

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y AGROAMBIENTAL



**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DE
COMPOST PROCEDENTES DE ESTIÉRCOL VACUNO
EN UN CULTIVO DE LECHUGA”**

TRABAJO FIN DE GRADO

JULIO – 2025

Autor: Federico Pedraza Cañizares

Tutor/es: Encarnación Martínez

Sabater

Jose Antonio Sáez Tovar

Título: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DE COMPOST PROCEDENTES DE ESTIÉRCOL VACUNO EN UN CULTIVO DE LECHUGA.

Resumen: La gestión de residuos orgánicos representa un reto clave en el contexto de las políticas ambientales actuales, especialmente en el marco del Pacto Verde Europeo y la Agenda 2030. En este trabajo se aborda el compostaje como técnica sostenible para el tratamiento de estiércoles ganaderos, evaluando su efecto como enmienda orgánica sobre el suelo y el desarrollo vegetal. Se estudian distintos parámetros físico-químicos del compost y su influencia en el crecimiento de lechuga, así como su impacto sobre las propiedades del suelo. El objetivo principal es valorar la viabilidad del uso agrícola de compost y su contribución a una agricultura más circular y respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: Compostaje, residuos ganaderos, enmiendas orgánicas, suelo sostenible, agricultura circular.

Title: EVALUATION OF THE AGRONOMIC QUALITY OF COMPOST DERIVED FROM CATTLE MANURE IN A LETTUCE CROP.

Abstract: The management of organic waste represents a key challenge within the framework of current environmental policies, particularly in the context of the European Green Deal and the 2030 Agenda. This study addresses composting as a sustainable technique for the treatment of livestock manure, evaluating its effect as an organic amendment on soil and plant development. Various physicochemical parameters of the compost and their influence on lettuce growth are studied, as well as their impact on soil properties. The main objective is to assess the feasibility of using compost in agriculture and its contribution to a more circular and environmentally friendly farming system.

Keywords: Composting, livestock waste, organic amendments, sustainable soil, circular agriculture.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Importancia del tratamiento de residuos orgánicos en la actual política Europea, Pacto Verde y Agenda 2030.....	6
1.2 Los residuos ganaderos	6
1.2.1 Producción de estiércoles vacunos.....	7
1.3 Proceso de compostaje.....	8
1.3.1 Definición y etapas del proceso	8
1.3.2 Principales factores que afectan al proceso de compostaje	10
1.3.3 Sistemas de compostaje	11
1.3.4 Definición y evaluación de la calidad del compost	15
1.3.5 Legislación española relativa al compostaje.....	18
1.4 Suelo e influencia de la materia orgánica	19
1.4.1 Dinámica de la materia orgánica.....	20
1.4.2 Efecto de las enmiendas orgánicas bioestabilizadas sobre el suelo	22
2. OBJETIVOS	24
3. MATERIAL Y MÉTODOS	26
3.1 Diseño Experimental.....	26
3.2 Desarrollo del experimento	27
3.3 Parámetros analizados y métodos utilizados	28
3.4 Métodos Estadísticos.....	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1 Resultados de la Producción de Lechuga	32
4.1.1 Rendimiento de la Producción de Lechuga	32
4.1.2 Estado Nutricional del tejido de Lechuga.....	33

4.1.3 Contenido en clorofila (SPAD) y desarrollo de la cobertura vegetal	37
4.2 Efecto de las enmiendas testadas en los parámetros del suelo.....	38
4.2.1 Evaluación de la variación de pH y CE	38
4.2.2 Evaluación de nitrógeno total Kjeldahl, fósforo Olsen y potasio asimilable	40
4.2.3 Evaluación de la variación del C orgánico en el suelo	41
5. CONCLUSIONES	42
5.1 Conclusión sobre la producción de lechuga	42
5.1 Conclusión sobre el efecto de las enmiendas testadas en los parámetros del suelo.....	43
6. BIBLIOGRAFÍA	45



1. INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA ACTUAL POLÍTICA EUROPEA, PACTO VERDE Y AGENDA 2030.

En la actualidad, con el contexto de emergencia climática y degradación ambiental, la gestión sostenible de los residuos se ha convertido en una prioridad clave para la Unión Europea. El tratamiento adecuado de los residuos orgánicos representa un pilar esencial para avanzar hacia una economía circular, baja en carbono y eficiente en el uso de los recursos. Este punto de vista se centra en el Pacto Verde Europeo, una estrategia lanzada por la Comisión Europea en 2019 con el objetivo de lograr minimizar el cambio climático. Dentro de esta idea, se promueve el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante el compostaje y digestión anaerobia, transformándolos en recursos útiles como fertilizantes o biogás, en lugar de desecharlos en vertederos, donde generan emisiones de gases de efecto invernadero (Fernández & Ruiz, 1998).

Paralelamente, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas refuerza este compromiso a través de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este contexto, la correcta gestión de los residuos orgánicos no solo contribuye a reducir el cambio climático, sino que también favorece la salud del suelo, la seguridad alimentaria y el desarrollo de modelos urbanos más sostenibles (Naciones Unidas, 2015).

1.2 LOS RESIDUOS GANADEROS

Los residuos ganaderos plantean importantes desafíos ambientales y sanitarios. Uno de los principales problemas es la contaminación del agua por nitratos y fósforo, derivada de la mala gestión de estos residuos, lo que contribuye a la eutrofización de ríos y acuíferos (MAPA, 2022). Además, su descomposición, como se ha comentado en la introducción, genera emisiones de gases de efecto invernadero como metano (CH_4) y óxido de nitrógeno (N_2O), agravando el cambio climático. En muchas regiones con alta concentración ganadera se supera la

capacidad del suelo para absorber estos residuos, lo que provoca acumulaciones, malos olores, conflictos sociales y riesgos sanitarios por la proliferación de patógenos. A nivel europeo, estas problemáticas están siendo abordadas mediante normativas como la Directiva de Nitratos (Directiva 91/676/CEE) y estrategias de economía circular, aunque aún quedan importantes retos técnicos y territoriales (BOE, 2020).

1.2.1 PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOLES VACUNOS

La ganadería bovina genera una gran cantidad de residuos orgánicos, especialmente estiércoles sólidos y líquidos, cuya gestión representa uno de los principales retos del sector. En España, la ganadería bovina supera las 6.400.000 de cabezas, que hacen un total de 131.955 explotaciones. De estas explotaciones sobre el 74% están orientadas a la producción de carne, el 15% para cebo, el 9% a la producción de leche y el 2% tanto a la producción de carne como a la de leche (MAPA, 2023).

La producción de estiércol vacuno es constante y significativa, sobre todo en explotaciones intensivas. Haciendo una estimación con las 6.400.000 cabezas de ganado bovino en España y sabiendo que una unidad de ganado genera 50 kg de estiércol al día, $6,4 \text{ mill} \times 50 \times 365 = 116 \text{ mil tn}$ de estiércol año aproximadamente. Esta cantidad de estiércol se puede utilizar directamente para fines agrícolas como fertilización agrícola directa (suelen haber bastantes problemas de contaminación de aguas con nitratos), para producción de biogás y para compostaje.

Cuando se aplica el compostaje, el estiércol vacuno se convierte en un recurso valioso. Es una de las alternativas más eficaces para el tratamiento de estos residuos. A través de procesos controlados de descomposición, se reduce significativamente la carga de patógenos, olores y emisiones gaseosas, transformando el estiércol en un abono orgánico muy bueno. Este compost mejora la fertilidad del suelo, aumenta la retención de agua y facilita la absorción de nutrientes de las plantas. En este sentido, promover el compostaje del estiércol

vacuno no solo reduce los impactos ambientales negativos, sino que también representa una oportunidad para avanzar hacia una agricultura más resiliente y sostenible (MAPA, 2013)

1.3 PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso biológico aeróbico controlado en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica biodegradable, como el estiércol, transformándola en un material estable, higienizado y rico en humus conocido como compost. Durante este proceso, bajo condiciones óptimas de oxígeno, humedad y temperatura, se reduce el volumen inicial del residuo, se eliminan patógenos y semillas viables, y se obtiene un producto final con propiedades fertilizantes y mejoradoras del suelo. El compostaje constituye una estrategia clave en la valorización de residuos orgánicos, alineada con los principios de la economía circular y la sostenibilidad agrícola.

1.3.1 ETAPAS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

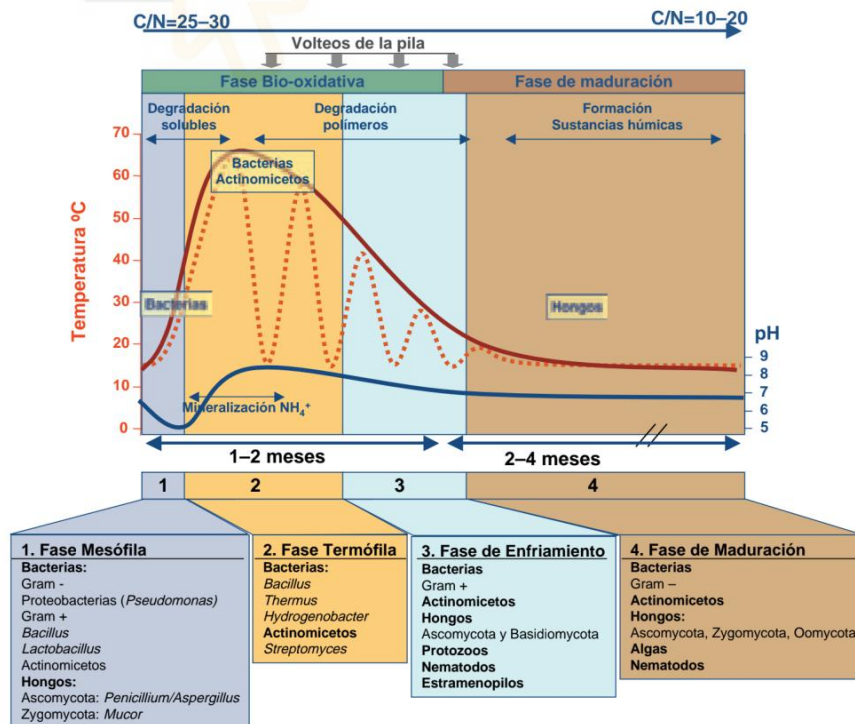


Figura 1.1. Fases de compostaje y sucesión microbiana (Fuente: Moreno J.,2008)

