métodos analíticos

Los parámetros químicos, físicos y físico-químicos estudiados en los materiales iniciales y en los sustratos elaborados se determinaron siguiendo los métodos descritos por Bustamante y col. (2008).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis MLG-Univariante con contraste post-hoc Tukey-b, teniendo en cuenta las variables: tipo de ingrediente usado en los sustratos y la proporción de sustitución del sustrato comercial. Se utilizó el programa estadístico SPSS 15.0

Desarrollo de medios orgánicos de transición para asegurar la supervivencia de especies aromáticas utilizadas en reforestación

El trabajo **“Aseguramiento de la supervivencia nutricional de especies vegetales para reforestación en entornos mediterráneos: estudio comparativo de medios orgánicos de transición (2017)”** fue publicado en las V Jornadas de la Red Española de Compostaje y en él se planteó un ensayo de validación de 5 materiales orgánicos para su uso como aditivo en medios de cultivo en contenedor para la transición de especies arbustivas de repoblación. Los materiales orgánicos ensayados fueron:

- Compost CTP: 70,2% tronco de palmera + 29,8% lodo EDAR.
- Compost CHP: 63,8% hoja de palmera + 36,2% lodo EDAR.
- Vermicompost VG de origen ganadero.
- Material pelletizado del compost CTP (PCTP).
- Material pelletizado del vermicompost VG (PVG).

Los pellets (6 mm diámetro y 25 mm largo) fueron elaborados mediante pelletizadora por extrusión ZhangqiuFadall modelo SKJ450. Se usaron 2 fertilizantes inorgánicos de liberación lenta NPK 15-15-15 Nutricote®, de 3 y 6 meses (FILL3 y FILL6) respectivamente, como referencia. Estos fertilizantes se añadieron de forma que se incorporara 1g de N total por tiesto (en el rango de la entrada de N para los tratamientos orgánicos). Se utilizó un ingrediente estructural formado por turba y fibra de coco (50-50% v/v) que componía el 100% del volumen en el caso de los tratamientos con fertilización inorgánica y para el control/testigo sin fertilizar (B), y el 75% del volumen en los tratamientos con materiales orgánicos, donde el 25% restante lo componían los 5 materiales orgánicos ensayados (CTP, CHP, VG, PCTP y PVG).

Se usaron tiestos de 1700 cm³, donde se implantaron cepellones forestales de 250 cm³ con plantas aromáticas autóctonas, lavanda (*Lavanduleae*) y tomillo (*Thymus vulgaris*) producidas en el centro experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar en El Ejido (Almería). Se prepararon en total 8 tratamientos con 24 repeticiones por tratamiento y cultivo que se colocaron al azar y se mantuvieron en crecimiento durante 6 meses en invernadero ubicado en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela.

Métodos analíticos

En los sustratos se determinaron propiedades físicas, físico-químicas, así como iones en el extracto de saturación según los métodos descritos por Bustamante y col. (2008).

En ambos cultivos se determinaron el desarrollo vegetativo y la producción de biomasa en raíz, tallo y hojas.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico ANOVA de una vía en todos los tratamientos para ver la influencia del tipo de material usado en sustitución a la turba. Como prueba post-hoc se empleó la prueba Tukey-b para evaluar las diferencias entre medias específicas, mostrándose en los resultados mediante el empleo de letras para una probabilidad del 95% ($P < 0,05$).

5. RESUMEN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN



5 Resumen de resultados y discusión

VALIDACION DE SUSTRATOS EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Uso de compost de estiércoles como ingrediente de sustrato

Efecto del pretratamiento de lavado sobre los compost

En general, el pretratamiento de lavado aplicado a los compost produjo un efecto significativo en varias de las propiedades finales de los materiales. Los valores de pH aumentaron levemente en todos los composts excepto en el M3, cuyo valor se mantuvo constante, y el compost D1, cuyo valor disminuyó con el pretratamiento. Sin embargo, la conductividad eléctrica (CE) disminuyó claramente en todos los compost después del pretratamiento, con porcentajes de disminución de 40,7% para M1, 12,8% para M2, 26,9% para M3, 26,4% para D1 y 31,2% para D2. Este efecto fue especialmente notable en los compost con mayor salinidad inicial (M1, D1 y D2), lo que indica la eliminación de iones. La contribución de los iones a la CE depende de su cantidad total lixiviada y de su concentración inicial en el compost, por lo tanto, de la eficiencia de lixiviación. La concentración de iones en el compost depende de los materiales de desecho iniciales y el proceso de compostaje, es decir, de las características físicas y químicas del compost, como el tamaño de las partículas, densidad aparente, capacidad total de retención de agua y especialmente contenido de materia orgánica.

En cuanto a los parámetros químicos, el pretratamiento de lavado pareció producir una reducción de la fracción orgánica, probablemente debido a la lixiviación de la fracción orgánica soluble en agua. La concentración total de los principales macronutrientes (N, P y K) y de Na (uno de los principales iones fitotóxicos junto con el cloruro) también disminuyó después del pretratamiento de lavado, especialmente para K y Na, debido a su naturaleza altamente soluble en el compost.

Efecto sobre las propiedades físicas y químicas del sustrato de cultivo

La incorporación de los compost a los sustratos tuvo un efecto variable sobre las propiedades físico-químicas según el tipo de compost. El uso de compost derivados de estiércol (M1, M2 y M3) indujo a valores de pH (valores medios) más altos que los de los digeridos anaeróbicos, mientras que los valores de CE más bajos se observaron en los sustratos preparados con compost M2 y D1. Asimismo, el porcentaje creciente de compost en las mezclas, aumentó los valores de pH y CE. Además, el pretratamiento de lavado indujo un aumento del pH y una

reducción de la CE. En cuanto a las características físicas, en general, los valores medios fueron similares a los de la turba pura (tratamiento control) y dentro o cerca de los valores óptimos de un medio de cultivo ideal. El pretratamiento de lavado fue la variable que mostró mayor influencia, con importantes efectos sobre todas las propiedades físicas. Esto podría deberse a cambios en el tamaño de las partículas y la distribución de los poros en los compost lavados, como muestra la reducción de la capacidad de aire y el aumento del espacio poroso total, la capacidad total de retención de agua y la contracción (Fornes y col., 2010) reportaron una relación entre la eficiencia del desplazamiento de la sal durante la lixiviación y el tipo de compost. Estas variaciones se deben a la eficiencia de la lixiviación.

Todos los factores estudiados (tipo de compost, proporción en el sustrato y pretratamiento) mostraron una influencia significativa en las características químicas del sustrato. Este hecho fue especialmente relevante para las concentraciones de los elementos solubles en agua, que aumentaron con el aumento de la proporción de compost y fueron más altas en los medios de cultivo en comparación con la turba. Sin embargo, se observó el comportamiento contrario para el pretratamiento de lavado, mostrando una disminución en las concentraciones de estos elementos con respecto al compost original.

Germinación de semillas y crecimiento de plántulas

Los factores considerados mostraron una influencia significativa, especialmente el origen del compost y el pretratamiento de lavado, en la germinación de la semilla de pimiento. La incorporación de los compost M1, M3 y D2 en los sustratos indujo los valores más bajos de germinación de semillas, coincidiendo este hecho con el mayor aumento de la salinidad producido por estos compost cuando fueron incorporados a los sustratos. La proporción de compost en los sustratos solo produjo una disminución en la germinación en el porcentaje más alto de sustitución de turba (75%). Sin embargo, el pretratamiento de lavado de los compost tuvo un efecto positivo en la germinación de la semilla de pimiento, probablemente debido al efecto de reducción de la salinidad.

