

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y AGROAMBIENTAL



ANÁLISIS DEL CONTENIDO Y VALOR EQUIVALENTE DE PRODUCTOS ORGÁNICOS DE APLICACIÓN EN AGRICULTURA A NIVEL DE SUSTANCIAS HÚMICAS

TRABAJO FIN DE GRADO

JULIO-2017

Autor: Raquel González Perales

Tutor/es: Raúl Moral Herrero

Aurelia Pérez Espinosa



AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado bajo la supervisión de los profesores Raúl Moral Herrero y Aurelia Pérez Espinosa, a quienes me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento, por haber hecho posible la realización de este trabajo fin de grado. Además de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que saliera de manera exitosa.

También agradecerles a las profesoras Margarita Brugarolas Molla-Bauza y a María de los Ángeles Bustamante Muñoz, por su colaboración para realizar este trabajo.

Y por último a los técnicos de laboratorio de la universidad, en especial a Mari Sol, por enseñarme a desenvolverme en el laboratorio y a realizar los experimentos pertinentes, de forma paciente y clara.



Título: ANÁLISIS DEL CONTENIDO Y VALOR EQUIVALENTE DE PRODUCTOS ORGÁNICOS DE APLICACIÓN EN AGRICULTURA A NIVEL DE SUSTANCIAS HÚMICAS.

RESUMEN:

En este trabajo, se desarrolla un procedimiento experimental con el objetivo de analizar los contenidos de ácidos húmicos y fúlvicos de múltiples recursos orgánicos de aplicación en agricultura, entre los que destacar compost, vermicompost, enmiendas orgánicas frescas (estiércoles, lodos de depuradora) y estabilizados. Así mismo, se estudiará como el proceso de compostaje influye en dichos contenidos. Finalmente se establecerá una aproximación al valor económico equivalente del contenido de estas sustancias húmicas según el precio de mercado y normalizándolo a un contenido unitario de C húmico.

Palabras claves: Materia orgánica, compost, sustancias húmicas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos.

Title: ANALYSIS OF THE CONTENT AND EQUIVALENT VALUE OF ORGANIC PRODUCTS OF APPLICATION IN AGRICULTURE AT LEVEL OF HUMAN SUBSTANCES.

ABSTRACT:

In this investigation, it is developed an experimental procedure with the objective of analyzing the contents of humic and fulvic acids of multiple organic resources applied in agriculture (solids), among which are compost, vermicompost, fresh organic amendments (manure, sewage sludge) and stabilized. Likewise, we will study how the composting process influences this content. Finally, the equivalent value of the content of these humic substances will be established according to the market price and normalized to a unitary content of humic C.

Key words: Organic material, composting, humic substances, humic acids, fulvic acids.

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Concepto de suelo	10
1.2. La materia orgánica del suelo	12
1.3. Importancia de la materia orgánica del suelo.....	12
1.4. Composición de la materia orgánica en el suelo.....	18
1.4.1. Fracción orgánica biodegradable	19
1.4.2. Sustancias húmicas.....	24
1.4.3. Biomasa microbiana.....	26
1.5. Sustancias húmicas.....	28
1.5.1. Definición.....	28
1.5.2. Características y funcionalidad	30
1.5.3. Proceso de estabilización mediante la humificación. Origen y formación de las sustancias húmicas	33
1.6. Fundamentos del compostaje	34
1.6.1. Definición y fases del proceso de compostaje	34
1.6.2. Condiciones para el proceso de compostaje.....	38
1.6.3. Sistemas de compostaje.....	40
1.6.4. Evaluación del grado de madurez de un compost	40
1.7. Productos comerciales de naturaleza orgánica.....	44
1.8. Residuos orgánicos como fuente de sustancias húmicas	46
1.8.1. Concepto y problemática de los residuos	47
1.8.2. Fuentes de materia orgánica de aplicación agrícola.....	50
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	54
2.1. Antecedentes.....	54
2.2. Objetivos.....	56

3. MATERIALES Y MÉTODOS	58
3.1. Diseño experimental	58
3.2. Desarrollo experimental	60
3.3. Métodos analíticos	71
3.4. Métodos estadísticos	74
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4.1.1. Efecto del compostaje en la evolución de la fracción orgánica	78
4.1.2. Contenido en parámetros relacionados con la materia orgánica y las sustancias húmicas en recursos orgánicos para los compost maduros en el grupo de materiales A (compost de distinta naturaleza)	89
4.1.2.1. Humedad (%)	90
4.1.2.2. Materia orgánica total (%)	92
4.1.2.3. Cenizas (%)	94
4.1.2.4. Pérdida de materia orgánica	95
4.1.2.5. Carbono orgánico total (%)	97
4.1.2.6. Nitrógeno total (%)	99
4.1.2.7. Relación carbono/nitrógeno	101
4.1.2.8. Carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (%)	104
4.1.2.9. Carbono de los ácidos fúlvicos (%)	106
4.1.2.10. Carbono de los ácidos húmicos (%)	108
4.1.3. Índices de evolución de la materia orgánica en el grupo de materiales A (compost de distinta naturaleza)	110
4.1.3.1. Relación de humificación	111
4.1.3.2. Índice de humificación	113
4.1.3.3. Porcentaje de ácidos húmicos	114
4.1.3.4. Relación de polimerización	116
4.1.4 Valor económico equivalente de sustancias húmicas en el grupo de materiales A (compost de distinta naturaleza)	118

4.2.1. Contenido en parámetros relacionados con la materia orgánica y las sustancias húmicas en recursos orgánicos en el grupo de materiales B (recursos orgánicos comerciales de distinta naturaleza)	126
4.2.1.1. Materia orgánica total (%) y Cenizas (%)	126
4.2.1.2. Carbono orgánico total (%)	129
4.2.1.3. Nitrógeno total (%)	130
4.2.1.4. Relación carbono/nitrógeno	131
4.2.1.5. Carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (%)	132
4.2.1.6. Carbono de los ácidos fúlvicos (%)	134
4.2.1.7. Carbono de los ácidos húmicos (%)	135
4.2.2. Índices de evolución de la materia orgánica en el grupo de materiales B (recursos orgánicos comerciales de distinta naturaleza)	136
4.2.2.1. Relación de humificación	137
4.2.2.2. Índice de humificación	138
4.2.2.3. Porcentaje de ácidos húmicos	139
4.2.2.4. Relación de polimerización	139
4.2.3. Valor económico equivalente de sustancias húmicas en el grupo de materiales B (recursos orgánicos comerciales de distinta naturaleza)	141
5. CONCLUSIONES	147
6. BIBLIOGRAFÍA	152

UNIVERSITAT
Miguel Hernández

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la Agricultura, el hombre ha aplicado toda clase de materias orgánicas a los suelos cultivados. Durante 150 años los fisiólogos mantuvieron la teoría húmica que indicaba que las plantas se nutrían directamente del humus del suelo y la presencia de este material marcaba su fertilidad. Sin embargo, la revolución agrícola promovida en el siglo pasado, cuando Justus von Liebig (1843) demostró con claridad que las plantas precisan de agua y sustancias inorgánicas para su nutrición, comenzó a poner en duda que el humus fuera el principio nutritivo de las plantas a la vez que fomentó el desarrollo de fertilizantes inorgánicos. Éstos son de 20 a 100 veces más concentrados en elementos básicos como N, P y K que los abonos orgánicos (Arens, 1983), lo que supuso un indudable efecto positivo en la agricultura, aumentando los rendimientos y provocando el abandono de muchas técnicas antiguas de cultivo, una de las cuales fue el uso de residuos orgánicos como abono de los suelos.

Pero sin duda esta marginación y desplazamiento progresivo de los abonos orgánicos, motivada por la gran difusión de los fertilizantes químicos y las exigencias de los sistemas de cultivo modernos, ha provocado la aparición de otros problemas.

Según Mustin (1987), la materia orgánica representa del 95 al 99% del total del peso seco de los seres vivos, pero su presencia en los suelos suele ser escasa y son contadas las excepciones en las que supera el 2% (Navarro *et al.*, 1995). Para Gros y Domínguez (1992), el nivel deseable de materia orgánica en los suelos arcillosos medios es del 2%, pudiendo descender a 1,65% en suelos pesados y llegar a un 2,5% en los arenosos.

La materia orgánica del suelo contiene cerca del 5% de nitrógeno total, pero también contiene otros elementos esenciales para las plantas, tales como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes (Anónimo *et al.*, 1988). Durante la evolución de la materia orgánica en el suelo se distinguen dos fases: la humidificación y la mineralización (Gros y Domínguez, 1992). La humidificación es una fase bastante rápida, durante la cual los microorganismos del suelo actúan sobre la materia orgánica desde el momento en que se la entierra.

Los autores denominan indistintamente materia orgánica (Navarro *et al.*, 1995) o humus (Gros y Domínguez, 1992) a la parte orgánica que cumple un papel esencial en el suelo. No existe una definición de humus con la que todos los especialistas estén de acuerdo; pero, en general, el término humus designa a las “sustancias orgánicas variadas, de color pardo y negruzco, que resultan de la descomposición de materias orgánicas de origen exclusivamente vegetal”.

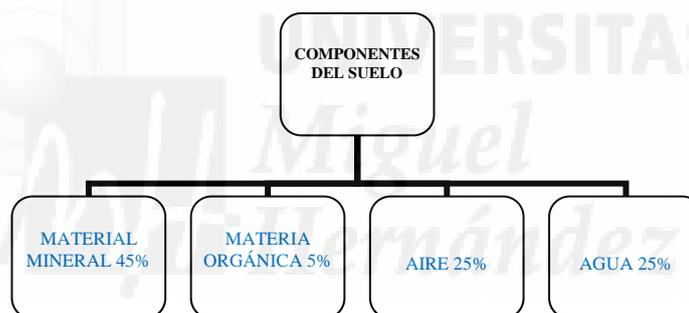
El humus tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, los autores mencionan que aumenta la capacidad de cambio del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad tampón del suelo favorece la acción de los abonos minerales y facilita su absorción a través de la membrana celular de las raicillas. Y en cuanto a su efecto sobre las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal sirve de alimento a una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado. Estos efectos de la materia orgánica también han sido sugeridos por otros autores (Anónimo, 1988).

1.1. Concepto de suelo

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre y que contiene materia orgánica. Es decir, suelo y roca se distinguen en que la roca no posee materia orgánica, mientras que el suelo mantiene vida porque contiene materia orgánica. Como la microbiología es difícil de visualizar a simple vista, así como también lo es la emisión de CO₂ de su respiración, la forma más fácil de saber si es suelo o roca es a través de la presencia de materia orgánica. Como ésta es de color oscuro no es difícil de entender que a medida que el suelo contiene más materia orgánica su color va tornándose más oscuro, llegándose a ser negro cuando el contenido es alto. Cuando el suelo es netamente negro se dice que el suelo es un “Mollisuelo” o un Mollisol, es decir, rico en sustancias húmicas (SSH).

Los suelos tienen diferentes capas denominadas horizontes. Si hacemos un corte vertical de un suelo mediante una calicata, se verán claramente las capas a las cuales se llaman horizontes. Por lo general, salvo en algunas regiones frías, la materia orgánica se concentra en el horizonte superior (llamado horizonte A o epipedón); luego se suceden otras capas de otros colores diversos, pero más claros. A esos otros horizontes se les denominan B y, ya en la transición con la roca, C. Hay otras letras para horizontes diferentes que ahora no vamos a explicar. Sólo interesa saber que un suelo está compuesto por diferentes horizontes y que usualmente el horizonte superior A suele ser más oscuro, esto es, el más rico en materia orgánica.

El suelo está integrado por cuatro grandes componentes (**Esquema 1**) todos ellos importantes para el crecimiento vegetal, los cuales de acuerdo con Buckman y Brady (1991) son: agua, aire, materia mineral y materia orgánica.



Esquema 1. Componentes de un suelo franco-arcilloso en volumen.

Fuente: Adaptado de Buckman y Brady (1991).

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como en sus funciones ambientales entre ellas captura de carbono y calidad del aire. La materia orgánica del suelo es el principal determinante de su actividad biológica. La cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con la materia orgánica. La materia orgánica y la actividad biológica que esta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos. La agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica. Estas a su vez, incrementan la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. La materia orgánica del suelo

también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas.

La materia orgánica influye a nivel biológico, químico y físico (Okalebo *et al.*, 2006), sobre el suelo. La materia orgánica es un componente de la fase sólida del suelo y a pesar de no ser un constituyente mayoritario del mismo, desempeña un papel muy importante en el funcionamiento de los ecosistemas. Interviene de forma activa en la formación del suelo, condiciona su comportamiento en relación al crecimiento de las plantas y microorganismos, al influir en el movimiento y almacenamiento del agua, intercambio catiónico y constituir una fuente de nutrientes, entre otros aspectos (Porta, 1994).

1.2. La materia orgánica del suelo

Se denomina materia orgánica del suelo a la sustancia de color oscuro que se encuentra en el seno del suelo y que no es separable de la materia inorgánica del suelo (matriz) ni reconocible su procedencia, sea vegetal o animal. Por tanto, quedan excluidos los residuos orgánicos que están sobre el suelo y que denominamos mantillo, hojarasca o, si procede de cosechas o rastrojo (en general se llaman residuos orgánicos).

Para que se considere materia orgánica del suelo los residuos orgánicos deben integrarse en el seno del suelo, usualmente mediante el arado, se transforman en materia orgánica del suelo en relativamente poco tiempo, dependiendo de la naturaleza de los residuos orgánicos, de las características del suelo y, fundamentalmente, de las condiciones climáticas; humedad y temperatura favorecen la integración de los residuos orgánicos en el suelo (matriz edáfica) y su transformación en materia orgánica del suelo.

1.3. Importancia de la materia orgánica del suelo

Históricamente se ha considerado a la materia orgánica del suelo como un factor importante en la agricultura porque se pensaba que ésta era la base nutricional de las plantas. A partir de los estudios de Liebig se demostró que los nutrientes inorgánicos se toman a través de la solución del suelo y, cuando son escasos en el suelo, sólo un

suplemento de nutrientes, a través de adición de fertilizantes, puede satisfacer las demandas nutricionales de las plantas.

Consecuentemente se reconsideró el concepto de materia orgánica del suelo ante la demostración de que no intervenía en la nutrición vegetal de manera directa; pero que sí cobra la materia orgánica del suelo importancia fundamental en la formación de los suelos (edafogénesis o pedogénesis), teniendo una fuerte influencia sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas y bioquímicas edáficas (del suelo) y, por ende, sobre su grado de fertilidad.

En consecuencia, la MOS es importante por las siguientes razones:

- a) Fuente de energía. La materia orgánica del suelo es, en efecto, energía potencial capturada temporalmente al Sol. La estabilidad biológica de la materia orgánica del suelo, a pesar de estar en un medio oxidante como lo es la atmósfera terrestre, permite que ella sea un almacén de energía potencial que se va liberando a medida que se descompone en un lento proceso que se denomina mineralización (esto es, proceso en el que se descompone la materia orgánica del suelo liberándose el C en forma de CO₂). Si bien es verdad que la materia orgánica del suelo es teóricamente inestable (por ser una sustancia reductora en un medio oxidante), su estructura permite una estabilidad temporal a escala geológica (muy superior a la humana) debido a que se mineraliza muy lentamente.
- b) Aumento de la absorción solar. La materia orgánica del suelo oscurece el suelo, lo que hace que se absorben los rayos del Sol con mayor intensidad y que exista una menor reflexión solar (albedo) y un mayor calentamiento edáfico. Esta condición disminuye el riesgo de heladas puntuales y favorece la actividad microbiana (fuertemente dependiente de la temperatura edáfica).
- c) Reserva de nutrientes. La materia orgánica del suelo es un almacén de bioelementos o nutrientes que mantiene englobados debido a su peculiar estructura. Desde este punto de vista la materia orgánica del suelo puede ser:

- Un almacén bruto de nutrientes que pueden liberar muy lentamente los bioelementos por mineralización, a la par que se libera energía y CO₂. Incluye procesos bioquímicos. En este caso la materia orgánica del suelo se comporta en la práctica como un comportamiento o reservorio de nutrientes.
 - Un retenedor temporal de nutrientes, que pueden liberarse de manera relativamente rápida. Incluye procesos fisicoquímicos. En este caso la materia orgánica del suelo se comporta en la práctica como fuente de flujos.
- d) Suministro de nutrientes. La materia orgánica del suelo no alimenta directamente a las plantas, pero al ser un almacén o fuente de flujos de bioelementos, la materia orgánica del suelo los va liberando bien rápidamente por cesión a través del intercambio iónico, bien lentamente al ritmo de su descomposición o mineralización. Por tanto, la liberación puede ser muy lenta como consecuencia de la propia mineralización, como es el caso del nitrógeno (N), fósforo (P) o azufre (S), así como también de manera relativamente rápida a través del fenómeno llamado de intercambio iónico, como es el caso de los elementos catiónicos calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), potasio (K⁺), sodio (Na⁺) o los llamados micronutrientes hierro (Fe²⁺), manganeso (Mn²⁺), cobre (Cu²⁺), cinc (Zn²⁺), etc.
- e) Actividad biológica. La energía y nutrientes generados por una abundante MOS favorece la actividad microbiana. Es decir, a mayor cantidad de materia orgánica del suelo es más alta la probabilidad de existan una mayor actividad microbiológica. A su vez, la presencia de microorganismos aumenta la competencia y la presencia de sus depredadores, con lo cual incrementa la biodiversidad.
- f) Cementación de partículas y mejoramiento de la estructura. Quizás el mayor efecto de la materia orgánica del suelo sobre las propiedades del suelo sea en la formación de su estructura. La materia orgánica del suelo actúa directa e indirectamente como cementante de las partículas inorgánicas, formando

- agregados. En consecuencia, los suelos con abundante contenido de MOS suelen tener buena estructura, estable, de alta permeabilidad y muy abundante porosidad. Estas condiciones afectan positivamente no sólo al rendimiento de los cultivos, sino que también reducen el potencial de erosión.
- g) Retención de humedad. En general la materia orgánica del suelo es hidrófila, es decir, tiene una alta capacidad de absorber y retener agua. Si bien algunas fracciones de la materia orgánica del suelo pueden ser hidrófobas, en todo caso promueve la retención de agua en los microporos. Los microporos retienen el agua por capilaridad, lo que facilita la difusión del agua en todos sentidos, incluso en forma ascendente.
- h) Alteración de las rocas. La materia orgánica del suelo tiene carácter ácido, por lo que libera cationes de hidrógeno (H^+) capaces de hidrolizar los minerales que constituyen las rocas existentes previas al suelo. En la descomposición o alteración de las rocas se liberan bioelementos que enriquecen el suelo, sobre todo si hay suficiente la materia orgánica del suelo para retenerlos.
- i) Aumento de la capacidad de intercambio catiónico. Las unidades estructurales que constituyen la materia orgánica del suelo poseen un muy pequeño tamaño. Las partículas de tamaño muy pequeño tienen una gran superficie específica, luego alta capacidad de retención, a la vez que carga positiva. La medida de esta capacidad de retención es de tipo reversible. Un alto contenido de materia orgánica del suelo genera altos valores de CIC.
- j) Disminución de la toxicidad. La materia orgánica del suelo tiene la capacidad de inactivar los principios tóxicos de moléculas orgánicas o las formas tóxicas de los metales pesados al interactuar con ellos.
- k) Aumento del poder amortiguador del suelo. La alta CIC y la mayor actividad biológica promovidas por la materia orgánica del suelo hacen que el suelo tienda a resistir los impactos que pretendan modificar o cambiar la estabilidad del sistema. Consecuentemente, el sistema resiste tales cambios o tiende a

restablecer el equilibrio inicial. Este poder de amortiguador se denomina resiliencia (concepto contrario a fragilidad). Cuando un suelo es frágil el poder de amortiguación es bajo, mientras que los suelos resilientes tienen un poder de amortiguación alto. Existen a la vez dos tipos de amortiguaciones; una físicoquímica que se deriva de la CIC y otra bioquímica que se deriva de la actividad microbiológica que mantiene; cada una actúa con procesos diferentes.

- l) Fijación de carbono en la biosfera. La preocupación ambiental, junto a un enfoque agronómico positivo, es la principal causa para que la materia orgánica del suelo haya recobrado su actual importancia. La materia orgánica del suelo tiene un elevado contenido de carbono (entre 45 y 55% de la materia orgánica del suelo es C) que resulta ser bioestable. Esta bioestabilidad puede mantener capturado el C en el suelo y de esa manera retirarlo de la atmósfera, que paulatinamente se está enriqueciendo con C por las actividades humanas. Se considera que un buen manejo de la MOS puede ser un paliativo al constante incremento de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera y que puede tener un impacto positivo en el cambio climático.
- m) Efectos indirectos. Es también importante indicar que la materia orgánica del suelo tiene otras acciones indirectas, como el efecto positivo sobre el balance hídrico, la nutrición de las plantas y el control de la erosión.