1. Recolección y preparación de materiales: En primer lugar, se recogerá el estiércol. Es recomendable triturar o trocear los materiales de mayor tamaño para facilitar su descomposición. Además, es esencial mantener una proporción equilibrada entre materiales ricos en carbono (secos) y en nitrógeno (húmedos).
2. Formación de la mezcla: Los materiales se disponen en capas alternas (materiales secos en una capa y húmedos en otra) en una pila o compostera, asegurando una buena aireación y un nivel de humedad adecuado (Fernández & Ruiz, 1998).
3. Fase de descomposición activa: Esta fase se divide en dos subetapas:
 - Mesofílica (20-40 °C): Bacterias mesófilas comienzan la descomposición.
 - Termofílica (40-70 °C): La actividad microbiana eleva la temperatura, lo que favorece una descomposición rápida y la eliminación de patógenos y semillas.
4. Fase de maduración: Con la reducción de la temperatura, se estabiliza el material. Intervienen diferentes organismos como hongos y otros microorganismos que degradan la materia orgánica, mejorando la estructura del compost.
5. Curado: El compost se deja reposar durante varias semanas o meses para completar su estabilización. En esta etapa, adquiere una textura homogénea, color oscuro y un olor terroso. La actividad biológica disminuye considerablemente y el material se considera maduro (MAPA, 1994).
6. Tamizado y aplicación: Finalmente, el compost se puede tamizar para eliminar fragmentos no descompuestos. El producto final es apto para ser utilizado como enmienda orgánica en suelos (Fernández & Ruiz, 1998).

1.3.2 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN AL PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso biológico complejo influido por múltiples factores que determinan la eficiencia, la calidad del compost final y el tiempo necesario para su maduración. Estos factores deben ser cuidadosamente controlados para garantizar una descomposición adecuada de la materia orgánica. A continuación, se describen los principales:

Relación Carbono/Nitrógeno (C/N): La proporción entre materiales ricos en carbono (C) y en nitrógeno (N) es uno de los factores más críticos. Una relación adecuada favorece la actividad microbiana, evitando tanto la liberación de olores desagradables por exceso de nitrógeno, como la ralentización del proceso por exceso de carbono (MAPA, 1994).

Humedad: El contenido de humedad ideal debe situarse entre el 50 % y el 60 %. Un ambiente demasiado seco inhibe la actividad microbiana, mientras que el exceso de agua puede provocar condiciones anaerobias, causando malos olores y ralentizando la descomposición. La humedad puede regularse añadiendo materiales secos o húmedos según sea necesario.

Temperatura: Durante el proceso, la temperatura puede alcanzar hasta los 70 °C en la fase termofílica. Un descenso de la temperatura puede indicar falta de actividad microbiana o desequilibrio en la mezcla.

Oxigenación: El compostaje es un proceso aeróbico, por lo que el oxígeno es esencial. La aireación adecuada se logra mediante volteos regulares de la pila o mediante un diseño estructural que permita el paso del aire.

Tamaño de Partícula: El tamaño de las partículas afecta la superficie de contacto para la acción microbiana. Materiales muy grandes se descomponen lentamente, mientras que partículas excesivamente finas pueden compactarse y dificultar la circulación del aire. Se recomienda triturar los residuos a un tamaño medio, manteniendo una textura que favorezca tanto el contacto como la aireación.

pH: El pH del compost tiende a oscilar entre 5.5 y 8.5 a lo largo del proceso. Aunque los microorganismos toleran un amplio rango, un pH muy ácido o muy alcalino puede inhibir la actividad biológica. En general, el proceso tiende a neutralizarse hacia valores cercanos a 7 en la fase de maduración.

Tipo y composición de los Materiales: La naturaleza de los residuos orgánicos utilizados influye directamente en la velocidad y calidad del compost. Materiales fácilmente degradables (como frutas o césped fresco) activan rápidamente el proceso, mientras que otros más lignificados (ramas, paja) requieren más tiempo y condiciones específicas para su descomposición. En nuestro caso, al ser estiércol de vacuno, el compostaje será más lento.

1.3.3 SISTEMAS DE COMPOSTAJE

El sistema de compostaje utilizado depende del tipo de aireación que es empleada en el proceso. Puede ser mediante opciones distintas: volteando la masa, mediante aireación forzada o mediante aireación pasiva, donde el aire fluye de forma pasiva a través de la pila (Imbeah, 1998), catalogándose en sistemas estáticos y dinámicos. El sistema de compostaje también puede ser clasificado en sistemas abiertos, semicerrados y cerrados. La diferencia esencial entre unos sistemas y otros, con independencia de la clasificación optada, radica en el método utilizado para suministrar oxígeno a la masa con el objetivo de que sea un proceso aeróbico.

A continuación, van a ser descritas diferentes opciones realizar el proceso de compostaje, ordenadas según el grado de sofisticación del sistema:

- Pilas estáticas con aireación pasiva
- Pilas o hileras volteadas
- Pilas estáticas con aireación forzada
- Trincheras (canales semicerrados)
- Túneles estáticos

- Tambores/cilindros rotatorios

Pilas estáticas con aireación pasiva

La aireación pasiva puede originarse a través de tres mecanismos: la difusión molecular, el viento y la convección térmica. Aunque este sistema de tratamiento es el más económico, el tipo de manejo puede dar lugar a que se generen condiciones anóxicas. La aireación puede ser asistida mediante el uso de tuberías perforadas que atraviesan la pila.

Pilas o hileras volteadas

El compostaje en pilas o hileras volteadas se refiere a un sistema común en el que los residuos se esparcen en un montículo alargado, normalmente de sección triangular o trapezoidal. La aireación se suministra mediante volteo mecánico en intervalos frecuentes; el volteo debe realizarse de forma adecuada con el objetivo de asegurar la adecuada homogeneización del material, su higienización, haciendo pasar todo el material por la zona central de la pila y un mantenimiento de las apropiadas condiciones de fermentación. Se puede emplear una amplia gama de maquinaria para la agitación mecánica del material, desde simples palas de carga hasta equipos especializados de volteo de hileras, siendo preferibles estas últimas para la optimización del proceso.

Al ser un sistema típicamente discontinuo, con continuas oscilaciones en los niveles de humedad, oxígeno y temperatura no es el óptimo para el desarrollo de las reacciones de degradación biológica. De ahí que este proceso sea lento y aún con el adecuado programa de volteos y riegos se necesite un mínimo de 100-120 días para lograr unos adecuados niveles de estabilización. En cambio, presentan la ventaja de conseguir una mayor homogeneización y garantía de higienización del material.

Pilas estáticas con aireación forzada

Las pilas estáticas con aireación forzada son capaces de mantener altos niveles de aireación con una alta actividad microbiana. El método se basa en la construcción de una pila homogenizada encima de un sistema de tubos de aireación o sobre un suelo poroso con tuberías debajo.

Existen dos sistemas principales: de presión positiva, el aire es insuflado a través de un soplador de aire (Sistema Rutgers), y de presión negativa o succión (sistema de Beltsville) en las que el aire de escape pasar a través de biofiltro para el control de los gases de efecto invernadero y olores. El sistema Rutgers también permite el control de la temperatura, estableciendo un valor máximo que asegura una tasa de degradación óptima.

Debido a que no existen mecanismos para mezclar el material durante el proceso de compostaje, los materiales deben ser homogeneizados antes del establecimiento de la pila. La mezcla debe ser relativamente porosa y tener una buena estructura para resistir la compactación y el asentamiento (Rynk y Richard, 2004).

Trincheras (canales semicerrados)

El proceso de compostaje en estos sistemas se desarrolla en una serie de canales, calles o trincheras con muretes. Los canales se encuentran abiertos por arriba y con dispositivos que permiten la circulación por encima de ellos de una máquina volteadora que remueve la pila de compostaje y la hace avanzar unos 3-4 metros cada vez; este tipo de volteo es la novedad más relevante de este sistema.

En algunas configuraciones, el volteo es efectuado mediante una volteadora que circula sobre unos raíles situados a lo largo de la parte superior de los muretes y que puede ser pasada de una a otra calle por medio de unos puntos de transferencia (Moreno y Moral, 2008).

Esta disposición permite realizar un seguimiento y control exhaustivo de la temperatura, humedad y nivel de oxígeno con las mejoras añadidas de los volteos periódicos, el riego simultáneo al volteo y, la posibilidad de airear selectivamente determinadas zonas.

Túneles estáticos

Se denomina túneles a estáticos a contenedores de hormigón alargados de forma rectangular dotados con: un sistema de aireación forzada (normalmente a través de ranuras en el suelo), sondas de temperatura, de humedad y de nivel de oxígeno, recogida de gases y lixiviados y sistema de riego.

Un sistema automatizado mide y regula la aireación, temperatura y humedad. En función de los valores del nivel de oxígeno y de temperatura en el contenedor se puede realizar la aireación con aire fresco, reciclado o mezcla de ambos. El control de temperatura puede realizarse fijando patrones de comportamiento en los que se suele delimitar un periodo termófilo y otros mesófilos. La humedad óptima del proceso se regula por control del riego de la mezcla en función de las condiciones de entrada del material y de operación.

El material para compostar se mantiene durante un periodo que oscila entre 2 y 6 semanas en los contenedores (Moreno y Moral, 2008) y, posteriormente la mezcla inmadura se traslada a otro lugar, en el que se efectúa un proceso de maduración controlada, manteniendo los volteos y riegos en función del estado de estabilización del producto.

Las principales ventajas de este sistema consisten en que permite mantener valores constantes y controlados de las variables críticas y recoger los gases y los lixiviados que además pueden ser reutilizados.

Tambores/cilindros rotatorios

La tecnología de los reactores de tambor rotatorio se realiza en cilindros de unos pocos metros de diámetro por algunos más de longitud, que giran lentamente a lo largo de su eje principal. Los tambores montados de forma horizontal tienen una pequeña inclinación para que los materiales circulen lentamente dentro de ellos mientras el sistema rota y se voltea en su interior. Los materiales a compostar se cargan en un lado del tambor por medio de cintas transportadoras y el compost ya finalizado se recoge por el otro extremo. Gracias a este sistema es posible controlar parámetros como la temperatura de la masa, el tiempo de permanencia, los volteos y la inyección/extracción de aire (Canaleta, 2005).