Además, el porcentaje de compost en el sustrato y el pretratamiento de lavado influyó significativamente en el peso fresco aéreo y radical, que presentó los valores promedio más altos para el porcentaje de 25% de compost y para el pretratamiento. Estos resultados muestran que el pretratamiento de lavado tuvo un efecto positivo en la germinación, la altura de los brotes y en la producción de biomasa de plántulas de pimiento. En este experimento, los incrementos en la producción de biomasa de las plántulas a pesar del pretratamiento de lavado indican que

la salinidad se ha reducido, pero sin implicar un efecto negativo en la germinación y crecimiento de las plántulas asociado a la disminución de los elementos minerales solubles en agua.

Análisis de componentes principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales realizado para todos los resultados indicó que los dos primeros componentes o factores explicaron juntos más del 69% de la variabilidad total (54,03% y 15,14%, respectivamente). El factor 1 clasifica los grupos en función de la proporción de compost, así las mezclas con mayores porcentajes de compost (50-75%) están asociadas con el lado positivo de este factor. Los contribuyentes positivos a este factor incluyeron todos los parámetros relacionados con las fracciones de elementos solubles en agua y totales. Por otro lado, el factor 2 asociado al compost lavado fue influenciado principalmente por los parámetros asociados a las características de la plántula.

Uso de residuos y compost derivados de palmera como ingrediente de sustrato

Características físico-químicas y físicas de los medios de cultivo

Atendiendo a las propiedades físico-químicas de los medios de cultivo, se observó que el tipo de ingrediente tiene un efecto significativo tanto en los valores de pH como de conductividad eléctrica (CE). Los medios de cultivo con los materiales derivados de hojas de palmera (PL y LC) mostraron valores de pH dentro del rango óptimo para un sustrato, mientras que el resto de sustratos presentaron valores de pH ligeramente superiores a los valores de referencia, excepto los sustratos con tronco de palmera (PT). Por otro lado, el tipo de Ingrediente tiene una clara influencia en la salinidad de los medios de cultivo, mostrando únicamente los sustratos con fibra de coco y PL, valores de CE similares o ligeramente superiores al valor límite establecido (Abad y col., 2001; Noguera y col., 2003). Los sustratos preparados con compost (LC y TC) presentaron los mayores valores de CE, siendo muy superiores al valor límite de CE. La proporción del Ingrediente en el medio de cultivo no mostró ningún efecto sobre los valores de pH, pero influyó en los valores de conductividad eléctrica, los cuales aumentaron significativamente con el porcentaje del Ingrediente en el sustrato, no observándose una diferencia significativa entre los porcentajes de 80% y 100%. Esta tendencia también fue observada en estudios previos de sustitución de turba utilizando materiales orgánicos de origen similar (Ceglie y col., 2015; Tittarelli y col., 2009; Ceglie y col., 2011) o diferente (Bustamante y col., 2008; Bustamante y col., 2021).

En cuanto a las características físicas estudiadas en los medios de cultivo, la mayoría de ellas presentan valores dentro del rango óptimo. Sin embargo, la capacidad de retención de agua fue crítica, con valores promedio inferiores al rango de referencia, excepto para la fibra de coco y los sustratos con compost de tronco de palmera, siendo especialmente baja para los sustratos con hoja de palmera (PL).

La proporción de los Ingredientes en los sustratos también tuvo un efecto significativo sobre las propiedades físicas, excepto por la contracción. Sin embargo, en general no se observó una tendencia clara en función del porcentaje: este hecho solo se observó para la densidad aparente (BD) y el espacio poroso total (TPS). Estas propiedades están inversamente correlacionadas en los sustratos, ya que una baja densidad aparente está asociada a un espacio libre de poros elevado (Ceglie y col., 2015). Esto concuerda con los resultados obtenidos para estas propiedades, ya que BD aumentó con el aumento de la proporción de ingrediente en la composición del medio de cultivo, mientras que TPS disminuyó con la proporción.

Características químicas de los medios de cultivo

En cuanto al efecto del tipo y proporción de los ingredientes en los medios de cultivo estudiados, sobre sus propiedades químicas, los sustratos preparados utilizando PL y PT presentaron las mayores concentraciones de materia orgánica (MO), similares o ligeramente inferiores a la fibra de coco.

Por otro lado, los sustratos con LC en su composición presentaron la mayor concentración de nitrógeno total (NT), muy superior al sustrato con 100% fibra de coco. La proporción creciente de ingredientes en los medios de cultivo disminuyó las concentraciones de MO, encontrando la tendencia opuesta para NT. Bustamante y col. (2021) indicaron las mismas tendencias en un estudio que utilizó compost de residuos ganaderos como ingredientes del sustrato.

El tipo de ingrediente y su respectiva proporción en el medio de cultivo también mostraron un efecto significativo sobre los iones hidrosolubles. Para todos los iones estudiados, las concentraciones más altas se encontraron en los sustratos compuestos por LC y TC, coincidiendo con los valores más altos de conductividad eléctrica encontrados en los sustratos con estos ingredientes, respectivamente. La proporción creciente de los Ingredientes en los sustratos también aumentó las concentraciones de los iones hidrosolubles considerados (K , Na , NO_3^- -N, SO_4^{2-} , Cl^-), superando los valores límite establecidos en estudios previos (Abad y col., 1992; Abad y col., 2001). Solo los sustratos preparados con fibra de coco, PL y PT mostraron concentraciones adecuadas de NO_3^- -N, SO_4^{2-} , con valores dentro del rango adecuado para un sustrato óptimo (Abad y col., 1992; Abad y col., 2001). Medina y col. (2009) también indicaron un aumento significativo en los iones del extracto soluble en agua al aumentar la proporción de sustratos de

champiñón usados como ingredientes de los medios de cultivo, debido al contenido de sal de estos residuos.

Germinación y parámetros morfológicos de las plántulas de lechuga

Las plántulas cultivadas en los sustratos con fibra de coco, PL y PT mostraron los mayores porcentajes de germinación, siendo estos valores estadísticamente similares entre ellos. La proporción de los ingredientes también tuvo un efecto estadísticamente significativo, decayendo la germinación con la proporción de ingrediente en el sustrato, lo que se puede explicar por el aumento de las concentraciones de iones hidrosolubles encontrados, reflejado también en los valores crecientes de conductividad eléctrica. Además, los medios de cultivo con LC y TC en su composición presentaron los menores porcentajes de germinación, coincidiendo con los mayores contenidos de salinidad observados en estos sustratos. Este comportamiento también ha sido observado por diferentes estudios utilizando residuos orgánicos y/o compost como ingredientes del sustrato (Medina y col., 2009; Ceglie y col., 2015; Bustamante y col., 2021).

En cuanto a los parámetros morfológicos, los mayores valores de altura de las plántulas se observaron en los sustratos con fibra de coco y una proporción de 20% de ingrediente (80% fibra de coco). En general, la altura disminuyó con la proporción decreciente del ingrediente, mostrando únicamente una mayor altura con 20% de ingrediente que con 0%, probablemente debido a la incorporación de nutrientes, como N y P, con los residuos orgánicos y/o compost, como se ha informado en trabajos anteriores (Bustamante y col., 2008; Sáez y col., 2016; Bustamante y col., 2021).

En cuanto al peso fresco y seco aéreo y de raíz, la tendencia general mostró un efecto significativo del tipo y porcentaje de Ingrediente en los medios de cultivo, los sustratos con LC y fibra de coco presentaron el mayor peso fresco y seco aéreo y el mayor peso fresco y seco de raíz, respectivamente. La proporción decreciente de los ingredientes en los sustratos produjo un aumento en los valores de estos parámetros morfológicos, a excepción del peso fresco y seco aéreo, con valores superiores para la proporción de 20% que 0% de ingrediente. Bustamante y col. (2021) encontraron este último efecto, con las proporciones correspondientes de 25% y 0% de compost, probablemente debido a la incorporación de nutrientes con los ingredientes.

