

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE COMPOST
ECOLÓGICO, CUBIERTAS VEGETALES Y
GANADO EN LA CALIDAD DEL SUELO EN EL
CONTEXTO DE LA AGRICULTURA ECOLÓGICA

Trabajo Fin de Máster

Carmen García Villalobos

Tutorizado por: Engracia Madejón Rodríguez y
Laura Lozano de Sosa Miralles

2023



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D^a. Carmen García Villalobos**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Evaluación de la influencia de compost ecológico, cubiertas vegetales y ganado en la calidad del suelo en el contexto de la agricultura ecológica”, bajo la dirección de D^a. Engracia Madejón Rodríguez y de D^a Laura Lozano de Sosa Miralles del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC), debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 5 de septiembre de 2023

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

**CONCEPCION
|PAREDES|GIL** Firmado digitalmente por
CONCEPCION|PAREDES|GIL
Fecha: 2023.09.05 12:42:30
+02'00'

Fdo.: Concepción Paredes Gil

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



ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

Máster Universitario de Investigación en
Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos



Evaluación de la influencia de compost ecológico, cubiertas
vegetales y ganado en la calidad del suelo en el contexto de la
agricultura ecológica



Vº Bº DIRECTOR

VºBº CODIRECTOR

Engracia Madejón Rodríguez

ALUMNO

Carmen García Villalobos

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Carmen García Villalobos

Título: Evaluación de la influencia de compost ecológico, cubiertas vegetales y ganado en la calidad del suelo en el contexto de la agricultura ecológica.

Title: Evaluation of the influence of organic compost, cover crops and livestock on soil quality in the context of organic farming.

Director/es del TFM: Engracia Madejón Rodríguez y Laura Lozano de Sosa Miralles

Año: 2023

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

Tipo de proyecto: Trabajo Experimental de investigación

Palabras claves: agricultura ecológica, compost, ganado, cubierta vegetal.

Keywords: organic farming, compost, livestock, cover crop.

Nº citas bibliográficas:

Nº de tablas: 7

Nº de figuras: 6

Nº de fotos: 5

RESUMEN

El presente trabajo fin de máster se enfoca en las estrategias de manejo representativas de la agricultura ecológica (AE) para la gestión de agroecosistemas en sintonía con las directivas europeas más recientes. Así, se pretende potenciar prácticas agronómicas sostenibles diseñadas para preservar la materia orgánica y los nutrientes del suelo, mantener la producción y aumentar la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio global.

En concreto, este estudio se centra en evaluar los efectos de la adición de compost, las cubiertas vegetales (sembradas y espontáneas) y la presencia de ganado en la calidad y fertilidad del suelo. Para ello, se diseñó un experimento en macetas usando un suelo de una finca modelo (Cortijo El Puerto, Sevilla) dedicada al cultivo de olivar ecológico. Para ello, se realizó una caracterización

completa de este compost y tras su aplicación se establecieron 3 tratamiento de cubiertas donde además aplicó orina artificial para simular la excreta del ganado. Se llevaron a cabo dos muestreos de suelo, uno tras la adición de compost y el otro una vez desarrolladas las cubiertas y añadida la orina. Se analizaron parámetros fisicoquímicos y bioquímicos del suelo.

El análisis del compost mostró que se trata de un material muy maduro, con altos contenidos en nutrientes y bajos contenidos en metales pesados. Su alta madurez explica sus bajos contenidos en materia orgánica comparado a lo que puede esperarse para este tipo de materiales.

En el primer muestreo de suelo se comprobó que el compost aumentó la capacidad de retención de agua y el contenido de carbono y nutrientes del mismo. Este hecho contribuyó a que con el compost se obtuvieran mayores rendimientos de biomasa tanto sembrada como espontánea. Las propiedades bioquímicas del suelo no se vieron afectadas por la presencia del compost.

En el segundo muestreo se observó que las cubiertas vegetales fue el factor más influyente en la calidad del suelo. Por otra parte, las deposiciones del ganado tuvieron poca o nula influencia en las actividades enzimáticas, exceptuando la deshidrogenasa, que se vio afectada positivamente por este factor. La aplicación del compost produjo un cierto efecto inhibitorio en algunas actividades enzimáticas.

Aunque se necesitan estudios en campo a largo plazo, este trabajo demuestra que la implantación de prácticas agrícolas sostenibles, teniendo en cuenta los análisis previos del suelo y calculando las dosis adecuadas, puede ser crucial en la mejora de la calidad y la resiliencia de los agrosistemas.

ABSTRACT

This master's thesis focuses on representative management strategies of organic farming (OA) to manage and use agroecosystems in line with the most recent European directives. Thus, it is intended to promote sustainable agronomic practices designed to preserve organic matter and soil nutrients, maintain production and increase the resilience of ecosystems in the face of global change.

Specifically, this study focuses on evaluating the effects of compost addition, plant covers (sown and spontaneous) and the presence of livestock on soil quality and fertility. For this, an experiment was designed in pots using soil from a model farm (Cortijo El Puerto, Seville) dedicated to the cultivation of organic olive groves. For this, a complete characterization of this compost was carried out and after its application, 3 cover crops were established where artificial urine was also applied to simulate cattle excrement. Two soil samples were undertaken, one after the addition of compost and the other once the cover crops were developed and urine was added. Soil physicochemical and biochemical parameters were analyzed.

The compost analysis showed that this was a very mature material, with high nutrient content and low heavy metal content. Its high maturity explains its low organic matter content compared to what can be expected for this type of material.

In the first soil sampling, it was found that the compost increased soil water retention capacity and its carbon and nutrient content. This fact explained that the compost yielded higher biomass, both planted and spontaneous. The biochemical properties of the soil were not affected by the addition of the compost.

In the second sampling, it was observed that the vegetation cover was the most influential factor in the quality of the soil. On the other hand, cattle stools had little or no influence on enzyme activities, except for dehydrogenase, which was positively affected by this factor. The application of the compost produced a certain inhibitory effect on some enzymatic activities.

Although long-term field studies are needed, this work shows that the implementation of sustainable agricultural practices, taking into account previous soil analyzes and calculating the appropriate doses, can be crucial in improving the quality and resilience of agrosystems.





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

Elche, a 15/03/2023

Nombre del tutor/a	Engracia Madejón Rodríguez
Nombre del alumno/a	Carmen García Villalobos
Tipo de actividad	Sin implicaciones ético-legales
Título del 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)	Evaluación de la influencia de compost ecológico, cubiertas vegetales y ganado en la calidad del suelo en el contexto de la agricultura ecológica
Evaluación Riesgos Laborales	No procede
Evaluación Ética	No procede
Registro provisional	230314052655
Código de Investigación Responsable	TFM.MGT.EMR.CGV.230314
Caducidad	2 años

Se considera que el presente proyecto carece de riesgos laborales significativos para las personas que participan en el mismo, ya sean de la UMH o de otras organizaciones.

La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: **Evaluación de la influencia de compost ecológico, cubiertas vegetales y ganado en la calidad del suelo en el contexto de la agricultura ecológica** ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: "TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)", habiéndose determinado que no requiere ninguna evaluación adicional. Es importante destacar que si la información aportada en dicho formulario no es correcta este informe no tiene validez.

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

Atentamente,

Alberto Pastor Campos
Secretario del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Domingo L. Orozco Beltrán
Presidente del CEII
Vicerrectorado de Investigación

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento y respeto por su labor a Engracia Madejón y a Laura Lozano de Sosa, tutoras de este trabajo de investigación. Destacar su dedicación, atención constante y paciencia. Las dos son personas que despiertan la pasión hacia el método científico, buscando la exhaustividad y el trabajo bien hecho. Han sido fundamentales sus correcciones y sugerencias en el contenido, su guía y explicaciones en el análisis estadístico de los datos y la interpretación de estos. Muchas gracias.

A la dirección del IRNAS- CSIC por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones en el marco del proyecto: Biocompost y cultivos de cubierta: relacionando la salud del suelo, la economía circular y la rentabilidad en cultivos ecológicos mediterráneos (BIOECOVER) financiado con los fondos del plan de recuperación, transformación y resiliencia (PRTR) También quiero expresar mi especial gratitud hacia Cristina, Patricia, Carmen y José Antonio, miembros del grupo de investigación SoilPlant del IRNAS-CSIC. Su apoyo en el laboratorio y las explicaciones de los análisis realizados allí han sido esenciales para el desarrollo del trabajo. La generosidad con la que compartieron sus conocimientos ha sido de gran ayuda para mí. También agradezco a todos la acogida y hospitalidad durante mi estancia.

A mi familia y amigos quiero agradecerles su apoyo y paciencia. Su constante respaldo ha significado mucho para mí.

Índice

1.	Introducción.....	10
1.1.	Estrategias de desarrollo sostenible en el contexto de cambio climático.....	10
1.2.	Agricultura ecológica.....	11
1.2.1.	Papel de la fertilización y enmiendas orgánicas.....	12
1.2.2.	Papel de las cubiertas vegetales.....	15
1.2.3.	Papel del ganado.....	15
1.3.	Indicadores de la calidad del suelo.....	17
2.	Objetivos.....	19
3.	Materiales y métodos.....	20
3.1.	Área de estudio.....	20
3.2.	Diseño experimental. Experimento en macetas.....	21
3.3.	Metodología.....	25
3.3.1.	Análisis del compost.....	25
3.3.2.	Análisis del suelo.....	26
3.3.3.	Determinación de la biomasa de las cubiertas vegetales.....	28
3.3.4.	Análisis estadístico.....	28
4.	Resultados y discusión.....	29
4.1.	Caracterización del compost de alperujo.....	29
4.1.1.	Análisis físico y químico del compost.....	29
4.1.2.	Análisis de fitotoxicidad del compost.....	33
4.2.	Suelo.....	34
4.2.1.	Efecto inmediato de la adición de compost en las propiedades del suelo (tiempo inicial).....	34
4.2.2.	Efecto del compost y la excreta de ganado en el desarrollo de las cubiertas vegetales.....	38
4.2.3.	Efectos de los factores compost, cubierta vegetal y excreta de ganado (orina) en las actividades enzimáticas y en la biomasa (tiempo final).....	40
5.	Conclusiones.....	46
6.	Bibliografía.....	47

1. Introducción

1.1. Estrategias de desarrollo sostenible en el contexto de cambio climático

Las estrategias de desarrollo sostenible son acciones que buscan promover el crecimiento económico, social y ambiental sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades. Estas acciones, además, tienen el propósito de hacer frente a la problemática del cambio climático y mitigar sus impactos.

La economía circular es una de estas estrategias de producción y consumo que promueve el desarrollo sostenible en el tiempo. En concreto, es un concepto que propone un nuevo modelo de producción y consumo basado en la idea de utilizar los recursos de manera eficiente y sostenible, disminuyendo así la cantidad de residuos generados y la contaminación. Este modelo, busca transformar el modelo económico tradicional aumentando la vida útil de los recursos para que puedan ser usados durante más tiempo y, posteriormente, ser reutilizados o reciclados, y así evitar su sobreexplotación. Así se logra una mayor eficiencia en el uso del recurso y se consigue un modelo más sostenible (Durán Romero, 2019). Respecto a la gestión de residuos orgánicos, en la economía circular asociada con la agricultura, se busca reutilizar los subproductos, transformándolos en nutrientes y materia orgánica (MO) para el suelo y convirtiéndolos en un recurso.

En el contexto de la agricultura, existen diversas estrategias de desarrollo sostenible que se están implementando a nivel mundial para afrontar problemas ambientales como el cambio climático o la sobreexplotación de los recursos naturales. Por ejemplo, El Pacto Verde Europeo (European Green Deal) es una iniciativa de la Unión Europea cuyo objetivo es conseguir la neutralidad climática para 2050. Para ello, se promueve la utilización de prácticas agrícolas sostenibles, como la agricultura regenerativa o la ecológica (AE). Con ellas, se reduce el uso de plaguicidas químicos o se minimiza el consumo de agua y energía, entre otros (Comisión Europea, 2019).

Por otra parte, La Agricultura de Carbono (C Farming) también se refiere a una variedad de prácticas agrícolas regenerativas centradas en promover la salud del suelo y mejorar los servicios ecosistémicos disminuyendo la huella ecológica de la agricultura intensiva. El concepto se basa en promover la capacidad de los suelos agrícolas de capturar y almacenar C atmosférico limitando así el calentamiento global (McDonald et al., 2021).

1.2. Agricultura ecológica

Durante la segunda mitad del siglo pasado, la intensificación de los sistemas de cultivo tradicionales e integrados en muchos países desarrollados y en desarrollo ha llevado a una reducción de la diversidad biológica. En general, la agricultura convencional conduce a un aumento de los insumos y recursos necesarios para mantener el rendimiento y su estabilidad, lo que generalmente implica un aumento en la aparición y especialización de plagas y vegetación adventicia, así como el empobrecimiento de la calidad del suelo (Adhikary et al., 2020) y de su biodiversidad (de Vries et al., 2013) que pueden comprometer la provisión de servicios ecosistémicos a largo plazo. De hecho, la intensificación de la agricultura y las pérdidas de MO del suelo se han identificado como las principales amenazas para los suelos europeos (Gardi et al., 2013). Recientemente, se ha demostrado que los suelos de cultivo se ven mucho más afectados por las variables climáticas que en los bosques o pastizales, lo que sugiere que los suelos de cultivo ya degradados serán más vulnerables al cambio climático que los suelos más naturales (Smith et al., 2021). Bajo las actuales proyecciones de cambio climático, la adopción de prácticas agronómicas que promuevan el mantenimiento de suelos saludables debería ser una prioridad (Lal et al., 2015).