Según Mustin (1987), para que un suelo agrícola presente unas condiciones favorables para el desarrollo de las plantas debería tener un porcentaje en volumen de materia orgánica, en torno al 5 %. En los suelos de secano el porcentaje de materia orgánica oscila entre el 1-2 % y en los de regadío entre el 2-4 %. En zonas áridas y semiáridas debido a las particulares condiciones edafoclimáticas el contenido en materia orgánica de los suelos no supera el 2 %.

La materia orgánica del suelo comprende una serie de compuestos de distinta naturaleza. Detritus vegetales y animales, sustancias húmicas, partículas de carbón y sustancias alifáticas simples como los carbohidratos. Las más reactivas son las sustancias húmicas que se dividen generalmente en ácidos húmicos (solubles en medio

alcalino, e insolubles en medio ácido), ácidos fúlvicos (solubles en medio alcalino y ácido) y huminas (insolubles en ambos medios). Para algunos autores las sustancias húmicas comprenden todos los compuestos carbonados producto de la humificación (procesos biológicos, químicos y bioquímicos de degradación de las moléculas de tejido animal, vegetal y hongos).

La materia orgánica del suelo procede de los restos de tejidos vegetales, de los residuos de animales y de la biomasa microbiana. Estos restos tan dispares que en bioquímica se denominan “polímeros de compuestos orgánicos” y que podemos denominar “materia orgánica fresca”, bajo la acción de factores edáficos, climáticos y biológicos, serán sometidos a un proceso constante de transformación. Caso particular son los suelos de cultivo, donde el aporte de residuos orgánicos (estiércoles, lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, etc.) puede convertirse en la principal fuente de materia orgánica para el suelo.

El suelo también es un importante sumidero, ya que mantiene una cantidad enorme de materia orgánica (formada por carbono principalmente). Un sumidero de carbono o sumidero de CO₂ es un depósito natural o artificial de carbono, que absorbe el carbono de la atmósfera y contribuye a reducir la cantidad de CO₂ del aire.

El aumento de la cantidad de humus y materia orgánica mejoraría la calidad del suelo y la cantidad de carbono almacenado. La siembra directa y el barbecho pueden ayudar al almacenamiento de carbono. Los subsuelos almacenan dos veces más que el suelo superficial (Chave. J, 2008).

La captura de carbono en los suelos agrícolas se contrapone al proceso de desertificación por medio del papel que juega el incremento de la materia orgánica sobre la estabilidad de la estructura -resistencia a la erosión hídrica y eólica- y a la retención de agua, y al aspecto esencial de la cobertura de la superficie del suelo directamente por las plantas o por los residuos de las plantas -o cobertura muerta- para prevenir la erosión e incrementar la conservación del agua. La materia orgánica, al incrementar la calidad del suelo, también tiene una función protectora al fijar los contaminantes -ya sean orgánicos como los pesticidas o minerales como los metales pesados o el aluminio- los cuales, en general, disminuyen en su toxicidad.

Los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂. Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica conciernen la vegetación -ingreso de residuos, composición de las plantas-, los factores climáticos -condiciones de temperatura y humedad- y las propiedades del suelo -textura, contenido y mineralogía de la arcilla, acidez. Otros factores relacionados con la fertilización del suelo (N, P o S) o con el riego, tienen efecto sobre la producción de las plantas y por lo tanto sobre el contenido de materia orgánica. La tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo depende sobre todo de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno -drenaje-, el uso de la tierra, los sistemas de cultivo, el manejo del suelo y de los cultivos (Lal *et al.*, 1995). En un tipo de suelo dado expuesto a prácticas constantes, se alcanza un casi-equilibrio -situación estable- de la materia orgánica del suelo después de 30 a 50 años (Greenland, 1995).

1.4. Composición de la materia orgánica en el suelo

Materia orgánica y componentes orgánicos del suelo son términos equivalentes que se utilizan para designar una mezcla heterogénea compleja de materiales orgánicos que se presentan de forma natural en el suelo o bien son incorporados por el hombre. Estos materiales incluyen:

Materia orgánica no humificada	- Biomasa vegetal y animal senescente
	- Biomasa microbiana
Humus	- Sustancias no húmicas
	- Sustancias húmicas

La biomasa vegetal y animal senescente está formada por restos vegetales y animales en diversos estados de descomposición.

La biomasa microbiana está formada por los microorganismos y microfauna del suelo que tienen un tamaño inferior a 5×10^{-3} μm . La importancia de esta fracción

radica en la capacidad que posee para transformar e interrelacionar las distintas fracciones de la materia orgánica.

El término *humus* en sentido amplio, se utiliza para designar las sustancias orgánicas que resultan de procesos de humificación (descomposición, degradación y síntesis). Es un constituyente de la fase sólida del suelo y se compone de una mezcla de materiales orgánicos: las sustancias no húmicas (compuestos de estructura molecular específica) y las sustancias húmicas (compuestos de estructura molecular no específica) (Porta, 1994).

Las *sustancias no húmicas* incluyen aquellos materiales cuyas características químicas resultan todavía identificables, tales como glúcidos, proteínas, aminoácidos, grasas, ceras y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Schnitzer y Khan, 1978). La mayoría de estos compuestos son fácilmente biodegradables y tienen una vida corta en los suelos ya que son utilizados como sustratos por los microorganismos. También se incluyen en este grupo a los organismos vivos del suelo (microflora y micro y mesofauna).

Las *sustancias húmicas*, se caracterizan por no presentar unas características físicas y químicas específicas. Son de color oscuro, con carga predominantemente negativa y carácter ácido. En su estructura suelen poseer compuestos aromáticos, son hidrófilas, químicamente muy complejas y de elevado peso molecular. Son compuestos relativamente oxidados (Porta, 1994).

1.4.1. Fracción orgánica biodegradable

Esta fracción está constituida por compuestos procedentes de residuos vegetales y de animales. También se incluyen las sustancias orgánicas originadas por la síntesis microbiana, como aminosacáridos, fitoreguladores, vitaminas y antibióticos, otros compuestos procedentes de la descomposición de residuos vegetales y animales y de la biomasa microbiana, así como compuestos orgánicos procedentes de la rizodeposición, como exudados, secreciones, lisados, etc.

Los carbohidratos que se encontrarán, serán los que formen parte de los tejidos de sostén, conducción y sustancias de reserva de las plantas, como hemicelulosa,

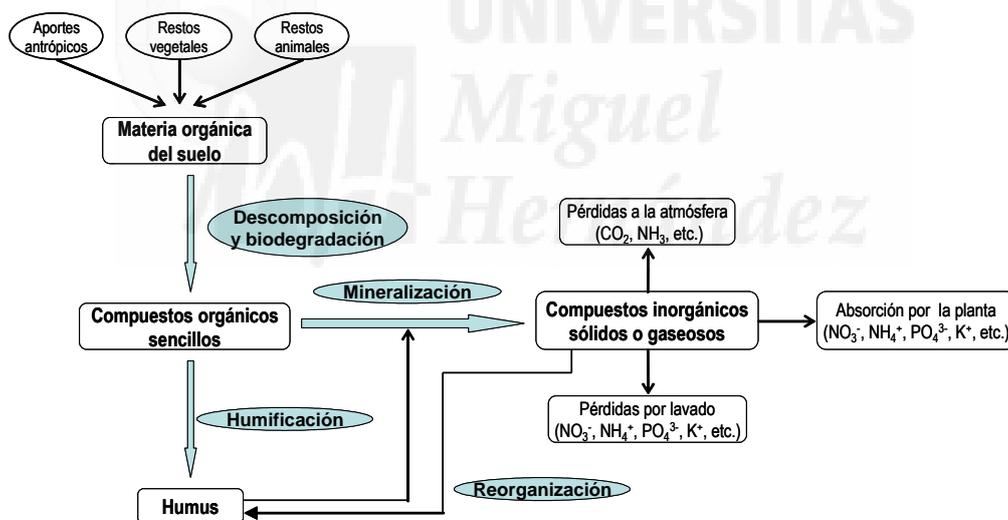
celulosa y almidón. También los carbohidratos de las paredes celulares de los microorganismos y los sintetizados por ellos mismos, como quitina, mucopéptido, mucopolisacáridos, ácidos teicoicos, etc. De los carbohidratos procedentes de los residuos de animales se encontrará el glucógeno. A todos estos compuestos se unirán los carbohidratos sencillos resultantes de su descomposición por parte de los microorganismos del suelo (Labrador-Moreno, 1996).

Los compuestos nitrogenados estarán formados por las proteínas, polipéptidos, oligopéptidos, aminoácidos y ácidos nucleicos. Estos compuestos en condiciones favorables son rápidamente mineralizados. En determinadas ocasiones, sin embargo, muchos aminoácidos y péptidos muestran una mayor resistencia a la degradación debido a que se encuentran adsorbidos en la superficie de las arcillas o en sus espacios interlaminares.

La fracción biodegradable de la materia orgánica se descompone de forma diferente dependiendo de las condiciones físicas y químicas del suelo, ya que la actividad microbiana varía con el nivel de humedad del suelo, potencial redox, pH, etc. Esta fracción constituye la fuente de elementos nutritivos para las plantas N, P, K y S entre otros, y también es fuente de CO₂ para la atmósfera del suelo. Además participa en gran cantidad de procesos ligados a las propiedades químico-físicas del suelo, procesos tales como la agregación, la disolución de minerales, los ciclos biogeoquímicos de los elementos y la formación y estabilidad de la estructura, así como el suministro de materiales bioactivos para los vegetales y para los microorganismos edáficos (Labrador-Moreno, 1996).

La dinámica de la materia orgánica en el suelo está determinada por la incorporación a éste de restos de origen vegetal y animal, y a la transformación y evolución de estos restos bajo la acción de distintos grupos de microorganismos y fauna, así como de las condiciones edafoclimáticas. Como resultado de dichas transformaciones se obtienen compuestos orgánicos más estables que los iniciales en el medio edáfico.

En el **Esquema 2** se representa un esquema de los procesos que siguen los componentes orgánicos desde su incorporación al suelo y las interrelaciones que entre ellos se producen. En una primera etapa la “materia orgánica fresca” (restos de plantas y animales) 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. Posteriormente, estos compuestos sufren, por acción microbiana, un proceso de *mineralización* que consiste en una rápida transformación de los compuestos orgánicos sencillos 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 .



Esquema 2. Transformaciones de los componentes orgánicos en el suelo.

La materia orgánica no mineralizada de forma rápida, a través del proceso de *humificación* es sometida a profundas transformaciones que hacen aumentar su resistencia 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, 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.

La velocidad y el equilibrio de los procesos de transformación de la materia orgánica del suelo dependen de la actividad de los microorganismos encargados de estas transformaciones. Tal actividad está condicionada tanto por factores externos como el clima, el suelo, la acción humana, etc., e internos como la composición de la materia orgánica. Entre ellos, es de destacar:

- a) Naturaleza de los residuos orgánicos. La composición de los restos vegetales o animales, así como de los residuos aportados por el hombre es muy variada, lo que hace que la secuencia de degradación de sus constituyentes sea también, muy variada. Además, estos componentes pueden ejercer una acción positiva o negativa sobre la actividad microbiana responsable de la transformación. El nitrógeno, los compuestos hidrosolubles y otros constituyentes energéticos, así como las sustancias activadoras de la actividad microbiana ejercen una acción positiva en la transformación de la materia orgánica. En cambio, compuestos fitotóxicos como lípidos, resinas, ceras y polifenoles, ralentizan la biodegradación.
- b) Temperatura. La velocidad de las transformaciones aumenta con la temperatura, ya que los microorganismos proliferan con mayor rapidez. Cada organismo tiene un óptimo de temperatura. Los hongos alcanzan su desarrollo ideal entre 20 y 25°C y las bacterias entre 30 y 50°C.
- c) Humedad. La humedad excesiva es poco favorable para el desarrollo microbiano. Por eso, en climas húmedos se acumula en los suelos mayor cantidad de materia orgánica que en regiones áridas. Por otra parte, la vida microbiana y su multiplicación requieren de agua, bien proveniente de los residuos, tallos, hojas, estiércoles frescos, etc., o bien directamente del suelo. El

- contenido de agua más favorable para una correcta dinámica de la materia orgánica esta en torno al 60 % de humedad equivalente.
- d) Aireación. La mayor parte de los microorganismos que transforman la materia orgánica son aerobios, por ello, las condiciones que favorecen la aireación del suelo (laboreo, drenaje, etc.) estimulan su actividad, con lo que aumenta la velocidad de las transformaciones. Normalmente, en condiciones de mala aireación, saturación de agua, degradación de la estructura, etc., sólo se produce la acumulación de los restos vegetales, siendo muy lenta su transformación y mineralización (Fassbender, 1972).
- e) Contenido en nitrógeno. Los residuos ricos en nitrógeno se descomponen de forma más rápida que los que tienen un contenido menor, debido a que los microorganismos necesitan de este elemento. Cuando los residuos son pobres en nitrógeno, pero en el suelo hay cantidad suficiente, los microorganismos lo toman del suelo, pudiendo provocar en los suelos cultivados una deficiencia de nitrógeno para los cultivos (periodo de depresión de nitratos).
- f) Acidez del suelo. Los suelos ácidos no son favorables para el desarrollo de los microorganismos transformadores. El pH adecuado está comprendido entre 6 y 7,2. La técnica del encalado en suelos ácido mejora las condiciones de humificación de la materia orgánica, siempre que el pH sea el factor limitante de la actividad de los microorganismos.
- g) Acción humana. El laboreo del suelo de cultivo y la roturación de sistemas forestales para su uso agrícola, suponen una variación del balance orgánico y por lo tanto del tipo de humus formado. En general, las acciones llevadas a cabo por el hombre para preparación y puesta en cultivo del suelo, implican una disminución notable del contenido de materia orgánica total, tanto en calidad como en cantidad.
- h) Características minerales del suelo. Bajo condiciones similares el contenido de humus de un suelo está relacionado con el contenido de coloides minerales y con su capacidad de adsorción. En suelos arenosos los restos orgánicos se

descomponen más rápidamente, siendo también mayor la movilidad de los nutrientes a lo largo del perfil.

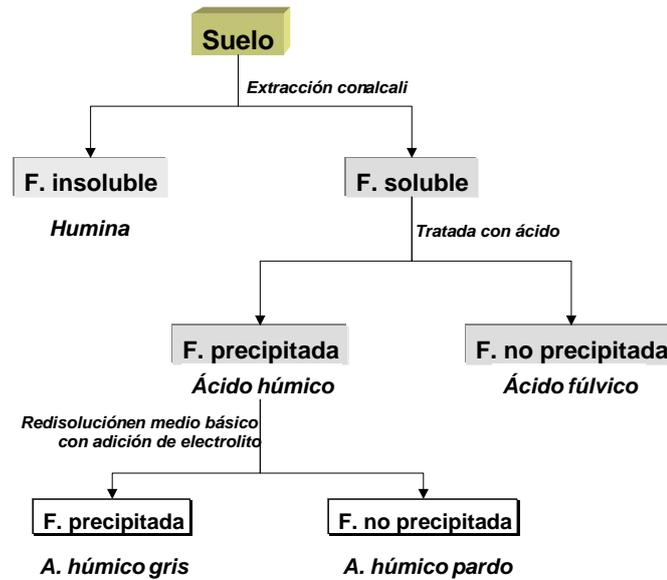
1.4.2. Sustancias húmicas

Para el estudio de las sustancias húmicas se ha establecido de forma empírica tres fracciones:

- ✓ Ácidos fúlvicos
- ✓ Ácidos húmicos
- ✓ Humina

Este fraccionamiento de la materia orgánica del suelo está basado en la distinta solubilidad de sus componentes en medios ácidos y básicos. La disolución alcalina más utilizada para la extracción de las sustancias húmicas es el pirofosfato sódico 0,1 M, como resultado de dicho tratamiento se obtiene un líquido oscuro que, por acidificación, da un precipitado pardo, en forma de flóculos constituido por los *ácidos húmicos* (AH), mientras que los *ácido fúlvicos* (AF) permanecen en la disolución. Este método de extracción alcalina no disuelve toda la fracción humificada, quedando un resto no soluble denominado *humina*.

En el **Esquema 3** se muestra de forma esquemática el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En dicho fraccionamiento se obtienen secuencialmente: los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos, y la humina. Los ácidos húmicos se dividen en dos grupos en función de su precipitación o no con electrolito (solución salina) bajo condiciones alcalinas, denominándose a estas fracciones ácidos húmicos grises y pardos, respectivamente.



Esquema 3. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo.

Las características de las sustancias húmicas son:

Ácidos fúlvicos: materiales orgánicos extraíbles con reactivos alcalinos, no son precipitables por los ácidos después de su extracción. Su composición química no es específica, varía con la categoría de suelo, de la vegetación de que proceden y el método de extracción.

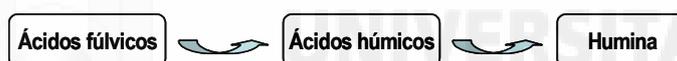
Ácidos húmicos: materiales amorfos de color oscuro que pueden extraerse del suelo con reactivos alcalinos y precipitan con los ácidos en forma de flóculos de color pardo. Están formados por macromoléculas complejas de unidades aromáticas unidas a otros constituyentes orgánicos (aminoácidos, péptidos, aminoazúcares, etc.). Pueden fraccionarse en:

- *Ácidos húmicos grises*: insolubles en disolución acuosa de NaCl, son compuestos muy condensados, de color oscuro y muy estables, característicos en Mollisoles.
- *Ácidos húmicos pardos*: solubles en disolución acuosa de NaCl, son compuestos poco condensados y fácilmente biodegradables, característicos en Spodosoles.

Humina: grupo de sustancias húmicas no extraíbles y difíciles de aislar. Existen numerosas formas de humina, de naturaleza diferente:

- *Huminas jóvenes: huminas microbianas*, formadas por cuerpos microbianos y compuestos alifáticos (sacáridos, proteínas y aminoazúcares) derivados de ellos, y *humina heredada*, formada por constituyentes de membranas vegetales poco transformadas.
- *Huminas evolucionadas*: se llama así a la *humina de insolubilización o neoformada*, resulta de la evolución lenta de los ácidos húmicos que provoca la polimerización de los núcleos aromáticos y un descenso de la solubilidad frente a los reactivos de extracción.

Los ácidos fúlvicos, los ácidos húmicos y las huminas forman una serie continua que puede evolucionar, en determinadas condiciones, en el sentido siguiente:



1.4.3. Biomasa microbiana

La biomasa microbiana es la fracción viviente de la materia orgánica que comprende todos los organismos menores de $5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^3$ que no sea material vegetal. Aunque el término biomasa microbiana incluye microorganismos muy diferentes, en este método de determinación se trata a todos ellos como una fracción única e indiferenciable.

Esta fracción de la materia orgánica no representa normalmente más de un 5% de la materia orgánica total del suelo y en ella se incluyen microorganismos muy diferentes tales como bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoos, etc. (Jenkinson y Ladd, 1981), distribuyéndose de manera no homogénea, lo que provoca que los resultados de los estudios de microbiología del suelo representen los promedios de los efectos de los microorganismos que ocupan los diferentes microhábitats.

El papel de los microorganismos en el suelo es doble:

- Suministran los compuestos inorgánicos con una valencia adecuada para que las plantas superiores puedan utilizarlos (ciclos del nitrógeno y del azufre).
- Contribuyen a la continua degradación y mineralización de la materia orgánica en descomposición.

A la hora de realizar una clasificación de los microorganismos del suelo, podemos diferenciarlos según la forma en que obtienen energía y carbono para sus funciones metabólicas en dos grupos: fotótrofos y quimiótrofos.

Los organismos fotótrofos obtienen su energía de la luz solar, mientras que los quimiótrofos la obtienen de la energía liberada en reacciones químicas de oxidación-reducción. Dentro de estos dos grupos se pueden distinguir los organismos autótrofos, los cuales obtienen su C orgánico por fijación del CO₂ de la atmósfera, y los organismos heterótrofos, que utilizan los compuestos orgánicos como única fuente de carbono para su ciclo vital, desempeñando un papel fundamental, ya que evitan que las sustancias orgánicas formadas a partir de la fotosíntesis se vayan acumulando. Un aumento de los valores de biomasa en el suelo es indicativo de que en el suelo se produce un buen desarrollo de los microorganismos que se encuentran en él.

La microbiana es la fracción más destacada dentro de la biota del suelo. Los microorganismos son, en un elevado porcentaje, responsables de los procesos que tienen lugar en el suelo: transformación de la materia orgánica, ciclos biogeoquímicos que mantienen los equilibrios entre las diferentes formas naturales de los elementos en el suelo y degradación de contaminantes, como pesticidas o metales pesados.

En el suelo también encontramos otros organismos, como son ácaros, artrópodos, colémbolos, nematodos y lombrices. La mayor parte de estos grupos responde en positivo a la adición de compost al suelo. Las lombrices son responsables del aumento de la macroporosidad del suelo, su grado de agregación e infiltración, además de mejorar sus propiedades químicas. El aumento de éstas es mucho menor cuando la materia orgánica adicionada no está estabilizada, probablemente debido al menor grado de humificación.

Los nematodos están asociados con la asimilación de la materia orgánica y la aireación del suelo.