Análisis quimiométrico: Random Forest (RF) y análisis de clústers jerárquicos (HCA)

El análisis Random Forest muestra todas las variables analizadas y remarcó las variables más relevantes para explicar la proporción de fibra de coco en el medio de cultivo, que son H, GI, Cl, TPS y RFW. El enfoque basado en árboles Random Forest (RF), que consistió en algoritmos basados en la inducción de reglas que dividen el espacio del conjunto de datos en varios subespacios de clase (Breiman y col., 2001), se llevó a cabo para evaluar las variables que están mejor relacionadas con la proporción de fibra de coco en el sustrato. El valor p corresponde al incremento en el error cuadrático medio (MSE) de los árboles generados. Además, los puntos rojos corresponden a las variables WSK y ADW, con importancia en los análisis ($p\text{-value} < 0,01$), pero que aparecen en menos árboles que el resto mencionado. Este enfoque muestra que las principales variables relacionadas con la proporción de ingrediente en la mezcla son principalmente parámetros morfológicos, como la germinación, la altura de la plántula y el peso fresco de la raíz, así como parámetros químicos y físicos, cloruro y espacio poroso total, respectivamente. Además, aunque con menor relevancia, el K hidrosoluble y el seco aéreo parecen estar relacionados con el porcentaje de fibra de coco en los medios de cultivo estudiados.

El análisis de clústers jerárquicos (HCA) se llevó a cabo para estudiar la posibilidad de agrupar los diferentes medios de cultivo en función de sus características similares, dependiendo del ingrediente incorporado y la proporción utilizada. Los resultados de HCA mostraron tres grupos principales. Uno de ellos agrupó la fibra de coco (CF) con el medio de cultivo constituido por hojas de palmera (PL) y tronco de palmera (PT) en todas las proporciones, demostrando que estos ingredientes incorporados en el medio de cultivo tuvieron un comportamiento similar al de la fibra de coco, considerando los parámetros estudiados. Este resultado confirma el comportamiento observado en la mayoría de los parámetros estudiados en los sustratos y en las plántulas de lechuga. El segundo grupo lo constituyen los sustratos con compost de tronco y hojas de palmera (TC y LC, respectivamente), con proporciones de estos ingredientes similares o inferiores al 60% y el tercer grupo lo forman los sustratos con TC y LC en porcentajes iguales o superiores al 80% del ingrediente. Estos resultados también destacaron el efecto diferente del tipo de material y de la proporción, especialmente en el caso de los compost, sobre las propiedades del medio de cultivo y sobre las características de las plántulas.

VALIDACION DE SUSTRATOS PARA ESPECIES VEGETALES UTILIZADAS EN REFORESTACIÓN EN AMBIENTES MEDITERRÁNEOS

Validación de sustratos para la producción de especies utilizadas en reforestación

Propiedades físicas de los sustratos

Se establecieron los principales parámetros físicos de los tratamientos empleados. En general todos los sustratos presentaron propiedades físicas apropiadas, con unos valores dentro de los rangos considerados como óptimos para los sustratos. Estadísticamente, el tipo de material orgánico empleado mostró una mayor influencia en la capacidad de aireación que la proporción empleada: esta propiedad fue similar para todos los porcentajes de sustitución y similar estadísticamente a la del sustrato comercial.

Cabe destacar la modificación en las propiedades físicas al emplear el sustrato: esto queda reflejado en las diferencias presentadas entre el sustrato comercial y el mismo sustrato agotado tras un ciclo de cultivo.

Efectos sobre el peso fresco y seco de la parte aérea del material vegetal

Entre los factores analizados se encuentran: tipo de ingrediente, proporción y tipo de especie vegetal. Además, se examinó la biomasa aérea fresca y seca de las tres especies vegetales empleadas (adelfa, efedra y tetraclinis).

El tratamiento elaborado con el compost obtenido de la mezcla de tronco de palmera y lodo de depuradora (compost TP) fue el que presentó un rendimiento semejante al sustrato comercial, a nivel estadístico. En este compost TP se obtuvo el mayor peso fresco y seco de biomasa aérea, por otro lado, el medio de transición elaborado con vermicompost presentó, estadísticamente, una menor biomasa fresca y seca de la parte aérea, llegando a ser inferior que en el medio de cultivo elaborado con sustrato agotado.

Atendiendo a los porcentajes de sustitución en los sustratos, las mezclas al 50% (v/v) mostraron el mayor peso fresco y seco; por otro lado, los porcentajes de sustitución al 10% y 25% presentaron los valores más bajos. Respecto a estos parámetros, los mejores resultados de sustitución se advirtieron en el siguiente orden de especies: adelfa > tetraclinis > efedra.

Validación de medios orgánicos de transición para asegurar la supervivencia de especies aromáticas utilizadas en reforestación

Propiedades físicas y químicas

Los sustratos elaborados a base de materiales orgánicos presentaron propiedades físicas apropiadas, en el rango de valores estimados como óptimos por varios autores. Estos resultados fueron mejores en el caso de la capacidad de retención de agua para los tratamientos inorgánicos FILL 3 y FILL6 y el control. La capacidad de cambio catiónico fue mayor en los sustratos que contienen compost-vermicompost, aumentando de esta manera el potencial amortiguador a nivel fertilizante, aunque el contenido en aniones (como cloruros, nitratos y sulfatos) en el extracto de saturación fue mayor que en los medios FILL 3, FILL 6 y el control. Esta circunstancia presenta un riesgo de salinización, lo que ha sido corroborado con los datos de la conductividad eléctrica, donde se obtuvieron valores más elevados para los cationes, lo cual se muestra como un efecto favorable para la nutrición vegetal, excepto por el Na⁺.

En varios sustratos, como el compost de hoja de palmera y el material pelletizado de tronco de palmera, se apreció un mayor contenido de agua útil al mismo tiempo que una menor capacidad de aireación. Tanto el espacio poroso total como el pH no resultaron alterados en los medios de cultivo por los diferentes sustratos.

Crecimiento de las plántulas

Los tratamientos con un 25% del volumen del contenedor de material orgánico como ingrediente no produjeron una cantidad de biomasa comparable a los tratamientos de fertilización inorgánica de liberación lenta utilizados (FILL 3 y FILL 6) sólo resultaron ser superiores al control para el compost de hoja de palmera en la lavanda. Para estas plantas, los tratamientos de compost de tronco, compost de hojas y el material pelletizado de compost de tronco de palmera mostraron valores en los parámetros morfológicos más próximos a los obtenidos con la fertilización inorgánica de liberación lenta. En el cultivo de tomillo, la integración de materiales orgánicos a los tratamientos dio lugar a un efecto más beneficioso, sobre los parámetros morfológicos que los tratamientos FILL 3, FILL 6 y el control. Destaca el material pelletizado de compost de tronco de palmera para el área foliar, el compost de tronco de palmera y vermicompost para la ratio hoja/raíz (m.s.) y en general todos los tratamientos, excepto el vermicompost pelletizado, para la ratio hoja+tallo/raíz (m.s.).

6. CONCLUSIONES GENERALES

6 Conclusiones generales

DESARROLLO Y VALIDACION DE SUSTRATOS EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Uso de compost de estiércoles como ingrediente de sustrato

- ✓ El uso de un pretratamiento de lavado fue un método efectivo para reducir la salinidad en los compost derivados de residuos ganaderos antes de su uso como ingredientes del sustrato.
- ✓ Este pretratamiento y el porcentaje de compost en el sustrato mostraron una influencia significativa en la germinación y crecimiento de las plántulas, las cuales presentaron los valores promedio más altos para el porcentaje de 25% de compost independientemente de su origen, y para el uso del pretratamiento.
- ✓ El pretratamiento de lavado no influyó negativamente en las propiedades físicas de los sustratos obtenidos, los cuales fueron adecuados para la producción de plántulas.
- ✓ La pérdida de elementos hidrosolubles debido al tratamiento de lavado no tuvo un efecto negativo, como ya quedó reflejado en el efecto positivo sobre la germinación de las semillas y la producción de biomasa de plántulas de pimiento de los medios de cultivo con los compost lavados.