La rotación expone el material al aire fresco, intercambiando O₂, liberando calor y diversos gases de la descomposición. Asimismo, se provoca una homogenización en aireación y temperatura del material que se está compostando, consiguiendo una amplia garantía de correcta higienización. El material saliente del proceso,

pasa un periodo posterior de maduración que puede ser realizado de diversos sistemas (túneles de maduración, hileras volteadas, etc.).

Como ventajas de este sistema encontramos el gran control que se puede efectuar sobre los parámetros y la flexibilidad del proceso. A pesar de esto, como principal desventaja encontramos su elevada inversión inicial necesaria.

1.3.4 DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL COMPOST

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

Desde un punto de vista práctico, a veces se entiende como compost maduro a un material térmicamente estabilizado, lo cual no implica necesariamente una estabilización biológica. Sin embargo, desde el punto de vista de la calidad del producto final un compost maduro ha de ser un producto altamente *humificado*, cuya materia orgánica ha evolucionado durante un largo período de tiempo hacia formas más resistentes a la biodegradación (presenta numerosas similitudes a las propiedades de la materia orgánica humificada del suelo) y además es altamente maduro, que implícitamente está biológicamente estabilizado y además carece de sustancias orgánicas fitotóxicas (Iglesias Jiménez y col., 2008).

En términos generales un compost maduro, y por tanto estable, debería ser:

- a) Un producto estabilizado: la estabilización es un requisito previo a su empleo agrícola; esta debe de ser lograda por procesos biológicos y no confundirse con procesos como desecación o esterilización.
- b) Un producto inocuo: la destrucción de organismos patógenos se consigue con el efecto continuado de la alta temperatura, el tiempo y la competencia de la

población microbiana no patógena con la patógena; condiciones que se dan preferentemente en la etapa termófila.

c) Debe haberse sometido a una etapa inicial de descomposición: el compost debe asociarse al proceso de compostaje tal y como se definió anteriormente y se debe excluir a todos los productos obtenidos mediante otros procesos. La degradación irá incluida en la primera fase de compostaje, pues para iniciar la estabilización, esta tiene que haber finalizado, y la presencia de compuestos orgánicos solubles y catabolitos orgánicos deberá estar en un nivel muy bajo.

d) Será el resultado de un proceso de humificación: durante la fase de estabilización del producto (maduración) se producirá una humificación, acompañada de un lento proceso de mineralización.

Por todas estas razones, los productos no terminados o "inmaduros" (no humificados o que contengan sustancias fitotóxicas) no deberían ser llamados "compost", aunque algunos no tienen tales requisitos puedan tener usos especiales.

Concretamente, para la evaluación de la madurez del compost, numerosos métodos y criterios (físicos, químicos y biológicos) han sido propuestos, pero la mayoría, aisladamente, no son operativos para su aplicación práctica a todo tipo de materiales. Es decir, no existe un único método universal para su aplicación a cualquier tipo de compost y por tanto es imprescindible la aplicación combinada de determinados parámetros indicadores de la actividad microbiana durante el compostaje y de la "humificación" del material para evitar los serios riesgos que conlleva la aplicación a los suelos de cultivo de compost insuficientemente maduros. (Iglesias Jiménez y col., 2008).

En la Tabla siguiente, se muestran los valores límites establecidos por distintos autores a partir de los cuales se considera que un compost ha alcanzado su madurez.

Tabla 1.1. Fuente: Bustamante (2007). RH: Relación de humificación; IH: Índice de humificación; Pah: Porcentaje de humificación ($Cah/Cex \times 100$); Cah/Caf: Relación de polimerización; CCC: Capacidad de cambio catiónico.

Parámetro	Valor límite	Fuente
Chidrosoluble (%)	< 0,5	García y col. (1992)
	<1	Hue y Liu (1995)
	<1,7	Bernal y col. (1998)
Cot/Nt	< 20	Mathur y col. (1993)
	<15	Bernal y col. (1998)
Chidro/Norg	<0,70	Hue y Liu (1995)
	<055	Bernal y col. (1998)
NH ₄ ⁺ (%)	<0,04	Zucconi y de Bertoldi (1987)
N-NH ₄ ⁺ /N-NO ₃	<0,16	Bernal y col. (1998)
RH (%)	>7	Roletto y col. (1985)
IH (%)	>3,5	Roletto y col. (1985)
	>13	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 b)
Pah (%)	>62	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 b)
Cah/Caf	>1	Roletto y col. (1985)
	>1,6	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 b)
Índ. germinación (%)	>50	Zucconi y de Bertoldi (1987)
CCC (meq/100 g MO)	>60	Harada e Inoko (1980)

	>67	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 b)
CCC/Cot (meq/g Cot)	>1,9 >3,5	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 a) García y col. (1992)

1.3.5 LEGISLACIÓN ESPAÑOLA RELATIVA AL COMPOSTAJE

En el reciente Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes (BOE de 10 de julio de 2013), recientemente modificado por el Real Decreto 529/2023 se clasifica a los composts como:

Grupo 6. Enmiendas orgánicas del anexo I. Donde se definen, entre otros, los distintos tipos de composts:

6.02. *Compost*

6.03. *Compost vegetal*

6.04. *Compost de estiércol*

6.05. *Vermicompost*

6.09. *Compost de alperujo*

En el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, se define compost de la siguiente forma:

Definición Compost: producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo la fase termófila), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables.

Hay que cumplir con una serie de especificaciones y límites comercialización:

- Contenido mínimo en nutrientes (% masa).
- Niveles de metales pesados que no pueden sobrepasar.

- Parámetros microbiológicos.
- Otros parámetros (impurezas, semillas de malas hierbas, etc.).

En concreto, para compost en general:

Tabla 1.2. Diferentes parámetros para que una enmienda orgánica sea considerada como compost según el Real Decreto 506/2013 del 28 de junio.

Parámetro	Real Decreto 506/2013
Materia orgánica mínima	35%
Humedad máxima	40%
C/N	< 20
Microorganismos	Ausente en 25 g de compost
<i>Salmonella spp</i>	<1000 NMP/g
<i>E. coli</i>	
Tamaño de partículas	90% ≤ 25mm
Impurezas (%)	No puede contener
Gravas y piedras (%)	No puede contener

1.4 SUELO E INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica (MO) es porcentualmente minoritaria en el suelo, ya que adquiere valores entre 0-5%. Sin embargo, permite mejorar toda una serie de propiedades, entre las que se pueden destacar: el aumento de la cohesión, la capacidad de retención de agua y la formación de complejos arcillo-húmicos.

La materia orgánica del suelo juega un papel importante en la conservación y/o restauración a largo plazo de los suelos mediante el mantenimiento de la fertilidad. La reducción del stock de carbono en los suelos agrícolas es especialmente crítica,

ya que la materia orgánica es fundamental para mejorar la estructura del suelo, las características químicas y mantener la supresión de los patógenos transmitidos por el suelo (Arthur y col., 2014; Zaccardelli y col., 2013). Además, la MO es un indicador de calidad del suelo muy reactivo y ubicuo, que influye en la productividad. (Komatsuzaki y Ohta, 2007).

En consecuencia, aquellas prácticas de manejo agrícola que conservan o mejoran el contenido de materia orgánica del suelo son las que deben prevalecer para preservar la producción agrícola y la calidad ambiental, pudiendo considerarse como únicas estrategias sostenibles. En concreto, según señalan Diacono y Montemurro (2010), la única forma sostenible de agricultura es la agricultura ecológica.

Por su parte, en gran parte el área mediterránea, el *European Soil Bureau* indica que el valor de MO se sitúa por debajo de 1,7%. La materia orgánica está sufriendo un agotamiento progresivo en dicha área, debido a las condiciones ambientales favorables para la mineralización de la materia orgánica y el establecimiento de una agricultura intensivista (altas temperaturas y disponibilidad continua de agua y nutrientes por fertirrigación), condiciones que podrían contribuir a la degradación del suelo (Scotti, 2015).

Por los motivos previamente descritos, de forma genérica la materia orgánica debe reponerse de forma periódica en todos los suelos agrícolas, pero en especial en aquellas zonas geográficas que por sus condiciones edafoclimáticas generen una tendencia acentuada a su pérdida, como la zona mediterránea.

1.4.1. DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica fresca (restos de plantas y animales) incorporada al suelo, sufre una serie de transformaciones que dependerán de la naturaleza del material orgánico y de las condiciones ecológicas (Porta, y col., 2008). Los procesos fundamentales (Figura 1.1.) son los que describen a continuación.

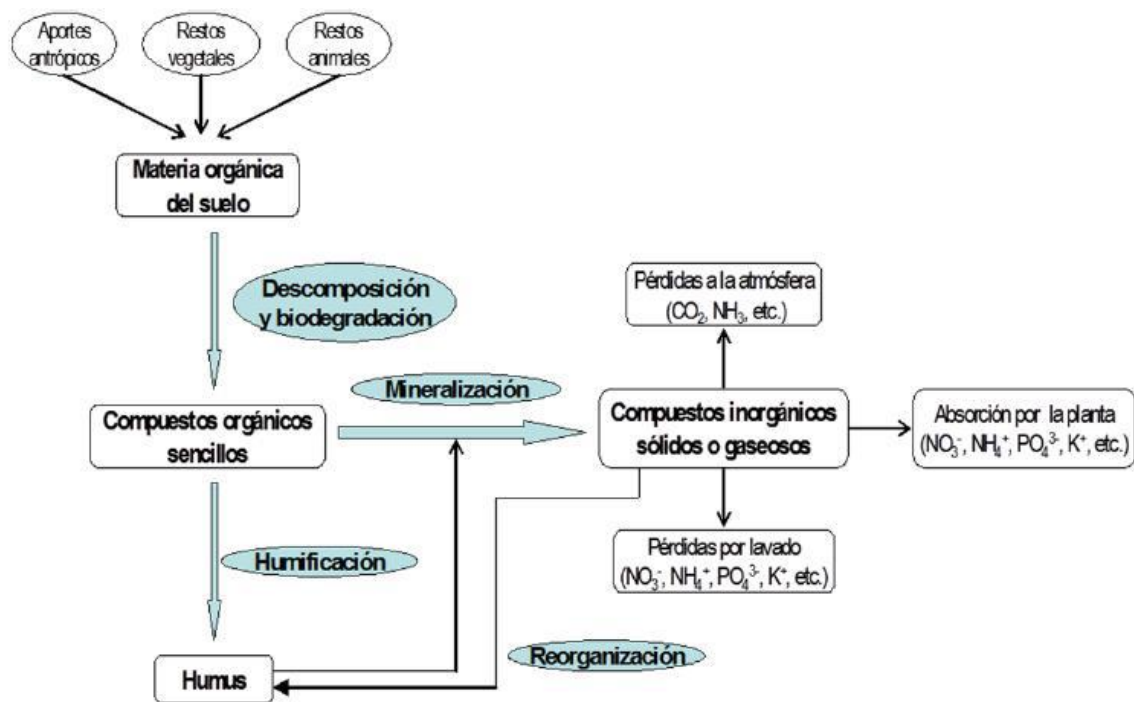


Figura 1.2. Transformaciones de los componentes orgánicos en el suelo.