La AE es un enfoque de producción agrícola que pretende mejorar la sostenibilidad de los sistemas alimentarios. En su práctica se prescinde del uso de fertilizantes y pesticidas químicos, se promueve la diversificación de cultivos y se fomenta la conservación del suelo y de la biodiversidad (Muller et al., 2017). El objetivo principal de la AE es producir alimentos de forma sostenible, sin comprometer los recursos naturales ni la salud humana.

Durante las últimas décadas, la AE ha emergido para enfrentar el uso convencional insostenible de la tierra y los riesgos potenciales del uso de químicos. Es un enfoque holístico de la agricultura que considera la sostenibilidad ambiental a largo plazo (Seufert et al, 2012). Los beneficios ambientales de esta agricultura incluyen la protección de la biodiversidad, el mantenimiento o aumento de la calidad del suelo, el agua y el aire, así como la eficiencia energética. La Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica recomienda que la agricultura orgánica se base en los cuatro principios básicos de salud, ecología, equidad y cuidado de los seres humanos y de los ecosistemas (Rundgren y Parrott, 2006). Este sistema es y debe ser complejo y debe aprovechar las relaciones funcionales entre los diversos componentes del propio agroecosistema. La AE generalmente incluye prácticas de manejo del suelo que pueden proteger (o restaurar) la calidad del suelo, como

laboreo reducido, el manejo integrado de nutrientes o las coberturas vegetales (Lal, 2015). Los efectos positivos de la AE podrían potenciarse en un contexto de mayor estrés ambiental debido al cambio climático. Seufert et al. (2012) utilizó un metanálisis completo para examinar el rendimiento relativo de la agricultura orgánica y convencional, que mostró que los rendimientos orgánicos suelen ser más bajos que los convencionales. Sin embargo, bajo estrés por sequía, los cultivos gestionados orgánicamente produjeron rendimientos entre un 70% y un 90% más altos que los gestionados de forma convencional, gracias a la mejor capacidad del suelo gestionado orgánicamente para almacenar agua (Gomiero, 2018). Este problema es crítico en nuestras las condiciones, dado que se espera que el área mediterránea sea una de las áreas más vulnerables ante los efectos del cambio climático (Diffenbaugh y Giorgi, 2012). Así, las últimas proyecciones de cambio climático reportan una reducción de lluvia entre 10 % y 40 % en esta zona dependiendo del aumento de la temperatura global (Masson-Delmotte et al., 2021), lo que aumentaría aún más el riesgo de desertificación.

La AE incorpora como principio básico la preservación o incremento de la fertilidad y actividad biológica del suelo a través de la gestión y la protección de la MO. Es por ello que la aplicación de enmiendas orgánicas, el manejo de las cubiertas vegetales y del ganado se han convertido en piezas claves para garantizar el equilibrio de los sistemas, mejorar la calidad del suelo o promover la biodiversidad.

1.2.1. Papel de la fertilización y enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas, como el compost o los residuos vegetales, desempeñan un papel fundamental en la AE. A través de su aplicación se contribuye al desarrollo de estrategias de cero residuos en un contexto de economía circular y se limita, por otra parte, el uso de fertilizantes químicos que pueden dar lugar a problemas de eutrofización de los recursos hídricos (Durán-Lara et al., 2020; Erhart y Hartl, 2010).

Los compost usados en producción ecológica deben ser originados a partir de mezclas de materiales aprobados por la propia AE. Así, los materiales compostables en AE son aquellos incluidos en el anexo I del Reglamento (CE) 889/2008. Además de materiales orgánicos, también se permiten ciertos aditivos minerales según lo establecido en el mismo reglamento (Vinyals, 2014).

Estos materiales se someten a compostaje, un proceso biológico ocurrido en condiciones aeróbicas, el cual, con la adecuada humedad y temperatura, consigue estabilizar e higienizar la MO de los residuos orgánicos para la reintroducción en el sistema agronómico (Román et al., 2013; Vinyals, 2014).

Este proceso empieza con una fase mesófila, en la que los microorganismos descomponen compuestos solubles, generando calor y haciendo que la temperatura alcance aproximadamente los 45°C. En este punto, los microorganismos termófilos reemplazan a los mesófilos, pasando a la fase termófila. En esta fase, se alcanzan los 60-70°C y los termófilos degradan fuentes de C más complejas, como ceras o polímeros. A medida que se agotan las fuentes de C y nitrógeno (N), la temperatura desciende, dando paso a la fase mesófila de enfriamiento. Durante esta, se descomponen las celulosas y ligninas. Por último, es en la fase de maduración cuando la MO se estabiliza y se forman los ácidos húmicos y fúlvicos (Román et al., 2013; Vinyals, 2014).

El proceso de compostaje necesita un tiempo mínimo de unos 4 a 6 meses para obtener un compost joven. Desde este momento hasta un año se consideran compost maduros, que tendrán efecto restaurador de la MO en el suelo (Vinyals, 2014). Si se emplean sin un adecuado grado de madurez, pueden provocar efectos negativos en las plantas a causa de la presencia de metabolitos fitotóxicos (Zucconi et al., 1985 citado en Varnero et al., 2007).

Otra consecuencia destacada de la incorporación de compost inmaduros es la inmovilización del N disponible de los suelos por las poblaciones de microorganismos, lo que puede causar un déficit de N para la planta y, por ello, una disminución del rendimiento de los cultivos (García de la Fuente, 2011).

Algunos de los indicadores *in situ* usados para evaluar la madurez de un compost son el color o el olor. Se entiende que el proceso de maduración se ha completado cuando el compost presenta un color oscuro y, en seco, produce poco olor (Vinyals, 2014).

Por otra parte, el crecimiento de las plantas es uno de los mejores indicadores biológicos para estimar la madurez de un compost. Un compost maduro debe facilitar el desarrollo vegetal, el cual se evalúa mediante el test de germinación. Esta prueba se realiza colocando semillas de berro (*Lepidium sativum* L.), conocidas por su rápido desarrollo, en placas de Petri bajo condiciones adecuadas para la germinación (Mahapatra et al., 2022).

La humificación es la formación de sustancias húmicas que ocurre en la etapa de madurez del compost. Dependiendo del grado de humificación, el producto orgánico será más o menos maduro. Para determinarlo, se debe tener en cuenta que la formación de ácido húmico genera un aumento en las concentraciones de oxígeno o N, entre otras (Mahapatra et al., 2022).

La relación entre C y N también se utiliza para evaluar la estabilidad y madurez de un compost. A medida que avanza el proceso de compostaje, la relación C/N disminuye por la degradación de compuestos orgánicos, que libera CO₂ y resulta en un aumento del N total. Por tanto, la disminución de la relación C/N y la ganancia de N son analogías importantes para el análisis de la madurez y estabilidad del compost (Mahapatra et al., 2022).

Estos son algunos de los indicadores que se pueden evaluar para determinar la madurez de un compost. Una vez que se obtienen compost maduros y de calidad, es posible aumentar los rendimientos de los cultivos comparados con aquellos en los se usan fertilizantes químicos, teniendo en cuenta cantidades equivalentes de nutrientes aportados (Trinidad-Santos, 2016).

El beneficio más significativo del empleo de compost en el suelo es el aumento de la MO (Erhart y Hartl, 2010). Esta desempeña funciones esenciales en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reflejadas en la Figura 1 (Marañón y Madejón, 2017).

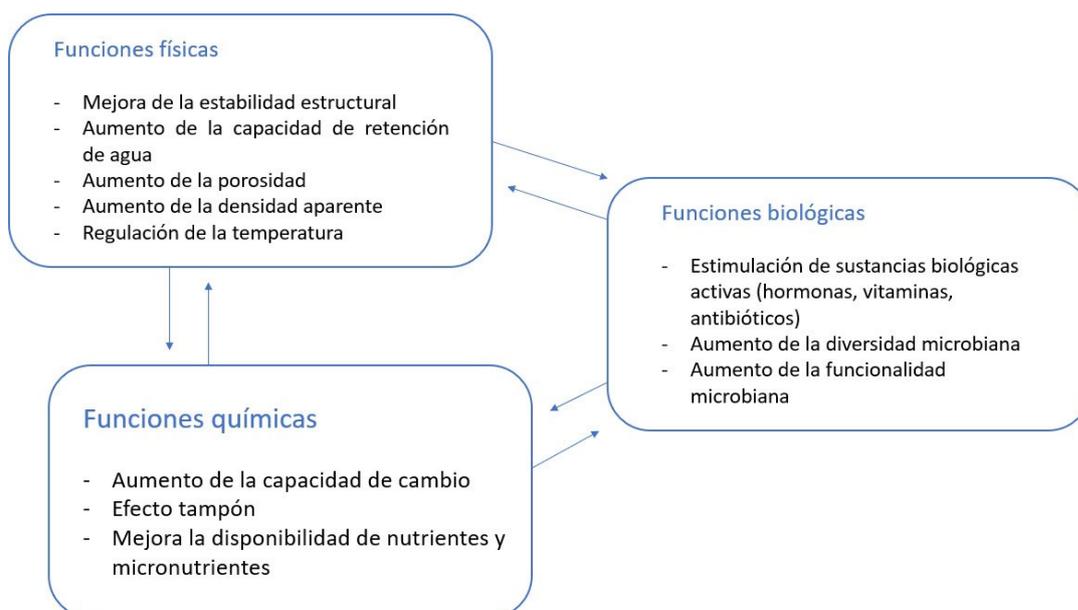


Figura 1. Propiedades principales de la materia orgánica sobre el suelo. Elaboración propia editada de Marañón y Madejón, 2017

1.2.2. Papel de las cubiertas vegetales

Los cultivos de cobertura pueden definirse como aquellos cultivos que brindan protección al suelo y mejoran su fertilidad. Manejados adecuadamente, el uso de estos cultivos tiene notables beneficios ambientales como la mejora de la estructura del suelo, el incremento de la MO y el secuestro de C en el suelo a la vez que se aumenta la capacidad de retención de agua del suelo y se disminuye la evotranspiración (Coombs et al., 2017; Dube et al., 2014). Su uso también conlleva una menor contaminación del agua y un aumento de la biodiversidad presente en el suelo (Paye et al., 2022). Además, los cultivos de cobertura controlan las hierbas adventicias compitiendo por la luz, el agua y los nutrientes o mediante la liberación de exudados alelopáticos (Masilionyte et al., 2017).

Concretamente, en áreas mediterráneas, situadas en pendientes pronunciadas, uno de los principales beneficios de los cultivos de cobertura es la reducción de la erosión y el aumento del C orgánico del suelo (Repullo-Ruibérriz et al. 2018). En el entorno mediterráneo, los cultivos de cobertura han sido identificados como una de las mejores prácticas para aumentar las reservas de C del suelo y cumplir con la iniciativa “4perMille”, que tiene como objetivo aumentar las reservas mundiales de C del suelo en un 0,4 % anual como compensación por los gases de efecto invernadero globales por fuentes antropogénicas (Francaviglia et al. 2019). Sin embargo, en condiciones mediterráneas pueden plantear también un grave problema de competencia por el agua con las plantas principales de cultivo si no se gestionan adecuadamente. Las especies utilizadas deben estar adaptadas al clima mediterráneo y deben eliminarse mediante siega mecánica o ecológica a finales de invierno o principios de primavera, de forma que se minimice la competencia por el agua con el cultivo principal a finales de primavera (Gómez, 2017). Este problema añade algunas dificultades en el manejo de cultivos de cobertura en ambientes con escasez de agua, lo que explica en parte por qué los agricultores todavía no adoptan esta práctica de forma masiva en las fincas mediterráneas.

1.2.3. Papel del ganado

La ganadería desempeña un rol principal en los agrosistemas ecológicos, principalmente, a través de sus deposiciones (heces y orina). El estiércol y la orina se consideran fuentes de nutrientes con los que abonar de forma natural sin necesidad de aplicar fertilizantes

químicos. De esta manera, se mejora la calidad del suelo, al aportar N, P y demás elementos esenciales para enriquecer el suelo (Ferichani, 2013; Gili et al., 2004; Morales-Morales et al., 2019).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la orina del ganado, si se acumula de forma excesiva, puede llegar a lixiviar y contaminar el suelo (Morales-Morales et al., 2019). Por ello, es primordial un correcto manejo del ganado.

Por otro lado, con el objetivo de eliminar el crecimiento excesivo de la vegetación, el ganado es capaz de pastar en áreas concretas, realizando un desbroce mecánico y ecológico. Esta acción de los animales ayuda a controlar el crecimiento de las hierbas adventicias y supone, también un ahorro de costos en maquinarias y combustible para el mantenimiento de estas áreas.

El reciclaje de los residuos también puede ser un aspecto positivo de la presencia de ganado en un sistema agrícola. Los restos de las cosechas, por ejemplo, pueden convertirse en alimento para los animales, transformando así los residuos en subproductos. A su vez, los estiércoles pueden ser utilizados en las mezclas de compostaje para reducir la relación C/N de las mismas favoreciendo el proceso.