Uso de residuos y compost derivados de palmera como ingredientes de sustratos

- ✓ Los medios de cultivo preparados con materiales orgánicos derivados de la palmera (*Phoenix dactylifera* L.) y fibra de coco han mostrado propiedades adecuadas para la producción comercial de lechuga para trasplante (*Lactuca sativa* L. var. Senna).
- ✓ El tipo y la proporción de los ingredientes utilizados en los medios de cultivo tuvieron un claro efecto sobre las propiedades del sustrato y sobre la germinación y las características morfológicas de las plántulas de lechuga.
- ✓ Los porcentajes más bajos de germinación fueron observados en los sustratos compuestos por los compost de hoja de palmera y tronco de palmera (LC y TC, respectivamente), así como en las proporciones más altas debido a su mayor contenido salino comparados con los materiales fibrosos sin compostar, lo que podría ser un aspecto limitante para su uso como componentes de sustratos.

- ✓ Sólo los sustratos con los compost LC y TC en proporciones inferiores al 60% tuvieron un comportamiento más cercano al observado en los medios de cultivo con 100% fibra de coco.
- ✓ Los sustratos constituidos por hoja de palmera (PL) y tronco de palmera (PT) en todas las proporciones mostraron las características y efectos más similares en la respuesta de las planta a la fibra de coco, sin ningún efecto negativo sobre la germinación y los parámetros morfológicos de la planta.
- ✓ Las herramientas quimiométricas utilizadas (Random Forest y Análisis Jerárquico de Cluster) permitieron identificar las variables que mejor se relacionaban con la proporción de fibra de coco en el sustrato y agrupar los medios de cultivo que eran más similares a la fibra de coco (PL y PT).

DESARROLLO Y VALIDACION DE SUSTRATOS PARA ESPECIES VEGETALES UTILIZADAS EN REFORESTACIÓN EN AMBIENTES MEDITERRÁNEOS

Desarrollo y validación de medios orgánicos de transición para la producción de especies utilizadas en reforestación en ambientes mediterráneos

- ✓ Todas las mezclas elaboradas con los diferentes materiales orgánicos considerados (compost de residuos de palmera y lodo de depuradora, vermicompost de origen ganadero y sustrato agotado) mostraron unas propiedades físicas adecuadas para su uso como sustratos de cultivo.
- ✓ Aunque las propiedades físicas del sustrato agotado se vieron modificadas con respecto al mismo sustrato sin haber pasado un ciclo de cultivo (sustrato comercial), esto no produjo un efecto negativo sobre el peso fresco y seco de planta en ninguna de las especies vegetales consideradas.
- ✓ Los compost utilizados, especialmente el compost elaborado con hoja de palmera y lodo de depuradora (compost HP), así como la proporción de sustitución al 50% (v/v) mostraron los mejores resultados en las tres especies estudiadas, siendo este efecto especialmente destacable en el cultivo de adelfa.

Desarrollo y validación de medios orgánicos de transición para asegurar la supervivencia de especies aromáticas utilizadas en reforestación en ambientes mediterráneos

- ✓ Los medios de transición con materiales orgánicos en su composición mostraron adecuadas propiedades físicas y mejoraron aspectos químicos como la capacidad de cambio catiónico y el contenido nutriente con respecto a los tratamientos inorgánicos de liberación lenta.
- ✓ Estos medios también implicaron una mayor salinidad, que pudo influir en la menor producción de biomasa observada en ambos cultivos. Por ello, son necesarios más estudios para optimizar la proporción más adecuada de estos materiales en medios de cultivo de transición.



7. PERSPECTIVAS DE FUTURO





7 Perspectivas de futuro

El propósito principal de este trabajo era la propuesta de soluciones sostenibles para reducir el uso de turba en el sector del cultivo sin suelo basadas en el uso de residuos orgánicos compostados o no, como ingrediente de sustratos. Durante la realización de este trabajo he podido constatar la alta dependencia de la turba en el sector del cultivo sin suelo, ya que actualmente la mayoría de los medios de cultivo emplean sustratos basados en turba, y este es un sistema que no se puede mantener a largo plazo, por lo que es necesaria una mayor variedad de materiales renovables disponibles y eficaces para este sector.

Adicionalmente, es necesaria una concienciación a nivel empresarial y de la sociedad, en general, para empezar a funcionar en un nuevo entorno de economía circular, donde se priorice el reciclado o reutilización de los residuos orgánicos de origen agroindustrial, urbano, ganadero y agrícola. Así, los compost elaborados con flujos residuales orgánicos de diferentes sectores pueden constituir un ejemplo de recircularización en el entorno, al postularse como materiales alternativos a la turba, que además pueden aportar valores añadidos al cultivo. En el transcurso de los ensayos que dan lugar a este trabajo, también he sido consciente de la necesidad del sector viverístico de disponer de un material estable, que se pueda adaptar según las necesidades en cada momento. En este sentido, un aspecto negativo podría ser la alta heterogeneidad de estos materiales orgánicos (compostados o no), que podrían dificultar su uso comercial en el sector. Por esto considero que resultaría clave una estimación previa de las propiedades más importantes de estos materiales iniciales en el proceso de compostaje, de las que dependerá el rendimiento del material y el producto final obtenido.

En este contexto, los grandes retos y oportunidades en la gestión y tratamientos de flujos de materia orgánica en nuestro entorno, deberían orientarse a:

- **Búsqueda** de nuevos materiales alternativos. Es muy amplia y variada la cantidad de materiales orgánicos susceptibles de ser usados como componentes para sustrato (fibras, compost, etc.) por lo que se debe seguir investigando sus características y comportamiento.
- Estudio de flujos residuales de composición más o menos **estable** en el tiempo y de producción continua (estiércoles, lodos de depuradora, FORS, restos de poda, etc.) que nos permitan obtener compost de características reproducibles, adecuados a las necesidades del sector.

- **Convencer** de los beneficios de la sustitución de un material, como es la turba, cuya obtención presenta unos perjuicios medioambientales, por otro material (el compost), reutilizando la materia orgánica que además aportará beneficios nutricionales al cultivo.

- **Comunicación** entre empresas productoras de compost y el sector viverístico y hortícola para que exista una correspondencia con las necesidades de cada sector, imprescindible para la elaboración de compost de calidad. Esto permitirá una producción de **compost a la carta**, implicando a los usuarios finales para una mejor planificación y mejorar la calidad del producto, (obteniendo mezclas que presenten menos salinidad, o más nitrógeno, o menor pH, etc).

- En lo referente a investigación, realizar más **ensayos** para adecuar las proporciones de uso de los residuos compostados o tratados y obtener una composición que garantice su uso como sustrato, tratando de maximizar el rendimiento de los cultivos; que pueda extenderse su empleo a cualquier cultivo o sistema forestal, con el menor empleo de turba.

- Adaptar a una **escala** significativa el manejo de los materiales disponibles como componentes de sustratos de cultivo de valor añadido. Escalar las mezclas de sustratos de cultivo a grandes volúmenes (toneladas) sin modificar las propiedades determinadas en el laboratorio, considerando también el tiempo de almacenaje y que el transporte sea factible (disponible localmente y/o ligero) garantizando el suministro seguro del material para su posterior uso en el sector comercial.

- Creación de nuevas **plantas de compostaje** o macrocompostaje que podrían satisfacer la demanda de sustratos del sector del cultivo sin suelo, a la vez que se introducen nuevos aspectos sociales relacionados con la demanda de puestos específicos de empleo que generaría el uso de este tipo de materiales frente a la turba.