- Descomposición y biodegradación: la materia orgánica incorporada al suelo, sufre un proceso de descomposición y biodegradación, obteniéndose compuestos orgánicos sencillos y en general solubles como proteínas, hidratos de carbono, ácidos orgánicos, etc.

- Mineralización: que consiste en una rápida transformación por acción microbiana de los compuestos orgánicos sencillos (solubles) a compuestos inorgánicos, bien solubles (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , etc.) o bien gaseosos (CO_2 , NH_4^+ , etc.) Los compuestos inorgánicos solubles obtenidos en el proceso de mineralización pueden ser aprovechados como nutrientes para las plantas, pueden perderse por lavado o bien pueden ser reorganizados, inmovilizándose temporalmente en la biomasa microbiana. Como resultado del proceso de mineralización entre el 60 y el 80 % del carbono orgánico es devuelto a la atmósfera en forma de CO_2 .

-Humificación: conjunto de procesos complejos que hacen aumentar la resistencia de la MO a la biodegradación. En la humificación pueden tener lugar reacciones químicas de oxidación, condensación y polimerización, procesos

biológicos de catabolismo y síntesis microbiana, dando lugar macromoléculas más o menos policondensadas que no se forman en las células vivas, sino que son constituyentes típicos de los suelos y que se denominan sustancias húmicas. Existen procesos de humificación directa de compuestos orgánicos sencillos a sustancias húmicas y otros de humificación lenta, de biomasa microbiana a sustancias húmicas.

1.4.2 EFECTO DE LAS ENMIENDAS ORGÁNICAS BIOESTABILIZADAS SOBRE EL SUELO

El impacto ambiental de las prácticas agrícolas convencionales y las preocupaciones globales sobre la degradación del suelo han aumentado el interés sobre estrategias agrícolas sostenibles como la aplicación de enmiendas orgánicas bioestabilizadas al suelo provenientes de materiales de desecho. En este contexto, la aplicación de enmiendas orgánicas debe contemplarse como una estrategia de manejo fundamental para preservar la sostenibilidad de los sistemas de cultivos hortícolas intensivos situados en la zona mediterránea.

La función más ampliamente reconocida a la aplicación de sustancias húmicas, como las aplicadas con el compost, es la mejora de la condición estructural del suelo. La aplicación regular de compost mejora una serie de propiedades físicas, ya que aumenta la porosidad total, la conductividad hidráulica, la capacidad de retención y la estabilidad de los agregados; mientras que reduce la densidad aparente y la resistencia a la penetración (Aggelides y Londra, 2000).

Invertir la tendencia de pérdida de carbono del suelo, resultado de un largo período de actividad agronómica con fertilización mineral, puede ayudar a mejorar la salud del suelo y la posibilidad de aumentar el contenido de carbono orgánico del suelo, a través del cambio de prácticas agronómicas, puede jugar un papel esencial en la lucha contra el cambio climático (Lal, 2007). El mantenimiento del carbono orgánico es importante no solo para la captura y la mitigación de gases de efecto invernadero, sino que también ejerce una influencia significativa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Ashagrie y col., 2007).

El aumento del stock de carbono orgánico del suelo y, por lo tanto, el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, es una importante mejora en la fertilidad química del suelo ya que implica una mayor retención de nutrientes y en una forma más asimilable para las plantas (Weber y col., 2007; Kaur y col., 2008).

Con el uso a largo plazo de las enmiendas orgánicas bioestabilizadas, los efectos residuales sobre la producción de los cultivos y las propiedades del suelo pueden durar varios años, ya que solo una fracción del N y otros nutrientes está disponible para las plantas en el primer año después de su aplicación.



2. OBJETIVOS

La fertilización convencional con productos sintéticos ha sido ampliamente utilizada en la producción hortícola intensiva, sin embargo, su uso continuado plantea desafíos medioambientales y de sostenibilidad del suelo. En este contexto, el uso de enmiendas orgánicas, como estiércoles y compost, emerge como una alternativa prometedora para mantener la productividad agrícola sin comprometer la salud del agroecosistema.

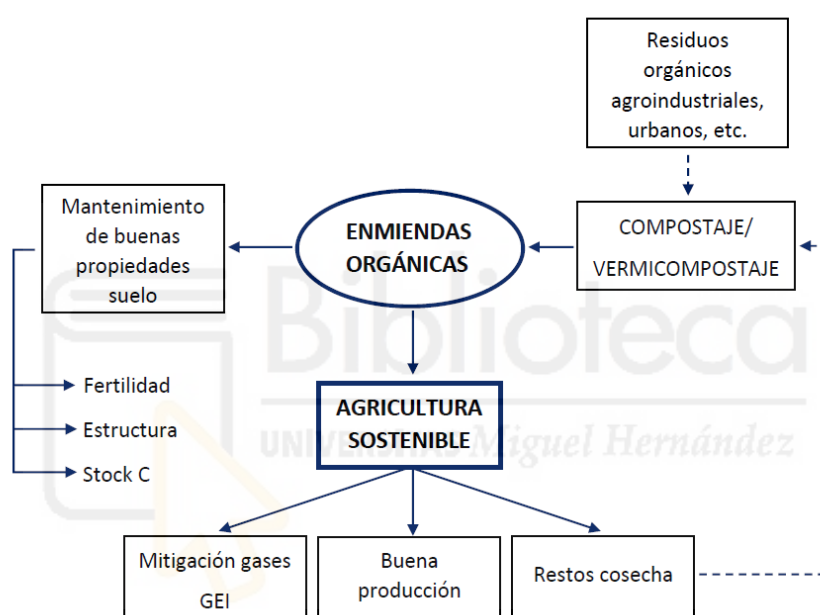


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la importancia de las enmiendas orgánicas en la agricultura.

El objetivo principal del presente trabajo ha sido evaluar de forma comparativa el efecto de distintos materiales fertilizantes, tanto inorgánicos como orgánicos, sobre el desarrollo de un cultivo de lechuga baby (*Lactuca sativa* var. baby celistra), así como sobre la fertilidad del suelo tras la cosecha. Para ello, se ha analizado el comportamiento del cultivo en términos de producción de biomasa, contenido de clorofila y cobertura vegetal, además de estudiar parámetros

fisicoquímicos del suelo, como pH, conductividad eléctrica, carbono oxidable y contenido de nutrientes (N, P, K), con el fin de determinar la eficiencia de uso de los fertilizantes aplicados.



3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un ensayo en maceta con lechuga (*Lactuca sativa* var. baby celistra) en el invernadero cerrado FertiLab-EPSO UMH (España) en condiciones controladas: temperatura 21-25 °C, humedad relativa 50-60%, y fotoperiodo 12 h/12 h (luz/oscuridad) con lámparas artificiales (RX600, Solray® 385, Helsinki, Finlandia). Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado con cinco tratamientos y tres réplicas por tratamiento, incluyendo un control sin fertilizar.

Los tratamientos fueron los siguientes: (a) fertilizante sintético ComplexIN (15-15-15) en 2 dosis: 100 (IN100) y 200 (IN200) kg NPK ha⁻¹; (b) estiércol vacuno (CM); (c) compost de estiércol vacuno (CIG 72); (d) compost de estiércol vacuno + paja (90% estiércol + 10% paja) (CIG 73) y (e) compost de estiércol vacuno + poda de almendro (90% estiércol + 10% poda de almendro) (CIG 74).

Los tratamientos tuvieron una equivalencia a 200 kg N/ha, ajustados a las dimensiones y peso de las macetas. Las macetas de plástico (Ø 11 cm, 1200 cm³) se llenaron con 1500 g de suelo, se colocaron al azar en la mesa de crecimiento y se movieron periódicamente. El experimento se realizó durante 45 días y se planificaron 2 riegos por semana para mantener el suelo al 60% de su CRH.