La combinación de adición de enmiendas orgánicas (compost ecológicos) y cultivos de cobertura podría ser una estrategia para hacer frente al posible efecto no deseado de las limitaciones de agua en las plantas de cultivo objetivo debido a la competencia por el agua con las especies de cobertura, dados los efectos positivos de la adición de compost en la retención de agua del suelo. Además, la influencia del ganado es también fundamental como se ha destacado. Sin embargo, no existen muchos trabajos que hayan evaluado la combinación de estas tres prácticas. Aunque cabría esperar los efectos positivos de la adición de compost sobre la resistencia a la sequía, posiblemente los aportes de nutrientes en el compost podrían impulsar el crecimiento de vegetación adventicias, intensificando la competencia por el agua con la planta de cultivo principal y requiriendo un manejo más complejo. Se necesitan más estudios para evaluar si estas dos prácticas, individualmente o combinadas, tienen efectos positivos netos sobre el rendimiento y el balance hídrico en suelos agrícolas.

1.3. Indicadores de la calidad del suelo

En la década de los 90 se empezó a utilizar el concepto de calidad del suelo, relacionado con su productividad y fertilidad. Una de las definiciones más aceptadas es “la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites ecológicos, para sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental, y promoviendo la salud de la flora y la fauna” (Doran y Parkin, 1994).

Uno de los principales aspectos que se pretenden abordar en este trabajo de fin de máster es el establecimiento de indicadores de la calidad del suelo que posibiliten conocer el éxito alcanzado a corto y medio plazo por diferentes sistemas de fertilización y cubiertas vegetales en la situación edafoclimática estudiada. Si bien se reconocen las ventajas de la AE, no existe un consenso sobre qué parámetros del suelo son los que mejor reflejan el aumento de la calidad del suelo.

En general, los índices de calidad del suelo son una herramienta para evaluar la sostenibilidad y la capacidad de respuesta de los ecosistemas. Estos indicadores pueden ser físicos (textura, densidad aparente, capacidad de retención de agua y tasa de infiltración de agua), químicos (pH, conductividad eléctrica, C orgánico total, capacidad de intercambio catiónico (CIC)) o biológicos (actividades enzimáticas, respiración, abundancia y diversidad de comunidades del suelo). Además, existen índices multiparamétricos que integran varios parámetros (principalmente químicos y biológicos) como el pH, las actividades enzimáticas o el C de la biomasa entre otros (Bastida et al., 2008). En cualquier caso, los indicadores adecuados deben ser sencillos de medir, funcionar para todo tipo de entornos (o al menos los máximos posibles) y ser sensibles a las condiciones de estrés que revelen de forma fiable dónde se ha producido una alteración. Entre todos los índices mencionados, los índices microbiológicos han sido de gran interés en los últimos años. La actividad microbiana se puede evaluar midiendo actividades enzimáticas potenciales que, como se ha indicado, juegan un papel importante en los ciclos biogeoquímicos, fundamentales en la liberación de nutrientes (aumentando su biodisponibilidad). La actividad más utilizada es la deshidrogenasa (como medida general de microorganismos viables en suelos degradados), aunque existen otras muchas relacionadas con los ciclos de nutrientes. Estos parámetros nos pueden dar una idea de situaciones de estrés biótico y abiótico en muchos escenarios. Como es imposible elegir un único indicador que permita estimar la calidad del suelo, por la

multitud de parámetros físicos, químicos y biológicos que intervienen en él, suelen ser varios los que se determinan (Bolinder et al. 1999). Sin embargo, aún no está claro cuáles son los indicadores básicos a determinar, aunque existen programas nacionales e internacionales de monitoreo de la calidad del suelo que normalmente incluyen la mayoría de los indicadores. El carbono orgánico total (COT) y la MO son los indicadores más utilizados para evaluar los cambios en la calidad del suelo que origina la AE. Un seguimiento orientado a conocer la evolución que puede sufrir la MO del suelo bajo diferentes tratamientos, debe contemplar no solo el COT, sino también las fracciones C más lábiles, como el C hidrosoluble exponentes de la 'actividad biológica', aspecto importante ya que constituyen un 'alerta temprana' de los cambios, más inmediatos, que pueda estar experimentando la MO del suelo (Oyonarte et al., 2007). Además del COT y de la MO, las actividades enzimáticas y el contenido en C y N de la biomasa aportan información valiosa de la calidad del suelo. Las actividades de las enzimas pueden relacionarse con la actividad microbiana, fundamental para la descomposición de la MO y el reciclado de nutrientes. Las enzimas más estudiadas son las oxidoreductasas, como la deshidrogenasa y la fenoloxidasa, y las hidrolasas, siendo de este grupo las fosfatasas y la ureasa, aminopectidasas o las glucosidasas (Gianfreda y Bollag, 1994), involucradas en los ciclos del P, N y C respectivamente.

2. Objetivos

Los objetivos principales del presente trabajo son los siguientes:

- Evaluar la calidad de un compost ecológico. Para ello, se realizará un análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos más relevantes para determinar su idoneidad para la aplicación como enmienda orgánica al suelo y evaluar su capacidad para favorecer la salud y fertilidad del mismo en el contexto de la AE. Concretamente, se determinarán parámetros como el contenido en nutrientes esenciales, pH, presencia de metales pesados y otros contaminantes, MO, además de las pruebas de madurez correspondientes.
- Estudiar el impacto del compost en suelos manejados bajo los principios de la AE. Se investigarán los efectos de este tipo de compost en la salud del suelo y en la fertilidad. Para ello, se estudiará el efecto de la adición de compost en las propiedades físico-químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana del suelo y en el desarrollo de las coberturas vegetales.
- Evaluar los efectos de las coberturas vegetales, tanto espontáneas como sembradas, en la actividad microbiana del suelo.
- Estudiar los efectos de las excretas del ganado (orina) sobre las coberturas vegetales y la actividad microbiana del suelo.
- Valorar la interacción de los tres factores (adición de compost, cobertura y excreta de orina) conjuntamente

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

Para lograr los objetivos expuestos, se emplearon muestras de suelo de la finca “Cortijo El Puerto” y un compost generado en la planta de compostaje de la propia finca (Foto 1).



Foto 1. Pilas de compost durante su maduración en la finca “Cortijo El Puerto”, Sevilla

La finca está situada en Lora del Río (Sevilla) y está dedicada a agricultura ecológica desde 2012. Cuenta con una superficie actual de 220 hectáreas, en la que, principalmente, se cultivan olivos de variedades tradicionales y nuevas. Además, destaca la presencia de matorral mediterráneo disperso en toda la superficie. Las plantaciones del cortijo están sujetas a riego limitado en función de la cantidad de agua suministrada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

En cuanto a ganado, ovejas merinas y burros autóctonos son los encargados del control de la vegetación adventicia realizando tareas de desbroce (Foto 2).

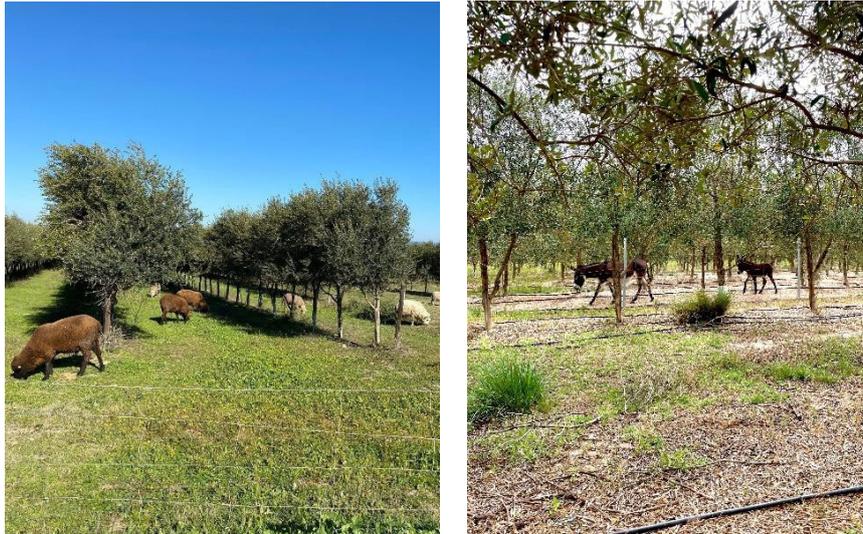


Foto 2. Ovejas merinas (izq.) y burros (dcha.) en la finca “Cortijo El Puerto”. Elaboración propia.

3.2. Diseño experimental. Experimento en macetas.

Se estableció un experimento en macetas en las instalaciones del IRNAS-CSIC para llevar a cabo los objetivos propuestos en condiciones controladas (Foto 3).



Foto 3. Experimento en macetas para evaluar los efectos de compost ecológico, cubierta vegetal y excreta de ganado. Elaboración propia.

En marzo de 2023 se rellenaron un total de 36 macetas de dimensiones 20 x 20 x 14 cm con 2,300 g aproximadamente de suelo procedente de una parcela de la finca “Cortijo El Puerto” en la que se encuentra la variedad de olivo arbosana.

Se establecieron tres factores experimentales: adición de compost ecológico, establecimiento de cubiertas vegetales, y deposición del ganado (evento de orina artificial) como fuente de N, para evaluar los efectos de estos factores en el suelo y su biomasa (Figura 2).

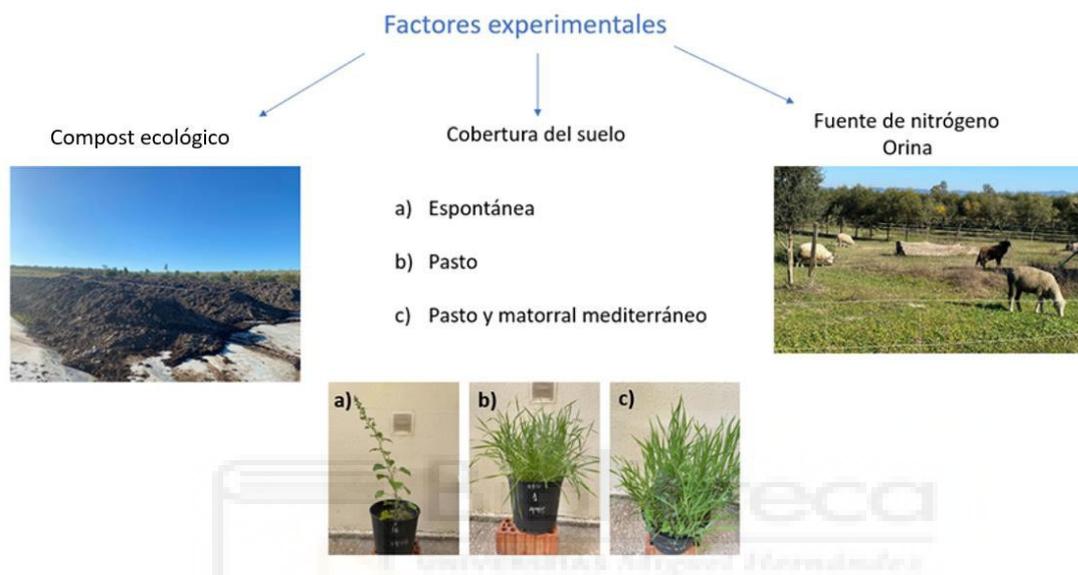


Figura 2. Factores experimentales del ensayo en macetas. Elaboración propia.

Para la evaluación del efecto del compost, en marzo de 2023 se agregaron 200 g de compost (60 t ha^{-1}) generado en la propia finca en 18 de las 36 macetas. Este compost, compuesto de alperujo combinado con restos de poda y estiércol procedente de la ganadería ecológica de la propia finca, en una proporción 2:1:1 respectivamente, fue sometido a un proceso de compostaje y maduración para la estabilización de la MO, eliminación de agentes patógenos y reducción de peso y volumen de los materiales.

Las muestras de suelo y de compost se recogieron en la finca el día anterior al establecimiento de las macetas.

Aproximadamente dos semanas después de la adición del compost, se tomaron de las macetas 4 muestras de suelo sin compost y otras 4 de suelo con compost. Estas 8 muestras

fueron utilizadas para obtener los datos necesarios para el Tiempo inicial (t_0). Con este muestreo, se evaluó el efecto inmediato del compost en el suelo.

Para evaluar los efectos de las cubiertas vegetales se establecieron 3 tipos de cubiertas (Figura 2). Para la cubierta de pastos se procedió a la siembra de semillas de diferentes especies vegetales provenientes de una mezcla comercial y registrada, principalmente compuesta por gramíneas, leguminosas y dicotiledóneas en las macetas. La dosis de siembra se estableció en 3 g de semillas por maceta para garantizar un correcto desarrollo de la cubierta. Dado que la mezcla comercial contenía aproximadamente 0,5 g de compost por cada gramo de mezcla, se sembraron 6 g de mezcla en 24 de las 36 macetas totales, asegurando así la cantidad deseada de semillas. Se tuvo en consideración el hecho de que la dosis de siembra de semillas fue alta, debido a que, en condiciones naturales, esta cobertura compite por agua. La decisión se tomó con el fin de observar los efectos de la cubierta vegetal de manera más destacada en unas condiciones controladas.

Por otra parte, para la cubierta de pastos y matorral mediterráneo se utilizó la misma dosis de siembra de semillas indicada anteriormente junto con una especie típica de matorral mediterráneo, el lentisco (*Pistacia lentiscus*), a fin de evaluar la interacción entre herbáceas y leñosas.

Para las cubiertas de especies espontáneas, se dejó crecer las especies adventicias con banco de semillas en el suelo.