8. BIBLIOGRAFÍA





8 Bibliografía

- Abad, M., Martínez, P.F., Martínez, M.D., Martínez, J., 1992. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 23, 45-61.
- Abad M, 1993. Sustratos para el cultivo sin suelo: Inventario y características. En *Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo*, ed., F. Cánovas, J. R. Díaz. I.E.A./F.I.A.P.A., Almería, 63-80.
- Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*, ed. C. Cadahia. Madrid. Ed. Mundi-Prensa. 681 pp.
- Abad, M., Noguera, P., Burés, S., 2000. Inventario de sustratos y materiales para ser utilizados como sustratos o componentes de sustratos en España. *Acta Hortic.*32, 361–377.
- Abad, M., Noguera, P., Bures, S., 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77 (2), 197–200.
- Abad, M., Noguera, P., Carrión, C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. *Tratado de cultivo sin suelo*. Madrid, Ed. Mundi-Prensa, 113-158.
- Abad, M., Noguera, P., Noguera, V., 1997. Crecimiento de plantas ornamentales de hoja en sustratos de cultivo a base de fibra de coco. *Actas de horticultura*, 17, 76-81.
- Abad. M., Fornes, F., Mendoza-Hernández, D y García de la Fuente, R., 2008. Uso de compost como sustrato o componente de sustratos en viveros y semilleros. *Tendencias futuras. Actas de horticultura* 53, 14-25.
- Alburquerque, J. A., Bautista-Carrascosa, I., Lidón, A., García-de-la-Fuente, R., Girbent, J., Abad, M., Cegarra, J., 2009. Co-composting an animal fatty-proteinaceous waste with a solid lignocellulosic by-product from the olive oil industry (“alperujo”). *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 84, 918-926.
- Aleandri, M. P., Chilosi, G., Muganu, M., Vettrano, A., Marinari, S., Paolocci, M., Luccioli, E., Vannini, A., 2015. On farm production of compost from nursery green residues and its use to reduce peat for the production of olive pot plants. *Scientia Horticulturae*, 193, 301-307.
- Ansorena, J., 1994. Sustratos. *Propiedades y características*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 172 pp.

- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Babenko, A., Cannon, J., Galvis, P., Metzger, J. D., 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology*, 39, 91-99.
- Atiyeh, R. M., Edwards, C. A., Subler, S., Metzger, J. D., 2001. Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: Effects on physicochemical properties and plant growth. *Bioresource Technology*, 78, 11-20.
- Azarmi, R., Giglou, M. T., Taleshmikail, R. D., 2008. Influence of vermicompost on soil chemical and physical properties in tomato (*Lycopersicum esculentum*) field. *African Journal of Biotechnology*, 7, 2397-2401.
- Baffi C., Dell'Abate M. T., Nassisi A., Silva S., Benedetti A., Genevini P. L., et al., 2007. Determination of biological stability in compost: A comparison of methodologies. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 1284-93.
- Baixauli, C., Aguilar, J. M., 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. Generalitat Valenciana. Consellería de Agricultura, Peixca i Alimentació. Valencia (España). I.S.B.N.: 84-482-3145-7.
- Benito, M., Masaguer, A., De Antonio, R., Moliner, A. 2005. Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. *Bioresource Technology*, 96, 597-603.
- Bernal M. P., Hunce S. Y., Clemente, R., 2018. Repercusión de las propiedades del agente estructurante en la generación de energía durante el compostaje. *Gestión integral de residuos orgánicos. Poniendo en marcha la economía circular en la sociedad*. 6as Jornadas de la Red Española de Compostaje, pp. 173 - 178. Valencia, Comunidad Valenciana (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-09-09152-2.
- Bernal, M. P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M. A., Cegarra, J., 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63(1), 91-99.
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100, 5444-5453.
- Bertrán, E., Sort, X., Soliva, M., Trillas, I., 2004. Composting winery waste: sludges and grape stalks. *Bioresource Technology*, 95, 203-208.

- 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.
- Bidlingmaier, W., 1996. Odour emissions from composting plants. En: *The Science of Composting*, ed. De Bertoldi, M; Sequi, P.; Lemmes, B. y Papi, T. Ed. Blackie Academic & Professional, London, vol I, 71-79.
- Blanco y Almendros, 1997. Chemical transformation, phytotoxicity and nutrient availability in progressive composting stages of wheat straw. *Plant and soil*, 196 (1), 15-25.
- Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., Lifset, R. 2017. Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 21, 476-482.
- BOE, 1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado*, 262, 32339 - 32340 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1990-26490>.
- BOE, 2010. Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. *Boletín Oficial del Estado*, 170, 61831 - 61859. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2010-11153.
- BOE, 2016. Orden PRA/1943/2016, de 22 de diciembre, por la que se modifican los anexos I, II, IV y VI del Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. *Boletín Oficial del Estado*, 309, 89958 - 89960. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-12222.
- BOE, 2022. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. *Boletín Oficial del Estado*, 85. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7/con>.
- Boluda, R., Roca-Pérez, L., Soriano, M.D., 2018. Compostaje y uso agrícola del compost: beneficios e implicaciones para la economía circular y la producción de productos hortícolas. II Jornada de Investigación Universitaria sobre Cambio Climático ORGANIZA: Cátedra de Cambio Climático, UPV-GVA.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Bueno-Márquez, P., Díaz-Blanco, M. J., Cabrera, F. 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje. En *Compostaje*, ed. Moreno J., y Moral R. Ed. Mundi-Prensa, 111-140.

- Bullock, C. H., Collier, M. J., Convery, F., 2012. Peatlands, their economic value and priorities for their future management-The example of Ireland. *Land Use Policy*. 29 (4), 921 - 928.
- Bunt, A. C., 1988. *Media and Mixes for Container-Grown Plants: A Manual on the Preparation and Use of Growing Media Pot Plants*, 2nd ed. Unwin Hyman, London, 309 pp.
- Burés, S., 1997. *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid, España. 342 pp.
- Burés, S., 1999. Introducción a los sustratos: aspectos generales. En *Tecnología de sustratos: aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal*, ed. J.N. Pastor S. Universidad de Lleida. España, 19-36.
- Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral, R., Agulló, E., Pérez-Murcia, M. D., Abad, M., 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 792–799.
- Cáceres, R., Coromina, N., Malińska, K., Marfá, O., 2015. Evolution of process control parameters during extended co-composting of Green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media. *Bioresource Technology* 179, 398-406.
- Cadahía, C., 2005. *Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Mundi-Prensa Libros, 681 pp. ISBN 8484762475.
- Cala, V., Cases, M. A., Walter, I., 2005. Biomass production and heavy metal content of *Rosmarinus officinalis* grown on organic waste-amended soil. *Journal of arid environments*. 62 (3), 401-412.
- Carmona, E., Abad, M., 2008. Aplicación del compost en viveros y semilleros. En *Compostaje*, ed. Moreno J., y Moral R. Ed. Mundi-Prensa, 397-424.
- Ceglie F. G., Bustamante M. A., Amara M B ., Tittarelli F., 2015. The challenge of peat substitution in organic seedling production: optimization of growing media formulation through mixture design and response surface analysis. *PLoS One* 10(6): e0128600. doi:10.1371/journal.pone.0128600.
- Ceglie, F. G., Elshafie, H., Verrastro, V., Tittarelli, F., 2011. Evaluation of olive pomace and green waste composts as peat substitutes for organic tomato seedling production. *Compost Science & Utilization*, 19 (4), 293-300.