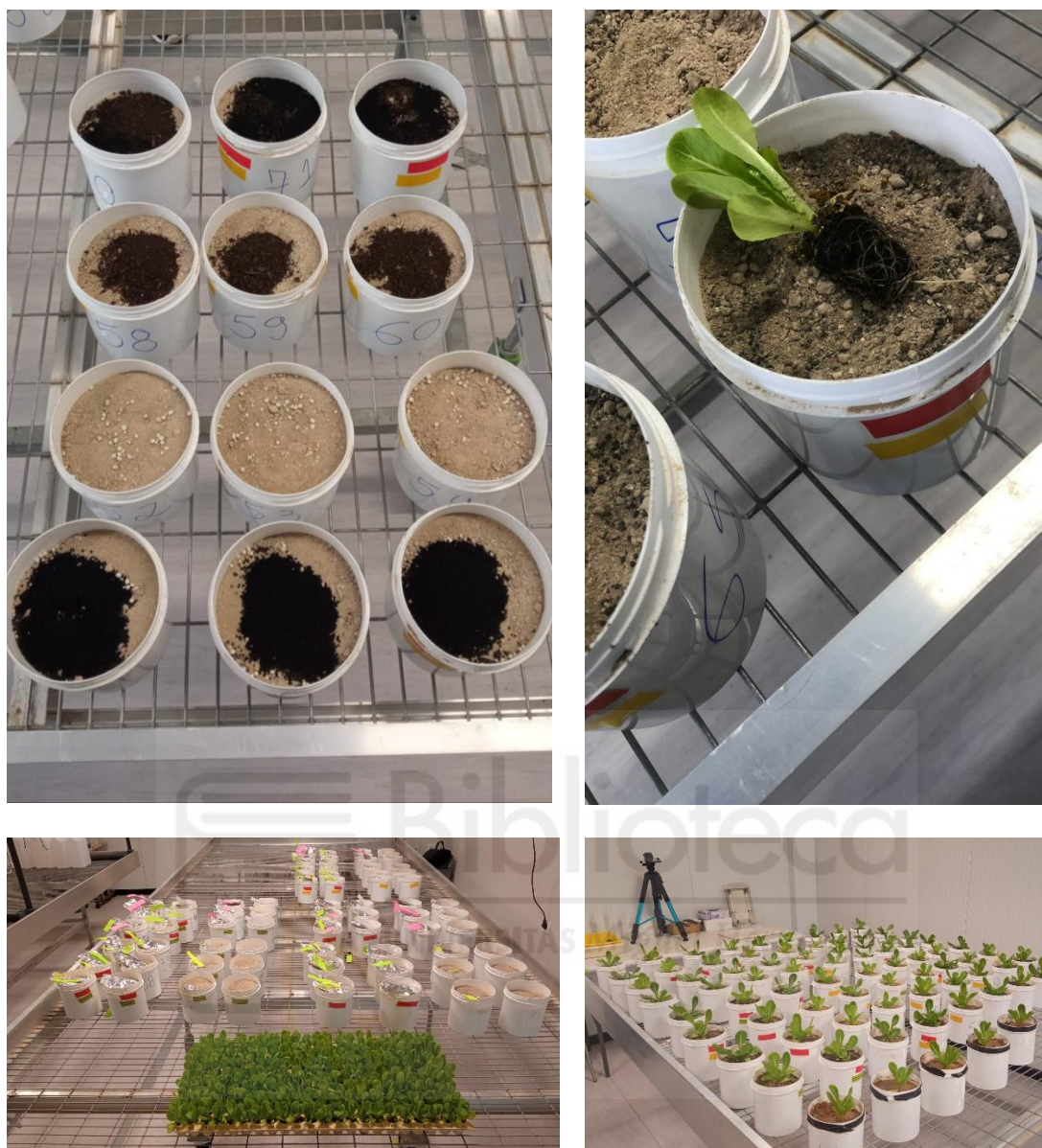


Figura 3.1. Detalle del montaje de Ensayo de Lechuga (var. *Baby*) en cámara de cultivo

3.2 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Previo al inicio del ensayo, se prepararon los diferentes tratamientos aplicándolos en los primeros centímetros de suelo ajustando la dosis de nitrógeno aportada por cada uno a una equivalencia de 200 kg N/ha (excepto el tratamiento IN100). A continuación, se realizó el trasplante directo de plántulas de lechuga baby (*Lactuca sativa* var. baby celistra) previamente germinadas.

Durante los 45 días de duración del experimento, las macetas se mantuvieron bajo condiciones ambientales controladas en el invernadero cerrado FertiLab-EPSo (UMH), asegurando un fotoperiodo constante, temperatura y humedad relativa estables, y riegos periódicos (2 veces por semana) adaptados a las necesidades del cultivo. Las macetas se colocaron de forma aleatoria y fueron rotadas regularmente para minimizar el efecto de posibles variaciones en el microclima del invernadero

Se realizaron muestreos no destructivos en los días 15, 25 y 45 para evaluar el estado del cultivo mediante la cobertura foliar (fCOVER) y el contenido de clorofila (SPAD). A los 45 días se llevó a cabo la cosecha final, extrayendo las plantas para la determinación de biomasa (peso fresco y seco), y procediendo al análisis de los suelos tras retirar las raíces y acondicionar las muestras para su caracterización físico-química.

3.3 PARÁMETROS ANALIZADOS Y MÉTODOS UTILIZADOS

Material vegetal:

En los días 15, 25 y 45 se midió la cobertura foliar (fCOVER) utilizando la aplicación Canopeo desarrollada para Matlab por Patrignani y Ochsner (Patrignani & Ochsner, 2015) y se determinó el contenido de clorofila de las plantas utilizando un clorofilómetro manual (SPAD Minolta 502) (Casella et al., 2022). Las plantas de lechuga se cosecharon a los 45 días para medir masa fresca y masa seca.



Figura 3.2. Detalle del muestreo periódico (no destructivo) de Canopy (Cobertura Vegetal) y SPAD (clorofila en hoja).

Suelo:

Tras la cosecha, el suelo de las macetas se procesó para eliminar las raíces y se extendió para que se secase. Una vez seca, se tamizó a través de una malla de 2 mm. Se caracterizaron fisicoquímicamente los suelos. La medida del pH se realizó en la suspensión suelo-agua desionizada con una relación de 1:2,5 (p/v). La medida de la conductividad eléctrica (CE) se realizó en el extracto acuoso, obtenido por filtración de la suspensión suelo-agua desionizada con una relación 1:5 (p/v), previa agitación de la muestra durante 30 minutos (M.A.P.A., 1994).

El carbono oxidable del suelo se determinó mediante el método Walkley-Black, (1934) modificado por Yeomans y Bremner (1989). Este método consiste en la oxidación parcial del carbono con dicromato potásico en medio ácido sulfúrico. El exceso de dicromato que no ha reaccionado se determina por valoración con

sulfato de amonio y hierro (II) hexahidratado (sal de Mohr), utilizando ferroína como indicador.

Para determinar el fósforo disponible aplicamos el método Olsen-Watanabe (Olsen et al., 1954) mediante extracción con bicarbonato de sodio y posterior determinación mediante espectrofotometría V-UV a 882 nm.

Para medir el nitrógeno en suelo se utiliza método Kjeldahl para la determinar el nitrógeno orgánico y el que se presenta en forma mineral como amonio conjuntamente. Este método se basa en una digestión, por vía húmeda en medio sulfúrico de la muestra, para mineralizar el nitrógeno orgánico a forma amónica. Posteriormente se realiza la destilación del amoniaco en medio alcalino, recogiendo el destilado en una mezcla de ácido bórico indicador, valorándose a continuación con ácido clorhídrico de normalidad conocida (Bremner y Britenbeck, 1983).

El contenido en potasio asimilable se determinó mediante extracción del suelo con una disolución de acetato de amonio 1 N a pH 7 (Knudsen y col., 1982) y posteriormente, se determinó en el extracto obtenido, mediante fotometría de llama.

3.4 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos en los diferentes ensayos, se aplicaron Modelos Lineales Generales (GLM) y análisis de varianza (ANOVA) univariante. Las comparaciones múltiples entre tratamientos se realizaron mediante la prueba Post-hoc LSD de Fisher con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. En los casos en los que se observaron diferencias significativas, se utilizaron letras distintas para indicar diferencias estadísticas entre medias.

Los análisis incluyeron variables biofísicas del cultivo de lechuga como clorofila (SPAD), cobertura vegetal (%), biomasa (peso fresco y seco), así como parámetros de absorción de nutrientes (N, P, K). También se evaluaron las propiedades físico-

químicas del suelo, incluyendo pH, conductividad eléctrica (CE), contenido de carbono oxidable, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo y potasio extraíbles.

Los tratamientos evaluados comprendieron tanto fertilizantes inorgánicos (IN100, IN200), como estiércol vacuno y diferentes compost como: compost de estiércol vacuno (CIG 72); (d) compost de estiércol vacuno + paja (90% estiércol + 10% paja) (CIG 73) y (d) compost de estiércol vacuno + poda de almendro (90% estiércol + 10% poda de almendro) (CIG 74).

Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software IBM SPSS Statistics v24.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DE LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA

4.1.1 RENDIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA

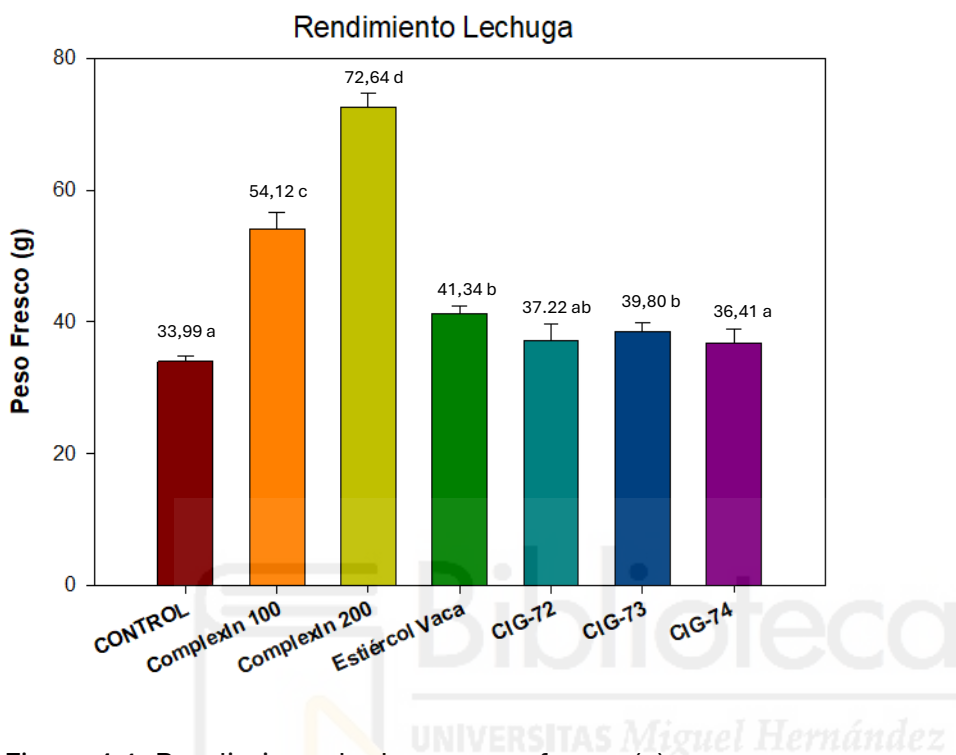


Figura 4.1. Rendimiento lechuga, peso fresco (g)

Como podemos observar en la figura 4.1 el fertilizante ComplexIn 200 fue el tratamiento más destacado en cuanto al rendimiento de la lechuga, con un peso fresco significativamente superior al de todos los demás tratamientos. También ComplexIn 100 mostró un efecto positivo importante, con una producción claramente mayor que la de varios tratamientos orgánicos y el control.