Los efectos de la presencia del ganado, y en concreto de sus eyecciones como fuente potencial de N en sistemas ecológicos, se realizó mediante la adición de orina artificial, elaborada según la receta proporcionada en Marsden et al. (2020).

Así, 2 meses después de la aplicación del compost (mayo 2023) y el desarrollo total de la cobertura vegetal, se añadieron 100 ml de orina artificial con jeringa (Foto 4), cuya composición química se muestra en la Tabla 1. El volumen se estableció siguiendo el rango medio de eyección de una oveja en un evento cualquiera (Marsden et al., 2020).

Tabla 1. Composición química de la orina artificial.

Componente químico	g/L (para 6 g N/L)
Urea	11,345
KHCO ₃	6,635
KCL	3,871
Na ₂ SO ₄	0,442
Creatina	0,940
Ácido hipúrico	2,046
Alantoína	0,664
Glicina	0,011
Creatinina	0,017
Ácido úrico	0,006
Hipoxantina	0,001
Amonio cloruro	0,017



Foto 4. Adición de orina artificial a las macetas experimentales. Elaboración propia.

Para la determinación de la biomasa fresca y la materia seca por maceta se cosechó el total de las especies herbáceas en junio 2023, excluyendo las especies de matorral. La fecha se determinó según la fase de desarrollo y floración de la cubierta herbácea coincidiendo a su vez con la época en la que el ganado habría realizado su desbroce. Esto simuló el impacto que tendría el ganado sobre las cubiertas naturalmente.

Además, ese mismo día, se tomaron muestras de aproximadamente 60 g de suelo de cada maceta para proceder con los análisis del Tiempo final (t_f). En este caso, se evaluaron los efectos todos los factores experimentales: compost, cubierta vegetal y orina.

3.3. Metodología

3.3.1. Análisis del compost

Para caracterizar física y químicamente el compost de alperujo empleado en el experimento, se analizaron parámetros físicos, como densidad aparente y humedad, y parámetros químicos, como, por ejemplo, pH, conductividad eléctrica (CE), contenido en MO y contenido en diferentes elementos químicos.

La determinación del pH y CE se realizó en el sobrenadante de un extracto compost: agua destilada 1: 2,5 (peso/volumen), obtenido tras agitación en un agitador de bandeja durante 30 minutos. Se dejaron decantar otros 30 minutos y se midió el pH con pH-metro y la CE en un conductivímetro.

Para la determinación de la humedad, se eligió el método gravimétrico, basado en la medición de la muestra antes y después de su desecado a 100°C y calcular su contenido de agua. Por otra parte, la densidad aparente fue obtenida mediante el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986).

La MO se midió por pérdida de ignición a 430 °C hasta peso constante. La determinación de Kjeldahl N se realizó según Hesse (1971).

Para el análisis multielemental, por una parte, se usó un Analizador Niton XRF portátil. La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica no destructiva utilizada para determinar la composición elemental de los materiales. Este tipo de analizadores funcionan emitiendo rayos X, denominados primarios, hacia la muestra para así medir los rayos X fluorescentes, secundarios, que cada elemento presente en la muestra a analizar produce como respuesta (López-Núñez et al., 2022).

Por otro lado, se realizó otro análisis elemental, en este caso mediante un método más preciso. Los contenidos de nutrientes y elementos traza se determinaron después de la digestión con agua regia en un horno de microondas por ICP-OES (CEN, 2002). También se analizaron muestras de compost de los programas WEPAL para el control de calidad de los procedimientos analíticos. Los resultados obtenidos para estas muestras divergieron \pm 5% como máximo de los resultados certificados.

Para terminar de caracterizar el compost usado en este experimento (más de un año de compostaje), se realizó una evaluación de la fitotoxicidad para asegurar la madurez del compost. Esta evaluación se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por Zucconi et al. (1981). El objetivo fue valorar la sensibilidad de semillas de *Lepidium sativum* a un extracto del compost de alperujo, comparando los resultados con los de otros dos compost inmaduros generados en la misma finca (1 mes y 6 meses de maduración).

Se prepararon diluciones de los compost en proporción de 1:10 (p/v) relación compost: agua destilada. Se colocaron 6 ml de los extractos de compost en placas de Petri que contenían 12 semillas de *Lepidium sativum* sobre papel filtro. Estas se compararon con controles con agua destilada.

Después de mantenerlas 72 horas en oscuridad a temperatura ambiente, se calculó el porcentaje de germinación relativo (PGR), el crecimiento de radícula relativo (CRR) y el índice de germinación (IG) de cada compost, según la metodología descrita por Tiquia (2000) (citado en Varnero et al., 2007):

$$\text{PGR} = \frac{\text{N.º semillas germinadas en extracto}}{\text{N.º semillas germinadas en control}} \times 100$$

$$\text{CRR} = \frac{\text{Longitud radículas en extracto}}{\text{Longitud radículas en control}} \times 100$$

$$\text{IG} = \frac{\text{PGR} \times \text{CRR}}{100}$$

3.3.2. Análisis del suelo

Para este trabajo, se llevó a cabo un análisis de los suelos de las macetas experimentales en dos momentos específicos: uno justo después de la aplicación del compost (tiempo inicial) y otro después del desarrollo de las cubiertas (tiempo final).

La medida de humedad del suelo se realizó utilizando el método gravimétrico, mientras, el pH y conductividad eléctrica se obtuvieron mediante un extracto suelo: agua destilada en una proporción 1: 2,5 (p/v), de forma similar a lo explicado para el compost.

Para determinar MO presente en las muestras de suelo, se utilizó en método de Walkley y Black (1934). La determinación de Kjeldahl N se realizó según Hesse (1971).

El dato de C hidrosoluble en los suelos se obtuvo mediante la extracción de muestra de suelo seco con agua tipo II en relación 1: 10 (p/v) y la posterior determinación, por el análisis de Carbono Orgánico Total (TOC), del C orgánico e inorgánico disuelto, en un analizador TOC-VE Shimadzu.

El método usado para determinar el K disponible para las plantas en estos suelos fue la extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 (Novozamsky y Houba, 1987). Asimismo, el P disponible se determinó por el método de Olsen et al. (1954). Se extrae el P disponible con bicarbonato sódico (CO_3HNa) 0,5 M a un pH aproximado de 8,5. La determinación de nitrato y amonio se llevó a cabo mediante el método de Mulvaney (1996). Estos tres extractos de midieron en un autoanalizador de flujo continuo Luebbe GmbH AA3 dual channel (Norderstedt, Alemania).

El contenido de C y de N de la biomasa microbiana se determinaron mediante el método de fumigación-extracción con cloroformo modificado por Gregorich et al. (1990) y Brookes et al. (1985), respectivamente.

La actividad de la enzima deshidrogenasa se obtuvo por colorimetría mediante el método Trevors (1984). Este se basa en la incubación del suelo con cloruro de idonitrotetrazolium (INT) y la medición de la absorbancia de idonitrotetrazolio formazano (INTF) a 490 nm.

El método elegido para obtener la actividad de la ureasa es el propuesto por Kandeler y Gerber (1988), modificado por Kandeler et al. (1999). Las muestras son incubadas con una solución de urea como sustrato donde se libera amonio, el cual es determinado colorimétricamente.

La actividad fenoloxidasas se determinó mediante absorbancia (Prosser et al., 2011). El producto de la enzima se convierte espontáneamente en dopacromo, al cual se mide la absorbancia a 475 nm.

La actividad de las enzimas β -glucosidasa, glucosaminidasa, aminopeptidasa y fosfatasa se determinaron por fluorimetría, usando un lector de microplacas (FLUOstar® Omega) (Deng et al., 2011; Deng et al., 2013; Wang et al. 2020).

3.3.3. Determinación de la biomasa de las cubiertas vegetales

La cosecha de las especies herbáceas de las macetas para la determinación de la biomasa se realizó mediante secado en estufa a una temperatura constante de 70°C durante un período de 48 horas. Transcurrido este tiempo se determinó su peso seco.

3.3.4. Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA de múltiples vías para determinar la influencia del compost, las cubiertas y la excreta del ganado sobre las propiedades físico y químicas del suelo y las actividades enzimáticas. Para determinar la influencia de cada cubierta individualmente se realizó además una prueba post hoc de Tukey. Para todas las pruebas estadísticas, se seleccionó $p < 0,05$ como el corte de significancia. El análisis estadístico se realizó con SPSS v25 para Windows (IBM Corp., Armonk, NY).

4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización del compost de alperujo

4.1.1. Análisis físico y químico del compost

Cada enmienda orgánica posee unas características específicas que influyen en las propiedades del suelo en el que se incorpora, el desarrollo del cultivo y, por consiguiente, en la producción y la calidad del mismo (García de la Fuente, 2011).

El uso de compost como enmiendas orgánicas en agricultura está regulado por el Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, sobre productos fertilizantes. En el Anexo I de dicho Real Decreto, se incluye el “Compost de alperujo” en la categoría 09 del grupo 6 “Enmiendas orgánicas” y se especifican los requisitos mínimos que debe cumplir (Tabla 2)

Tabla 2. Requisitos que deben cumplir los compost de alperujo, especificados en el Anexo I del Real Decreto 999/2017.

Requisitos (porcentaje en masa)
Materia orgánica total: 45%
Humedad máxima: 40%
Relación C/N < 20%
Contenido máximo en polifenoles: 0,8%
No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.

A continuación, se presentan los resultados de los análisis obtenidos en la caracterización físico y química del compost de alperujo usado en el experimento objeto de este Trabajo Fin de Máster (Tabla 3).

El compost de estudio fue alcalino, con valor de pH superior a 8,0 unidades (8,56). La conductividad eléctrica ($2,09 \text{ mS cm}^{-1}$) está dentro del intervalo observado en otros compost preparados con alperujo (García de la Fuente, 2011). Un valor de CE muy alto puede ser perjudicial para el crecimiento vegetal ya que indica una acumulación excesiva de sales.

En cuanto a propiedades físicas, el contenido de humedad del compost analizado (21,8%) fue inferior al máximo tolerado por la legislación vigente (40%), lo que resulta beneficioso al momento del transporte y aplicación (Moral y Muro, 2008). La densidad aparente se refiere a la cantidad de compost por unidad de volumen. Esta puede variar según los materiales utilizados para compostar. El valor de densidad aparente obtenido fue de 876 kg m^{-3} .

El resultado de contenido de MO del compost utilizado en el experimento fue más bajo del recogido en el citado Anexo I aunque muy similar al recogido por Panettieri et al., (2022) en otro compost de alperujo. Como en el caso del compost usado por los citados autores, este compost es un material con un punto de madurez muy alto después de más de 1 año de proceso de compostaje. Quizá, como recomendación al agricultor y productor de compost, sería conveniente recortar el tiempo de maduración (si es posible) para evitar pérdidas de C que resten calidad al compost producido. El contenido en N tanto mineral como orgánico es alto. Los contenidos de N Kjeldalh del compost del estudio fueron más del doble de los obtenidos por Panettieri et al. (2022). El cálculo de la relación C/N (10) demuestran también su idoneidad para el uso agrícola sin que se produzcan riesgos de limitaciones de N para los cultivos. Quizá el aporte de estiércol de ganado orgánico fue demasiado alto y se podría recomendar disminuir la proporción de este material en la mezcla de compostaje. Los contenidos en otros nutrientes esenciales para los cultivos (P, K, Ca y Mg) fueron en general inferiores a los obtenidos por Panettieri et al. (2022). Por último, comparando con los resultados obtenidos por Panettieri et al. (2022) y García de la Fuente (2011) simultáneamente, los contenidos en Na, S, Fe y As obtenidos en este estudio son superiores, al contrario que los contenidos en B y Co. En cuanto al Mn, el contenido es muy similar al del compost estudiado en ambos artículos.

Tabla 3. Valores medios \pm desviación estándar de las propiedades físico químicas y contenidos en nutrientes y elementos traza (obtenida mediante ICP-OES) del compost estudiado. (n=3)

Parámetro	Valor medio
pH	8,56 \pm 0,09
CE (mS/cm)	2,09 \pm 0,09
Humedad (%)	21,8 \pm 2,11
Materia orgánica (%)	31,4 \pm 2,52
N-Kjeldalh (%)	1,58 \pm 0,27
Densidad aparente (kg/m ³)	876 \pm 25,0
N-NH ₄ (mg/kg)	43,3 \pm 5,17
N-NO ₃ (mg/kg)	349 \pm 43,5
P ₂ O ₅ (%)	1,26 \pm 0,07
K ₂ O (%)	1,91 \pm 0,13
CaO (%)	4,74 \pm 0,06
MgO (%)	1,12 \pm 0,11
Na (%)	0,18 \pm 0,03
SO ₃ (%)	1,56 \pm 0,07
Fe (g/kg)	13,9 \pm 0,07
Mn (mg/kg)	264 \pm 48,3
B (mg/kg)	61,5 \pm 3,03
As (mg/kg)	3,54 \pm 1,49
Co (mg/kg)	4,35 \pm 0,49

Por otro lado, el contenido en metales pesados en los compost es un aspecto de gran importancia, ya que la concentración de estos puede limitar su uso agronómico (Pinamonti et al., 1997). En la aplicación de compost en el suelo, los principales metales pesados que pueden provocar efectos contaminantes son Zn, Cu, Ni, Pb, Cr y Hg. En este contexto, el Real Decreto 506/2013 sobre productos fertilizantes, regula el contenido máximo de metales

pesados en productos fertilizantes orgánicos, distinguiendo tres niveles de restricción (clases A, B y C; Tabla 4).