- Chaney, R. L., 1989. Toxic element accumulation in soils and crops: protecting soil fertility and agricultural food chains. En *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone*, ed. B. Bar-Yosef, N. J. Barrow, J. Goldshmid. Ed. Springer-Verlag, Berlin, 140 - 158.
- Chanyasak, V., Kubota, H., 1981. Carbon/organic nitrogen ratio in water extract as measure of compost degradation. *J. Ferment. Technol.* 59, 215-219.
- Chen, Y. C., Higgins, M. J., Beightol, S. M., Murthy, S. N., Toffey, W. E., 2011. Anaerobically digested biosolids odor generation and pathogen indicator regrowth after dewatering. *Water Research*, 45(8), 2616-2626.
- Chen, Y., Inbar, Y., Raviv, M. 1983. Slurry produced by methanogenic fermentation of cow manure as a peat substitute in horticulture. En *Proceedings of the Second International Symposium Peat in Agriculture and Horticulture*, 297-317.
- Chinsamy, M., Kulkarni, M. G., Staden, J.V., 2014. Vermicompost leachate reduces temperature and water stress effects in tomato seedlings. *HortScience* 49, 1183–1187.
- Chrysargyris, A., Stamatakis, A., Moustakas, K., Prasad, M., Tzortzakis, N., 2018. Evaluation of municipal solid waste compost and/or fertigation as peat substituent for pepper seedlings production. *Waste Biomass Valor*, 9, 2285-2294.
- Comunicación de la Comisión al parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa. COM (2014)398
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2014/ES/1-2014-398-ES-F2-1.Pdf>
- Cooperband, L. R., Stone, A. G., Fryda, M. R., Ravet, J.L., 2003. Relating compost measures of stability and maturity determination to plant growth. *Compost Science & Utilization*, 11, 113-124.
- Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A., 1991. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y Utilización. Ed. CSIC-CEBAS. Murcia.
- Dargie, G. C., Lewis, S. L., Lawson, I. T., Mitchard, E. T., Page, S. E., Bocko, Y. E., Ifo, S. A., 2017. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 542, 86–90, <https://doi.org/10.1038/nature21048>.
- de Lima, M. D.; Barbosa, R. 2019. Methods of authentication of food grown in organic and conventional systems using chemometrics and data mining algorithms: a review. *Food Anal. Methods* 2019, 12, 887–901.

- Dell'Abate, M. T., Benedetti, A., Sequi, P., 2000. Thermal methods of organic matter maturation monitoring during a composting process. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 61 (2), 389-396.
- Díaz, M. J., Jiménez, L., Cabrera, F., De Bertoldi, M., 2004. Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting. *Compost Science & Utilization*, 12(3), 273-279.
- Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. DO L150/109 del 14 de junio de 2018. <https://www.boe.es/doue/2018/150/L00109-00140.pdf>.
- Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. DO L328/82 del 21 de diciembre de 2018. <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>.
- EC., 2015. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Closing the loop. An EU action plan for the Circular Economy (COM (2015) 614/2 of 2 December 2015).
- EC., 2016. Propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes con el mercado CE y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 1069/2009 y (CE) n.º 1107/2009. Paquete de la economía circular (COM (2016) 157 final 17 de marzo de 2016).
- Fernández-Suárez, M. T., Sánchez-García, F. B., Bustamante, M. A., Pérez-Murcia, M. D., Moral.R., 2018. Ensayos de diferentes modelos de valorización mediante compostaje de la fracción orgánica de los residuos domiciliarios en el municipio de bellús (valencia). *Gestión integral de residuos orgánicos. Poniendo en marcha la economía circular en la sociedad. 6as Jornadas de la Red Española de Compostaje*, pp. 173 - 178. Valencia, Comunidad Valenciana (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-09-09152-2.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. <https://www.fao.org/faostat/>.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020. Mitigación del Cambio Climático en la Agricultura. <http://www.fao.org/in-action/micca/knowledge/peatlands-and-organic-soils/es/>
- Fornes, F., Belda, R. M., Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maqueira, A., Noguera, V., 2003. The microestructure of coconut coir dusts for use as alternative to peat in soilless growing media. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 43, 766-770.
- Fornes, F., Mendoza-Hernandez, D., Belda, R. M., 2013. Compost versus vermicompost as substrate constituents for rooting shrub cuttings. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2), 518-528.
- García-Gómez, A., Bernal, M. P., Roig, A., 2002. Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology*, 83, 81–87.
- García-Rodeja, I., 1999. El sistema Tierra y el Efecto Invernadero. *Alambique*, 20, 75-84.
- Gavilanes-Terán, I., Jara-Samaniego, J., Idrovo-Novillo, J., Bustamante, M. A., Pérez-Murcia, M. D., Pérez-Espinosa, A., López, M., Paredes, P., 2017. Agroindustrial compost as a peat alternative in the horticultural industry of Ecuador. *Journal of Environmental Management*, 186, 79-87.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., Hultink, E. J., 2017. The circular economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 143, 757-768.
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of cleaner production*, 114, 11-32.
- Gil, M. V.; Calvo, L. F.; Blanco, D.; Sánchez, M. E., 2008. Assessing the agronomic and environmental effects of the application of cattle manure compost on soil by multivariate methods. *Bioresource Technology*, 99, 5763–5772.
- Giménez, A., Fernández, J. A., Pascual, J. A., Ros, M., López-Serrano, M-, Egea-Gilabert, C., 2019. An agroindustrial compost as alternative to peat for production of baby leaf red lettuce in a floating system. *Scientia Horticulturae*, 246, 907-915.
- Gong, X., Li, S., Sun, X., Wang, L., Cai, L., Zhang, J., Wei, L., 2018. Green waste compost and vermicompost as peat substitutes in growing media for geranium (*Pelargonium zonale* L.) and calendula (*Calendula officinalis* L.). *Scientia Horticulturae*, 236, 186-191.

- González-Vila, F. J., Almendros, G., Madrid, F., 1999. Molecular alterations of organic fractions from urban waste in the course of composting and their further transformation in amended soil. *Science of the total environment*, 236 (1-3), 215-229
- Granato, D.; Santos, J. S.; Escher, G. B.; Ferreira, B. L.; Maggio, R. M. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: a critical perspective. *Trends Food Sci. Technol.* 2018, 72, 83–90.
- Greco, C., Comparetti, A., Fascella, G., Febo, P., La Placa, G., Saiano, F., Mammano, M. M., Orlando, S., Laudicina, V. A., 2021. Effects of Vermicompost, Compost and Digestate as Commercial Alternative Peat-Based Substrates on Qualitative Parameters of *Salvia officinalis*. *Agronomy*, 11, 98. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010098>.
- Handreck, K. A., 1992. Growth of ferns in soil-less media, as affected by pH, iron and calcium/magnesium ratio. *Scientia Horticulturae*, 50 (1–2), 115-126. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(05\)80014-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(05)80014-7).
- Haug, R. T., 1993. *The Practical Handbook of Composting Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida USA, p. 717. ISBN 9780873713733.
- Heathwaite, A., 1994. Hydrological management of a cutover peatland. *Hydrological processes*, 8 (3), 245-262.
- Hernández-Apaolaza, L., Gascó, A. M., Gascó, J. M., Guerrero, F., 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresource Technology*, 96 (1),125-131.
- Herrera, F., Castillo, J.E., Chica, A.F., López Bellido, L., 2008. Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Bioresource Technology*, 99, 287-296.
- Hoitink, Harry A. J., Tseng, D. Y., Chalmers, J. J., Tuovinen, O.H., 1995. Characterization of a bench-scale system for studying the biodegradation of organic solid wastes. *Biotechnology Progress*, 11(4), 443-51.
- Hue, N. V., Liu, J., 1995. Predicting compost stability. *Compost Science & Utilization*. 3 (2), 8-15.
- Iglesias-Jiménez, E. y Pérez-García, V. 1991. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio, and cation exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 1, 45-60.