1.5. Sustancias húmicas

Desde los estudios de Liebig en el siglo pasado, se conoce que las plantas son capaces de desarrollarse adecuadamente con un buen suministro de nutrientes minerales y luz. Es decir, que pueden vivir en ausencia de componentes estructurales del suelo, tanto inorgánicos como orgánicos. Este hecho está suficientemente contrastado en la actualidad con la, cada vez mayor, extensión de cultivos hidropónicos o sobre sustrato inerte que se pueden encontrar en las áreas de producción agrícola mundial. Sin embargo, la mayor parte de la agricultura se desarrolla sobre suelo, y en ese caso, la materia orgánica del suelo se describe, frecuentemente, como el factor clave para la fertilidad del mismo. Pero incluso para cultivos sobre sustrato inerte, la materia orgánica puede jugar un papel importante, si es considerada como un agente bioestimulante o bioactivador.

Pero antes de entrar en consideraciones sobre el papel de la materia orgánica sobre los cultivos, se debe definir y acotar en lo posible dicho término. De acuerdo con Stevenson (1994) la materia orgánica del suelo está conformada por la totalidad de las sustancias de tipo orgánico presentes en los suelos, incluyendo los restos de tejidos vegetales y animales inalterados, sus productos de descomposición parcial, la biomasa del suelo que algunos autores (Drozd *et al.*, 1996) excluyen de la totalidad de la materia orgánica, la fracción orgánica soluble en agua y la materia orgánica estabilizada: el humus.

1.5.1. Definición

Esta fracción es la más estable frente a la degradación microbiana, y la más importante de la materia orgánica del suelo, ya que es la responsable de la mayoría de las propiedades beneficiosas que ésta aporta, como es la capacidad tamponante, la capacidad de cambio catiónico y la mejora de la estructura del suelo. Está constituida por tres fracciones diferentes: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y humina, que se diferencian por su distinta solubilidad en disoluciones alcalinas y ácidas.

Las sustancias húmicas son compuestos de color oscuro y cuya estructura es compleja y poco conocida. Los ácidos húmicos y fúlvicos son polímeros de alto peso molecular constituidos por un núcleo central derivado del acoplamiento de anillo aromáticos, quinónicos y heterocíclicos, a través de grupos éster y amida, a los que se unen cadenas alifáticas laterales que contienen grupos funcionales de tipo carboxílico, alcohol, hidroxifenólico y carbonilo. Las sustancias húmicas contienen numerosos radicales libres estables y retenidos en polímeros que contienen sistemas semiquinónicos y tienen una elevada capacidad de cambio catiónico debido a los grupos funcionales de tipo carboxílico, hidroxílico y fenólico. Estos grupos se encuentran entre los radicales externos y confieren las propiedades ácidas de esta fracción y la capacidad de reacción con otras sustancias del suelo como proteínas, carbohidratos, así como, de la formación de complejos organometálicos con cationes di y trivalentes, como el Fe y Al. Las sustancias húmicas son también de gran importancia en la génesis del suelo, ya que forman coloides al unirse a partículas de arcilla, por ello son también importantes en la formación de una buena estructura, en la disponibilidad y movilidad de determinados nutrientes, especialmente micronutrientes, así como en la persistencia y degradación de plaguicidas en el suelo (Schnitzer, 1991).

Estos compuestos húmicos están sujetos a procesos de síntesis y mineralización por la biomasa microbiana, siendo húmicos están sujetos a procesos de síntesis y mineralización por la biomasa microbiana, siendo esta mineralización mucho más lenta que la que ocurre sobre la materia orgánica biodegradable.

Es por tanto, importante detectar y cuantificar la presencia de sustancias húmicas en la materia orgánica del suelo, y así determinar su grado de humificación (Ciavatta y Govi, 1993). La evolución que ocurre desde materia orgánica hacia compuestos humificados en materias primas que se transforman relativamente rápido, tales como lodos de depuradora, compost o estiércoles, se considera de gran importancia desde un punto de vista tanto agronómico como ambiental (Sequi *et al.*, 1991).

Los criterios que se establecen a la hora de evaluar la calidad de la materia orgánica de un compost presentan varios inconvenientes, dando lugar a resultados que pueden ser confusos. Desde hace décadas se ha considerado erróneamente que la

extracción alcalina de sustancias húmicas a partir de suelos u otros materiales orgánicos, da lugar a un extracto húmico total (Kononova, 1996). Nos encontramos, por tanto, ante un proceso tradicional de extracción de sustancias húmicas muy poco específico (Adani *et al.*, 1997; Chefetz *et al.*, 1998).

El Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, establece en su Anexo I, que se podrán comercializar como “ácidos húmicos líquidos”, productos en solución acuosa obtenidos por tratamiento o por procesado de turbas, lignitos o leonarditas, marcando como contenido mínimo de extracto húmico total un 15% y 7% de ácidos húmicos (Grupo 4, Otros abonados y productos especiales). Por otro lado, en el Grupo 6 de dicho anexo, dedicado a Enmiendas Orgánicas, se autoriza como enmienda orgánica húmica, productos de animal o vegetal, procedentes de lignitos, turbas o leonarditas con un contenido mínimo en materia orgánica del 25% un contenido mínimo de extracto húmico total del 15% y 3% de ácidos húmicos.

1.5.2. Características y funcionalidad

El término humus, se utilizó en la antigüedad para hacer referencia a la totalidad del suelo. Posteriormente se ha empleado como sinónimo de materia orgánica, mientras que en la actualidad, y como ya se ha mencionado, hace referencia a una fracción de dicha materia orgánica que engloba a un grupo de sustancias difícilmente clasificables, de color oscuro, muy resistentes al ataque microbiano, de alto peso molecular, de naturaleza coloidal y propiedades ácidas (Stevenson, 1994).

En conclusión, las sustancias húmicas, que se encuentran con gran asiduidad en el medio natural, en suelos, sedimentos y aguas (MacCarthy *et al.*, 1990) son residuos de las plantas y animales en estado de descomposición, unidos a los productos sintetizados por los microorganismos del suelo y ciertos intermedios de dicha síntesis (Ayuso, 1995). Esta composición no es estable sino que presenta gran dinamismo, por lo que más que un grupo de sustancias estamos ante un estado de la materia orgánica, diferente según las condiciones de su formación. Entre un 60% y un 90% de la materia orgánica del suelo está constituida por estos materiales de naturaleza lignoprotéica (Gallardo, 1980).

Actualmente se conoce, dentro de ciertos intervalos, la composición elemental de las sustancias húmicas. Sin embargo la complejidad intrínseca de estos materiales debida a la variabilidad de factores que intervienen en su formación (material original, microorganismos del suelo, condiciones ambientales etc.), hace que el estudio de las estructuras químicas que las conforman y de sus efectos sobre las plantas sea realmente complicado. Por consiguiente, la incapacidad de definir las sustancias húmicas en términos químicos específicos nos fuerza a usar definiciones imprecisas, en base únicamente a las características observadas en los procesos de su fraccionamiento.

La mayor parte de los estudios acerca de las sustancias húmicas se han llevado a cabo sobre las fracciones húmicas y fúlvicas, siendo la humina la que se ha estudiado en menor extensión (Rice *et al.*, 1988). La humina corresponde al 50% o más de la materia orgánica del suelo, de una gran inercia, está constituida por ácidos húmicos tan íntimamente unidos a la parte mineral del suelo que no pueden separarse de ella; así como también por sustancias húmicas de alta condensación y con un contenido de carbono superior al 60%. Por otro lado, los ácidos húmicos y fúlvicos son más activos tanto química como geológicamente (Ayuso, 1995).

El crecimiento y producción de las plantas depende de su nutrición mineral, del agua, el aire y de otros parámetros medioambientales como luz y temperatura. Sin embargo, el efecto positivo de la materia orgánica sobre el desarrollo vegetal también está sobradamente demostrado (Csicsor *et al.*, 1994; Barón *et al.*, 1995; Varanini *et al.*, 1995).

Sin duda, la genética es la principal artífice de la enorme mejora productiva de muchas especies vegetales. Sin embargo, esta ciencia no puede ser considerada como la única responsable de los éxitos alcanzados. Resulta obvio que la creciente capacidad de control de los parásitos y el mayor conocimiento de la fisiología vegetal, sobre todo desde el punto de vista nutricional, han contribuido de manera muy significativa, a dichos avances. Y es aquí donde entran a jugar un papel decisivo productos tales como las sustancias húmicas, que exaltan la capacidad de absorción y traslocación de nutrientes por las plantas, de manera que cada proceso de biosíntesis se ve optimizado con beneficios productivos y cualitativos (Dubbini, 1995). Hasta ahora, las sustancias

húmicas se han venido empleando mayoritariamente como mejoradores de las condiciones de fertilidad de los suelos, es decir, para optimizar la estructura, permeabilidad, niveles de materia orgánica etc., de los suelos. O sea, se han aprovechado sus efectos indirectos sobre los cultivos. Pero con las dosis empleadas, la incidencia sobre las propiedades del suelo es muy escasa. Debido a los altos precios que han regido en el mercado para estos productos, se han venido realizando aplicaciones en dosis que podríamos denominar "comerciales". Es decir, son criterios económicos y no científicos los que dictaminan la dosificación de estas sustancias.

En los últimos años, en cambio, con el desarrollo de los cultivos sobre sustrato inerte y la fertirrigación, el rol de las sustancias húmicas comerciales ha dado un nuevo giro. En la actualidad se pretende explorar los efectos directos de estos compuestos sobre la planta. Es decir, los efectos "likeauxine" u hormonales que puedan tener.

Como es sabido, los suelos agrícolas mediterráneos poseen, generalmente, bajos contenidos en materia orgánica, que tienden a disminuir debido a las pérdidas que se producen por mineralización de la misma, a las labores agrícolas, a la relativa poca importancia actual del estercolado, así como al empleo preferente de abonos minerales de origen industrial. Esta disminución de la materia orgánica en los suelos se traduce en un deterioro de las propiedades físico-químicas de los mismos, así como en su mayor erosionabilidad, con la consiguiente pérdida de productividad a medio y largo plazo (Barón *et al.*, 1995). Estas prácticas están convirtiendo paulatinamente la agricultura tradicional en un ejercicio de tendencias claramente insostenibles. Por ello, la utilización de materia orgánica está sobradamente justificada.

Pero, desde el punto de vista de las plantas, conviene distinguir entre los efectos indirectos y directos de las sustancias húmicas. Centrándonos en el primer grupo, la materia orgánica humificada puede mejorar la fertilidad del suelo a través de su efecto sobre diversas propiedades del mismo como:

- ✓ Aporte de nutrientes (N, P, S, etc.) a las raíces (Varanini, 1995).
- ✓ Mejora de la estructura del suelo incidiendo, de ese modo, en la relación agua-aire en la rizosfera (Piccolo *et al.*, 1997).
- ✓ Incremento en el suelo la actividad microbiana (Ocio *et al.*, 1990).

- ✓ Aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de la capacidad tampón-pH del suelo (Barón *et al.*, 1995).
- ✓ Formación de complejos estables con Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} y otros cationes polivalentes y aumento así de la disponibilidad de micronutrientes para las plantas (Albuzio *et al.*, 1994).
- ✓ Aporte de sustancias húmicas que actúan como transportadoras de nutrientes (Varanini, 1995).
- ✓ Oscurecimiento del suelo, de manera que se facilita su calentamiento (Gallardo, 1980).
- ✓ A través de su combinación con plaguicidas puede afectar a su bioactividad, persistencia y biodegradabilidad (Hunchak-Kaiouk *et al.*, 1994).

1.5.3. Proceso de estabilización mediante la humificación. Origen y formación de las sustancias húmicas

Los mecanismos de humificación no constituyen procesos aislados en el espacio y en el tiempo, como sería el caso de las vías metabólicas de compuestos de síntesis biológica, sino que engloban un gran número de procesos, de tal forma que en un suelo en particular, se desarrollan simultáneamente varios procesos de humificación, dependiendo del material precursor, de los cambios estacionales, de las condiciones ambientales, variables en el tiempo y en el espacio, y del mecanismo específico predominante en la formación de las sustancias húmicas (Ertel *et al.*, 1988).

PROCESOS DE HUMIFICACIÓN

Los restos vegetales de cualquier naturaleza (hoja, ramas muertas, raíces) que se incorporan al suelo constituyen la fuente principal de la materia orgánica del mismo. Estos restos forman la hojarasca, la cual experimenta reacciones químicas, y procesos biológicos de alteración y síntesis microbiana, con formación de compuestos de bajo y alto peso molecular, que son constituyentes típicos del suelo. Este proceso recibe el nombre de humificación (Flaig *et al.*, 1975), el cual implica cambios en la complejidad química de la materia orgánica y un aumento de su estabilidad, que hace aumentar su resistencia a la biodegradación y mineralización (Tate, 1987).

Entre los procesos que se dan durante la formación del humus, se distinguen la humificación directa, donde hay una formación de estructuras preexistentes, y la humificación indirecta, donde se forman macromoléculas de complejidad progresiva. Los productos finales en ambos casos son los ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas, cuyas proporciones relativas dependerán de la composición química de los materiales aportados, su velocidad de descomposición (Sift *et al.*, 1979), y de las características ecológicas del medio.

1.6. Fundamentos del compostaje

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos, que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido. Implica el paso por una etapa termofílica y una producción temporal de fitotoxinas, dando al final como productos de los procesos de degradación, dióxido de carbono, agua y minerales, así como una materia orgánica estabilizada, libre de fitotoxinas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos.

1.6.1. Definición y fases del proceso de compostaje

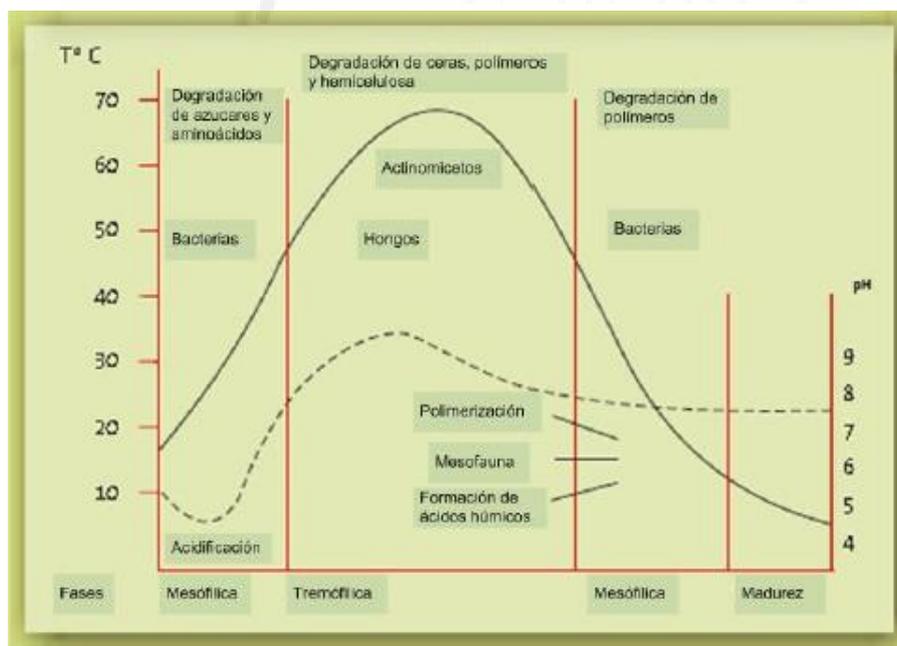
El compostaje, es una técnica mediante la cual se crean las condiciones necesarias para que a partir de residuos orgánicos los organismos descomponedores fabriquen un abonado de elevada calidad. El proceso proporciona un material orgánico más estable y maduro y, en consecuencia, un enriquecimiento en sustancias húmicas "reales" (Provenzano *et al.*, 2001). La madurez del compost es uno de los criterios fundamentales para el reciclaje de los residuos orgánicos, así como su comercialización y utilización en la agricultura (Campitelli y Ceppi, 2008).

Durante este proceso de degradación biológica, se produce un reordenamiento de las características moleculares del ácido húmico: el contenido de carbono lábil se reduce, mientras que la fracción aromática se enriquece (Chefetz *et al.*, 1996). Además, tiene lugar la preservación selectiva de moléculas de alquilo hidrofóbicas: éstas están representadas por ácidos grasos de cadena larga, alcoholes alifáticos, hidrocarburos lineales y derivados de poliéster de plantas, tales como ácidos alquílicos

dicardicarboxílicos de cadena larga (Spaccini y Piccolo, 2009). De esta manera, la materia orgánica estabilizada se crea de nuevo.

El material orgánico tiene efectos beneficiosos indirectos sobre el crecimiento de las plantas, mejorando la estructura del suelo, aumentando las poblaciones microbianas, comportándose como un tampón de pH y sirviendo como portador de micronutrientes (Magdoff y Weil, 2004). Por otra parte, las interacciones directas con las plantas son aquellas que requieren la absorción de macromoléculas orgánicas, tales como subtipos húmicos, en los tejidos vegetales, dando lugar a diversos efectos bioquímicos en la pared celular o membrana celular o en el citoplasma (Chen *et al.*, 2004). Además, los efectos hormonales sobre el desarrollo de las plantas son una de las formas en que las subespecies húmicas desencadenan estos efectos directos. Se informa que en diferentes partes de la planta se pueden observar estos efectos aumentando la absorción de micronutrientes (Adani *et al.*, 1998, Eyheraguibel *et al.*, 2008), e incluso en condiciones desfavorables como deficiencia de nutrientes y alta salinidad (Bidegain *et al.*, 2000, Khaled y Fawy, 2011), los efectos directos de las sustancias húmicas sobre el crecimiento de las plantas siguen siendo fuertes.

FASES EN EL PROCESO DEL COMPOSTAJE



Esquema 4: Evolución de la temperatura y pH durante el proceso de maduración. (Laos, 2003; Mustin, 1987).

- A) *Fase Mesofílica*: en esta etapa abundan las bacterias hemofílicas y hongos mesofílicos. El número de actinomicetos permanecen es relativamente bajo. Debido a la actividad metabólica de todos estos microorganismos la temperatura aumenta hasta unos 40°C, el pH disminuye desde un valor neutro 5.5-6 debido a la descomposición de lípidos y glúcidos en ácidos pirúvicos y de proteínas en aminoácidos, lo que favorece la aparición de hongos mesofílicos más tolerantes a las variaciones del pH y humedad. En esta etapa la relación C/N es de especial importancia ya que el carbono aportara la energía a los microorganismos y el nitrógeno es esencial para la síntesis de nuevas moléculas, por ello la relación debe estar entorno 30, si superamos esta proporción la actividad biológica disminuye, mientras que proporciones superiores de N provocan el agotamiento rápido del oxígeno, y a pérdida del exceso en forma de amoniaco, tóxico para la población bacteriana o por lixiviados. La humedad y ventilación del compostador son esenciales para maximizar la actividad microbiana y por consiguiente el proceso en general. La primera se debe mantener siempre entorno 40-60%, ya que el agua distribuye los nutrientes por la masa (C, N, P, K, B, Ca, Mg, Na, etc.). La ventilación debe ser adecuada sobre todo en las tres primeras etapas y con residuos densos ricos en N, pero nunca excesiva. Si la selección inicial del residuo no fue adecuada o su área superficial es muy reducida a que el tamaño de las partículas es excesivamente grande o pequeño, la ventilación formará caminos preferenciales quedando otras zonas en ausencia de oxígeno.
- B) *Fase Termofílica*: la temperatura continua ascendiendo hasta llegar a valores de 75°C, las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos mueren o permanecen en estado de dormancia mientras que las bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos termofílicos encuentran su óptimo, generando incluso más calor que los mesofílos. La degradación de los ácidos obtenidos en la etapa anterior provoca el incremento del pH pasando desde 5.5 hasta 7.5 donde permanecerá casi constante hasta el final del proceso, el color del compost se pone más oscuro paulatinamente y el olor original se comienza a sustituir por olor a tierra. Es en esta etapa cuando comienza la esterilización del residuo debido a las altas

temperaturas, la mayoría de las semillas y patógenos como E. Coli mueren al estar sometidos durante días a temperaturas superiores a 55°C.

- C) Fase mesofílica o de Enfriamiento: una vez que los nutrientes y energía comienzan a escasear, la actividad de los microorganismos termofílicos disminuye, consecuentemente la temperatura en la pila desciende desde los 75°C hasta la temperatura ambiente, provocando la muerte de los anteriores y la reaparición de microorganismos mesofílicos al pasar por los 40-45°C, estos dominarán el proceso hasta que toda la energía sea utilizada.
- D) Fase de maduración: la temperatura y pH se estabilizan, si el pH es ácido nos indica que el compost no está aún maduro, los actinomicetos adquieren especial importancia en la formación ácidos húmicos y son frecuentemente productores de antibióticos que inhiben el crecimiento de bacterias y patógenos, mientras que los macroorganismos tales como nematodos, rotíferos, escarabajos, lombrices, etc., incrementan su actividad desempeñando la función de remover, excavar, moler, masticar y en general romper físicamente los materiales incrementando el área superficial de estos para permitir el acceso de los microorganismos. El color del producto final debe ser negro o marrón oscuro y su olor a tierra de bosque, además ya no debeos reconocer los residuos iniciales.