Al examinar los datos de concentración de metales pesados del compost utilizado en el experimento (Tabla 4), se puede apreciar que presentó valores inferiores a los límites establecidos para la clase A, excepto para el Ni y el Cr, que presentaron valores inferiores a los límites establecidos para la clase B. Por tanto, el compost objeto de este trabajo puede clasificarse como compost clase B. En cualquier caso, dados los moderados valores obtenidos de estos dos elementos probablemente, si se acertara el proceso de maduración y aumentase el contenido en MO del compost, se podrían disminuir los contenidos de estos dos elementos por dilución y así poder considerar el compost en una categoría superior.

En comparación con los contenidos en metales pesados de compost de alperujo obtenidos por Panettieri et al. (2022), los niveles de Cd, Ni y Cr son superiores en el compost objeto de este trabajo, mientras que Cu, Pb y Zn muestran unos contenidos inferiores.

Tabla 4. Concentración de metales pesados (mg/kg) en el compost estudiado (obtenidos mediante ICP-OES) y límites máximos de concentración permitidos según el RD 506/3013. (n=3)

Metal	Límite de concentración (mg/kg)			Compost (mg/kg)
	Clase A	Clase B	Clase C	
Cd	0,7	2	3	0,19 ± 0,02
Cu	70	300	400	61,4 ± 0,27
Ni	25	90	100	39,5 ± 2,68
Pb	45	150	200	9,22 ± 4,41
Zn	200	500	1000	65,9 ± 4,25
Hg	0,4	1,5	2,5	0,04 ± 0,00
Cr	70	250	300	83,3 ± 17,6

Tras comparar, se observó que el conjunto de resultados obtenidos con el analizador de fluorescencia de rayos X (XRF) (Tabla 5) fueron similares a los conseguidos mediante ICP-OES, lo que representa una validación de los métodos utilizados. Especialmente los valores de Fe, Mn, As, Cu, Cr, Pb, Zn obtenidos con ambos métodos analíticos avalan el uso de las

técnicas de rayos x para el análisis de compost, como se ha puesto de manifiesto en otros trabajos (López-Núñez et al., 2022).

Tabla 5. Composición elemental (obtenida mediante XRF) del compost estudiado. (n=3) *Valor inferior al límite de detección.

Elemento	Resultado compost
Mg (mg/kg)	< LOD*
P (g/kg)	4,54 ± 0,27
S (g/kg)	4,35 ± 0,43
K (g/kg)	38,2 ± 0,46
Ca (g/kg)	36,4 ± 0,34
Fe (g/kg)	13,1 ± 0,17
Mn (mg/kg)	290 ± 50,8
As (mg/kg)	5,76 ± 3,59
Co (mg/kg)	< LOD*
Cd (mg/kg)	< LOD*
Cu (mg/kg)	64,5 ± 13,8
Ni (mg/kg)	< LOD*
Pb (mg/kg)	13,1 ± 4,34
Zn (mg/kg)	68,3 ± 8,99
Hg (mg/kg)	< LOD*
Cr (mg/kg)	123 ± 19,5

4.1.2. Análisis de fitotoxicidad del compost

De acuerdo con Zucconi et al. (1981) un compost con índice de germinación (IG) inferior del 50% se considera altamente fitotóxico; con un IG entre un 50% y un 80%, será moderadamente fitotóxico y superior al 80%, el compost no presentaría riesgo de

fitotoxicidad. Si el IG es del 100%, el compost tendrá fitonutrientes o efectos fitoestimulantes.

En el caso de los tres compost evaluados en la prueba de fitotoxicidad, se observó que los compost inmaduros con una maduración de 1 y 6 meses presentaron valores de IG incluidos en el intervalo propuesto por Zucconi et al. (1981) para los compost fitotóxicos moderados, los cuales fueron 67,4 y 76,3 respectivamente. Sin embargo, el compost utilizado en el experimento objeto de este Trabajo de Fin de Máster mostró un resultado de un IG de 111,6, lo cual indica que, de acuerdo con Zucconi, posee efectos fitoestimulantes para el crecimiento vegetal (Foto 5).



Foto 5. Placas Petri con la mezcla de semillas en agua destilada (izq.) y en extracto de compost (dcha.) tras 78 horas de incubación.

4.2. Suelo

4.2.1. Efecto inmediato de la adición de compost en las propiedades del suelo (tiempo inicial)

En relación a los parámetros físicos del suelo, la aplicación de compost duplicó prácticamente el contenido de humedad del suelo en comparación con el suelo sin enmienda ($p < 0,001$, Tabla 6). Muchos estudios han puesto de manifiesto que las enmiendas orgánicas de calidad tienen efectos positivos en el suelo, ya que aumenta su capacidad de retener agua, mejora la infiltración y la aireación (de Sosa et al., 2021). Este hecho es especialmente

importante en zonas mediterráneas donde el aumento de la eficiencia del uso del agua es fundamental en el escenario de sequía en el que nos encontramos. El efecto en este suelo, de textura franco arcillosa, fue menos acusado que el esperado para un suelo de textura arenosa, pero la mejora de la aireación y de la densidad, que probablemente ha ocasionado el compost, se tradujo en un aumento de la humedad del suelo.

En cuanto a los parámetros químicos, la adición de compost disminuyó ligeramente el pH del suelo (ca. 4,5%). A pesar de que el compost tenía un pH básico, su adición a esta dosis tuvo un cierto efecto acidificante a corto plazo en los suelos. Este descenso puede estar ligado a la liberación de H^+ al suelo durante el proceso de nitrificación (el compost presentaba alto contenidos en N). En agricultura, el pH del suelo es una de las propiedades fundamentales del suelo para caracterizar la fertilidad y la salud del suelo porque controla directa e indirectamente una serie de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo importantes para el crecimiento de las plantas (Mengel y Kirkby, 2002) y las condiciones ácidas o alcalinas extremas pueden constituir factores limitantes del rendimiento de los cultivos. En cualquier caso, los valores de pH del suelo de nuestro experimento se sitúan en el intervalo cercano a la neutralidad, lo que garantiza la disponibilidad de nutrientes.

El valor de la CE del suelo con compost fue un 37% mayor que el del suelo sin adición (Tabla 6). Autores como Li et al. (2021) o Guerrero et al. (2000) demuestran que la adición de compost incrementa la CE del suelo de manera proporcional a la dosis. Este hecho puede hacer que, debido a una incorporación continua en áreas de cultivo, los suelos evolucionen a salinos, afectando el desarrollo vegetal (Jiménez et al., 2010; Wang et al., 2010). Sin embargo, a pesar de a las altas dosis empleadas en el ensayo, no se observó un aumento relevante de este parámetro a corto plazo.

La MO aumentó significativamente tras la adición de la enmienda en un 51,6%, lo que se reflejó también muy significativamente en el contenido de C hidrosoluble, cuyo valor fue un 68% mayor en el suelo con enmienda ($p < 0,001$). Uno de los efectos más evidentes de la adición de enmiendas orgánicas a los suelos (incluso en suelos con alto contenido en C) es el aumento del contenido en MO del suelo. Este resultado ha sido observado por numerosos autores en distintos escenarios edafoclimáticos (de Sosa et al., 2023; Madejón et al. 2016). El aumento del C hidrosoluble es también un resultado publicado por otros autores en experimentos de adición de compost y enmiendas orgánicas a los suelos (de Sosa et al., 2021). Este aumento está relacionado con la liberación sustancias orgánicas del compost que

se sigue descomponiendo en el suelo, contribuyendo al ciclo de nutrientes del suelo. Las fracciones de C soluble en agua constituyen además una fuente de energía para microorganismos (Jindo et al., 2016).

En relación a los nutrientes del suelo, la aplicación del compost supuso un incremento en el contenido de N total del 59% en comparación con el suelo sin enmienda, así como de su forma inorgánica (es decir, nitrato y amonio) del 57 y 99% respectivamente. Así mismo, también se incrementó significativamente en el suelo con enmienda el contenido de P y K disponible en un 73% y 85% respectivamente (Tabla 6). Algunos trabajos han demostrado una clara relación estequiométrica entre la MO del suelo y los contenidos de N, P y K en sistemas de regadío en experimentos de campos (de Sosa et al., 2023), lo que pone de manifiesto la alta relación entre el aumento de MO y la fertilidad química del suelo.

Tabla 6. Valores de los parámetros físico-químicos analizados para ambos tratamientos estudiados en t_0 (suelo sin compost (S) y suelo con compost (SC)).

Parámetros físico-químicos	Tratamientos		
	S	SC	<i>p</i>
pH	7,61 ± 0,01	7,27 ± 0,01	**
CE (µs/cm)	204 ± 2,27	322 ± 45,1	*
Humedad (%)	7,10 ± 0,13	15,8 ± 1,20	**
Materia orgánica (%)	4,05 ± 0,09	8,38 ± 0,47	**
C total (%)	2,51 ± 0,05	5,57 ± 0,30	**
C hidrosoluble (mg/kg)	298 ± 4,86	936 ± 78,1	**
N total (%)	0,24 ± 0,01	0,59 ± 0,03	**
N - NH ₄ ⁺ (mg/kg)	2,50 ± 0,37	5,75 ± 1,12	*
N - NO ₃ ⁻ (mg/kg)	1,58 ± 0,23	241 ± 24,4	**
P Olsen (mg/kg)	88,1 ± 6,67	330 ± 30,9	**
K disponible (g/kg)	0,63 ± 0,03	4,08 ± 0,53	**

p: nivel de significación. *, ** indican diferencias estadísticamente significativas a $p < 0,05$ y $p < 0,001$, respectivamente

Por otra parte, la aplicación del compost inicialmente no supuso un cambio significativo en la actividad enzimática del suelo, aunque se observaron algunas ligeras diferencias (Figura 3).

Por un lado, el suelo sin compost presentó un 12% de mayor actividad de las enzimas β -glucosidasa y fenol oxidasa y un 3% más en la actividad de la ureasa, aunque las diferencias no fueron significativas ($p > 0,05$, Figura 3). Aunque normalmente la bibliografía es concordante en que existe una correlación entre el contenido en materia orgánica del suelo y estas actividades enzimáticas (Błońska et al., 2017), en nuestro caso este efecto no se detectó a corto plazo. Del mismo modo, Bautista-Cruz y Ortiz-Hernández (2015) no detectaron cambios en la actividad de la ureasa tras la aplicación de una enmienda orgánica cuyo contenido en nitrato y amonio era alto, y de Sosa et al. (2023) tampoco detectaron cambios en las actividades de la deshidrogenasa, β -glucosidasa o ureasa tras la aplicación de compost, encontrando el factor riego o la estacionalidad de las medidas factores mucho más relevantes.

Por otro lado, el suelo con enmienda registró valores mayores en la actividad de la aminopeptidasa (10%) y la fosfatasa (13%) pero estas diferencias tampoco fueron significativas. Cabe destacar la actividad de la glucosaminidasa, cuyo valor se incrementó significativamente en un 47% en el suelo con enmienda en comparación con el suelo control. La enzima glucosaminidasa está relacionada con la descomposición de uno de los biopolímeros más abundantes del suelo (quitina) cuya descomposición libera amino azúcares y se relaciona con fuentes transitorias de C y N (Ekenler y Tabatabai, 2004). En este sentido, otros estudios como Brennan y Acosta-Martinez (2019) también detectaron cambios inmediatos en la actividad de la enzima glucosaminidasa tras la adición de compost, aunque hubo mucha variabilidad en los diferentes sistemas orgánicos.

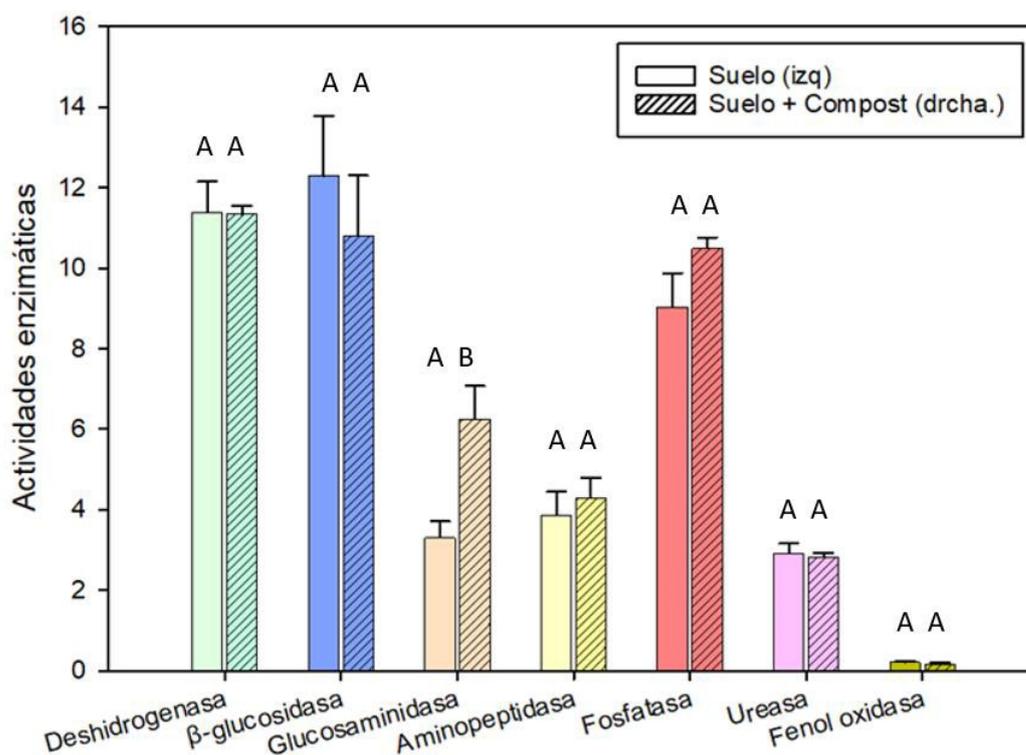


Figura 3. Actividades enzimáticas del suelo con y sin compost en t_0 . Las diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas con la adición de compost ($p < 0,05$); Deshidrogenasa ($\mu\text{g INTFg-1ssh-1}$); β -glucosidasa, Glucosaminidasa, Aminopeptidasa, Fosfatasa ($\mu\text{mol MUFg-1ssh-1}$); Ureasa ($\mu\text{moles NH}_4^+\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$); Fenoloxidasa (mg mol ss h^{-1}).