- Iglesias-Jiménez, E. y Pérez-García, V., 1989. Evaluation of city refuse on compost maturity. A review. *Biological Wastes*, 27, 115-42.
- Inbar, Y., Chen, Y., Hadar, Y., 1990. Humic substances formed during the compost maturity. *Biocycle*, 31, 64-69.
- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López, M., López-Lluch, D. B., Gavilanes-Terán, I., Moral, R., 2017. Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of Cleaner Production* 141, 1349-1358.
- Jayasinghe, G. Y., Liyana Arachchi, I. D., Tokashiki, Y., 2010. Evaluation of containerized substrates developed from cattle manure compost and synthetic aggregates for ornamental plant production as a peat alternative. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1412–1418.
- Jhorar, B. S., Phogat, V., 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.
- Joosten, H., Tapio-Bistrom, M. L., Tol, S., 2012. Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use. *Mitigation of Climate in Agriculture Series 5*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Wetlands International. <http://www.fao.org/docrep/015/an762e/an762e.pdf>.
- Kiehl, F. J., 1985. *Fertilizantes orgánicos*. Editora Agronómica Ceres Ltda, São Paulo. Brazil, 492 pp.
- Laos, F., 2003. *Compostaje de residuos orgánicos de actividades productivas y urbanas en la región Andino Patagónica: determinación de índices de madurez para su utilización agronómica*. Tesis doctoral Universidad Nacional del Comahue, Argentina. 148 pp.
- Liang, C., Das, K. C., McClendon, R. W., 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86, 136-137.
- Liaw, A.; Wiener, M. 2002. Classification and regression by random Forest. *R news*, 2002, 2(3), 18-22.

- López, M. J., Boluda, R., 2008. Residuos agrícolas. En Compostaje, ed. J. Moreno y R. Moral. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 489-518.
- López-Cuadrado, M. C., Ruiz-Fernández, J., Masaguer, A., 2006. Producción de planta ornamental en contenedor con sustratos alternativos a la turba. IMIDRA, Madrid, España.
- López-Rodríguez, G., Pérez-Esteban, J., Ruiz-Fernández, J., Masaguer, A., 2016. Behavior and evolution of sustainable organic substrates in a vertical garden. *Ecological Engineering*, 93, 129-134.
- Madejón, E., Díaz, M. J., López, R. y Cabrera, F., 2001. Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Bioresource Technology*. 76, 275- 278.
- Maher, M., Prasad, M., Raviv, M., 2008. Organic soilless media components. En *Soilless culture: Theory and practice*, ed. M. Raviv and J. H. Lieth. Oxford: Elsevier. 459-504.
- Masaguer, A., López-Fabal, A., Carmona, E., Fornés, F., Ordovás, J., Gómez-Sánchez, M. A., Moreno-Aguirre, M. T., Marfá, O., Cáceres, R., López-Núñez, R., Belda, R., 2015. Uso del compost como componente de sustratos para cultivo en contenedor. Tomo 2. En *Recursos Orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales*. Vol.III. Ed. Mundi-Prensa, España, pp. 244.
- Massa, D., Malorgio, F., Lazzereschi, S., Carmassi, G., Prisa, D., Burchi, G., 2018. Evaluation of two green composts for peat substitution in geranium (*Pelargonium zonale* L.) cultivation: Effect on plant growth, quality, nutrition, and photosynthesis. *Scientia Horticulturae*, 228, 213–221.
- Mathur, S. P., Owen, G., Dinel, H., Schnitzer, M., 1993. Determination of compost biomaturity. Literature review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 10, 65-85.
- Medina, E., Paredes, C., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Moral, R., 2009. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresource Technology*, 100, 4227–4232.
- Mendoza-Hernández, D., Fornes, F., Belda, R. M., 2014. Compost and vermicompost of horticultural waste as substrates for cutting rooting and growth of rosemary. *Scientia Horticulturae*, 178, 192–202.

- Michel, F. C., Pecchia, J. A., Rigot, J., 2004. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Science & Utilization*, 12(4), 323-334.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., 1993. *Wetlands*, 2nd ed. John Wiley, New York. 920 pp.
- Miyatake, F., Iwabuchi, K., 2006. Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 97, 961-965.
- Moral, R., Paredes, C., Pérez-Murcia, M. D., Pérez-Espinosa, A., Bustamante, M. A., 2013. Challenges of Composting for Growing Media Purposes in Spain and the Mediterranean Area. *Acta Horticulturae*, 1013, 25-39. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1013.1
- Moral, R., Pérez-Murcia, M. D., Pérez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C., 2005. Estimation of nutrient values of pig slurries in Southeast Spain using easily determined properties. *Waste management*, 25 (7), 719-725.
- Morales, A. B., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F. C., Moral, R., Ros, M., 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-Corts, M. R., Gómez-Sánchez, M. A., Pérez-Sánchez, R., 2014. Evaluation of green/pruning wastes compost and vermicompost, slungum compost and their mixes as growing media for horticultural production. *Scientia Horticulturae*, 172, 155-160.
- Moreno-Casco J., Moral, R., 2008. *Compostaje*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 570 pp.
- Moreno-Caselles, J., Moral, R., Paredes, C., Pérez-Murcia, M. D., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., Agulló, E., 2005. Fe, Cu, Mn and Zn input and availability in calcareous soils amended with the solid phase of pig slurry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36 (4-6), 525-534.
- Mustin, M., 1987. *Le compost. Gestion de la matière organique*. Éditions François Dubusc. Paris.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Maquieira, A., Noguera, V., 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as a container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34, 593-605.

- Nolan, T., Troy, S. M., Healy, M. G., Kwapinski, W., Leahy, J. J., Lawlor, P. G., 2011. Characterization of compost produced from separated pig manure and a variety of bulking agents at low initial C/N ratios. *Bioresource Technology*, 102, 7131-7138.
- Ostos, J. C., López-Garrido, R., Murillo, J. M., López, R., 2008. Substitution of peat for municipal solid waste- and sewage sludge-based composts in nursery growing media: Effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. *Bioresource Technology*, 99, 1793-1800.
- Page, S. E., Rieley, J. O., Banks, C. J., 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17 (2), 798–818, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>.
- Paluszynska, A.; Biecek, P.; Jiang, Y.; Jiang, M. Y., 2017. Package 'randomForestExplainer'. Explaining and visualizing random forests in terms of variable importance. R package version 0.9.
- Peñuelas, J. L., Ocaña, L., 2000. Cultivo de plantas forestales en contenedor: Principios y fundamentos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Mundi-Prensa. 190 pp. ISBN: 8471146444.
- Pérez-Murcia, M. D. y Moreno-Caselles, J., 2008. Residuos urbanos. En *Compostaje*, ed. J. Moreno y R. Moral. Ed. Mundi-Prensa. 467-488.
- Pérez-Murcia, M. D., Agulló, E., Bauxali, C., Giner, A., Ferrer, A., Andreu, F. J., Bustamante, M. A., Moral, R. 2020. Acoplamiento de flujos residuales primarios y secundarios: desarrollo de estrategias de cocompostaje entre las podas de los principales cultivos del campo valenciano y los lodos de la industria del procesado de cítricos. *Compostaje webinars 2020*. Red Española de Compostaje, 267-271. ISBN: 978-84-09-27257-0
- Pérez-Murcia, M. D., Domene, M. A., González-Céspedes, A., Sánchez-García, F. B., Fernández-Suárez, M. T., Bustamante, M. A., Moral, R., 2018. Estudio de diferentes mezclas de cocompostaje de lodos agroindustriales, con residuos agrícolas y agroalimentarios. *Gestión integral de residuos orgánicos. Poniendo en marcha la economía circular en la sociedad*. 6as Jornadas de la Red Española de Compostaje, 173 - 178. Valencia, Comunidad Valenciana (España): Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-09-09152-2.