El estiércol vacuno y el tratamiento CIG-73 lograron incrementos de peso que fueron estadísticamente mayores al control, aunque no alcanzaron los niveles observados con los fertilizantes inorgánicos. El tratamiento CIG-72 tuvo un resultado intermedio, sin diferencias significativas respecto al control ni a los tratamientos con rendimientos medios. En cambio, CIG-74 y el control obtuvieron los valores más bajos, sin diferencias estadísticas entre ellos. Un estudio en Chile (Osorio et al., 2013) encontró que el uso de estiércol vacuno estabilizado en

lechuga aumentó significativamente el peso fresco del cultivo, confirmando su efecto positivo aunque menor que los fertilizantes inorgánicos.

En este punto podemos observar que los fertilizantes inorgánicos han producido una mejora muy significativa en comparación con los estiércoles, incluso a la mitad de la dosis. Por otra parte, los tratamientos orgánicos que mejor se han comportado han sido el estiércol vacuno y el CIG-73 ya que son los únicos que difieren estadísticamente del control, estando un poco por encima el estiércol de vacuno.

4.1.2 ESTADO NUTRICIONAL DEL TEJIDO DE LECHUGA

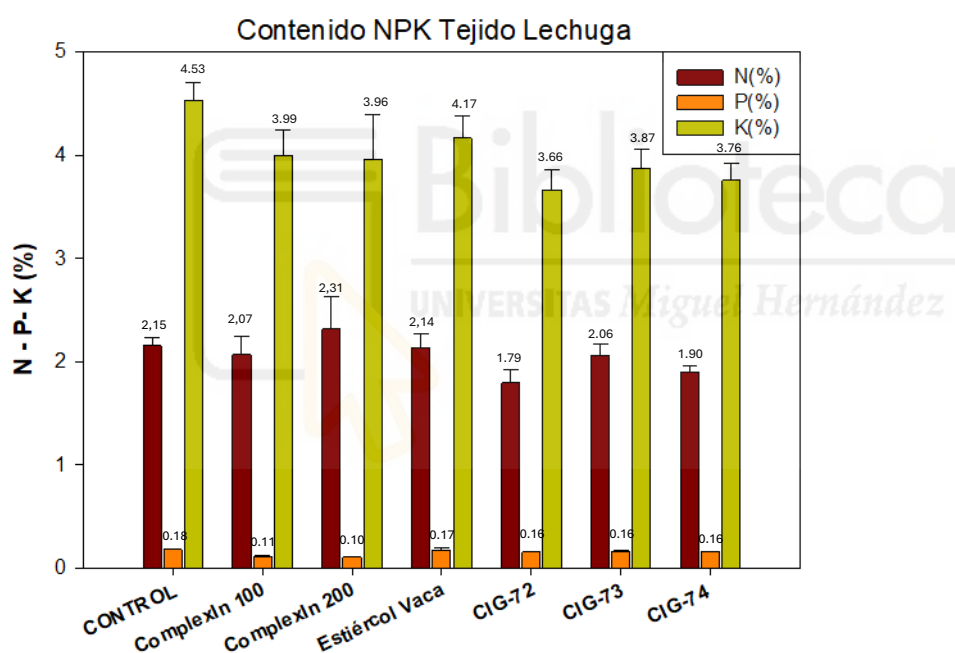


Figura 4.2. Contenido NPK tejido lechuga (%)

Como podemos observar en la figura 4.2 los resultados muestran que los niveles de nitrógeno (N) en los tejidos de lechuga fueron relativamente similares entre la mayoría de los tratamientos, aunque se observó un valor más alto en el tratamiento con ComplexIn 200 (2,31%), seguido del tratamiento con estiércol MP 890 (2,14%)

y el testigo, CONTROL (2,15%). Por el contrario, el tratamiento CIG-72 presentó el valor más bajo de nitrógeno (1,79%), lo que podría indicar una menor disponibilidad o absorción de este nutriente.

En cuanto al fósforo (P), el valor más alto se encontró en el tratamiento Control (0,18%), mientras que los tratamientos con ComplexIn 100 y 200 mostraron los niveles más bajos (0,11% y 0,10%, respectivamente). Los demás tratamientos, incluidos los CIG y el estiércol, presentaron valores intermedios (entre 0,16% y 0,17%), bastante parecidos entre ellos.

Respecto al potasio (K), el tratamiento Control también destacó por presentar el contenido más elevado (4,53%), mientras que CIG-72 registró el valor más bajo (3,66%). Los demás tratamientos mostraron niveles de potasio relativamente similares entre sí (entre 3,76% y 4,17%).

Sabiendo los porcentajes de cada uno de los elementos (N, P, K) en los diferentes tratamientos y la cantidad de materia seca de las plantas, podemos saber la cantidad de N, P, K absorbida por las plantas de cada uno de los tratamientos

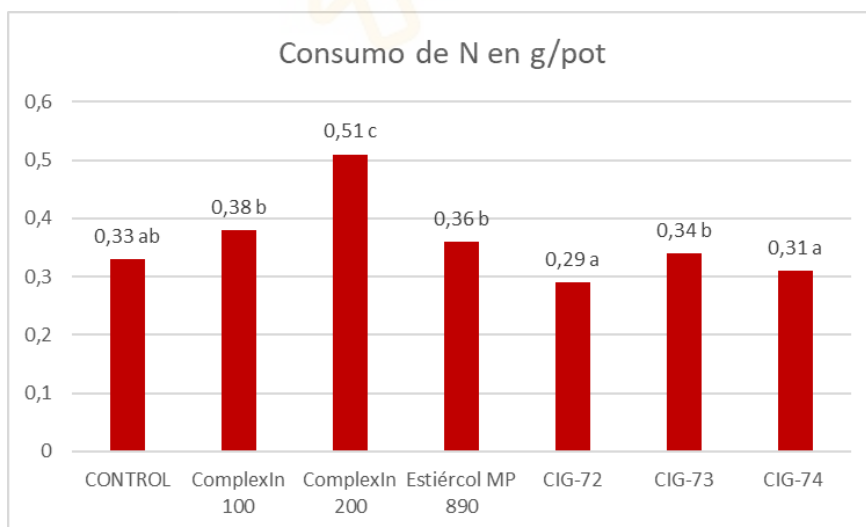


Figura 4.3. Consumo de N en g/pot

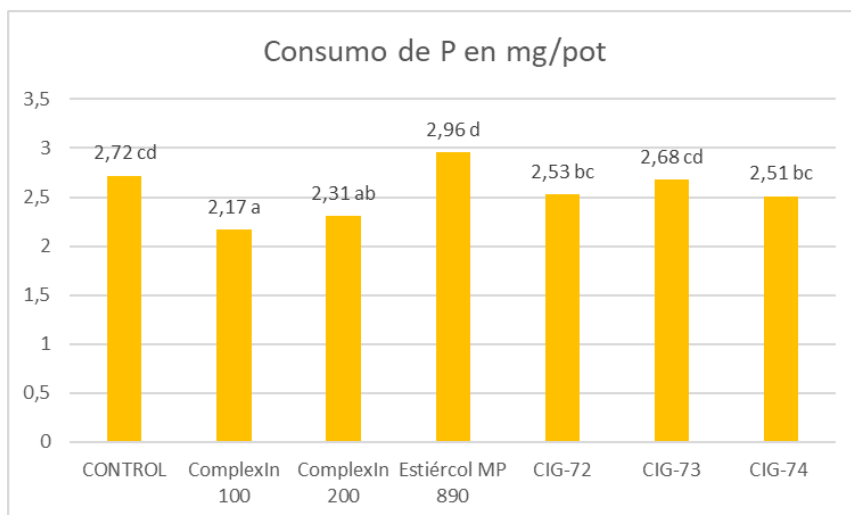


Figura 4.4. Consumo de P en mg/pot

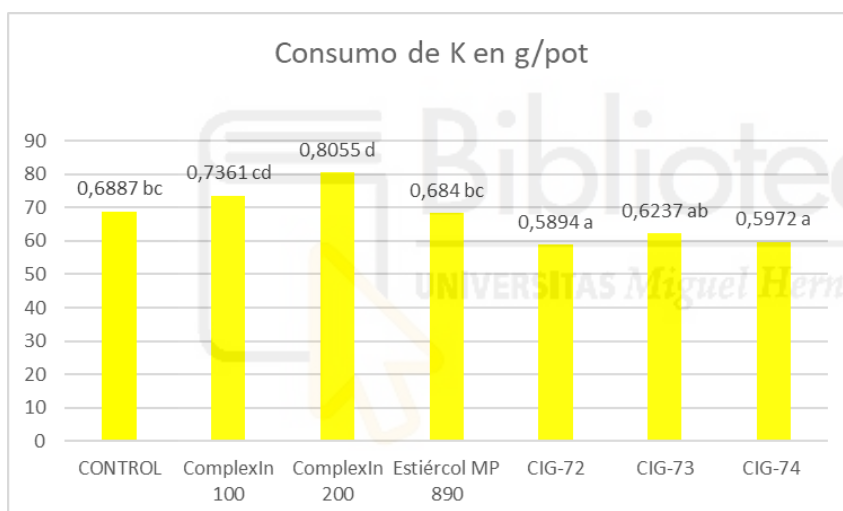


Figura 4.5. Consumo de K en g/pot

Se evaluó la acumulación total de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) por maceta, encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

En el caso del nitrógeno, como podemos ver en la figura 4.3, el tratamiento ComplexIn 200 (0,51 g/pot) presentó la mayor acumulación, siendo significativamente superior al resto de tratamientos. ComplexIn 100, estiércol y CIG-73 también mostraron acumulaciones elevadas de N, aunque

estadísticamente similares entre sí. Por el contrario, los tratamientos CIG-72 y CIG-74 presentaron las menores acumulaciones de nitrógeno.

En cuanto al fósforo, observando la figura 4.4, el tratamiento con estiércol (2,96 mg/pot) fue el que mostró la acumulación más alta, estadísticamente superior a la mayoría de los demás tratamientos. ComplexIn 200 y CIG-72 se ubicaron en un grupo intermedio, mientras que ComplexIn 100 (2,17 mg/pot) tuvo la menor acumulación de P, siendo significativamente diferente al resto. Estudios en lechuga y repollo en Popayán, Colombia (Muñoz et al., 2015), muestran que composts derivados de residuos orgánicos incrementan significativamente la acumulación de P en tejido vegetal

Respecto al potasio, podemos ver en la figura 4.5 que el ComplexIn 200 (80,55 mg/pot) destacó con la mayor acumulación, siendo significativamente superior a todos los demás tratamientos. Le siguió ComplexIn 100 (73,61 mg/pot), mientras que CIG-72 y CIG-74 mostraron los valores más bajos de K, agrupándose ambos en el rango estadísticamente inferior.