Esta ausencia de diferencias significativas en las actividades de las enzimas en los dos tratamientos analizados se pudo deber a la necesidad de un mayor tiempo de adaptación del suelo tras la incorporación del compost. Por ello, se realizó un segundo muestreo una vez desarrolladas las cubiertas vegetales.

4.2.2. Efecto del compost y la excreta de ganado en el desarrollo de las cubiertas vegetales

El compost tuvo la mayor influencia en el desarrollo de la cubierta vegetal, aunque las diferencias con las macetas sin enmiendas no resultaron significativas ($p > 0,005$). En la Figura 4 se observa la tendencia de aumento del peso de biomasa seca (tanto de la cubierta de gramíneas sembrada como de vegetación espontánea ya que el lentisco permaneció en las macetas y no se pesó) en las macetas a las que se le añadió la enmienda. La aplicación de

compost, como se indica en el apartado anterior, mejoró la capacidad de retención de agua y el contenido en nutrientes del suelo. De este modo pudo observarse una respuesta de las plantas tanto aquellas que crecieron de forma espontánea como, sobre todo, aquellas que se sembraron (gramíneas). Los efectos positivos de la adición de compost de calidad en la producción de biomasa de especies herbáceas se han demostrado en numerosos estudios tanto de suelos agrícolas (Diacono y Montemurro, 2019) como de suelos degradados o contaminados (Pérez de Mora et al., 2011).

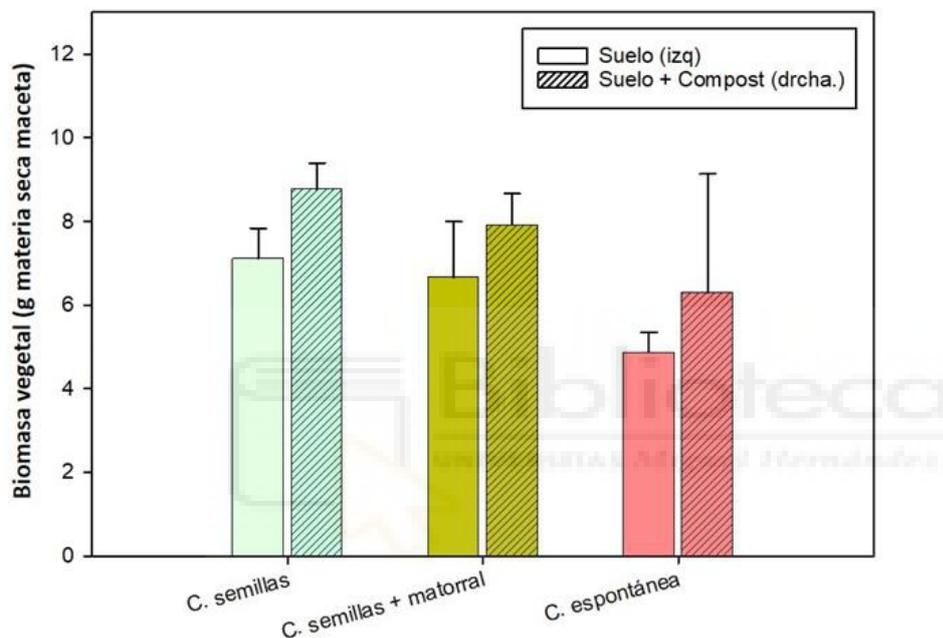


Figura 4. Valores medios y desviación estándar de la materia seca de la biomasa de cubiertas espontáneas y gramíneas sembradas del experimento en macetas.

El efecto de la adición de excreta de ganado en la producción de biomasa fue mucho más destacado en los tratamientos en los que no se añadió compost, donde en general los valores medios de biomasa tanto espontánea como de gramíneas sembradas fue superior sin la excreta (Figura 5). En el caso de las plantas tratadas con compost (con alto contenido en N como se ha comentado) el efecto de esta fuente de N que proviene del ganado es menos importante, aunque este resultado tampoco fue estadísticamente significativo. Del mismo modo, Devasena y Sangeetha (2022) encontraron que la aplicación foliar de la excreta del

ganado vacuno era más efectiva que la aplicación en suelo ya que se favorecía en mayor medida la asimilación de nutrientes esenciales con mayor rapidez.

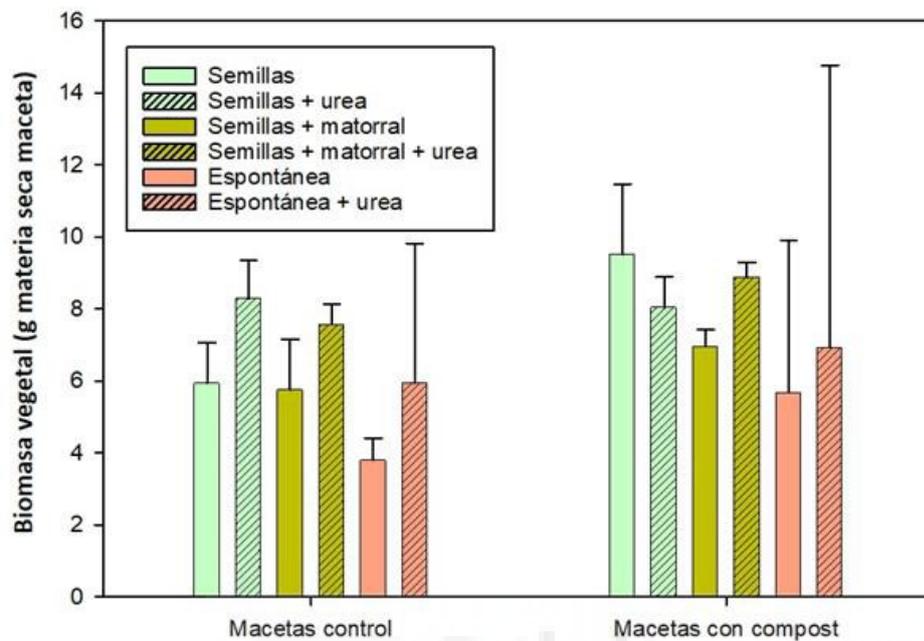


Figura 5. Valores medios y desviación estándar de la materia seca de cubiertas espontáneas y gramíneas sembradas del experimento en macetas.

4.2.3. Efectos de los factores compost, cubierta vegetal y excreta de ganado (orina) en las actividades enzimáticas y en la biomasa (tiempo final)

El compost, y sobre todo las cubiertas vegetales, tuvieron un papel clave en la respuesta enzimática del suelo. Las actividades enzimáticas pueden ser utilizadas como indicadores para evaluar el efecto del manejo agronómico sobre características de calidad del suelo (Henríquez et al., 2014).

En cuanto al compost, se observó que tuvo relevancia significativa en la mayoría de las actividades estudiadas (Figura 6). Sin embargo, es interesante destacar que los valores de actividad más altos para algunas de las actividades estudiadas se encontraron en los suelos sin compost. Por ejemplo, para la β -glucosidasa, la actividad fue un 30% mayor en el caso del suelo sin enmienda (con cubierta de semillas sembradas), o para la fosfatasa, que lo fue en un 20% (para la misma cubierta vegetal). Esto sugiere la existencia de un posible efecto

inhibidor por parte del compost en los procesos enzimáticos. Este hecho puede sugerir que la adición de una fuente de MO externa en un suelo que ha sido manejado bajo principios de conservación y sostenibilidad no sería necesaria o, al menos, no a las dosis tan altas empleadas en el ensayo (60 t ha^{-1}). Del mismo modo, Panettieri et al. (2022) encontró mayor respuesta enzimática en la actividad de la deshidrogenasa y β -glucosidasa después de enmendar con un compost similar al de este estudio a bajas dosis, describiendo la misma tendencia de inhibición de la actividad con una dosis mayor. De Sosa et al. (2023) encontró una relación más fuerte entre la actividad enzimática y el momento de muestreo o de riego que con el compost en sí mismo. Interesantemente, se encontró una respuesta activadora muy significativa de la enzima aminopeptidasa tras la adición de compost ($p < 0,001$, Figura 6), especialmente en los suelos con cobertura espontánea, donde se produjo un aumento del 85% en la actividad enzimática en suelo con compost en comparación con suelo con la misma cubierta vegetal, pero sin adición de la enmienda. Esto se vio reflejado en el análisis estadístico, donde se encontró una fuerte interacción entre el factor compost y la cobertura (Figura 6), indicando posibles tasas de renovación mayores del N del suelo en la vegetación adventicia cuyas necesidades nutricionales podrían ser mayores (Das et al., 2017). El caso de la enzima fenoloxidasa fue un poco particular al presentar una interacción entre los tres factores experimentales, aunque los factores que más afectaron fueron el compost y las cubiertas siendo la respuesta de la excreta del ganado más bien un factor residual (Figura 6). Así, la adición de compost incrementó la respuesta de la actividad en un 6, 18 y 23% para las cubiertas de semillas, de semillas con matorral y espontáneas respectivamente en comparación con las macetas con las mismas coberturas sin compost. En este sentido, Sinsabaugh (2010) escribe que esta enzima tiene un papel clave como mediadora en la degradación de lignina, humificación, mineralización de C y exportación de C orgánico disuelto por se podría explicar su aumento debido al grado de maduración del compost en el que probablemente se encuentren valores elevados de compuestos humificados.

Por otro lado, las cubiertas también demostraron tener un efecto significativo en la mayoría de las actividades enzimáticas que fueron objeto de estudio (Figura 6). Estas, al proteger el suelo y aportar MO, crean un ambiente propicio para la actividad microbiana. Rankoth et al. (2019) cuantificó los efectos de las coberturas sobre las actividades enzimáticas de un suelo bajo cultivo de maíz, encontrando diferencias significativas de activación de enzimas específicas según la presencia de la cobertura o no. Esto sugiere que la cobertura de cultivo puede tener un efecto específico en la dinámica microbiana del suelo. También el estudio de

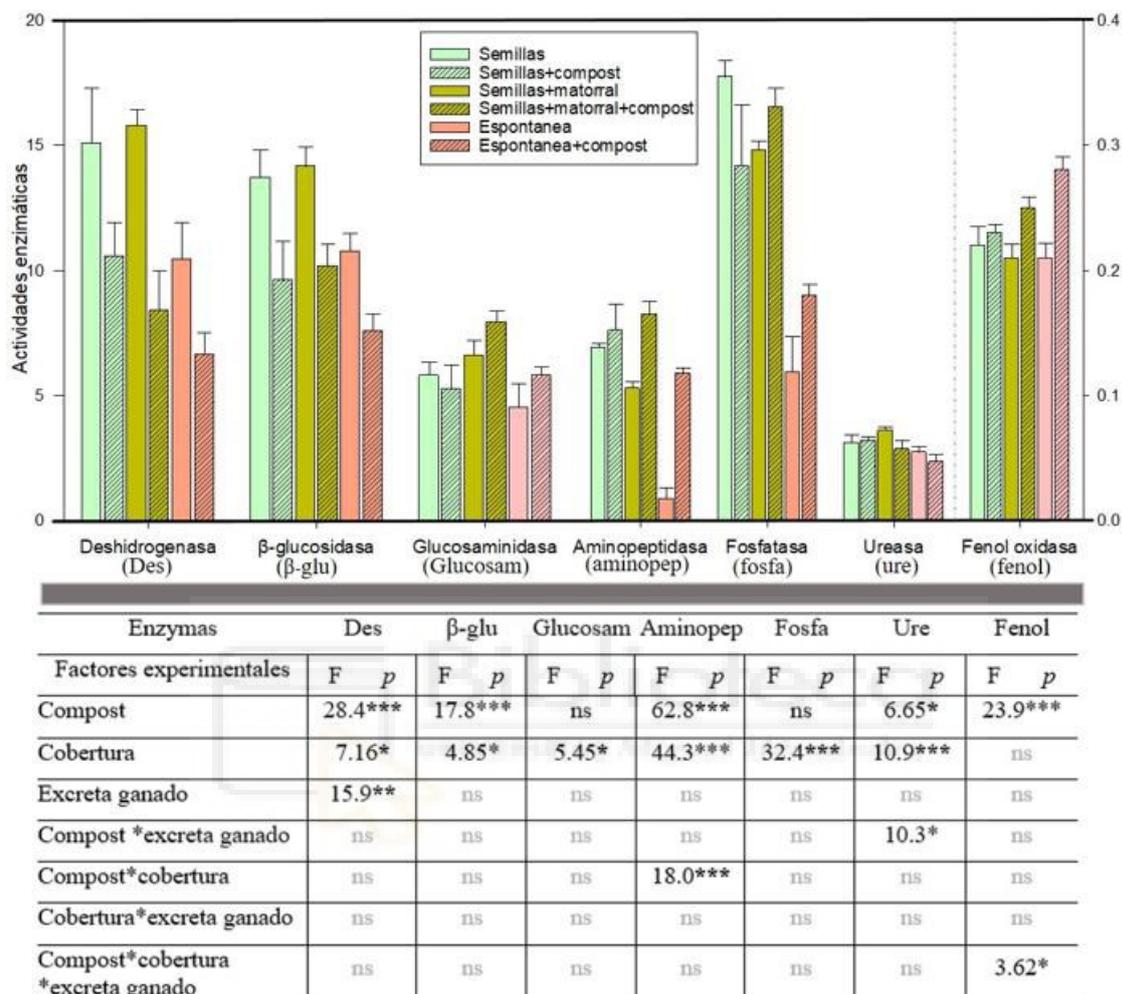
Singh et al. (2021) evidenció efectos significativos y consistentes de los cultivos de cobertura en las actividades enzimáticas. Este resultado se atribuyó a los aportes adicionales de MO proporcionados por los cultivos de cobertura durante periodos de barbecho desnudo. A la misma conclusión llega Nivelles et al. (2016) en su estudio combinando sistemas de laboreo, cultivos de cobertura y fertilización nitrogenada. Las cubiertas vegetales mantuvieron los niveles de C y N del suelo y aumentaron las actividades enzimáticas.