Algunos compostadores poseen sistemas de volteo. Este ayuda a mantener la concentración de oxígeno, porosidad, temperatura y humedad uniforme en toda la pila de residuos ya que, los materiales próximos a la superficie tienden a recibir mayor aporte de oxígeno pero alcanzan menos temperatura, mientras que los materiales del interior poseen menor porosidad debido a la presión de los materiales que les rodean y alcanzan mayor temperatura y humedad. En este caso, el volteo se realizó a mano.

1.6.2. Condiciones para el proceso de compostaje

Las variables más importantes que afectan al proceso de compostaje se pueden clasificar en dos tipos:

- Parámetros de seguimiento: aquellos que se han de medir durante todo el proceso, para que sus intervalos se encuentren en los parámetros considerados correctos en cada fase del proceso.
- Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato: aquellos que se han de medir y adecuar a su valor correcto al inicio del proceso.

PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO

- Temperatura: es el síntoma más claro de la actividad microbiana, y por lo tanto del inicio del proceso de compostaje, ya que una vez colocado el material que se va a compostar, si las condiciones son adecuadas, crecen los microorganismos y se genera calor aumentando la temperatura. La evolución de la temperatura representa muy bien el proceso de compostaje, pues se ha comprobado que pequeños cambios de la humedad, pH, o C/N.
- Humedad: la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos. La humedad de la masa de compostaje debe ser tal que permita la circulación tanto del oxígeno, como de otros gases producidos en la reacción. La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%, por debajo del 30% la actividad biológica decrece y por encima del 70% el agua de desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas produciéndose anaerobiosis.
- pH: inicialmente la acidez es la propia de los productos a compostar. Durante la fase inicial se produce una disminución debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciendo la liberación de ácidos orgánicos. En la segunda fase se produce una progresiva alcalinización del producto debido a la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas. Por último en la tercera el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos.

- Aireación: es imprescindible para el buen desarrollo del compostaje asegurar la presencia de oxígeno, ya que una aireación excesiva provoca el enfriamiento de la masa y por lo tanto la disminución de la actividad microbiana. El nivel de oxígeno es óptimo entre los valores del 18-20%.

PARÁMETROS RELATIVOS A LA NATURALEZA DEL SUSTRATO

- Tamaño de partícula: cuando más triturado esté el material, es decir mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción. Las dimensiones consideradas óptimas, generalmente, son entre 1 y 5 cm.
- Relación C/N: el intervalo teórico óptimo de C/N para el compostaje de un producto es de 25-30. Valores por encima de 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso. Si por el contrario los valores son menores a 25, se produce pérdida de nitrógeno en forma amoniacal.
- Nutrientes: La utilidad de un compuesto para ser compostado reside en la disponibilidad de los elementos nutritivos que contenga. Entre los elementos que componen el sustrato destacan el C, N y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. Además existen otros nutrientes presentes en menor cantidad, micronutrientes, que tienen un papel fundamental en la síntesis de enzimas, metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte.
- Materia orgánica: es el principal factor para determinar la calidad agronómica del compost.
- Conductividad eléctrica: está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración en sales. La dosis de compost que puede añadir a un suelo debe ser proporcional a la CE del compost debido a que un exceso en la salinidad del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas.

1.6.3. Sistemas de compostaje

La clasificación más común se realiza en función del aislamiento del material a compostar con respecto al exterior, en cuyo caso se tendrán: sistemas abiertos, semi-cerrados y cerrados.

- Sistemas abiertos: la forma de amontonamiento del material en este tipo de plantas es muy variado (pilas, mesetas, zanjas, etc.), así como los sistemas de manipulación de éste. Se utilizan principalmente sistemas dinámicos, ya sea por medio de volteos o con maquinaria inespecífica (palas mecánicas), también se utilizan métodos estáticos con sistemas de aireación pasiva o forzada, aunque son menos frecuentes
- Sistemas semi-cerrados: en este tipo de sistemas todas las operaciones se realizan dentro de una nave cubierta y cerrada. El sistema más conocido es el de las “trincheras” en las que el material se coloca entre muretes longitudinales y es volteado por distintos procedimientos.
- Sistemas cerrados: el material a compostar no está nunca en contacto directo con el exterior, sino a través de un sistema de conductos y turbinas, lo que facilita el tratamiento de los olores generados en la fermentación.

En este tipo de sistemas las distintas variables (humedad, composición, temperatura, pH, etc.) pueden ser registrados con un mínimo de impacto ambiental en las instalaciones.

1.6.4. Evaluación del grado de madurez de un compost

Desde el punto de vista práctico se entiende como un compost maduro un material térmicamente estabilizado. La aplicación agrícola de un compost sin un adecuado grado de madurez, puede ocasionar efectos negativos muy graves, como:

- ✓ Originar una disminución del contenido de oxígeno a nivel de las raíces.
- ✓ Si la relación C/N es alta, se produce un bloqueo de nitrógeno en el suelo.
- ✓ Excesivo aumento de la temperatura del suelo.
- ✓ Acumulación de sustancias fitotóxicas.

- ✓ No se produce la eliminación de microorganismos patógenos.

Los métodos propuestos para la evolución del grado de madurez pueden agruparse en cinco tipos según la naturaleza del parámetro que se avalúan:

1. Parámetros sensoriales de la madurez: solo dan una idea aproximada del grado de madurez del compost, pero puede ser suficiente para una aplicación práctica en plantas de compostaje.
 - A. Temperatura: es el reflejo de la actividad metabólica de los microorganismos, por lo que es un buen indicador del final de la fase bio-oxidativa ya que la curva de temperatura se estabiliza definitivamente síntoma de que el compost ha adquirido cierta madurez.
 - B. Color: durante el proceso tiene lugar, de manera gradual, el oscurecimiento del material a medida que va madurando llegando a presentar un color pardo oscuro, debido a la formación de grupos cromóforos y a la síntesis de melanoidinas.
 - C. Olor: los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco, aminos y en general ácidos orgánicos, que producen malos olores. El olor desagradable producido por estos compuestos desaparece con la maduración del producto.

2. Evolución de parámetros de la biomasa microbiana: determinan el grado de estabilidad biológica del material. Pueden distinguirse cuatro tipos de métodos:
 - A. Respiración: emplean el estudio de la respiración del compost (absorción de oxígeno o desprendimiento de anhídrido carbónico). Es la técnica más fiable para ser considerada como indicador de madurez para todo tipo de residuos. Se considera maduro un compost cuando no consume más de 40 mg de oxígeno por Kg de materia seca en una hora, tras haberlo incubarlo durante 3 días (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1989)
 - B. Parámetros bioquímicos de la actividad microbiana: están basados en la identificación de la microflora específica y en el estudio de enzimas indicadores de la actividad celular en cada fase del compostaje.
 - C. Análisis de constituyentes fácilmente biodegradables: Morel *et al*, (1985), indican que el parámetro que caracteriza en mayor medida el estado de

maduración del compost es la relación entre el carbono orgánico total y el porcentaje de carbohidratos solubles en agua caliente.

3. Estudio de la materia orgánica humificada: estudios deducen que la naturaleza de los compuestos húmicos extraídos del compost se corresponde, en parte, con el mismo tipo de compuestos sintetizados en las fases iniciales de humificación.

A. Carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas: numerosos autores han propuesto la riqueza total en C húmico como índice de madurez dado que en residuos agrícolas y estiércoles normalmente se observa un incremento en la riqueza de C húmico. Pero en el caso de compostaje de RSU y lodos el C húmico total permanece constante durante todo el proceso. Iglesias Jiménez y Pérez García (1992b, 1992c). Por lo tanto el porcentaje de C húmico total no puede considerarse como un índice adecuado de humificación de materia orgánica.

B. Índices de evolución de la materia orgánica: para conocer la calidad de las sustancias húmicas también se estudió diversos índices de humificación (Roletto *et al.*, 1985; Ciavatta *et al.*, 1988):

- Relación de humificación (RH) = $C_{ex}/C_{OT} * 100$
- Índice de humificación (IH) = $C_{ah}/C_{OT} * 100$
- Porcentaje de ácidos húmicos (P_{ah}) = $C_{ah}/C_{ex} * 100$
- Relación de polimerización = C_{ah}/C_{af}

VALORES INDICATIVOS DE EVOLUCION DE LA MATERIA ORGÁNICA	
RELACIÓN DE HUMIFICACIÓN	>7
ÍNDICE DE HUMIFICACIÓN	>3,5
PORCENTAJE DE ÁCIDOS HÚMICOS	>50
RELACIÓN DE POLIMERIZACIÓN	>1

4. Indicadores químicos de la madurez

A. Ratio C/N fase sólida: es el criterio utilizado tradicionalmente para establecer el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica, siendo necesario un valor cercano a 30 en el material inicial y menor de 20

- como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poincelot, 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) o menor de 15 (Juste, 1980).
- B. Ratio C/N fase acuosa: mediante el estudio de los cambios bioquímicos a lo largo del compostaje en extractos en agua es posible deducir el estado de maduración del compost. Disminuye paulatinamente desde valores entre 30-40 hasta 5-6, y diversos autores proponen este parámetro como indicador absoluto de madurez.
- C. Carbono orgánico soluble en agua (Cw): numerosos autores han propuesto, como alternativa a la reacción C/N tanto en fase sólida como acuosa, la determinación del Cw como simple índice de madurez, ya que siempre se observa un descenso paulatino durante el compostaje, hasta una práctica esterilización. Sin embargo los valores límites propuestos varían considerablemente, dependiendo del material inicial.
- D. Capacidad de intercambio catiónico: aumenta progresivamente a medida que progresa la humificación de la materia orgánica, ya que el incremento del grado de polimerización provoca un aumento considerable de la superficie específica de las macromoléculas húmicas y un aumento progresiva de grupos carboxilos aunque en menor medida. Posteriormente este incremento de la CIC ha sido descrito por numerosos autores en todo tipo de residuos y por lo tanto ha sido aceptado universalmente como criterio de madurez e indirectamente como criterio de humificación de materiales orgánicos (Roig *et al.*, 1988).
- E. Ratio $N-NH_4^+/N-NO_3^-$: Finstein y Miller (1985) definen el concepto de madurez en términos de nitrificación y escriben que cuando en el proceso de compostaje aparecen cantidades apreciables de nitratos y/o nitritos se puede considerar que el compost está suficientemente maduro, ya que durante la fase termófila la nitrificación está prácticamente inhibida.
- F. Presencia de compuestos reductores: la presencia de compuestos tipo amoníaco o sulfhídrico, característicos de un potencial redox inadecuado, es indicativa, al igual que el pH ácido, de procesos anaerobios y muestran que los residuos se encuentran aún en periodo de intensa descomposición. Por lo que la presencia de estos compuestos indica inmadurez del compost.

5. Métodos biológicos: son los ensayos más fiables, ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectados por los métodos anteriores:
- A. Método de germinación: propuesto por Sphon (1978), Zucconi *et al.*, (1981), aunque el más generalizado es éste último que utiliza semillas de *Lepidium sativum* y que calcula un índice de germinación que combina el porcentaje de germinación y la longitud media de las raíces.
 - B. Método de crecimiento: suponen la evolución del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el maíz y la cebada.

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

- a) Estar basados en la evolución de parámetros determinables por técnicas analíticas objetivas, sencillas, rápidas y reproducibles.
- b) No ha de verse afectada su reproducibilidad por manipulaciones y preparaciones previas.

En general la calidad del producto dependerá principalmente de los materiales de origen y de las condiciones de temperatura, humedad y aireación que existan durante el proceso.

1.7. Productos comerciales de naturaleza orgánica

El suelo agrícola es un recurso inestimable y limitado, cuyo potencial agronómico actual se debe a la labor desarrollada por el hombre durante siglos. La degradación irreversible de este recurso supone no sólo destruir el bien máspreciado de los agricultores, sino hipotecar las oportunidades agrícolas de generaciones futuras. Por

este motivo, la protección del suelo constituye un objetivo prioritario en un buen abonado, para garantizar su fertilidad y su valor agronómico, presente y futuro.

Existe una amplia oferta en el mercado de productos orgánicos comerciales en formatos y tipologías variadas (vermicompost, compost, ácidos húmicos, etc.) a los que se les ha atribuido propiedades muy diversas (Cadahía, 1997):

- ✓ Mejorar la estructura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua.
- ✓ Evitar la retención de los cationes del suelo desbloqueándolos.
- ✓ Fijar los fertilizantes, disminuyendo las pérdidas por lixiviación.
- ✓ Activar la flora microbiana.
- ✓ Estimular la germinación.
- ✓ Favorecer el desarrollo del sistema radicular.
- ✓ Facilitar la absorción de nutrientes al aumentar la permeabilidad celular.

En el mercado español podemos encontrar diversas marcas comerciales de sustancias húmicas sólidas y líquidas. Sus orígenes son diversos:

- Para las *sólidas* predominan las leonarditas y estiércoles de ovino combinados con diferentes residuos orgánicos (tortas de café, girasol, restos vegetales sin identificar, restos animales, etc.). También podemos encontrar turbas y otros productos, como fermentados de cascarilla de cacao enriquecidos con micronutrientes. Encontramos en el Grupo 6 del anexo I del RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, dedicado a Enmiendas Orgánicas, que se autoriza como enmienda orgánica húmica, productos de animal o vegetal, procedentes de lignitos, turbas o leonarditas aquellas que tengan un contenido mínimo en materia orgánica del 25% un contenido mínimo de extracto húmico total del 15% y 3% de ácidos húmicos.
- Las sustancias húmicas comerciales *líquidas* proceden fundamentalmente de tres orígenes: leonarditas, restos vegetales y turbas que se podrán comercializar como “ácidos húmicos líquidos”, productos en solución acuosa obtenidos por tratamiento o procesado de turbas, lignitos o leonarditas, marcando como

contenido mínimo de extracto húmico total un 15% y 7% de ácidos húmicos (Grupo 4, Otros abonados y productos especiales).

En las últimas décadas se han realizado varios estudios que indican que, si bien la naturaleza y composición de las sustancias húmicas obtenidas de materiales más o menos humificados no son idénticas a las del suelo, tienen mecanismos de formación similares y la mayoría de parámetros analíticos presentan valores muy parecidos, por lo que, también han de ejercer acciones positivas sobre el desarrollo vegetal. Según Franco *et al.*, (1998) es importante tener presente que la fracción extraíble de los materiales humificados comprende un abanico que va desde los ácidos fúlvicos a los ácidos húmicos. Cuando la materia prima sea un material joven y poco humificado se obtendrán preferentemente fracciones fúlvicas con predominio de estructuras alifáticas que, si bien son altamente hidrofílicas y muy activas en cuanto a su interacción con los micronutrientes y su movilidad, tienen un tiempo de residencia en el suelo muy corto, debido a su rápida biodegradación por microorganismos; por el contrario, en las fracciones situadas al otro extremo, procedentes de materiales muy carbonizados, predominan ácidos húmicos con estructuras aromáticas muy policondensadas y de elevados pesos moleculares, con virtual ausencia de proteínas y mucopolisacáridos.

Cuando se empleen sustancias húmicas para aplicación foliar debemos tener en cuenta que en ellas debe predominar la fracción fúlvica y que contengan ácidos húmicos de bajo peso molecular; mientras que para aplicaciones a suelo se elegirán productos con una mayor presencia de la fracción húmica.

Debido a la complejidad de las sustancias húmicas y a su difícil caracterización, la legislación sólo propone como requisitos los anteriormente mencionados. Es obvio que productos procedentes de residuos animales o vegetales relativamente recientes no han sufrido ese lento proceso de humificación como las sustancias húmicas del suelo.

1.8. Residuos orgánicos como fuente de sustancias húmicas

Existe una estrecha relación, ampliamente constatada, entre la pérdida de materia orgánica, la merma del potencial agrícola y el avance de la erosión, en especial

cuando confluyen otros factores como la ausencia de vegetación, la pendiente del terreno y las condiciones climáticas (Stoate *et al.*, 2001). Hoy en día, el uso de enmiendas orgánicas para restaurar, mantener o mejorar los contenidos de materia orgánica del suelo y sus funciones físicas, químicas y biológicas es una de las prácticas más comunes, eficientes y baratas (Senesi *et al.*, 1996).

1.8.1. Concepto y problemática de los residuos

La generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental grave de las sociedades modernas. Así el abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores, y pueden provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana, pero si se gestionan adecuadamente se convierten en recursos con los beneficios de todo tipo que ello conlleva.

En Europa, la Directiva Marco de Residuos constituye el principal instrumento normativo para cambiar el enfoque de la gestión de los residuos, al centrar su objetivo en la prevención y el reciclado y reforzar el principio de jerarquía en las opciones de gestión de residuos. Siguiendo esta jerarquía, la prevención es la mejor opción de gestión seguida y en este orden, de la preparación para la reutilización, del reciclado, de otras formas de valorización (incluida la energética) y por último de la eliminación (el depósito en vertedero).

Posteriormente, y en el marco de la Estrategia 2020, “la Hoja de ruta hacia una Europa Eficiente en el uso de los “recursos” recode los objetivos y los medios para transformar la economía circular actual, basada en el uso intensivo de los recursos, en un nuevo modelo de crecimiento basado en el uso eficiente de los recursos. En este planteamiento, el reciclaje o la valorización material de los residuos, juegan un papel primordial.

La clasificación de los residuos no es única, una de las más tradicionales, es en función de lo distintos sectores de producción:

- Primarios o de producción de materias primas, se engloban los residuos ganaderos como estiércoles y purines, residuos agrícola (restos de cosechas, de poda, etc.).
- Secundarios o industriales, se generan una gran variedad de residuos orgánicos, tanto sólidos como líquidos, tan variados como las propias industrias que los generan. De especial interés son los residuos de la industria agroalimentaria, que generan residuos vegetales y residuos líquidos procedentes del procesado de frutas y verduras, lodos y aguas residuales procedentes de la transformación y procesado de los alimentos.
- Terciarios o de servicio: residuos domésticos (residuos sólidos urbanos), de limpieza y mantenimiento de jardines, y de la depuración de aguas residuales urbanas (lodos EDAR).

La actividad agraria genera residuos de tipologías muy diferentes en composición y cantidad y la separación de las explotaciones agrícolas hace que los residuos se encuentren muy diversos en el territorio, de manera que el transporte a puntos de clasificación y almacenamiento constituyen las piezas claves que deben abordarse para la mejorar la gestión de los residuos del sector agrario. La complejidad que supone para la mayoría de los productos agrarios que cada residuo que genera tenga unas normas específicas puede dificultar su gestión, por lo que hay que desarrollar estrategias específicas para el almacenamiento en las explotaciones de los distintos residuos generados, su correcta entrega, clasificación y almacenamiento intermedio, así como para el transporte a los lugares específicos de clasificación y almacenamiento. Para valorar la problemática en un caso concreto es necesario cuantificar los residuos y localizar a los gestores, adoptando en cada zona la solución más adecuada.

La eliminación de la creciente producción de residuos orgánicos es un problema ambiental y logístico que demandan soluciones potentes e innovadoras a la vez que respetuosas con el medio ambiente y que sean económicas y viables. La creciente generación de residuos, especialmente de los residuos orgánicos urbanos, es un problema que exige una solución inmediata. Se trata pues de considerar a los residuos que generamos como un constituyente de nuestra propia actividad, y asumir nuestra responsabilidad sobre los mismos.

El ciclo natural de la materia es cerrado, de forma que con los mismos elementos químicos se hacen y deshacen toda una serie de estructuras, sin generar ningún tipo de residuo que no sea asimilable por la naturaleza. Por tanto, los sistemas naturales no generan productos residuales acumulables. La intervención humana ha roto el citado ciclo natural de la materia para obtener los bienes que necesita, ya que extrae las materias primas y después de utilizarlas y procesarlas, quedan una serie de residuos que no son asimilables pero sí acumulables.

El gobierno español, para determinar las prioridades y criterios para la gestión de residuos en España, promulgó la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, la cual sustituye el anterior régimen jurídico comunitario de residuos y a la promulgación de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre, sobre los residuos.

Esta nueva Directiva (Directiva marco de residuos) establece el marco jurídico de la Unión Europea para la gestión de los residuos, proporciona los instrumentos que permiten dissociar la relación existente entre el crecimiento económico y producción de residuos, haciendo especial hincapié en la prevención, entendida como el conjunto de medidas adoptadas antes de que un producto se convierta en residuo, para reducir tanto la cantidad y contenido en sustancias peligrosas como los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente de los residuos generados. Así incorpora el principio de jerarquía en la producción y gestión de residuos que ha de centrarse en la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclaje u otras formas de valorización, incluida la valorización energética, y aspira a transformar la Unión Europea en una “sociedad del reciclado” y contribuir a la lucha contra el cambio climático (BOE 29 de julio 2011, sec. I. pág. 85650).

La definición de residuo cada vez es más precisa en su contenido y ámbito de aplicación. La larga experiencia derivada de la aplicación de la terminología contenida en la política y la normativa de la UE en materia de residuos, unida a la promulgación de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, define residuo como “cualquier sustancia y objeto del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la obligación de desprenderse, en virtud de las disposiciones legales vigentes”.