- Pérez-Murcia, M. D., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., 2005. Used of composted sewage sludge in growth media for broccoli. *Bioresource Technology*, 97, 123-130.
- Pérez-Murcia, M. D., Pérez-Espinosa, A., Barber, X., Agulló, E., Vico, A., Saez-Tovar, J. A., Paredes, C., Bustamante, M. A., Moral, R., 2016. Gestión de la biomasa de phoenix dactylifera: I. Compostaje de tronco de palmera con lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas y agroindustriales. *Reciclando los residuos para mejorar los suelos y el medioambiente. 5as Jornadas de la Red Española de Compostaje*, Sevilla, España. 98-102. Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-617-9214-6.
- Pettygrove, G. S., Heinrich, A. L., Eagle, A. J., 2010. Dairy Manure Nutrient Content and Forms. Manure Technical Guide Series. University of California Cooperative Extension.
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022
https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf
- Price, J. S., 1996. Hydrology and microclimate of a partly restored cutover bog, Quebec. *Hydrological processes*, 10, 1263-1272.
- Provenzano, M. R., de Oliveira, S. C., Silva, M. R. S., Senesi, N., 2001. Assessment of maturity degree of compost from domestic solid wastes by fluorescence and Fourier transform infrared spectroscopies. *Journal of agricultural and food chemistry* 49(12), 5874-5879.
- Puustjärvi, V., 1994. La turba y su manejo en la horticultura. Ediciones de Horticultura. Reus
- Ramsar, 1971. Turberas. En Ramsar, La Convención sobre los Humedales, vol. 14, 2 edn, Ramsar, Irán.
- Raviv, M., Chen, Y., Inbar, Y., 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container-growth plants. En: *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, ed. Y. Chen and Y. Avnimelech. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht (The Netherlands), 257-287.
- Raviv, M., Lieth, H., 2008. *Soilless culture theory and practice*. Editorial Elsevier, 587 pp.
- 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) nº 1069/2009 y (CE) nº 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) nº 2003/2003.

- Ria, M., Cahyono, R. B., Ariyanto, T., Azzahrani, I. N., Putri, R. U., Taherzadeh, M. J., 2019. Agricultural, industrial, municipal, and forest wastes: an overview. En: Sustainable resource recovery and zero waste approaches. 1-22.
- Rigueiro-Rodríguez, A. Amador-García, N., Ferreiro-Domínguez, C., Muñoz-Ferreiro, N., Santiago-Freijanes, J. J., Mosquera-Losada, M. R., 2018. Proposing policy changes for sewage sludge applications based on zinc within a circular economy perspective. Land Use Policy 76, 839- 846.
- Rinaldi, S., De Lucia, B., Salvati, L., Rea, E. 2011. Understanding complexity in the response of ornamental rosemary to different substrates: A multivariate analysis. Scientia Horticulturae, 176, 218–224.
- Sáez, J. A.; Belda, R. M.; Bernal, M. P.; Fornes, F., 2016. Biochar improves agro-environmental aspects of pig slurry compost as a substrate for crops with energy and remediation uses. Industrial Crops and Products, 94, 97–106.
- Sánchez-García, F. B., Ten, D., Fernández-Suárez, M. T., Palenzuela, M. V., Rosello, J., García-Randez, A., Moral, R., Bustamante, M. A., Pérez-Murcia, M. D., 2018. Ensayos para la optimización del compostaje de podas de granado (*Púnica granatum*) en un entorno de acreditación global GAP©: piloto agrocompostaje Sant Joan (Alicante). Gestión integral de residuos orgánicos. Poniendo en marcha la economía circular en la sociedad. 6as Jornadas de la Red Española de Compostaje, Valencia, España. 179 - 184. Red Española de Compostaje. ISBN 978-84-09-09152-2.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig A., Paredes, C., Bernal, M. P., 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. Bioresource Technology, 78(3), 301-308.
- Santos, A., Bustamante, M. A., Moral, R., Bernal, M. P., 2016a. Carbon conservation strategy for the management of pig slurry by composting: Initial study of the bulking agent influence. Mitigation Adaptation Strategies for Global Change, 21, 1093–1105.
- Santos, A., Bustamante, M. A., Tortosa, G., Moral, R., Bernal, M. P., 2016b. Gaseous emissions and process development during composting of pig slurry: the influence of the proportion of cotton gin waste. Journal of Cleaner Production, 112, 81–90.
- Saña, J., Soliva, M., 1987. El Compostatge. Procés, Sistemes i Aplicacions. Ed. Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient. Barcelona.

- Swagemakers, P., Dominguez-Garcia, M. D., Onofa-Torres, A., Oostindie, H., Groot, J.C.J. 2017. A values-based approach to exploring synergies between livestock farming and landscape conservation in Galicia (Spain). *Sustainability*, 9 (11). <https://doi.org/10.3390/su9111987>
- Terés, V. T., 2001. Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 483 pp. ISBN 978-84-457-1809-4.
- Tittarelli, F., Rea, E., Verrastro, V., Pascual, J. A., Canali, S., Ceglie, F. G., Trinchera, A., Rivera, C. M., 2009. Compost-based nursery substrates: effect of peat substitution on organic melon seedlings. *Compost Science & Utilization*, 17 (4), 220-228.
- Tortosa, G., Albuquerque, J., Ait-Baddi, G., Cegarra, J., 2012. The production of commercial organic amendments and fertilisers by composting of two-phase olive mill waste (“alperujo”). *Journal of Cleaner Production*, 26, 48-55
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itävaara, M., 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology* 72, 169–183. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2).
- Urrestarazu, M. 2013. State of the Art and new Trends of Soilless culture in Spain and in emerging countries. *Acta Horticulturae*, 1013, 305-312. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1013.37
- Vargas García, M.C., Andreu Rodríguez, F.J., Fernández Guelfo, L.A. y col. 2014. De Residuo a Recurso: El camino hacia la sostenibilidad, Vol. I Recursos Orgánicos. 1. Residuos Agrícolas. Ed. Mundi Prensa, 257 pp.
- Veaa, E. B, Romeoa, D., Thomsena, M., 2018. Biowaste valorisation in a future circular bioeconomy 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference Denmark.
- Vico, A., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Agulló, E., Marhuenda-Egea, F. C., Sáez-Tovar, J. A., Paredes C., Pérez-Espinosa, A., Moral, R., 2018. Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *Journal of Environmental Management*, 226, 408-415. [https://doi:10.1016/j.jenvman.2018.08.035](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.035).

- Vukobratovic, M., Loncaric, Z., Vukobratovic, Z., Muzic, M., 2018. Use of composted manure as substrate for lettuce and cucumber seedlings. *Waste Biomass Valor*, 9, 25–31. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9755-2>.
- Yu, Z., Loisel, J., Brosseau, D. P., Beilman, D. W., Hunt, S. J., 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 37, L13402, doi:10.1029/2010GL043584.
- Zapata, N., Guerrero, F., Polo, A., 2005. Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de sustratos de cultivo. *Agricultura técnica*, 65 (4), 378-387.
- Zhang L., Sun X., Tian Y., Gong X., 2013. Composted green waste as a substitute for peat in growth media: Effects on growth and nutrition of *Calathea Insignis*. *PLoS ONE* 8(10): e78121. doi:10.1371/journal.pone.0078121
- Zhu, N. W., 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilotscale aerated static bin system. *Bioresource Technology*, 97(15), 1870-1875.
- Zmora-Nahum, S., Markovitch, O., Tarchitzky, J., Chen, Y., 2005. Dissolved organic carbón (DOC) as a parameter of compost maturity. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 2109-2116.
- Zucconi, F., de Bertoldi, M., 1987. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. En *Compost: Production, Quality and Use*, ed. M. de Bertoldi, M.P. Ferranti, P. L'Hermite, F. Zucconi. Elsevier. Barking. 30-50.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., de Bertoldi, M., 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*, 22 (2), 54-57.