Analizando el efecto de las coberturas individualmente, las principales diferencias se encontraron entre las cubiertas de semillas y de semillas con matorral en comparación con las cubiertas espontáneas ($p < 0,05$), que estimularon la respuesta enzimática del suelo en comparación con la espontánea. Por ejemplo, la actividad de la enzima aminopeptidasa fue, de media, un 50% mayor para las coberturas con semillas en comparación con la de los suelos con vegetación espontánea, independientemente de la aplicación del compost. Similarmente, en el caso de la fosfatasa, el aumento fue del 52%. El incremento de la actividad de la deshidrogenasa y ureasa en las cubiertas con semillas comparativamente con las cubiertas espontáneas fue algo menor pero también significativa (30% y 20% respectivamente, $p < 0,05$).

Por otro lado, cabe mencionar que no se encontraron diferencias significativas entre las cubiertas con semillas y la de semillas con matorral, lo que sugiere que este último no tuvo un gran impacto sobre los procesos enzimáticos, necesitando probablemente más tiempo para modificar la comunidad microbiana del suelo. La única excepción se observó en el caso de la enzima glucosaminidasa, en la cual se registró una actividad un 4,2% mayor en los suelos con vegetación combinada de semillas y matorral, en comparación con los suelos con cubierta de semillas en exclusiva. De manera similar, Liang et al. (2014) también encontró que esta enzima parecía reaccionar más rápidamente dependiendo de los cultivos de cobertura.

Por último, los resultados revelaron que el factor orina tuvo un efecto prácticamente despreciable en las actividades enzimáticas, siendo significativo únicamente para la actividad de la deshidrogenasa, la cual fue un 30% mayor en el caso de la adición de excreta de ganado ($p < 0,01$). En el estudio de Davies et al. (2022) se encontró un resultado similar. La aplicación de N en forma de urea tuvo un impacto mínimo en la actividad enzimática en los suelos analizados. Esto sugiere que alguna forma de N orgánico podría ser más relevante

que el amonio proporcionado por la orina en relación con la actividad de las enzimas en el suelo.



Nivel de significación: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Figura 6. Análisis estadístico de actividades enzimáticas del suelo según la interacción entre el factor compost y el factor cobertura. Deshidrogenasa ($\mu\text{g INTFg-1ssh-1}$); β -glucosidasa, Glucosaminidasa, Aminopeptidasa, Fosfatasa ($\mu\text{mol MUFg-1ssh-1}$); Ureasa ($\mu\text{moles NH}_4\text{+g-1h-1}$); Fenoloxidasa (mg mol ss h-1).

La biomasa microbiana del suelo desempeña un papel esencial como almacén de energía y nutrientes, viéndose muy influenciada por las distintas prácticas agronómicas. El C y N de la biomasa microbiana del suelo son bioindicadores capaces de mostrar cambios en el suelo de los ecosistemas (Toledo et al., 2020). Comprender cómo los diferentes factores

experimentales influyen en estos elementos puede ayudar a desarrollar estrategias para mejorar la calidad del suelo y, por tanto, la producción agrícola.

El compost tuvo un impacto positivo en el C de la biomasa ($p < 0,001$), mostrando un incremento del 33% en macetas con cobertura de semillas sembradas, 7% en los casos de cobertura de semillas y matorral y 3% en las que contaban con cobertura espontánea, en comparación con las macetas sin adición de compost; Tabla 7). Este hecho se debe a que el compost enriquece el suelo con materia orgánica, lo que puede aumentar la acumulación de C también en la biomasa vegetal.

Así mismo, las coberturas vegetales también ejercieron una influencia positiva en el contenido de C de la biomasa ($p < 0,01$). La diferencia significativa se observó entre los casos de semillas y semillas con matorral en comparación con aquellos que presentaban vegetación adventicia ($p < 0,01$ y $p < 0,05$, respectivamente), al igual que ocurrió con las respuestas enzimáticas. Así, se encontró una diferencia del 6% ($p > 0,05$) entre los dos tipos de coberturas con semillas y del 27% entre la cubierta compuesta por semillas y la de vegetación espontánea, siendo este último caso el que menor dato de C obtuvo. Estos resultados resaltan la importancia de la elección de cubiertas para promover la calidad del funcionamiento de los ecosistemas. En consonancia con este resultado, Sainju et al. (2005) determinó que el rendimiento de la biomasa aérea y la acumulación de C fueron mayores en los cultivos de cobertura que en las malezas de invierno, las cuales son consideradas un tipo de vegetación espontánea.

Por lo que se refiere a la orina, los resultados obtenidos mostraron que la ausencia de excreta resultó en un aumento del 26% en el C de la biomasa en comparación con las plantas de las macetas a las que se les añadió orina artificial (Tabla 7). En los casos de adición de orina, la disponibilidad de N aumentó, disminuyendo la relación C/N y, por lo tanto, probablemente se potenció la descomposición de la MO para producir más C. Por el contrario, la falta de N proveniente de la orina hizo que no hubiera desequilibrio en la relación C/N y permitió una mayor acumulación de materia orgánica en las plantas. El estudio realizado por Flores Flores (2004) se enfocó en investigar el efecto de la fertilización nitrogenada en la biomasa vegetal de un cultivo de arroz. Los resultados obtenidos revelaron que la dosis intermedia (120 kg de N ha⁻¹) demostró ser más efectiva en términos de contenido de C en la biomasa que dosis superiores (140 y 160 kg de N ha⁻¹) y que el tratamiento control, siendo diferente este resultado al obtenido para este trabajo.

Por otra parte, ninguno de los factores experimentales influyó significativamente en el contenido de N de la biomasa ($p > 0,05$ para los tres casos). Estos resultados concuerdan con estudios previos en los que no observaron respuestas significativas en el contenido de N de la biomasa al aumentar el N en el suelo mediante adición de fertilizante con urea (Zhang et al., 2008).

Tabla 7. Valores de C y N de la biomasa por tratamiento experimental (n=36).

Tratamiento experimental		C de biomasa (mg/kg)			N de biomasa (mg/kg)		
Semillas	Sin compost	204	±	23,4	16,5	±	2,4
	Con compost	307	±	19,4	18,1	±	1,9
Semillas + matorral	Sin compost	233	±	18,4	20,6	±	1,6
	Con compost	250	±	33,1	15,5	±	3,0
Espontánea	Sin compost	172	±	37,9	17,2	±	3,2
	Con compost	181	±	18,9	13,9	±	2,8



5. Conclusiones

En el marco de este estudio, se evaluaron los efectos de la adición de compost de alperujo ecológico, de las cubiertas vegetales y del ganado en la calidad del suelo con el objetivo de desarrollar estrategias que aumenten la producción y favorezcan la capacidad de resistencia del ecosistema agrícola, enfocado en los ecosistemas mediterráneos. Los resultados obtenidos en el experimento para este trabajo fin de máster mostraron una mejora significativa en la capacidad de retención de agua del suelo gracias a la adición de compost, lo que resulta relevante en zonas mediterráneas con condiciones de sequía. La enmienda orgánica también incrementó significativamente el contenido de MO y de otros nutrientes disponibles en el suelo, como N, P o K, mejorando la fertilidad y salud del mismo. Es importante destacar que la evaluación a largo plazo de los parámetros fisicoquímicos del suelo habría enriquecido más el estudio, habiendo revelado una perspectiva más completa sobre la evolución del suelo en respuesta a la práctica agrícola de enmendar con compost.

En relación a las actividades enzimáticas, las cubiertas vegetales tuvieron un impacto importante en estas, promoviendo respuestas microbianas positivas y mejorando la salud del suelo. Por otro lado, la adición de compost manifestó cierto efecto inhibitorio en las actividades enzimáticas, sugiriendo que su aplicación podría no ser necesaria en los casos de suelos con buena calidad inicial, aunque sería conveniente seguir analizando los resultados a más largo plazo en los que seguramente se podrá obtener una respuesta más positiva. En cuanto al contenido de C en la biomasa se refiere, el compost demostró ser una enmienda orgánica beneficiosa, mientras que la elección de cubiertas vegetales también tuvo un papel influyente en este contenido. Asimismo, la adición de urea en el suelo afectó negativamente al contenido de C en la biomasa debido a un desequilibrio en la relación C/N.

Los resultados de este trabajo fin de máster subrayan la creciente importancia de la agricultura ecológica en la gestión de los agroecosistemas, fomentando la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente. Ciertas prácticas agrícolas, como el uso de cubiertas vegetales, quizás más relevantes en agrosistemas con suelos fértiles y bien manejados, brindan oportunidades para mantener las funciones agrícolas esenciales y mejorar la resiliencia del suelo ante futuros problemas causados por el cambio climático. Sin embargo, la aplicación de enmiendas orgánicas necesitaría ser optimizada y probada en condiciones de campo para determinar los efectos del compost a largo plazo.

6. Bibliografía

- Adhikary, S., Biswas, B., & Priya, A. (2020). Conservation Agriculture: An Efficient Tool to Overcome the Drawbacks of Conventional Agricultural System towards Sustainable Crop Production. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 9(7), 1333-1340.
- Baldwin, K. R., & Creamer, N. G. (2006). Cover crops for organic farms. North Carolina Cooperative Extension Service. Accedido desde <https://content.ces.ncsu.edu/cover-crops-for-organic-farms>.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147(3-4), 159-171.
- Bautista-Cruz, A., & Ortiz-Hernández, Y. D. (2015). Hydrolytic soil enzymes and their response to fertilization: a short review. *Comunicata Scientiae*, 6(3), 255-262.
- Blake, G.R. & K.H. Hartge. 1986. Bulk Density. In: A. Klute (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Pp. 363-375. ASA and SSSA, Madison, WI, EEUU.
- Błońska E., Lasota, J., & Zwydak, M. (2017). The relationship between soil properties, enzyme activity and land use. *Forest Research Papers*, 78, 39-44. <https://depot.ceon.pl/handle/123456789/1505>
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., Gregorich, E. G., & Carter, M. R. (1999). The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(1), 37-45.
- Brennan, E. B., & Acosta-Martinez, V. (2019). Cover crops and compost influence soil enzymes during six years of tillage-intensive, organic vegetable production. *Soil Science Society of America Journal*, 83(3), 624-637.
- Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D. S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil biology and biochemistry*, 17(6), 837-842.

- Cayetano, M. C., Cordero, J. A. T., Colmenero, G. S., & Ondoño, E. F. (2020). Cambios en el suelo por la utilización de ganado ovino en olivar ecológico. *Spanish Journal of Soil Science*, 10(1).
- Comisión Europea (2019). El Pacto Verde Europeo. < https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF >
- Coombs, C., Lauzon, J. D., Deen, B., & Van Eerd, L. L. (2017). Legume cover crop management on nitrogen dynamics and yield in grain corn systems. *Field crops research*, 201, 75-85.
- Das, S., Jeong, S. T., Das, S., & Kim, P. J. (2017). Composted cattle manure increases microbial activity and soil fertility more than composted swine manure in a submerged rice paddy. *Frontiers in microbiology*, 8, 1702
- Davies, B., Coulter, J. A., & Pagliari, P. H. (2022). Soil enzyme activity behavior after urea nitrogen application. *Plants*, 11(17), 2247.
- Deng, S., Kang, H., & Freeman, C. (2011). Microplate fluorimetric assay of soil enzymes. *Methods of soil enzymology*, 9, 311-318.
- Deng, S., Popova, I. E., Dick, L., & Dick, R. (2013). Bench scale and microplate format assay of soil enzyme activities using spectroscopic and fluorometric approaches. *Applied soil ecology*, 64, 84-90.
- de Sosa, L. L. D., Moreno, B., Herrera, R. A., Panettieri, M., Madejón, E., & Benítez, E. (2021). Organic Amendments and Sampling Date Influences on Soil Bacterial Community Composition and Their Predictive Functional Profiles in an Olive Grove Ecosystem. *Agriculture*, 11(11), 1178.
- de Sosa, L. L., Martín-Palomo, M. J., Castro-Valdecantos, P., & Madejón, E. (2023). Agricultural use of compost under different irrigation strategies in a hedgerow olive grove under Mediterranean conditions—a comparison with traditional systems. *Soil*, 9(1), 325-338.