Se debe tener en cuenta que los residuos orgánicos plantean también una serie de inconvenientes y restricciones cuando se aplican al suelo. Como residuos, debido a su origen y composición, pueden ser causa de problemas muy diversos tales como la acumulación de metales pesados, la presencia de contaminantes orgánicos o aumentos en la salinidad del suelo (García *et al.*, 1994); pero además como compuestos orgánicos, también deben ser tenidos en cuenta otros factores muy importantes como la estabilidad o tasa de descomposición de la materia orgánica y la madurez o grado de descomposición de las sustancias orgánicas fitotóxicas (Wu *et al.*, 2000).

1.8.2. Fuentes de materia orgánica de aplicación agrícola

Las distintas aportaciones de la materia orgánica al suelo son con la adición de diferentes enmiendas orgánicas, procedentes de materiales carbonados de origen vegetal o animal, utilizada fundamentalmente para mantener o aumentar el contenido en materia orgánica del suelo, mejorar sus propiedades físicas y mejorar también sus propiedades o actividad química o biológica. La naturaleza de estos recursos orgánicos puede ser residual o un recurso natural, como es la turba. Una enmienda orgánica es cualquier sustancia o producto orgánico capaz de modificar o mejorar las propiedades y las características físicas, químicas, biológicas o mecánicas del suelo. Las diferentes fuentes de materia orgánica son:

Turba: material natural producido por la degradación natural prolongada de residuos vegetales. Contiene hasta el 98% de materia orgánica y es muy rico en sustancias húmicas. Las turbas de buena calidad tienen un elevado coste, y además tienen unas limitaciones ambientales, sobre todo en países con escasez de reservas de turba, como es España.

Estiércoles y purines de animales: el estiércol es la mezcla de deyecciones sólidas y líquidas con la cama de paja del ganado estabulado. Cuando el residuo es recogido en forma semisólida, sin la presencia de cama, se llama purín.

Lodos de depuradora: conocidos como biosólidos, cuando se refiere al producto final del tratamiento biológico de las aguas residuales municipales. Se han utilizado

ampliamente como enmienda en suelos agrícolas, sin embargo el escaso control de la calidad de los materiales y el uso indiscriminado durante muchos años ha llevado a la acumulación de metales pesados en los suelos de aplicación, lo que ha llevado a promulgar una legislación específica tanto a nivel comunitario como estatal. Se consideran residuos orgánicos biodegradables aplicables en agricultura y han sido empleados en numerosos ensayos de campo. Las nuevas técnicas de depuración de aguas residuales y posterior estabilidad de los lodos han permitido obtener biosólidos con mayor calidad para su uso agrícola.

Residuos sólidos urbanos: su uso está limitado por la presencia de metales pesados y compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, pero la mejora de los procesos de separación en origen y el procesado individualizado de los residuos vegetales en las plantas de tratamiento han permitido la producción de enmiendas de gran calidad que pueden ser utilizadas con gran seguridad en los suelos.

Residuos de la industria agroalimentaria: en los países mediterráneos como España, se generan grandes cantidades de subproductos de esta industria, como son la producción del aceite de oliva, que produce alperujo, la industria vitícola y alcohólica, o el procesado de frutas y verduras. Muchos de estos residuos se utilizan como mezcla de diferentes compost.

Compost: es el resultado de la transformación aerobia controlada de residuos orgánicos, que es utilizado como fertilizante orgánico para el suelo. El compostaje es un proceso bio-oxidativo espontáneo durante el cual la actividad de los microorganismos degrada la materia orgánica más lábil, para obtener un material estable microbiológicamente, rico en materia orgánica humidificada, libre de microorganismos patógenos, olores y de fototoxicidad, que resulta beneficioso para el desarrollo vegetal.

Vermicompost: es un proceso de biooxidación, degradación y estabilización de la materia orgánica mediada por la acción combinada de lombrices y microorganismos, mediante el cual se obtiene un producto final estabilizado, homogéneo, y de granulometría fina denominado vermicompost, lumbricompost, compost de lombriz o humus de lombriz. El proceso de vermicompostaje ha sido utilizado para la

biodegradación de un gran número de residuos orgánicos, y se considera como una ecotecnología limpia, sin impacto ambiental y cuyos costes de inversión, energéticos y de mantenimiento son moderadamente bajos.



UNIVERSITAS
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS
Miguel Hernández

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

2.1. Antecedentes

El aumento de la generación de residuos orgánicos, en las últimas décadas es evidente y especialmente en algunos sectores, como el sector terciario donde se encuentran residuos de tipo urbano que debido al obligado cumplimiento de diferentes reglamentaciones y directrices vigentes, se están generando en gran cantidad. Además el mantenimiento de parques y jardines también ocasiona importantes cantidades de restos de poda de distintas especies, muchas de ellas con caracteres estacionales que es preciso gestionar adecuadamente para evitar problemas ambientales.

Éstos no sólo son una fuente potencial de contaminación cuando no se gestionan correctamente, sino que pueden llegar a ser un valioso recurso especialmente si se valorizan a través del aprovechamiento de estos residuos para la aplicación agrícola.

Una de las prioridades de la política de medio ambiente de la UE es precisamente la gestión de los residuos generados en los distintos sectores, de ahí que La Directiva Marco de Residuos constituya el principal instrumento normativo para cambiar el enfoque de la gestión de los residuos en Europa, al centrar su objetivo en la prevención y el reciclado y reforzar el principio de jerarquía en las opciones de gestión de residuos. El objetivo es convertir a Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, que produzca menos residuos y que utilice como recurso, siempre que sea posible, los que no pueden ser evitados.

En definitiva se trata de sustituir una economía lineal basada en producir, consumir y tirar, por una economía circular en la que se reincorporen al proceso productivo una y otra vez los materiales que contienen los residuos para la producción de nuevos productos o materias primas. En este planteamiento, el reciclaje o la valorización material de los residuos, juegan un papel primordial.

Además, los suelos de nuestra zona se caracterizan por ser deficientes en materia orgánica debido a las características climáticas siendo suelos fácilmente degradables. La incorporación de residuos orgánicos al suelo es una de las prácticas que puede contribuir a la mejora agrícola y ambiental del medio edáfico.

La gestión adecuada de la materia orgánica del suelo, constituye uno de los pilares básicos sobre los que se apoya una agricultura de carácter sostenible. Sin embargo, el amplio desarrollo de la agricultura de régimen intensivo, con el consiguiente empleo de fertilizantes minerales de manera indiscriminada y casi abusiva, se ha traducido en una pérdida de los niveles óptimos de materia orgánica del suelo, debida al desequilibrio que se genera en éstos. En las zonas de climas templados y escasa pluviometría, donde este tipo de agricultura se ha visto ampliamente desarrollada, dicho efecto es todavía más insostenible. Este es el caso de las regiones mediterráneas, donde la pérdida de calidad de los suelos provocadas por las causas antes mencionadas, unida a la salinización de los mismos y a otros factores de tipo económico y social, ha generado el abandono de amplias áreas dedicadas a la agricultura.

Por todo ello, y para restablecer los contenidos de materia orgánica de los suelos y las propiedades asociadas a ellas, los agricultores han utilizado, en muchos casos, cantidades muy importantes de sustancias húmicas comerciales. Es decir, hasta ahora, las sustancias húmicas se han venido empleando mayoritariamente como mejoradores de las condiciones de fertilidad de los suelos, aprovechado sus efectos indirectos sobre los cultivos. Pero con las dosis tan bajas empleadas, la incidencia sobre las propiedades del suelo suele ser muy escasa.

Además, en los últimos años, en cambio, con el desarrollo de los cultivos sobre sustrato inerte y la fertirrigación, el rol de las sustancias húmicas comerciales ha dado un nuevo giro. En la actualidad se pretende explorar los efectos directos de estos compuestos sobre la planta. Es decir, los efectos bioestimulantes o bioactivadores (*like-auxine*) que puedan tener. Aunque es posible que podamos argumentar que el mismo efecto biostimulante lo tiene la propia materia orgánica de los suelos, sin necesidad de particularizar en las sustancias húmicas en concreto (Killi y Kadvir, 2013), y en este sentido, habría bastante que discutir.

2.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es cuantificar el contenido en sustancias húmicas de distintos recursos orgánicos disponibles en el entorno agrario mediterráneo, entre los que destacan los compost, vermicompost, enmiendas orgánicas frescas y estabilizados utilizados en agricultura, y productos comerciales usados para mejorar los niveles en ácidos húmicos y fúlvicos. Así mismo, se estudiará como el proceso de compostaje influye en el contenido de dichas sustancias húmicas. Finalmente se establecerá el valor equivalente del contenido de estas sustancias húmicas según el precio de mercado y normalizándolo a un contenido unitario de carbono húmico, con el fin de poner un valor económico al contenido de sustancias de alto valor añadido como son las sustancias húmicas presentes en las enmiendas orgánicas.

Para ello, se establecen los siguientes *objetivos concretos*:

- Determinación del contenido del carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas y las formas de carbono asociadas a las fracciones de ácidos fúlvicos y húmicos en los recursos orgánicos estudiados.
- Estudiar cómo influye el proceso de compostaje en la evolución de la materia orgánica y especialmente en el contenido de los ácidos húmicos y fúlvicos.
- Determinación de parámetros complementarios ligados a la evolución de la materia orgánica como es el nitrógeno total y el carbono total, entre otros, con efecto sobre la capacidad fertilizante.
- Análisis del valor equivalente de los residuos orgánicos en comparación con productos comerciales, a nivel de sustancias húmicas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño experimental

El objetivo principal de este trabajo es cuantificar el contenido en sustancias húmicas de distintos recursos orgánicos disponibles en el entorno agrario mediterráneo, entre los que destacan los compost, vermicompost, enmiendas orgánicas frescas y estabilizados utilizados en agricultura, y productos comerciales usados para mejorar los niveles en ácidos húmicos y fúlvicos. Así mismo, se estudiará como el proceso de compostaje influye en el contenido de dichas sustancias húmicas. Finalmente se establecerá el valor equivalente del contenido de estas sustancias húmicas según el precio de mercado y normalizándolo a un contenido unitario de carbono húmico, con el fin de poner un valor económico al contenido de sustancias de alto valor añadido como son las sustancias húmicas presentes en las enmiendas orgánicas.

Para ello se realizarán las siguientes etapas en el trabajo:

1. Desarrollo de una amplia colección de muestras de materias primas de origen vegetal y recursos orgánicos frescos y estabilizados de aplicación agrícola,
2. Determinación de contenidos de sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) en dicha colección,
3. Estudio del contenido y variación de sustancias húmicas durante el procesos de compostaje, mediante evaluación de muestras iniciales (antes del compostaje) y muestras maduras (compostadas),
4. Estudio del valor equivalente de las sustancias húmicas en los recursos orgánicos estudiados.

Para ello se han seleccionado dos grupos de materiales:

Grupo A: Muestras procedentes de 35 procesos de compostaje desarrollados en la planta de COMPOLAB de la UMH (EPSO). Dichos procesos de compostaje emplearon ingredientes (residuos) de distinto origen y naturaleza, tanto agrícola como agroindustrial y urbana. Se consideraron muestras de la mezcla inicial (sin compostar) así como el compost ya maduro que es el producto de aplicación agrícola.

Grupo B: Compuesto por 20 productos comerciales distintos, disponibles en el mercado para el agricultor del sureste Español, de naturaleza orgánica, ya sean frescos o estabilizados (de diferentes tipologías como son estiércoles, humus de lombriz, sustratos y sustancias húmicas comerciales).

En total se analizaron 55 muestras: 35 muestras de compost (Grupo A), 3 muestras de compost, 3 muestras de sustratos comerciales, 9 muestras de estiércoles, 3 muestras de humus de lombriz y otras 2 muestras de ácidos húmicos comerciales (Grupo B).

Los parámetros analizados para todas las muestras han sido los siguientes: materia orgánica total (MOT), carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT), relación C/N, carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}), carbono de los ácidos fúlvicos (C_{af}), y carbono de los ácidos húmicos (C_{ah}).

Para conocer la calidad de las sustancias húmicas también se estudió diversos índices de humificación (Roletto *et al.*, 1985; Ciavatta *et al.*, 1988):

- Relación de humificación (RH) = $C_{ex}/C_{OT} * 100$
- Índice de humificación (IH) = $C_{ah}/C_{OT} * 100$
- Porcentaje de ácidos húmicos (P_{ah}) = $C_{ah}/C_{ex} * 100$
- Relación de polimerización = C_{ah}/C_{af}

3.2. Desarrollo experimental

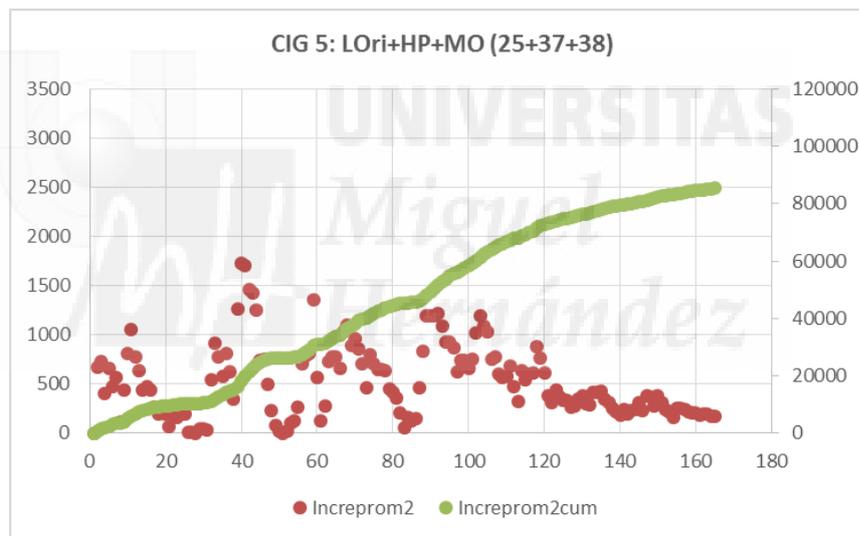
Para el desarrollo del trabajo se estableció un plan de muestreo para describir las diferentes fuentes orgánicas de nuestro entorno socioeconómico con el fin de saber los contenidos de sustancias de valor añadido de tipo húmico y poder establecer el valor asociado que tiene el uso de estos recursos y que en el sector agrícola no están internalizados y ni siquiera considerados a nivel estratégico. En la **Tabla 1**, se muestra los ingredientes que se emplearon para los procesos de compostaje del Grupo A. Estos compost han sido diseñados en base a distintos ingredientes, tal y como se indica, siendo la mayoría de las pilas binarias. El sistema empleado para el compostaje es el sistema de pilas abiertas móvil con volteos periódicos de estas y control de la temperatura.

La *Universidad Miguel Hernández de Elche*, dentro de sus instalaciones docentes e investigadoras y ubicada dentro del Campus de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO), dispone de una planta de compostaje a escala piloto, denominada *COMPOLAB* (COMPOLAB-Laboratorio de valorización de residuos orgánicos) que está asignada al Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente a través del Grupo de Investigación Aplicada en Agroquímica y Medio Ambiente (GIAAMA). En la zona de compostaje industrial o al aire libre (playa de compostaje) se realiza un sistema de compostaje descubierto en playa comercial mediante volteo periódico con volteadora Bahkus 4:28, con capacidad para la realización de pilas móviles con ventilación por volteos y control de temperatura, con una dimensión unitaria de pila de hasta 40 metros de longitud con 4 metros de ancho. Las dimensiones operativas para compostaje en la playa son de 28 x 40 metros.

La operativa general de la playa de compostaje se organiza como sigue:

- a) Recepción de flujo residual en silos de acopio o directamente en la playa y pretratamiento (si procede): el pretratamiento consiste en adecuación granulométrica mediante trituradora forestal acoplada a tractor.

- b) Determinación de densidad aparente para cada flujo residual: se determina la relación peso volumen aparente (sin compactar) para poder luego proceder a trabajar en volumen, a través de la contabilización de volumen (número de palas, volquetes etc.) que se aplica.
- c) Mezcla (start-up): se apilan los diferentes ingredientes en capas consecutivas para facilitar la homogenización posterior (a realizar con la volteadora).
- d) Desarrollo y seguimiento del proceso: incluye monitorización de temperatura y humedad mediante sondas portátiles o datalogger en su caso, incluyendo volteos para asegurar termofilia y evolución de toda la masa a compostar. Aproximadamente cada 5-10 días al inicio y cada 15-20 después del primer mes.



Gráfica 1. Ejemplo de modelo de gráfica para un caso concreto.



Imagen 1. Playa de compostaje COMPOLAB.



Imagen 2. Playa de compostaje COMPOLAB y sensor de temperatura.

Tabla 1. Ingredientes constituyentes de los materiales del Grupo A.

MUESTRA	TIPO DE PRODUCTO	PRODUCTOR	INGREDIENTE 1	INGREDIENTE 2	INGREDIENTE 3	MS (%) 1	MS (%) 2	MS (%) 3
CIG 2	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	PODA MORERA	-	29,6	70,4	-
CIG 3	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	TRONCO PALMERA	-	26,3	73,7	-
CIG 4	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 3	HOJA PALMERA	-	46,6	53,4	-
CIG 5	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 3	HOJA PALMERA	PODA MORERA	29,5	36,8	33,7
CIG 6	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	CAÑA DE RIO	-	31,4	68,6	-
CIG 7	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 3	HOJA PALMERA	-	42,2	57,8	-
CIG 8	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 4	HOJA PALMERA	-	36,2	63,8	-
CIG 9	COMPOST	COMPOLAB	RESTOS JARDINERIA EPSO	-	-	100	-	-
CIG 10	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	CAÑA DE RIO	-	29,5	7,5	-
CIG 11	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	RESTOS DESMOTADOS DE ALGODÓN	-	38,0	62,0	-
CIG 12	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	RESTOS JARDINERIA EPSO	-	53,9	46,1	-
CIG 13	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 1	TRONCO PALMERA	-	27,5	72,5	-
CIG 14	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 1	CAÑA DE RIO	-	19,6	80,4	-
CIG 15	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 1	RESTOS JARDINERIA EPSO	-	40,9	59,1	-
CIG 16	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	CAÑA DE RIO	-	60,8	39,2	-
CIG 17	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	TIPUANA	-	41,1	58,9	-
CIG 18	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 2	PODA MORERA	-	54,9	45,1	-
CIG 19	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	TRONCO PALMERA	-	29,8	70,2	-
CIG 20	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	TRONCO PALMERA	-	21,9	78,1	-
CIG 21	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	TRONCO PALMERA	-	17,5	82,5	-
CIG 22	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	CAÑA DE RIO	-	38,7	61,3	-
CIG 23	COMPOST	COMPOLAB	EDAR 1	CAÑA DE RIO	-	32,2	67,8	-
CIG 24	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 2	HOJA PALMERA	-	42,8	57,2	-
CIG 25	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 2	CAÑA DE RIO	-	30,4	69,6	-
CIG 26	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 2	TRONCO PALMERA	-	24,3	75,7	-
CIG 27	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 2	RESTOS JARDINERIA EPSO	-	31,4	68,6	-
CIG 28	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 3	TRONCO PALMERA	-	24,9	75,1	-
CIG 29	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 3	PODA MORERA	-	30,9	69,1	-
CIG 30	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 4	TIPUANA	-	72,8	27,2	-
CIG 31	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 4	PODA MORERA	-	44,8	55,2	-
CIG 32	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 5	TIPUANA	-	27,7	72,3	-
CIG 33	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 5	PODA MORERA	-	53,8	46,2	-
CIG 34	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 4	TRONCO PALMERA	-	34,8	65,2	-
CIG 35	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 5	TRONCO PALMERA	-	34,0	66,0	-
CIG 36	COMPOST	COMPOLAB	EDARI 4	CAÑA DE RIO	-	31,3	68,7	-

Cada uno de los dos tipos de ingredientes empleados en la elaboración de los compost se describen a continuación: la **Tabla 2a**, hace referencia al ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) agrupado en 4 lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR) y 5 lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales agroindustriales (EDARI), con sus respectivas descripciones para cada una de las líneas tanto de aguas como de lodos; mientras que la **Tabla 2b** describe al ingrediente 2 (*agente estructurante*) donde nos encontramos con diferentes materiales vegetales.

Tabla 2a. Descripción general de los ingredientes EDAR y EDARI.