Los fertilizantes inorgánicos fueron los que mejor funcionaron en cuanto a la absorción de nutrientes. El ComplexIn 200 destacó con las mayores acumulaciones de nitrógeno y potasio, y una buena absorción de fósforo.

Entre los fertilizantes orgánicos, el estiércol MP 890 sobresalió en la absorción de fósforo, pero su efecto fue más moderado en nitrógeno y potasio. Los tratamientos con fertilizantes CIG (CIG-72, 73 y 74) mostraron los valores más bajos, especialmente en nitrógeno y potasio.

El control quedó en un punto intermedio, con valores similares a algunos tratamientos orgánicos.

4.1.3 CONTENIDO EN CLOROFILA (SPAD) Y DESARROLLO DE LA COBERTURA VEGETAL

Tabla 4.1. Contenido en clorofila SPAD en hoja.

Tratamiento	Clorofila (SPAD)		
	10 días	25 días	45 días
Control	37.49 abc	32.58 a	43.27 ab
IN100	43.48 cd	65.51 c	45.90 b
IN200	47.94 d	74.23 c	55.09 c
Manure	33.12 ab	52.02 b	45.64 b
CIG-72	37.77 bc	48.46 b	41.42 a
CIG-73	43.09 cd	50.09 b	45.61 b
CIG-74	39.64 c	50.02 b	42.74 ab

El tratamiento IN200 presentó los valores más altos en todas las fechas, lo que indica que las plantas tenían más clorofila y probablemente un mejor estado nutricional. Por otro lado, los tratamientos control (sin fertilizante) y con estiércol tuvieron los valores más bajos, sobre todo a los 25 días, lo que puede deberse a una menor disponibilidad de nutrientes en las primeras etapas.

Los tratamientos con compost (CIG-72, CIG-73 y CIG-74) mostraron valores intermedios. Aunque no alcanzaron los niveles del fertilizante químico, tuvieron resultados similares al estiércol, especialmente a los 25 y 45 días. Esto sugiere que los compost liberan los nutrientes de forma más lenta y sostenida en el tiempo. Este patrón es similar al observado por Muñoz et al. (2015) en Popayán, donde los tratamientos con compost alcanzaron valores SPAD inferiores al tratamiento inorgánico, pero mantenidos en fases posteriores.

Tabla 4.2. Cobertura vegetal (%)

Tratamiento	Cobertura Vegetal (%)		
	10 días	25 días	45 días
Control	3.04 a	5.43 a	6.06 a
IN100	4.26 c	12.20 e	8.75 d
IN200	4.71 d	15.55 f	11.91 e
Manure	4.22 c	7.75 cd	6.60 ab
CIG-72	3.33 ab	7.16 bc	7.04 bc
CIG-73	3.50 b	6.93 b	7.54 c
CIG-74	3.35 b	7.17 bc	7.41 c

Se observa en la tabla 4.2 que el tratamiento IN200 nuevamente destaca con los valores más altos en todas las fechas, alcanzando hasta un 15,55 % a los 25 días y un 11,91 % a los 45 días. Esto indica un mayor desarrollo foliar en comparación con los otros de tratamientos.

Por otro lado, el tratamiento control mostró los valores más bajos en los tres momentos de evaluación, lo cual era esperable al no contar con ninguna fuente de fertilización. El estiércol y los composts (CIG-72, CIG-73 y CIG-74) presentaron resultados intermedios, aunque sin diferencias marcadas entre ellos.

En general, los resultados muestran que la cobertura vegetal aumenta con el uso de fertilización inorgánica, y que los composts permiten un desarrollo moderado del cultivo.

4.2 EFECTO DE LAS ENMIENDAS TESTADAS EN LOS PARÁMETROS DEL SUELO

4.2.1 EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DE PH Y CE

Tabla 4.3. CE y pH del suelo

Tratamiento	pH	CE (dS cm ⁻¹)
Control	7.96 d	2.70 bc
IN100	7.89 d	2.71 bc
IN200	7.86 d	2.70 bc
Manure	7.83 d	2.26 a
CIG-72	7.51 a	2.60 b
CIG-73	7.60 b	2.94 d
CIG-74	7.67 c	2.97 d

En la tabla 4.3 podemos ver que los tratamientos mostraron variaciones significativas en pH y conductividad eléctrica. Considerando que el pH óptimo para la mayoría de los cultivos se sitúa sobre 7.0, se observó que todos los tratamientos presentaron valores superiores, indicando suelos ligeramente a moderadamente alcalinos. Los tratamientos CIG-72 (pH 7.51) y CIG-73 (pH 7.60) fueron los que más se aproximaron al valor ideal, esto es coherente con los hallazgos de García Lobo (2011), quien señala que la incorporación de compost estabiliza el pH en suelos alcalinos. El tratamiento control (pH 7.96) resultó ser el más alejado, lo que podría afectar la disponibilidad de micronutrientes como hierro, zinc y manganeso.

En cuanto a la CE, cuyo valor en que se estima que ya empieza a no ser beneficioso es de 2.0 dS/m, todos los tratamientos superaron este valor, lo que sugiere una salinidad moderada del suelo. El tratamiento con estiércol presentó el valor más bajo (2.26 dS/m), siendo el más cercano al valor recomendado y, por tanto, el más adecuado para cultivos sensibles a la salinidad. En cambio, los tratamientos CIG-73 (2.94 dS/m) y CIG-74 (2.97 dS/m) mostraron los valores más elevados, representando un riesgo potencial de estrés salino.

En resumen, el tratamiento CIG-72 se posiciona como el más equilibrado al combinar un pH próximo al neutro con una CE relativamente moderada, mientras

que el tratamiento con estiércol destaca por su bajo nivel de salinidad, siendo recomendable en suelos donde la acumulación de sales sea una limitante para el cultivo.

4.2.2 EVALUACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL, FÓSFORO OLSEN Y POTASIO ASIMILABLE

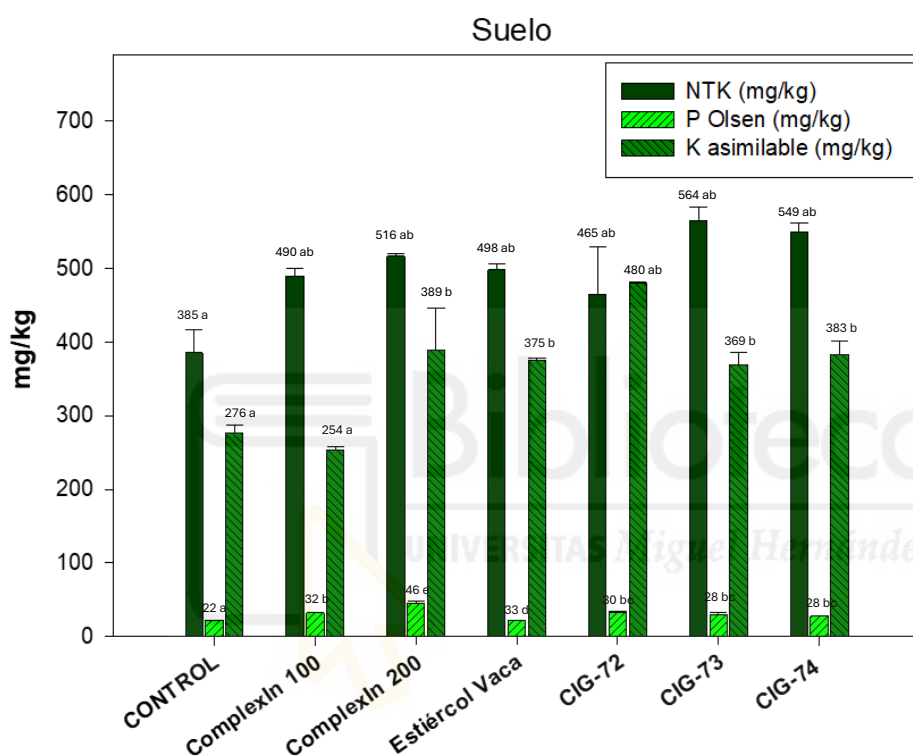


Figura 4.6. NPK del suelo

Los valores de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) fueron variables, el tratamiento Control presentó el valor más bajo (385 mg/kg), mientras que CIG-73 y CIG-74 registraron los valores más altos cerca de los 600 mg/kg, con diferencias significativas respecto al control ($p < 0.05$). El resto de tratamientos mostraron valores intermedios, entre 500 y 600 mg/kg.

En cuanto al fósforo extraíble (P Olsen), los valores estuvieron comprendidos entre 21.87 y 45.53 mg/kg. El valor mínimo correspondió al Control (21.87 mg/kg) y el máximo a IN200 (45.53 mg/kg). IN100, Estiércol y CIG-72 presentaron valores intermedios (entre 29.97 y 32.80 mg/kg), mientras que CIG-73 y CIG-74 se situaron

en torno a 27.87 mg/kg. Se observaron diferencias significativas entre varios tratamientos. Esto está respaldado por García Lobo (2011), que encontró aumentos significativos en P disponible tras aplicar compost, aunque menores que con fertilizantes inorgánicos.