- Devasena, M., & Sangeetha, V. (2022). Cow urine: Potential resource for sustainable agriculture. In *Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production* (pp. 247-262). Academic Press.
- De Vries, F. T., Thébault, E., Liiri, M., Birkhofer, K., Tsiafouli, M. A., Bjørnlund, L., ... & Bardgett, R. D. (2013). Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(35), 14296-14301.
- Diacono, M & Montemurro, F. (2019) Olive Pomace Compost in Organic Emmer Crop: Yield, Soil Properties, and Heavy Metals' Fate in Plant and Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(1), pp. 63–70
- Diffenbaugh, N. S., Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic change*, 114, 813-822.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.
- Dube, E., Chiduzza, C., & Muchaonyerwa, P. (2014). High biomass yielding winter cover crops can improve phosphorus availability in soil. *South African Journal of Science*, 110(3-4), 01-04.
- Durán-Lara, E. F., Valderrama, A., & Marican, A. (2020). Natural organic compounds for application in organic farming. *Agriculture*, 10(2), 41.
- Durán Romero, G. (2019). Progresando hacia un modelo de economía circular. *Economía y Medio Ambiente*, 211.
- Ekenler, M., & Tabatabai, M. A. (2004). β -Glucosaminidase activity as an index of nitrogen mineralization in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(7-8), 1081-1094.
- Emino, E. R., & Warman, P. R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, 12(4), 342-348.
- Erhart, E., & Hartl, W. (2010). Compost use in organic farming. *Genetic engineering, biofertilisation, soil quality and organic farming*, 311-345.

- Ferichani, M. (2013). The Potential of ettawa goat manure and urine management to support the productive and sustainable farming. *Journal of Crop and Weed*, 9(2), 76-80.
- Flores Flores, W. (2004). Efectos de la fertilización nitrogenada en el secuestro de carbono de la biomasa aérea del cultivo de arroz (*oryza sativa*) bajo riego al trasplante en la E.E. El Porvenir - INIA-Juan Guerra. Tesis de ingeniería para optar el grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
- Francaviglia, R., Álvaro-Fuentes, J., Di Bene, C., Gai, L., Regina, K., & Turtola, E. (2019). Diversified arable cropping systems and management schemes in selected European regions have positive effects on soil organic carbon content. *Agriculture*, 9(12), 261.
- García De La Fuente, R. (2011). Caracterización y uso de compost de alperujo como enmienda orgánica. Evaluación agronómica y medioambiental (Doctoral dissertation, Editorial Universitat Politècnica de València).
- Gardi, C., Jeffery, S., & Saltelli, A. (2013). An estimate of potential threats levels to soil biodiversity in EU. *Global change biology*, 19(5), 1538-1548.
- Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (2018). The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 771-782.
- Gianfreda L, Bollag JM (1994) Effect of soils on the behavior of immobilized enzymes. *Soil Sci Soc Am J* 58:1672–1681
- Gili, P., Marando, G., Irisarri, J., & Sagardoy, M. (2004). Actividad biológica y enzimática en suelos afectados por sales del Alto Valle de Río Negro y Neuquén. *Revista argentina de microbiología*, 36(4), 187-192.
- Gomez, J. A., & Soriano, M. A. (2020). Evaluation of the suitability of three autochthonous herbaceous species as cover crops under Mediterranean conditions through the calibration and validation of a temperature-based phenology model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 291, 106788.
- Gomiero, T. (2018). Food quality assessment in organic vs. conventional agricultural produce: Findings and issues. *Applied Soil Ecology*, 123, 714-728.

- Gregorich, E. G., Wen, G., Voroney, R. P., & Kachanoski, R. G. (1990). Calibration of a rapid direct chloroform extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(7), 1009-1011.
- Guerrero, C., Gómez, I., Mataix Solera, J., Moral, R., Mataix Beneyto, J., & Hernández, M. T. (2000). Effect of solid waste compost on microbiological and physical properties of a burnt forest soil in field experiments. *Biology and Fertility of Soils*, 32, 410-414.
- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., & Nogales, R. (2014). Actividad enzimática del suelo-deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa y ureasa-bajo diferentes cultivos. *Agronomía costarricense*, 38(1), 43-54.
- Hesse, J., 1971. A textbook of soil chemical analysis. John Murray, London, p. 197-199
- Jiménez, F., Escalona, A., & Acevedo, I. (2010). Compost de champiñonera y vermicompost como sustratos para el desarrollo de plántulas de pimentón. *Agronomía Tropical*, 60(3), 85-90
- Jindo, K.; Chocano, C.; Melgares de Aguilar, J.; González, D.; Hernandez, T.; García, C. Impact of Compost Application during 5 Years on Crop Production, Soil Microbial Activity, Carbon Fraction, and Humification Process. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2016, 47, 1907–1919
- Kandeler, E., & Gerber, H. (1988). Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and fertility of Soils*, 6, 68-72.
- Kandeler, E., Stemmer, M., & Klimanek, E. M. (1999). Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(2), 261-273.
- Lal, R., Negassa, W., & Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 79-86.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.
- Li, M., Zhang, J., Yang, X., Zhou, Y., Zhang, L., Yang, Y., ... & Yan, Q. (2021). Responses of ammonia-oxidizing microorganisms to biochar and compost amendments of heavy metals-polluted soil. *Journal of environmental sciences*, 102, 263-272.

- Liang, S., Grossman, J., & Shi, W. (2014). Soil microbial responses to winter legume cover crop management during organic transition. *European Journal of Soil Biology*, 65, 15-22.
- López-Núñez, R., Bello-López, M. A., Santana-Sosa, M., Bellido-Través, C., & Burgos-Doménech, P. (2022). Effect of Particle Size on Compost Analysis by Portable X-ray Fluorescence. *Applied Sciences*, 12(22), 11579.
- Madejón, P., Alaejos, J., García-Álbala, J., Fernández, M., & Madejón, E. (2016). Three-year study of fast-growing trees in degraded soils amended with composts: Effects on soil fertility and productivity. *Journal of environmental management*, 169, 18-26.
- Mahapatra, S., Ali, M. H., & Samal, K. (2022). Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin. *Energy Nexus*, 6, 100062.
- Marañón, T., & Madejón, E. (2017). Reciclando los residuos para mejorar los suelos y el medioambiente. *V Jornadas de la Red Española de Compostaje* 13-16.
- Marsden, K. A., Lush, L., Holmberg, J. A., Whelan, M. J., King, A. J., Wilson, R. P., ... & Chadwick, D. R. (2020). Sheep urination frequency, volume, N excretion and chemical composition: Implications for subsequent agricultural N losses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107073.
- Masilionyte, L., Maiksteniene, S., Kriauciuniene, Z., Jablonskyte-Rasce, D., Zou, L., & Sarauskis, E. (2017). Effect of cover crops in smothering weeds and volunteer plants in alternative farming systems. *Crop Protection*, 91, 74-81.
- Masson-Delmotte, V. P., Zhai, P., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N. & Scheel Monteiro, P. M. (2021). *Ipcc, 2021: Summary for policymakers*. in: *Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*.
- McDonald, H., Freluh-Larsen, A., Lóránt, A., Duin, L., Pyndt Andersen, S., Costa, G., and Bradley, H. (2021). *Carbon farming – Making agriculture fit for 2030*, Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg

- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal*. Suiza: Instituto Internacional de la Potasa.
- Moral, R. y Muro, J. (2008). Manejo, dosificación y gestión agronómica del compost. En: Moreno, J. y Moral, R. (Eds.). *Compostaje*. pp. 351-378. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Morales-Morales, E. J., Rubí-Arriaga, M., López-Sandoval, J. A., Martínez-Campos, Á. R., & Morales-Rosales, E. J. (2019). Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(8), 1875-1886.
- Muller, A., Schader, C., El-Hage Scialabba, N., Brüggemann, J., Isensee, A., Erb, K. H. & Niggli, U. (2017). Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature communications*, 8(1), 1-13.
- Mulvaney, R. L. (1996). Nitrogen—inorganic forms. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 1123-1184.
- Nivelle, E., Verzeaux, J., Habbib, H., Kuzyakov, Y., Decocq, G., Roger, D. & Tetu, T. (2016). Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. *Applied Soil Ecology*, 108, 147-155.
- Novozamsky, I., & Houba, V. J. G. (1987). Critical evaluation of soil testing methods for K. In *Proc. 20th Coll. Int. Potash Inst., Baden bei Wien, Austria*. IPI, Bern (pp. 165-185).
- Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
- Oyonarte, C., Mingorance, M. D., Durante, P., Piñero, G., & Barahona, E. (2007). Indicators of change in the organic matter in arid soils. *Science of the Total Environment*, 378(1-2), 133-137.
- Panettieri, M., Moreno, B., de Sosa, L. L., Benítez, E., & Madejón, E. (2022). Soil management and compost amendment are the main drivers of carbon sequestration

- in rainfed olive trees agroecosystems: An evaluation of chemical and biological markers. *Catena*, 214, 106258.
- Paye, W. S., Acharya, P., & Ghimire, R. (2022). Water productivity of forage sorghum in response to winter cover crops in semi-arid irrigated conditions. *Field Crops Research*, 283, 108552.
- Pérez-De-Mora, A., Madejón, P., Burgos, P., Cabrera, F., Lepp, N.W., Madejón, E. (2011). Phytostabilization of semiarid soils residually contaminated with trace elements using by-products: Sustainability and risks *Environmental Pollution* 159(10), pp. 3018-302
- Pinamonti, F., Stringari, G., Gasperi, F., & Zorzi, G. (1997). The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(2), 129-143.
- Prosser, J. A., Speir, T. W., & Stott, D. E. (2011). Soil oxidoreductases and FDA hydrolysis. *Methods of soil enzymology*, 9, 103-124.
- Rankoth, L. M., Udawatta, R. P., Veum, K. S., Jose, S., & Alagele, S. (2019). Cover crop influence on soil enzymes and selected chemical parameters for a claypan corn–soybean rotation. *Agriculture*, 9(6), 125.
- Repullo-Ruibérriz de Torres, M. A., Ordóñez-Fernández, R., Giráldez, J. V., Márquez-García, J., Laguna, A., & Carbonell-Bojollo, R. (2018). Efficiency of four different seeded plants and native vegetation as cover crops in the control of soil and carbon losses by water erosion in olive orchards. *Land Degradation & Development*, 29(8), 2278-2290.
- Román, P., Martínez, M. P., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina.*
- Rundgren, G., & Parrott, N. (2006). *Organic agriculture and food security: IFOAM.*
- Sainju, U. M., Singh, B. P., & Whitehead, W. F. (2005). Tillage, cover crops, and nitrogen fertilization effects on cotton and sorghum root biomass, carbon, and nitrogen. *Agronomy Journal*, 97(5), 1279-1290.
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232.

- Singh, J., & Kumar, S. (2021). Seasonal changes of soil carbon fractions and enzyme activities in response to winter cover crops under long-term rotation and tillage systems. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 886-899.
- Sinsabaugh, R. L. (2010). Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(3), 391-404.
- Smith, L. C., Orgiazzi, A., Eisenhauer, N., Cesarz, S., Lochner, A., Jones, A., ... & Guerra, C. A. (2021). Large-scale drivers of relationships between soil microbial properties and organic carbon across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 30(10), 2070-2083.
- Tiquia, S. M. (2000). Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig on litter system. In *Proceedings of the International Composting Symposium*, CBA Press Inc. Truro, NS (pp. 625-647).
- Toledo, M., Gutiérrez, M. C., Peña, A., Siles, J. A., & Martín, M. A. (2020). Co-composting of chicken manure, alperujo, olive leaves/pruning and cereal straw at full-scale: Compost quality assessment and odour emission. *Process Safety and Environmental Protection*, 139, 362-370.
- Trevors, J. T. (1984). Dehydrogenase activity in soil: a comparison between the INT and TTC assay. *Soil Biology & Biochemistry*, 16(6), 673-674.
- Trinidad-Santos, A. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agro productividad*, 9(8).
- Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(1), 28-37.
- Vinyals, N. (2014). El compostaje en Agricultura ecológica. PAE, (20).
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

- Wang, J., Huang, S., He, Q., Bing, H., Chen, X., Zhang, X., ... & Wu, Y. (2020). Microplate fluorimetric assay of soil leucine aminopeptidase activity: alkalization is not needed before fluorescence reading. *Biology and Fertility of Soils*, 56, 281-285.
- Wang, D., Shi, Q., Wang, X., Wei, M., Hu, J., Liu, J., & Yang, F. (2010). Influence of cow manure vermicompost on the growth, metabolite contents, and antioxidant activities of Chinese cabbage (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*). *Biology and fertility of soils*, 46, 689-696.
- Zhang, N., Wan, S., Li, L., Bi, J., Zhao, M., & Ma, K. (2008). Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China. *Plant and Soil*, 311, 19-28.
- Zucconi, F., & Bertoldi, D. E. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *Biocycle*, 22, 27-29.
- Zucconi, F. (1985). Phytotoxins during the stabilization of organic matter. *Composting of agricultural and other wastes*, 73-85.