LODO	Ha-EQUIVALENTES	ORIGEN Y TRATAMIENTO
EDAR 1	143.258	<p>Origen: Lodo de depuración de aguas residuales urbanas.</p> <p>Línea de aguas: Fangos activos de aireación prolongada.</p> <p>Línea de fangos: Estabilización mediante digestión aerobia y deshidratación mediante centrifugas de alta sequedad.</p>
EDAR 2	189.913	<p>Origen: Lodo de depuración de aguas residuales urbanas.</p> <p>Línea de aguas: Proceso biológico de doble etapa, con nitrificación-desnitrificación y tratamiento terciario de decantación lamelar, filtrado y desinfección mediante lámparas ultravioletas.</p> <p>Línea de fangos: espesamiento, estabilización mediante digestión anaerobia y deshidratación.</p> <p>Línea de biogás: Cogeneración de energía consumida en la propia EDAR.</p>
EDAR 3	34.365	<p>Origen: Lodo de depuración de aguas residuales urbanas.</p> <p>Línea de aguas: Fangos activos de aireación prolongada.</p> <p>Línea de fangos: Estabilización mediante digestión aerobia, espesado y deshidratación mediante filtros banda.</p>
EDAR 4	4.557	<p>Origen: Lodo de depuración de aguas residuales urbanas.</p> <p>Línea de aguas: Aireación prolongada mediante fangos activos con eliminación de nutrientes (el fósforo por precipitación química), filtración en filtro de arena y desinfección mediante radiación ultravioleta.</p> <p>Línea de fangos: Estabilización mediante digestión aeróbica, espesado y deshidratación en decantador centrífugo.</p>
EDARI 1	-	<p>Origen: procedente de la depuración de aguas residuales generadas en el procesado de congelados vegetales y de vegetales de cuarta gama (campeña de pimiento).</p> <p>Línea de aguas: se compone de un tratamiento físico-químico (DAF), balsa de homogeneización y tratamiento biológico mediante reactores discontinuos secuenciales (SBR). La aireación que se produce dentro de los reactores es forzada, por recirculación del agua de dentro del tanque que es enriquecida con O₂ mediante un sistema Venturi.</p> <p>Línea de fangos: adición de polielectrolito y centrifugado.</p>
EDARI 2	-	<p>Origen: procedente de la depuración de aguas residuales generadas en el procesado de pera.</p> <p>Línea de aguas: desbaste de gruesos, balsa de homogeneización y regulación de caudales, tratamiento mediante CAF (Celdas de Aeroflotación), reactor anóxico para la desnitrificación, reactor biológico con sistema de aireación forzada MTS, clarificador USBF situado dentro del reactor biológico para la decantación primaria, decantador secundario tradicional.</p>

		<p>Línea de fangos: los fangos procedentes del decantador primario (clarificador USBF), de los tratamientos físico-químicos (celda de aeroflotación) y del tratamiento biológico, se concentran y mezclan de forma homogénea en un espesador y finalmente se centrifugan previo acondicionamiento mediante la adición de polielectrolitos aniónico y catiónicos.</p>
EDARI 3	-	<p>Origen: procedente de la depuración de aguas residuales generadas en el procesado de fruta (procesado de la pera).</p> <p>Línea de aguas: tratamiento primario con tamices, balsa de homogeneización y ajuste del pH, seguido de un proceso de fangos activos con zona anóxica de desnitrificación, en esta zona se produce la mezcla del agua residual y el fango.</p> <p>Línea de fangos: el fango purgado se espesa mediante sedimentación y se deshidrata mediante centrifugado industrial, previa adición de un floculante (polielectrolito) para mejorar la separación de la fase sólida y su paso la centrifuga.</p>
EDARI 4	-	<p>Origen: procedente de la depuración de aguas residuales generadas en el procesado de fresa.</p> <p>Línea de aguas: desbaste de gruesos, balsa de homogeneización y regulación de caudales, tratamiento mediante CAF (Celdas de Aeroflotación), reactor anóxico para la desnitrificación, reactor biológico con sistema de aireación forzada MTS, clarificador USBF situado dentro del reactor biológico para la decantación primaria, decantador secundario tradicional.</p> <p>Línea de fangos: los fangos procedentes del decantador primario (clarificador USBF), de los tratamientos físico-químicos (celda de aeroflotación) y del tratamiento biológico, se concentran y mezclan de forma homogénea en un espesador y finalmente se centrifugan previo acondicionamiento mediante la adición de polielectrolitos aniónico y catiónicos.</p>
EDARI 5	-	<p>Origen: Procede de la industria de elaboración de postres y dulces con elevada cargas de DQO y DBO.</p> <p>Línea de aguas: tratamiento primario (físico- químico, estabilización biológica de fangos activos de alta carga y decantación secundaria.</p> <p>Línea de fangos: adición de polielectrolito y centrifugado.</p>

Tabla 2b. Descripción general del ingrediente vegetal.

INGREDIENTE	DESCRIPCIÓN
RESTO PODA EPSO	CESPED (<i>Agrostis tenuis</i>), HOJA JACARANDA (<i>Jacaranda mimosifolia</i>), CIPRÉS (<i>Cupressus</i>), HOJA MORERA (<i>Morus alba</i>)
PODA MORERA	HOJA MÁS RAMA DE MORERA (<i>Morus alba</i>)
TRONCO PALMERA	TRONCO PICADO PALMERA DATILERA (<i>Phoenix dactylifera</i>)
HOJA PALMERA	HOJA PICADA PALMERA DATILERA (<i>Phoenix dactylifera</i>)
CAÑA DE RÍO	CAÑA DE RIO (<i>Arundo donax</i>)
RESTOS DESMOTADO DE ALGODÓN	RESTOS DESMOTADO COSECHA DE ALGODÓN (<i>Gossypium</i>)
TIPUANA	RAMA PICADA DE TIPUANA (<i>Tipuana tipu</i>)

Respecto a las características de los materiales del Grupo B, en la **Tabla 4** se muestran cada uno de los materiales comerciales de distinta naturaleza, con su denominación/nombre comercial, tipo de producto y productor, indicando algunas de las características más importantes de su composición, estableciendo 5 tipos dentro de este grupo para facilitar la discusión de los resultados:

Tabla 3. Clave estadística para el grupo de materiales B.

MATERIALES GRUPO B	CLAVE ESTADÍSTICA
COMPOST (3 muestras)	TIPO 1
SUSTRATO (3 muestras)	TIPO 2
ÉSTIERCOLES (9 muestras)	TIPO 3
HUMUS DE LOMBRIZ (3 muestras)	TIPO 4
ÁCIDOS HÚMICOS COMERCIALES (2 muestras)	TIPO 5

Tabla.4. Características de los materiales del grupo B, agrupados según su naturaleza.

MUESTRA	TIPO DE PRODUCTO	DENOMINACION/NOMBRE COMERCIAL	PRODUCTOR	CARACTERÍSTICAS DE LAS ETIQUETAS
1	COMPOST	BONORA	GRUPO GRANJA SAN RAMON REQUENA (Valencia)	Enmienda orgánica. Material de digestión del tratamiento de residuos de subproductos animales y vegetales.
2	COMPOST	COMPOST CETRA	CENTRO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE ALICANTE	Compost de residuos sólidos urbanos.
3	COMPOST	COMPOST	S.A.T. MORE-BÉTERA (Valencia)	Estiércol vaca + restos de poda + lodo de depuradora.
4	SUSTRATO	NORFLOR, SUSTRATO UNIVERSAL	TURBAS GRANJA FÁTIMA (Guipúzcoa)	Sustrato universal. Contiene corteza de pino, compost vegetal y fibra de madera.
5	SUSTRATO	CAMPFLOR, SUSTRATO UNIVERSAL	SUSTRATOS ECOFLOR, S.L.U.(Navarra)	Sustrato universal. Contiene compost verde, turba negra, turba rubia, abono orgánico y abono NPK.
6	SUSTRATO	SISANFLOR, SUSTRATO UNIVERSAL	SISANFLOR, S.L. (Cuenca)	Sustrato universal. Contiene material vegetal compostado.
7	ESTIERCOL	ESTIERCOL OVEJA	OVIMANCHA, (Cuenca)	-
8	ESTIERCOL	ESTIERCOL GALLINAZA	RUJAMAR, (Cuenca)	-
9	ESTIERCOL	ESTIERCOL RINOCERONTE	TERRA NATURA	-
10	ESTIERCOL	ESTIERCOL ELEFANTE	TERRA NATURA	-
11	ESTIERCOL	ESTIERCOL OVEJA	TOLEDO	-
12	ESTIERCOL	ESTIERCOL OVEJA Y CABRA	MURCIA	-
13	ESTIERCOL	ESTIERCOL CABRA	EPSO	-
14	ESTIERCOL	ESTIERCOL CONEJO	EPSO	-
15	ESTIERCOL	ESTIERCOL VACA	PÉREZ AYALA E HIJOS S.L. (Murcia)	-
16	HUMUS DE LOMBRIZ	LOMBRICOMPOST	GEOLIA, (Madrid)	Vermicompost. Contiene compost vegetal y animal.

17	HUMUS DE LOMBRIZ	HUMUS COMERCIAL	QUÍMICA MASSÓ, S.A.(Barcelona)	Humus de lombriz.
18	HUMUS LOMBRIZ	HUMUS TERCIA	TRATAMIENTOS AMBIENTALES SIERRA DE LA TERCIA, S.A. (Murcia)	Proviene del proceso de vermicompostaje de residuos ganaderos, principalmente de vacuno.
19	ACIDOS HÚMICOS COMERCIALES	HUMIKEY	TBIO CROP SCIENCE	Extracto total húmicos 80% y 15% ácidos fúlvicos.
20	ACIDOS HÚMICOS COMERCIALES	GROWEL	QUÍMICA MASSÓ, S.A.(Barcelona)	Contiene 12% de ácidos húmicos y 3% ácidos fúlvicos.

Los análisis se realizaron en los laboratorios del departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la E.P.S Orihuela de la Universidad Miguel Hernández.

Como ya se ha mencionado en el diseño experimental, otro de los objetivos de este trabajo fin de grado es realizar una aproximación metodológica con el fin de conocer el valor equivalente de estas sustancias húmicas contenidas en recursos orgánicos no específicamente denominados como sustancias húmicas y que las contienen. Para ello se ha realizado i) un estudio del precio de mercado de dichas sustancias húmicas y ii) normalizado el valor económico de esas sustancias usando como referencia el precio unitario de un gramo de C húmico indistintamente sea de ácidos húmicos o fúlvicos.

En primer lugar pues se ha realizado un **estudio económico**, utilizando fuentes secundarias (páginas web de diferentes empresas) y la observación directa (visitas in situ a diferentes puntos de venta de productos fitosanitarios), del precio de venta al público, se ha obtenido información sobre distintos productos comerciales que en su composición contenían sustancias húmicas. En este fase, por tanto se han recopilado los precios de venta al público de un total de 46 productos comerciales, con sustancias húmicas (ácidos húmicos y / o ácidos fúlvicos) en su composición y un formato de 1 L de líquido soluble.

Tabla 5. Información sobre los productos comerciales empleados en el estudio económico.

Nº	NOMBRE COMERCIAL/ PRODUCTOR	DESCRIPCIÓN	S.H (%)	CA H (%)	CA F (%)	PRECIO (€)	PAGINA WEB EMPRESA
1	HUMBON (MORERA)	Producto a base de ácidos húmicos y fúlvicos, procedentes de Leonardita.	15	7	8	4,60 €	www.morera.com
2	FERTIORGAN HUMUS 15 (ARTAL)	Producto a base de ácidos húmicos y fúlvicos resultantes del proceso de descomposición y transformación de la Materia Orgánica procedente de la Leonardita.	15	8	7	10 €	www.artal.net
3	HUMIGARD 15 (KENOGARD)	Corrector de suelos a base de ácidos húmicos y fúlvicos.	15	5	10	3,35 €	www.kenogard.es
4	BIOSEI (SEIPASA)	Producto a base de ácidos húmicos con orgánica de origen vegetal.	15	7	8	7 €	www.seipasa.com
5	ELFER BISOIL (DESARROLLOS AGROQUÍMICOS)	Enmienda orgánica húmica de origen vegetal.	15	7	8	5,20 €	www.dasaelfer.com
6	HUMINOVA MS (AGROIN)	Enmienda húmica líquida de alta concentración procedente de Leonardita.	15	7,5	7,5	4,30 €	www.agroin.es
7	HUMICOP (ATLÁNTICA AGRÍCOLA)	Enmienda húmica líquida de origen mineral (leonardita americana).	15	11	4	6,30 €	www.atlanticaagricola.com
8	SPAHUMUS 15 (SPACHEM)	Acción sobre las condiciones de nutrición.	15	8	7	1,80 €	www.spachem.es
9	PROTEIN HUMUS 20 (SPACHEM)	Acción sobre las condiciones de nutrición.	20	10	10	1,98 €	www.spachem.es
10	SPAHUMUS 26 (SPACHEM)	Acción sobre las condiciones de nutrición.	26	10	16	2,22 €	www.spachem.es
11	BIOCAT 15 (ATLÁNTICA AGRÍCOLA)	Enmienda húmica líquida de origen vegetal especialmente formulada para incorporarse en el agua a través del sistema de riego.	15	7	8	6,48 €	www.atlanticaagricola.com
12	MIGON SUPER (BAYER)	Corrector de suelos a base de ácidos húmicos y fúlvicos, con un alto contenido en materia orgánica, utilizable en aquellos casos en que se requiera aumentar la fertilidad e inducir a un mejor aprovechamiento de los recursos del suelo.	15	9	6	4,22 €	www.bayercropscience.com
13	HUMBEL (PROBELTE)	Formulado líquido completamente soluble que contiene ácidos húmicos y fúlvicos para mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15	10	5	2,10 €	www.probelte.es
14	CARBOTECNIA HÚMICO (CARBOTECNIA)	Enmienda húmica que mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Favorece el desarrollo radicular y el crecimiento equilibrado de la planta. Evita la retrogradación y lixiviación de los cationes del suelo.	15	12	3	1,99 €	www.carbotecnia.es
15	AHULUQ SM (LUQSA)	Aportador de materia orgánica en forma de ácidos húmicos, para favorecer el crecimiento más equilibrado y rápido de las plantas.	15	12,4	2,6	2,62 €	www.luqsa.es
16	HUMISAR (SARABIA)	Su función es la de ser estimulante de un gran número de procesos biológicos	15	12,4	2,6	1,97 €	www.exclusivassarabia.com
17	PLANTA VERDE HL (MANCHAVERDE)	Producto extractado, concentrado, enriquecido y estabilizado, procedente de las deyecciones de las lombrices	15	12,4	2,6	1,70 €	www.plantaverde.com
18	LEONAR 15 (HEROGRA)	Es una enmienda húmica a base de ácidos húmicos y fúlvicos provenientes de leonardita altamente humificada y de alta calidad.	15	10	5	3,82 €	www.herograespeciales.com
19	HUMISEL (HAIFA IBERICA)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15	11	4	1,78 €	www.haifa-group.com
20	HUMISOL USA EXTRA (ATENCIÓN AGROAMBIENTAL)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15	12	3	2,36 €	www.atencionagroambiental.es
21	HUMITEC (TRADECORP)	Procedentes de Leonardita americana natural.	15	12	3	2,40 €	www.tradecorp.es

22	IBER – HUMUS (GRUPO AGROTECNOLOGÍA)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15	13	2	1,68 €	www.agrotecnologia.net
23	URBANO HUMUS (MEDIFER)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15	12	3	0,72 €	www.medifer.es
24	WELGRO HUMUS (C.Q. MASSÓ)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15	12	3	9,55 €	www.massogro.com
25	AGRO HUMIC (AGROSANTARIO)	Procedente de Leonardita Americana.	15	13,5	1,5	2,15 €	www.agrosantario.com
26	CODABOOSTER (SAS)	Mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo gracias a la naturaleza estable y coloidal de los ácidos húmicos.	15	12	3	1,72 €	www.sas-agri.com
27	HUMISTAR SAPEC (SAPEC)	Se aplica al suelo con el agua de riego, pudiendo ser mezclado con abonos solubles. También puede ser empleado como aditivo con abonos foliares y como potenciador del efecto de los quelatos.	15	12	3	8,05 €	www.sapecagro.es
28	CODAGUMUS (SAS)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	15,1	7,5	7,6	5,40 €	www.sas-agri.com
29	HUMESINT (MORERA)	Provee al suelo de los ácidos húmicos y fúlvicos (provenientes de Leonardita) necesarios para la formación del complejo húmico-arcilloso, mejorando las cualidades físicas y químicas de los suelos sobreexplotados o pobres en materia orgánica.	15,2	11,4	4,2	4,10 €	www.morera.com
30	HUMIGEN 3G (ATENS)	Enmienda húmica líquida procedente de lignito.	16	12	4	3,68 €	www.atens.es
31	LABIN HUMIC (LABIN)	Concentrado líquido de sustancias húmicas en forma de sales potásicas de ácidos húmicos y fúlvicos, procedente de las mejores leonarditas (lignitos con muy alto contenido en sustancias húmicas).	16	8	8	2,08 €	www.macasa.es
32	HUMISTAR 8/8 (SAPEC)	Mejorante del suelo en forma de líquido soluble que contiene ácidos húmicos y fúlvicos obtenidos a partir de Leonardita Americana.	16	8	8	3,30 €	www.sapecagro.es
33	NATURVITAL 16 (DAYMSA)	Indicado para: mejorar la estructura del suelo, la eficacia de los abonos minerales y corregir la mineralización y salinización del suelo.	16	9	7	3,20 €	www.daymsa.com
34	SOLEM HUMUS (SOLEM)	Su empleo mejora las características fisicoquímicas y biológicas del suelo, su estructura y capacidad de intercambio catiónico y la vida microbiana.	16	10	6	0,63 €	www.quimicassolem.com
35	RADISOL HUMIC (CODIAGRO)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	16	12	4	1,17 €	www.codiagro.com
36	HUMILING 8/8 (JISA)	Enmienda húmica líquida procedente de lignitos altamente humificados.	16	8	8	0,92 €	www.jisa.es
37	HUMILING 25 PLUS (JISA)	Enmienda húmica líquida procedente de lignitos altamente humificados.	25	10	15	2,15 €	www.jisa.es
38	TERRACAN (PLYMAG)	Enmienda orgánica líquida, mejoradora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.	16	9	7	5,18 €	www.plymag.com
39	AZABACHE HUMIC (ANTONIO TARAZONA)	Corrector que potencia las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos a partir de un ácido molecular húmico y fúlvico activo procedente de la Leonardita.	16	9	7	2,10 €	www.antoniotarazona.com
40	NATURVITAL BORO (DAYMSA)	Ayuda en la floración y en el cuajado, mejora la estructura del suelo y la eficacia de los abonos minerales.	16	9	7	3,30 €	www.daymsa.com
41	H 1 HUMICROM (AGROMED)	Mejora la estructura del suelo, potencia la actividad nutricional del suelo y aumenta la actividad de microorganismos del suelo.	17	14	3	4,30 €	www.agromed.net
42	HUMINOVA 2000 (AGROIN)	Enmienda húmica líquida de alta concentración procedente de Leonardita activada. Es un producto estabilizado y multifiltrado, 100% soluble y asimilable por todo tipo de cultivos.	20	10	10	2,60 €	www.agroin.es

43	AMINOFUVAT (HEROGRA)	Se trata de una enmienda húmica líquida de origen exclusivamente vegetal, enriquecida con aminoácidos y conteniendo nutrientes y microelementos, totalmente asimilables por las plantas.	25	0	25	4,10 €	www.herograespeciales.com
44	NATURVITAL PLUS (DAYMSA)	Ayuda en la floración y en el cuajado, mejora la estructura del suelo y la eficacia de los abonos minerales.	20	10	10	4,40 €	www.daymsa.com
45	SPLENDOR-F (AGROSERNA)	Mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.	21	0	21	2,40 €	www.agroserna.com
46	HEROFULVAT (HEROGRA)	Se trata de una enmienda fúlvica líquida de origen exclusivamente vegetal, conteniendo nutrientes y microelementos, totalmente asimilables por las plantas.	22	0	22	3,72 €	www.herograespeciales.com

Para determinar el valor equivalente de nuestras muestras en el mercado se ha realizado un análisis estadístico descriptivo. Utilizando el programa IBM SPSS Statistics 23. La variable analizada ha sido el precio por unidad de sustancia húmica, obtenido al referenciar el precio de venta al público al porcentaje de sustancias húmicas contenida en el producto. El valor medio de esta variable nos permitirá posteriormente establecer el precio de mercado de nuestro producto, multiplicando dicho valor por el porcentaje de sustancias húmicas que tienen nuestras muestras. Según la estimación realizada el precio medio obtenido ha sido de 0,02€ por gramo de sustancia húmica, esto es cada gramo de sustancia húmica equivale a 20 céntimos de euro en los productos húmicos comerciales. Parece claro que las sustancias húmicas contenidas en recursos orgánicos no específicos están diluidas en una gran masa de materia orgánica, por lo que el valor no puede ser equivalente pero si consideremos que lo son los beneficios generales que sobre el suelo enmendado se ejercen. Por tanto, en un paralelismo entre una mina de oro en Alaska y un lingote refinado de oro, el principio activo es el mismo (oro-sustancias húmicas) pero la concentración es diferente (en la superficie extractiva esta disperso el oro del mismo modo que lo están las SHs en una tonelada de compost por ejemplo), pero los beneficios y funcionalidades de las SHs se encuentran mejor repartidas en una enmienda que en una adición puntual de fertirrigación. El valor equivalente se podría ponderar mediante un factor diferencial entre SHs concentradas y dispersas pero lo que es indiscutible es la oportunidad y el valor económico de lo contenido en las enmiendas orgánicas ya sea a nivel de nutrientes primarios, N-P₂O₅-K₂O como ya establecieron Jara-Samaniego (2016) sino también el valor asociado a la presencia de SHs.