En el caso del potasio asimilable (K), los valores variaron entre 254 y 480 mg/kg. El valor más bajo se registró en IN100 (254 mg/kg), seguido del Control (276 mg/kg). El tratamiento CIG-72 mostró el valor más elevado (480 mg/kg), no es extraño ya que estudios en monocultivo de lechuga López, V., López, M., & Salas, M. (2022) también mostraron que el estiércol y compost pueden aportar mayor potasio asimilable que algunos fertilizantes minerales. IN200, Estiércol, CIG-73 y CIG-74 presentaron valores entre 369 y 389 mg/kg. También en este parámetro se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

4.2.3 EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL C ORGÁNICO EN EL SUELO

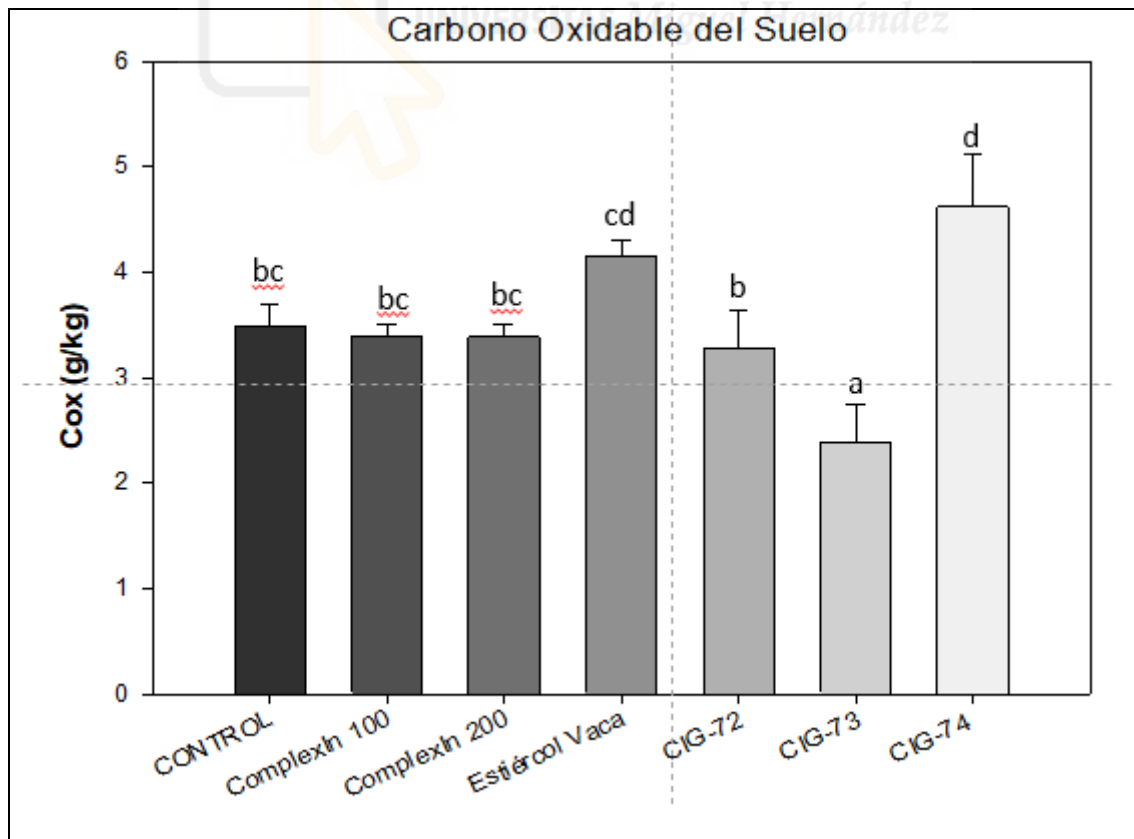


Figura 4.7. Carbono Oxidable (%)

En la figura 4.7 podemos ver que el tratamiento CIG-74 fue el que presentó el valor más elevado de carbono oxidable (4.6 g/kg), seguido por estiércol (4.2 g/kg), ambos con diferencias significativas frente a varios de los demás tratamientos, García Lobo (2011) halló que las enmiendas orgánicas incrementan el carbono orgánico soluble y la capacidad de intercambio catiónico, contribuyendo así a mejorar la estructura del suelo. Por otro lado, el valor más bajo se observó en el tratamiento CIG-73 (2.4 g/kg), significativamente inferior al resto.

Los tratamientos Control, IN100 e IN200 mostraron valores intermedios, con 3.4 y 3.5 g/kg, respectivamente y sin diferencias significativas entre ellos. El tratamiento CIG-72 presentó un valor ligeramente inferior (3.3 g/kg), aunque aún dentro de un rango cercano al de los tratamientos inorgánicos y al control.

5. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA

A lo largo del ensayo, los fertilizantes inorgánicos demostraron ser los más eficaces para el cultivo de lechuga, destacando especialmente el tratamiento con ComplexIn 200, que logró los mejores resultados en términos de biomasa, niveles de clorofila y acumulación de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Esta eficacia se atribuye a la rápida disponibilidad de nutrientes que ofrecen estos productos, lo que permite una respuesta inmediata por parte de la planta.

En contraste, entre los fertilizantes orgánicos, el estiércol vacuno superó a los composts CIG-72, 73 y 74, probablemente por su mayor contenido de nutrientes disponibles a corto plazo y por estimular la actividad microbiana en el suelo. No obstante, su uso conlleva ciertos riesgos si no se gestiona adecuadamente, como la presencia de patógenos o desequilibrios nutricionales. Por su parte, los composts CIG mostraron un efecto más limitado en este ciclo, pero presentan beneficios importantes a largo plazo, como la mejora de la estructura del suelo, el

aumento de la materia orgánica y la estabilización de nutrientes, lo que puede favorecer la sostenibilidad en cultivos futuros.

5.2 CONCLUSIÓN SOBRE EL EFECTO DE LAS ENMIENDAS TESTADAS EN LOS PARÁMETROS DEL SUELO

Las enmiendas aplicadas generaron efectos diferenciados en las propiedades químicas del suelo. En cuanto al pH, todos los tratamientos mostraron valores alcalinos, aunque los composts CIG-72 y CIG-73 se aproximaron más al rango neutro, a diferencia del control y los tratamientos inorgánicos que presentaron los valores más altos. En conductividad eléctrica, todos superaron el umbral de 2.0 dS/m, pero el estiércol aumentó menos la salinidad, mientras que CIG-73 y CIG-74 alcanzaron los niveles más altos, lo cual podría ser perjudicial en suelos sensibles. En términos de nutrientes, los biofertilizantes CIG-73 y CIG-74 sobresalieron por su contenido en nitrógeno total, el tratamiento IN200 destacó por su alto nivel de fósforo disponible y CIG-72 por su elevada concentración de potasio asimilable. Además, el carbono oxidable fue mayor en CIG-74 y el estiércol, indicando una mejor incorporación de materia orgánica.

En resumen, aunque los fertilizantes inorgánicos ofrecieron una respuesta más rápida en disponibilidad de nutrientes como el fósforo, las enmiendas orgánicas y biofertilizantes mostraron un impacto más positivo en la mejora de la calidad del suelo, particularmente en el contenido de carbono y potasio. El estiércol demostró ser una opción equilibrada, con buen aporte de materia orgánica, bajo impacto en la salinidad y niveles adecuados de nutrientes, aunque su uso sin compostar debe manejarse con precaución por posibles riesgos sanitarios. Estos resultados sugieren que una estrategia combinada de fertilización orgánica e inorgánica podría optimizar la productividad agrícola y la sostenibilidad del suelo a corto y largo plazo.



6. BIBLIOGRAFÍA

Aggelides, S. M., & Londra, P. A. (2000). Effects of compost produced from town wastes on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology*, 71(3), 253–259.

Arthur, E., Cornelis, W. M., Vermang, J., & De Rocker, E. (2014). Effects of organic soil amendments on soil physical properties: A review. *Soil Use and Management*, 30(1), 1–15.

Ashagrie, Y., Zech, W., & Guggenberger, G. (2007). Transformation of a tropical cropland soil to pasture: Organic carbon and nitrogen content, microbial biomass and structural stability. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 391–403.

Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453.

BOE. (2020). Real Decreto 506/2013, sobre productos fertilizantes, actualizado con las modificaciones del Real Decreto 999/2017. *Boletín Oficial del Estado*.

Casella, A., Orden, L., Pezzola, N. A., Bellacomo, C., Winschel, C. I., Caballero, G. R., Delegido, J., Gracia, L. M. N., & Verrelst, J. (2022). Analysis of Biophysical Variables in an Onion Crop (*Allium cepa* L.) with Nitrogen Fertilization by Sentinel-2 Observations. *Agronomy*, 12(8).

Comisión Europea. (1991). Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.

Comisión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

Comisión Europea. (2019). El Pacto Verde Europeo.

Comisión Europea. (2020). Estrategia “De la Granja a la Mesa” para un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medio ambiente (COM(2020) 381 final).

Comisión Europea. (2020). Un nuevo plan de acción para la economía circular. Por una Europa más limpia y más competitiva.

Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422.

FAO. (2018). Ganadería mundial en transformación: Un mapa mundial de los principales problemas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2021). Manual práctico de compostaje. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Fernández, J. A., & Ruiz, R. (1998). Estiércoles: producción, características y posibilidades de gestión. *Mundo Ganadero*, (104), 42–46. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

García, C., Hernández, T., & Costa, F. (1992). Biochemical parameters in compost of urban wastes. *Bioresource Technology*, 42(1), 89–95.

García Lobo, M. V. (2011). Efecto del uso de enmiendas orgánicas sobre la calidad del suelo en sistemas hortícolas del valle medio del río Negro. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Harada, Y., & Inoko, A. (1980). Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts. *Soil Science and Plant Nutrition*, 26(1), 127–134.

López, V., López, M., & Salas, M. (2022). Evaluación de la calidad del suelo en monocultivo de lechuga bajo diferentes tipos de fertilización en Córdoba, Argentina. Servicio Nacional de Conservación de Recursos Naturales (NRCS).

MAPA. (2013). Guía de buenas prácticas para la gestión de los estiércoles en las explotaciones ganaderas. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2022). Caracterización ambiental del sector vacuno en España.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2023). Indicadores anuales de vacuno de carne. Datos anuales 2023. Gobierno de España.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). Diagnóstico de la contaminación difusa por nitratos de origen agrario en España.

Moreno, J. 2008. Fundamentos de compostaje desde el punto de vista microbiológico. 2a Reunión Red Española Compostaje, Barcelona.

Muñoz, J., Bravo, J., & Díaz, C. (2015). Uso de compost en el desarrollo de lechuga y repollo en condiciones de agricultura urbana en Popayán. *Revista Agroecología y Desarrollo*, 9(1), 45–52.

Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Osorio, J., Alvear, M., & Córdova, J. (2013). *Efecto de la aplicación de estiércol vacuno compostado sobre el crecimiento y rendimiento de lechuga (Lactuca sativa L.)*. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(1), 54–59.

Patrignani, A., & Ochsner, T. E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312–2320.