3.3. Métodos analíticos

En las muestras consideradas se analizaron los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	TÉCNICA
Materia orgánica total (MOT)	Pérdida de peso por calcinación a 430° C (Navarro <i>et al.</i> , 1993).
Carbono orgánico total (C _{OT}) y Nitrógeno total (N _T)	Combustión a 1020° C y posterior detección en analizador elemental.
Carbono total extraíble	Extracción y posterior determinación en analizador de C (Cegarra <i>et al.</i> , 1974).
Fraccionamiento del carbono de los ácidos húmicos y fúlvicos	Precipitación de los ácidos húmicos a pH 2 en el extracto de hidróxido sódico (Cegarra, 1978) y posterior determinación en analizador de C.

Toma y preparación de la muestra

Muestras tipo A:

El muestreo se realizó en distintos puntos de la pila de compostaje en el caso de los compost a tiempo inicial y una vez completado el proceso de compostaje. Posteriormente se someten en el laboratorio a una serie de operaciones previas que las acondicionan para su análisis: secado, molido, homogeneizado y conservación.

Muestras tipo B:

En el caso de las otras muestras (grupo B: estiércoles, sustratos, humus de lombriz, compost y sustancias húmicas comerciales) se cogieron los productos finales que en algunos casos eran los productos comerciales.

a) Secado

La muestra se extiende en bandeja de plástico o de un material inerte para proceder al secado. Dependiendo de la humedad inicial del residuo, éste se seca al aire o se somete al secado en estufa de aire forzado a 60°C.

b) Molido y homogeneizado

Una vez seco el residuo, se procede a su molido mediante un molinillo eléctrico provisto de aspas metálicas, usando la cantidad necesaria para que se realice una óptima

molienda y evitando un calentamiento excesivo del molinillo. Las diferentes porciones de residuo molido, se vuelven a secar a 105°C durante hasta peso constante, y se vierten en un recipiente de plástico o de material inerte, donde se mezclan y homogenizan.

c) Conservación

Las muestras homogeneizadas se conservan en recipientes de polietileno o polipropileno provistos de cierre hermético, debidamente identificados para comprobaciones posteriores.

A continuación se describen cada una de las técnicas empleadas:

Materia orgánica total (MOT)

En las muestras analizadas tanto del grupo A como del B, se toma como “materia orgánica” la pérdida de peso por calcinación a 430°C. Se determina según el método de Navarro *et al.*, (1993). La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca.

Carbono orgánico total (C_{OT}) y Nitrógeno total (N_T)

Medida del CO₂ y Nitrógeno producido al quemar la muestra a 1020°C en un analizador elemental (EuroVector Elemental Analyser, Milan, Italy).

Procedimiento

Se pesan 1-2 mg de muestra seca (finamente molida en mortero de ágata) en una cápsula de estaño con una precisión de 0,001 mg, posteriormente se cierra la capsula con cuidado de no perder nada de muestra. Se procede al análisis una vez calibrado el analizador con patrón atropina.

Carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas

Extracción de la muestra con hidróxido sódico (Cegarra *et al.*, 1974) y determinación del carbono extraído en un analizador de muestras líquidas TOC-VCSN (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).

Reactivo

Hidróxido sódico 0,1 M.

Procedimiento

Se realiza una extracción con NaOH 0,1 M en la proporción 1:30 (p/v). Se agita mecánicamente durante 4 horas y se centrifuga. El líquido sobrenadante se pasa a través de una malla de fibra sintética, para eliminar las partículas sólidas que pudieran quedar flotando. Posteriormente, el sobrenadante es filtrado a través de filtros de tamaño de poro 0,45 mcm (PET 45/25), previamente a la medida en el TOC-VCSN.

Fraccionamiento del carbono de ácidos húmicos y fúlvicos

Precipitación de los ácidos húmicos a pH 2 en el extracto de hidróxido sódico (Cegarra, 1978).

Reactivos

Ácido sulfúrico 6 N.

Procedimiento

Para extraer las sustancias húmicas, las muestras eran tratadas con 0.1 M NaOH en proporción 1:30 sólido/líquido y se agitaban durante 4 h (García *et al.*, 1993). Después se centrifugan y el sobrenadante se divide en dos fracciones, una de ellas se utilizaba para su análisis de C_{ex} (fracción carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas), y la otra se ajustaba a pH 2 mediante la adición de H_2SO_4 5 M. La fracción de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas se obtiene del líquido sobrenadante tras pasarlo por una malla de fibra sintética, para eliminar las partículas sólidas que pudieran quedar flotando. Al líquido se le hace una dilución 1/100 y se filtra con filtros de jeringa de poliéster de tamaño de poro 0.45 mcm (PET 45/25).

El extracto filtrado se mide en analizador TOC/TN previa calibración. A pH 2 la fracción de ácidos húmicos (C_{ah}) precipita. Los ácidos fúlvicos (C_{af}) son solubles a dicho pH. Para ayudar a la precipitación de los ácidos húmicos se dejan en reposo

durante 24 h a 4°C. Los ácidos fúlvicos disueltos eran separados por centrifugación, como el anterior, y se almacena para el análisis del carbono. La concentración de carbono presente en la fracción de ácidos húmicos (C_{ah}) se calcula restando el carbono de la fracción de ácidos fúlvicos (C_{af}) a partir de la fracción de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}). El carbono fue determinado usando el aparato (TOC-VCSN, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).

Una vez obtenido el extracto con hidróxido sódico, se adiciona H_2SO_4 6N hasta pH 2. Se deja en reposo a 4°C durante 24 horas, para conseguir una completa precipitación de los ácidos húmicos. Éstos se separan del líquido sobrenadante, ácidos fúlvicos, por decantación y posterior centrifugación. El líquido resultante se pasa a través de una malla de fibra sintética. En los ácidos fúlvicos se determina el carbono como se hace con el carbono extraíble. El carbono de los ácidos húmicos (C_{ah}), su calcula por diferencia del carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}) y el carbono de ácidos fúlvicos (C_{af}). El resultado se expresa en porcentaje.

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

3.4. Métodos estadísticos

A nivel estadístico, en este trabajo fin de grado se han realizado diferentes estudios estadísticos para poder obtener conclusiones de los datos disponibles.

Una de las principales cuestiones es *determinar el efecto que el proceso de compostaje ejerce sobre la materia orgánica residual a nivel de estabilización de materia orgánica*, contenidos de C orgánico total, N total, así como de las sustancias que denominados húmicas. Para ello se ha realizado en primer lugar un análisis descriptivo de la naturaleza de las muestras mediante histogramas de frecuencia, valores promedio, medias y medianas con el fin de describir la naturaleza de las muestras en función del si la mezcla compostante está en fase inicial (recién constituida la pila de co-compostaje) o si el material orgánico que constituye la pila ha finalizado el proceso de compostaje (ha superado toda la fase biooxidativa y también el periodo de madurez de 45 días adicionales).

Una vez realizado este análisis descriptivo, se procedió a realizar un análisis estadístico ANOVA de una sola vía donde se clasificaron las muestras procedentes de cada compostaje CIG, muestras A (**Tabla 1**), se agruparon entre muestras iniciales y muestras maduras. En el caso de obtener diferencias significativas, se le aplica un contraste post-hoc de Tukey-b que nos sirve para establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas en función de la tipología o momento del proceso de compostaje.

Con posterioridad y teniendo en cuenta que en el proceso de co-compostaje binario existen dos tipos de ingredientes fundamentales: 1: ingrediente fuente de nitrógeno, con una relación C/N baja usualmente rico en nitrógeno y 2: ingrediente estructurante, usualmente ligno-celulosico leñoso de baja densidad que favorece el flujo de fluidos en la pila de compostaje, procedimos a categorizar los diferentes ingredientes tipo 1 y 2 en cada uno de los procesos de compostaje, usando las siguientes claves:

Tabla 6. Clave estadística para el ingrediente 1.

INGREDIENTE 1	CLAVE ESTADÍSTICA
EDAR1	1
EDAR2	2
EDAR3	3
EDAR4	4
EDARI1	5
EDARI2	6
EDARI3	7
EDARI4	8
EDARI5	9
Resto Poda EPSO	10

Tabla 7. Clave estadística para el ingrediente 2.

INGREDIENTE 2	CLAVE ESTADÍSTICA
RESTO PODA EPSO	10
PODA MORERA	11
TRONCO PALMERA	12
HOJA PALMERA	13
CAÑA RÍO	14
ALGODÓN	15
TIPUANA	16

Una vez categorizados, se realizó un análisis estadístico ANOVA de una sola vía donde se usó como variable independiente la naturaleza del ingrediente 1 o agente rico en N, obteniéndose 10 grupos de clasificación (**Tabla 6**). En el caso de obtener diferencias significativas, se le aplica un contraste post-hoc de Tukey-b que nos sirve para establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas en función de la tipología del ingrediente tipo 1, sin considerar su participación cuantitativa, solo cualitativa.

De forma similar se procedió para el ingrediente tipo 2 o estructurante, con un análisis estadístico ANOVA, obteniéndose 6 grupos de clasificación (**Tabla 7**). En el caso de obtener diferencias significativas, se le aplica un contraste post-hoc de Tukey-b que nos sirve para establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas en función de la tipología del ingrediente tipo 2, sin considerar su participación cuantitativa, solo cualitativa.

Con los recursos orgánicos comerciales (**Tabla 4**), se realizó un análisis similar, categorizando las 20 muestras seleccionadas y muestreadas en 5 grupos de clasificación (**Tabla 3**). De nuevo se realiza un análisis estadístico ANOVA, y un contraste post-hoc de Tukey-b que nos sirve para establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas en función del grupo de clasificación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1. Efecto del compostaje en la evolución de la fracción orgánica

En las **Figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14** se muestran los parámetros e índices de evolución de la materia orgánica, mediante histogramas de frecuencia, se ha representado tanto las muestras iniciales (antes del proceso de compostaje) y las muestras maduras (ya compostadas) mostrando la frecuencia de distribución de los rangos típicos de cada parámetro indicando el valor medio y la desviación estándar.

Los parámetros representados son la humedad, materia orgánica total, cenizas, pérdida de materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total, relación C/N, carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, carbono de los ácidos fúlvicos así como el carbono de los ácidos húmicos. Y los índices de evolución de la materia orgánica estudiados son: relación de humificación (carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas/carbono orgánico total), índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total), porcentaje de ácidos húmicos (carbono de los ácidos húmicos/carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas) y relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos).

En la **Tabla 8**, se resumen los efectos observados en función del momento del compostaje (inicial vs final) que tiene sobre los parámetros e índices de evolución de la materia orgánica y por tanto nos muestra de forma integrada el efecto general observado para los 35 procesos de compostaje estudiados.

Tabla 8. Cambios en los parámetros e índices en el proceso de compostaje.

PARÁMETRO/ÍNDICE	INICIAL	FINAL	INCREMENTO
HUMEDAD (%)	62,6	54,2	-13,4
MATERIA ORGÁNICA TOTAL (%)	73,1	57,5	-21,3
CENIZAS (%)	26,9	42,3	57,2
PÉRDIDA DE MATERIA ORGÁNICA (%)	-	51,9	-
CARBONO ORGÁNICO TOTAL (%)	37,4	30	-19,8
NITRÓGENO TOTAL (%)	2,15	2,69	25,1
RELACIÓN C/N	18,3	11,3	-38,3
CARBONO ASOCIADO A LAS SUSTANCIAS HÚMICAS (%)	9,48	5,48	-42,2
CARBONO DE LOS ÁCIDOS FÚLVICOS (%)	4,17	1,92	-54,0
CARBONO DE LOS ÁCIDOS HÚMICOS (%)	5,31	3,56	-33,0
RELACIÓN DE HUMIFICACIÓN	25,9	18,9	-27,0
ÍNDICE DE HUMIFICACIÓN	14,9	12,5	-16,1
PORCENTAJE DE ÁCIDOS HÚMICOS	56,8	64,0	12,7
RELACIÓN DE POLIMERIZACIÓN	1,43	1,96	37,1

Para un adecuado desarrollo del proceso de compostaje es necesario garantizar que las condiciones de operación se mantengan en los intervalos óptimos, ya que de otro modo no podría alcanzarse el rendimiento deseado en el proceso ni la calidad en el compost final. Al ser el compostaje un proceso biológico, las condiciones de operación óptimas son aquellas que permiten el adecuado desarrollo de los microorganismos implicados en el compostaje, estando la dinámica del proceso condicionada por la evolución de la población microbiana, las condiciones óptimas para que ésta se desarrolle y el grado de transformación de la materia conseguido.

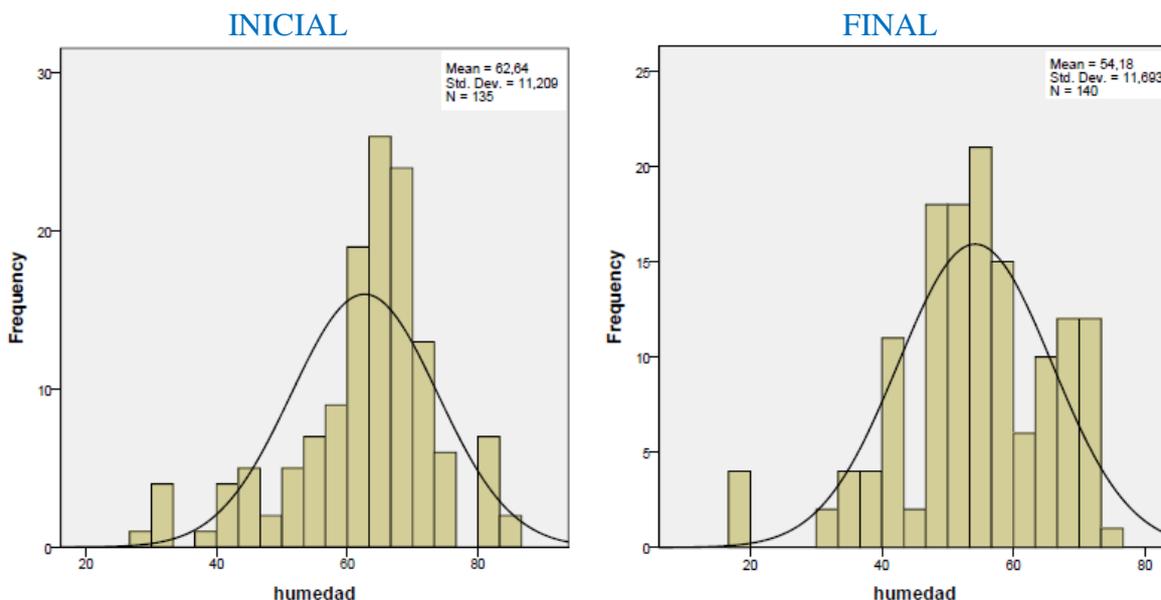


Figura 1. Histograma de frecuencia comparativo de la humedad inicial y final de los compost (Grupo A).

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso (Bueno *et al.*, 2008). El método más común para controlar la humedad en procesos de compostaje es la adición directa de agua, como ha sido en nuestro caso. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la adición de agua enfría la pila debido a la evaporación y en algunos casos la adición directa pueda modificar la estructura del compost, reduciendo su porosidad y evitando por tanto que el proceso de compostaje se dé adecuadamente (China *et al.*, 2015).

En la **Figura 1**, vemos la evolución de la humedad en el proceso de compostaje, siguiendo el óptimo indicado para la humedad entre el 50-70% para conseguir el óptimo crecimiento microbiano. También vemos que la humedad al final del proceso del compostaje es inferior que al inicio, por lo tanto podemos concluir que el proceso de compostaje trae consigo una reducción de la humedad (-13,4%).

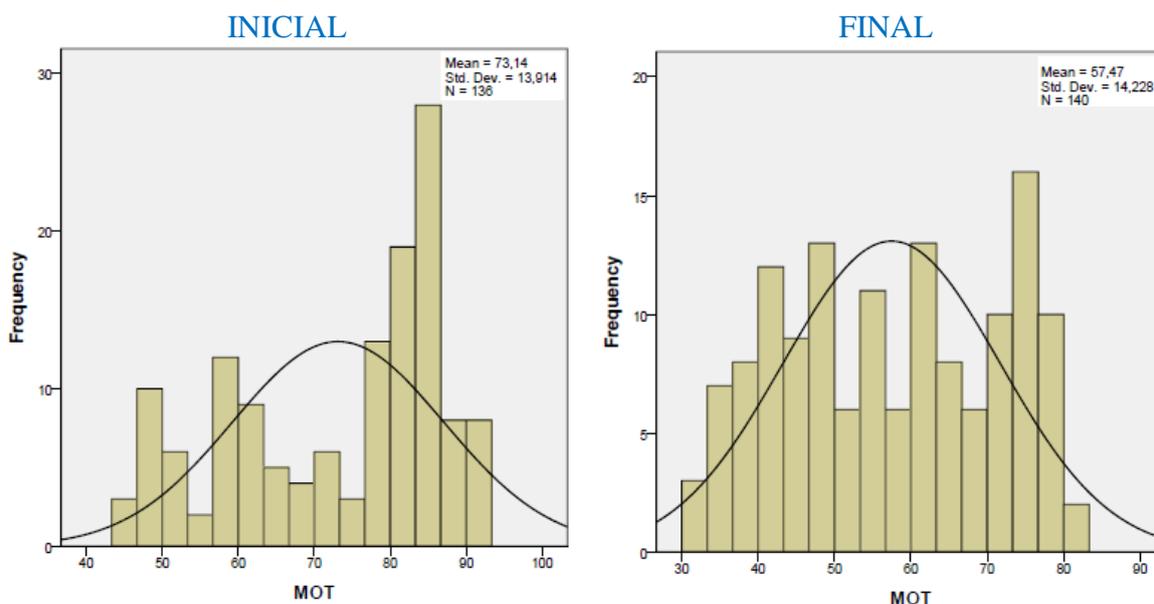


Figura 2. Histograma de frecuencia comparativo de la materia orgánica total inicial y final de los compost (Grupo A).

En la **Figura 2**, vemos la evolución de la materia orgánica total en el proceso de compostaje, teniendo también un comportamiento decreciente entre el contenido inicial y el final. Se ha producido un descenso significativo (-21,3%) en el contenido de materia orgánica total debido a su parcial transformación a materiales biodegradables y su degradación final hasta CO₂, quedando únicamente los compuestos más recalcitrantes y la materia orgánica estabilizada.

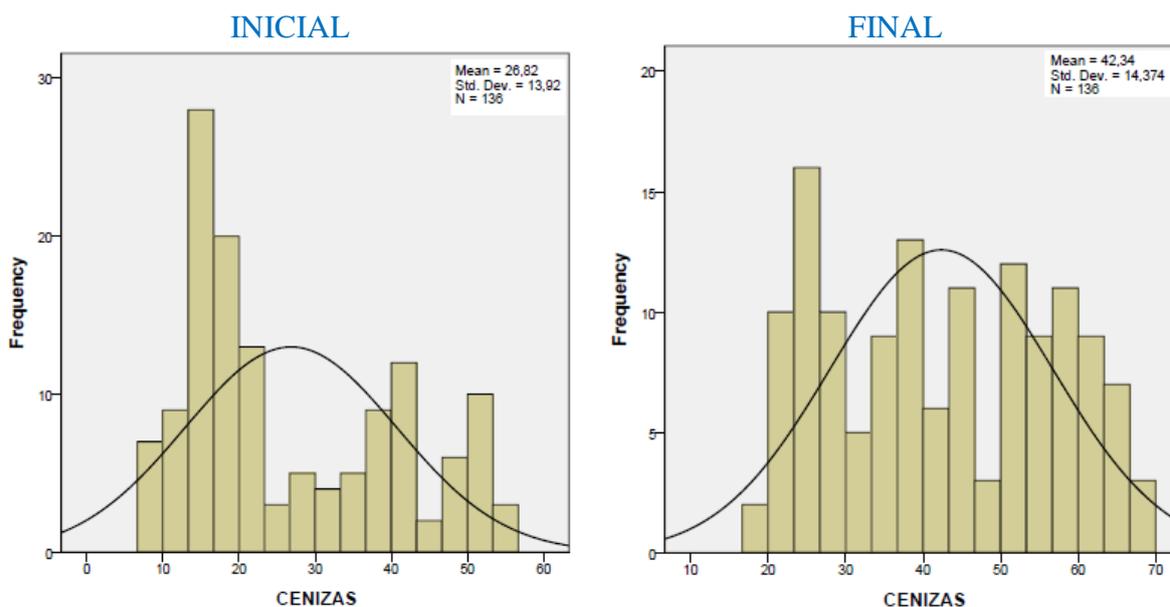


Figura 3. Histograma de frecuencia comparativo en cenizas inicial y final de los compost (Grupo A).

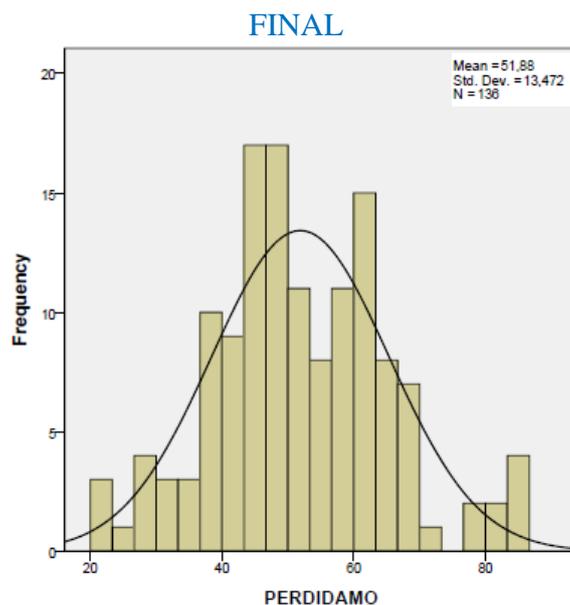


Figura 4. Histograma de frecuencia en pérdida de materia orgánica final de los compost (Grupo A).

En las **Figuras 3 y 4**, vemos la evolución tanto de las cenizas como de la pérdida de materia orgánica respectivamente, concluyendo que a medida que avanza el proceso de compostaje aumentan el porcentaje de cenizas (57,2%) debido a la pérdida de materia orgánica que sufren las pilas de nuestros compost, cabe mencionar que la pérdida de materia orgánica inicial sigue una distribución Gaussiana, coincidiendo los máximos de las frecuencias con el valor máximo de la campana de Gauss.

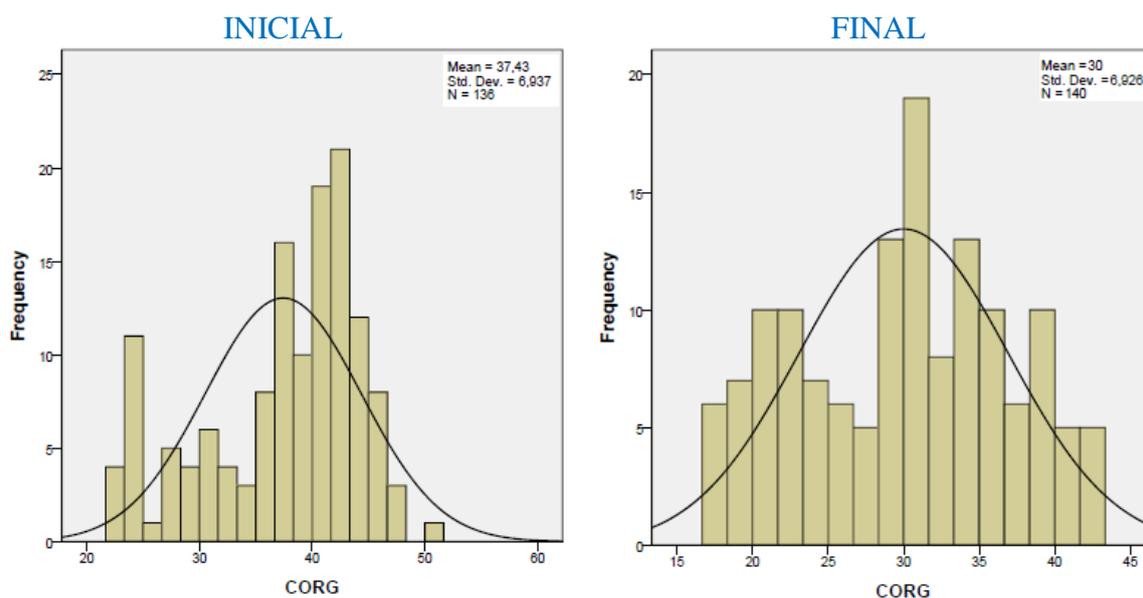


Figura 5. Histograma de frecuencia comparativo del carbono orgánico total inicial y final de los compost (Grupo A).

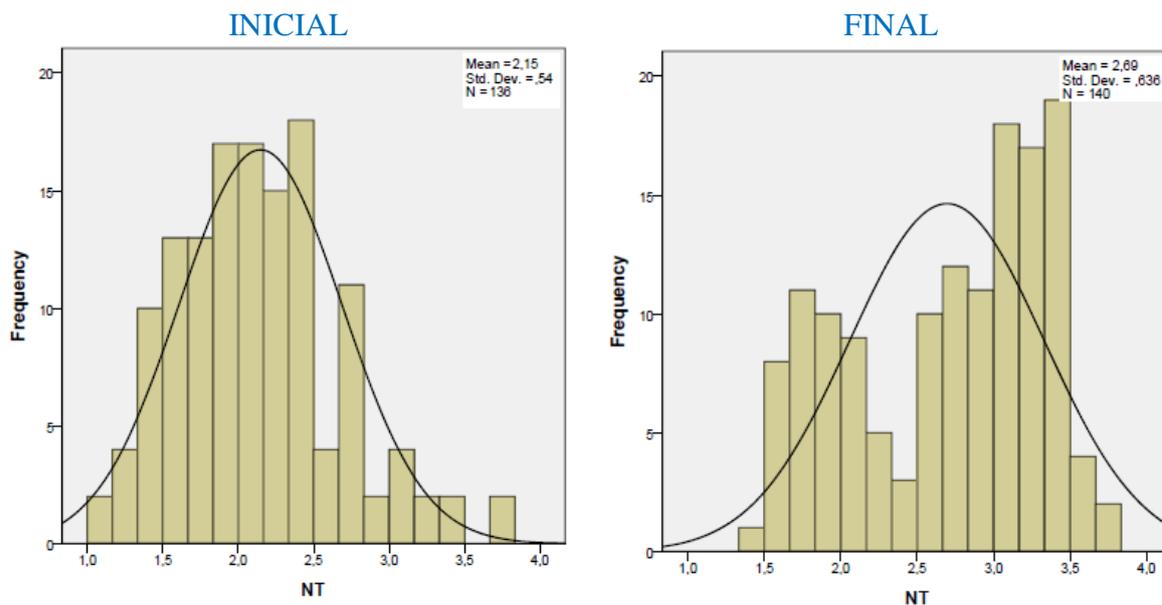


Figura 6. Histograma de frecuencia comparativo del nitrógeno total inicial y final de los compost (Grupo A).

La presencia en proporciones adecuadas de los nutrientes principales facilita el proceso biológico en el compostaje, pero además, la disponibilidad de elementos nutritivos en el compost final determinará su utilidad agronómica y especialmente su capacidad fertilizante. El carbono es el que debe presentarse en mayor cantidad ya que supone el 50% de las células de los microorganismos, y el 25% de dióxido de carbono que se desprende en la respiración. El nitrógeno es necesario junto con el carbono, para la formación de la pared celular y del protoplasma microbiano, además de condicionar la calidad como fertilizante del compost. En la **Figura 5**, vemos la evolución del carbono orgánico total en el proceso del compostaje, al igual que en la **Figura 6** vemos la evolución del nitrógeno, claramente se ve como el carbono orgánico total disminuye (-19,8%) a medida que se composte la pila, mientras que el nitrógeno total tiene el comportamiento inverso (25,1%). Cabe mencionar que el nitrógeno total inicial sigue una distribución Gaussiana, coincidiendo los máximos de las frecuencias con el valor máximo de la campana de Gauss.

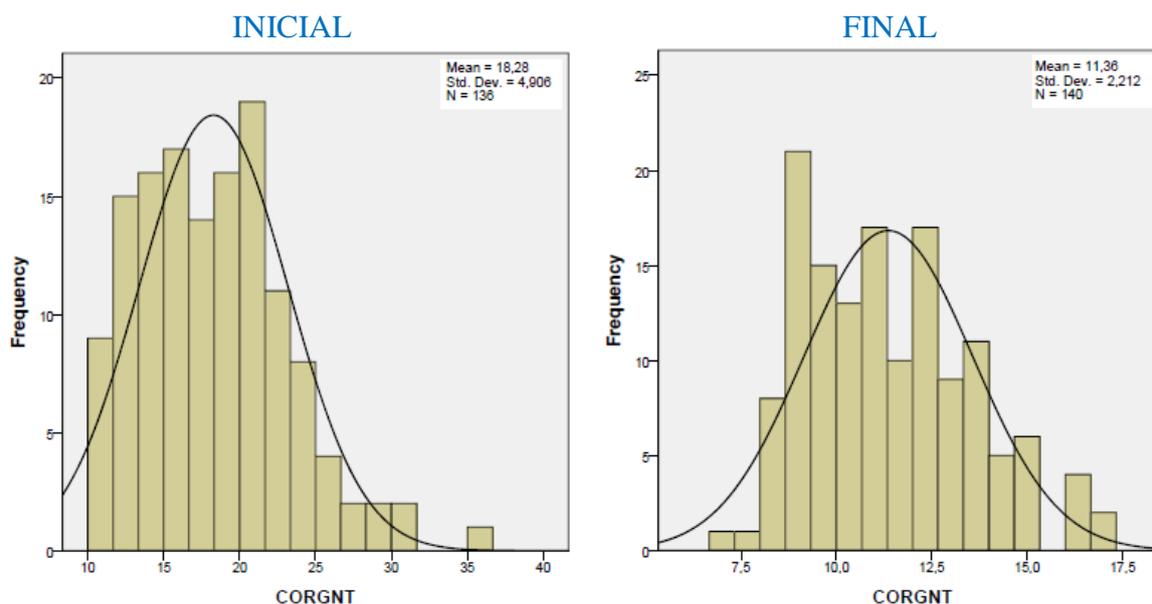


Figura 7. Histograma de frecuencia comparativo entre la relación carbono/nitrógeno inicial y final de los compost (Grupo A).

En la **Figura 7**, vemos que la relación C/N disminuye (-38,3) a medida que avanza el proceso de compostaje. La relación C/N en el compost es un indicador muy útil para evaluar el desarrollo y calidad de nuestro compostaje. Vemos que la relación C/N inicial sigue una distribución Gaussiana, coincidiendo los máximos de las frecuencias con el valor máximo de la campana de Gauss. Conforme avanza el proceso de compostaje la relación C/N va disminuyendo pues se va perdiendo carbono en forma de CO_2 , mientras que el nitrógeno contenido en la materia orgánica se oxida y se pierde en forma de óxidos gaseosos.

De cualquier modo, la relación óptima C/N varía en función del sustrato a compostar. Eso es debido a que no todas las formas de carbono ni de nitrógeno son biodegradables, especialmente las de carbono. Este hecho ha dado lugar a que algunos investigadores propongan la definición de nuevas relaciones basadas en las concentraciones de carbono y nitrógeno biodegradables o solubles (Bernal *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2014) en lugar de los clásicos carbono y nitrógeno totales (Moreno *et al.*, 2015).

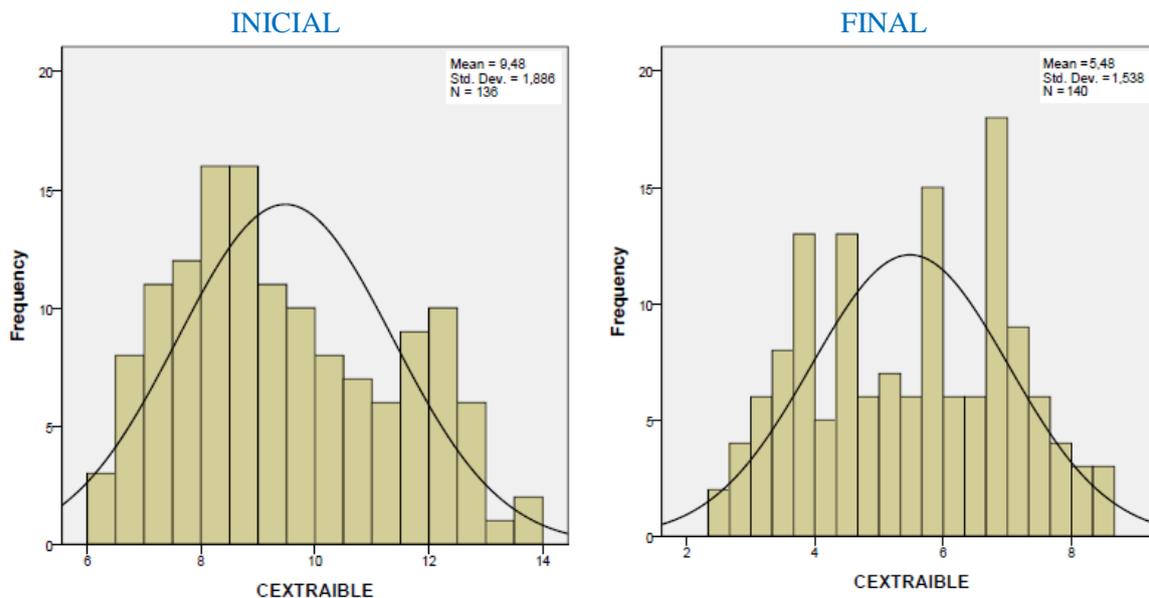


Figura 8. Histograma de frecuencia comparativo en carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas inicial y final de los compost (Grupo A).

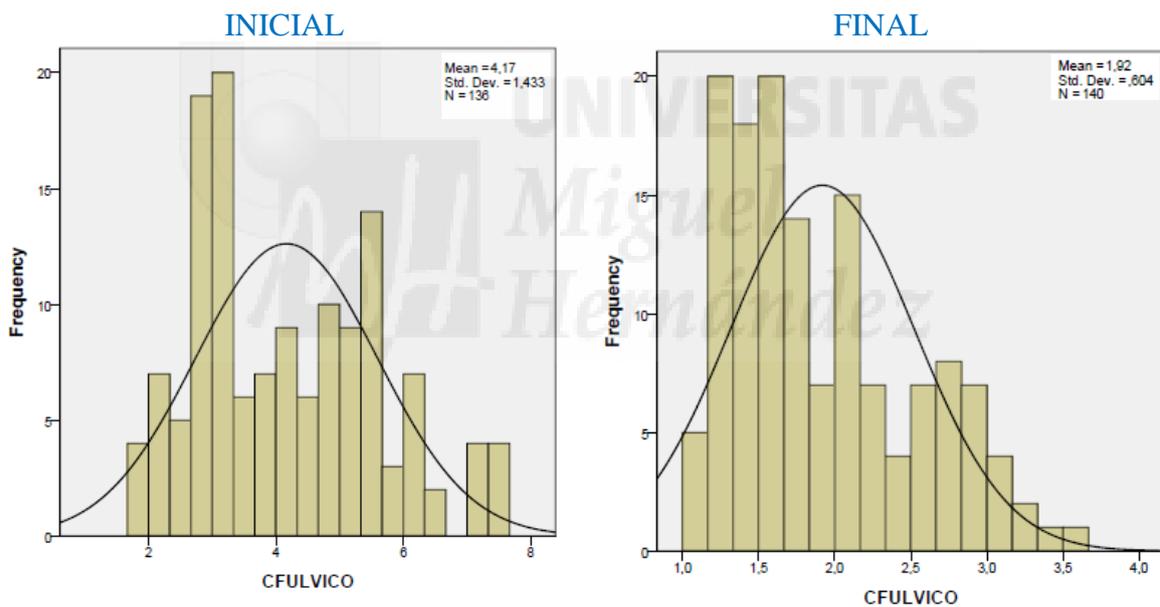


Figura 9. Histograma de frecuencia comparativo en carbono de los ácidos fúlvicos inicial y final de los compost (Grupo A).

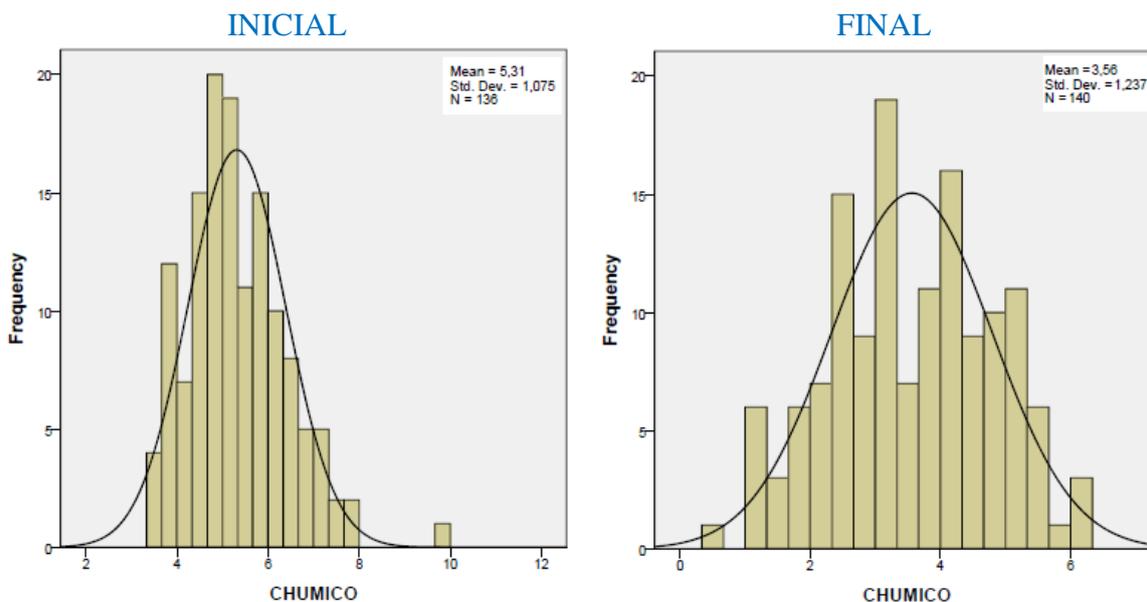


Figura 10. Histograma de frecuencia comparativo en carbono de los ácidos húmicos inicial y final de los compost (Grupo A).

En la **Figura 8, 9 y 10** vemos la evolución del carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, el carbono de los ácidos fúlvicos y el carbono de los ácidos húmicos respectivamente. En los tres casos vemos una disminución importante del contenido en sustancias húmicas, siendo del (-42,2%) para el carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, del (-54,0%) para el carbono de los ácidos fúlvicos y del (-33,0%) para el carbono de los ácidos húmicos.

Resulta contradictorio encontrar compuestos de naturaleza humificada al principio del proceso. Sin embargo, nuestros resultados coinciden con aquellos obtenidos por otros autores que han utilizado materias primas de similares características (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1992; Benito *et al.*, 2005).

Mediante el procedimiento de extracción y separación de sustancias húmicas se pueden estar extrayendo otros materiales que pueden interferir con la cuantificación del material humificado (Ciavatta *et al.*, 1990; Ciavatta y Govi, 1993), por lo que se estaría sobreestimando la cantidad de este tipo de compuestos en el material de partida.

Jara, Samaniego, 2016; en un estudio de caracterización en compost de residuos de vertederos, mercados y poda en Ecuador obtuvieron valores para el carbono de los

ácidos fúlvicos mayores que para el carbono de los ácidos húmicos en cinco de los seis compost realizados.

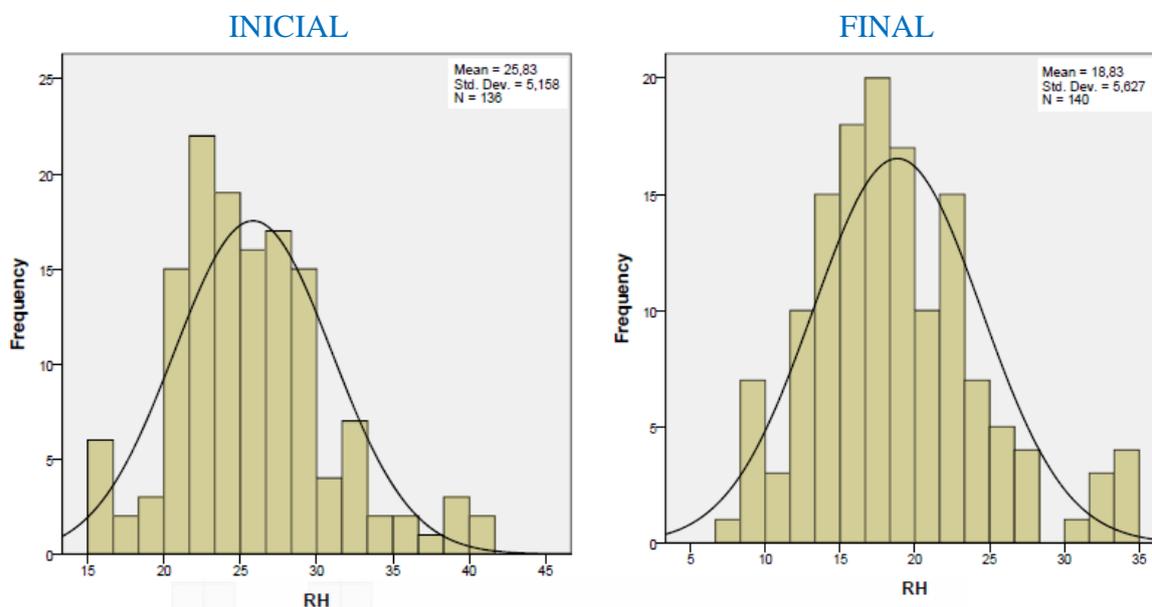


Figura 11. Histograma de frecuencia comparativo sobre la relación de humificación inicial y final de los compost (Grupo A).

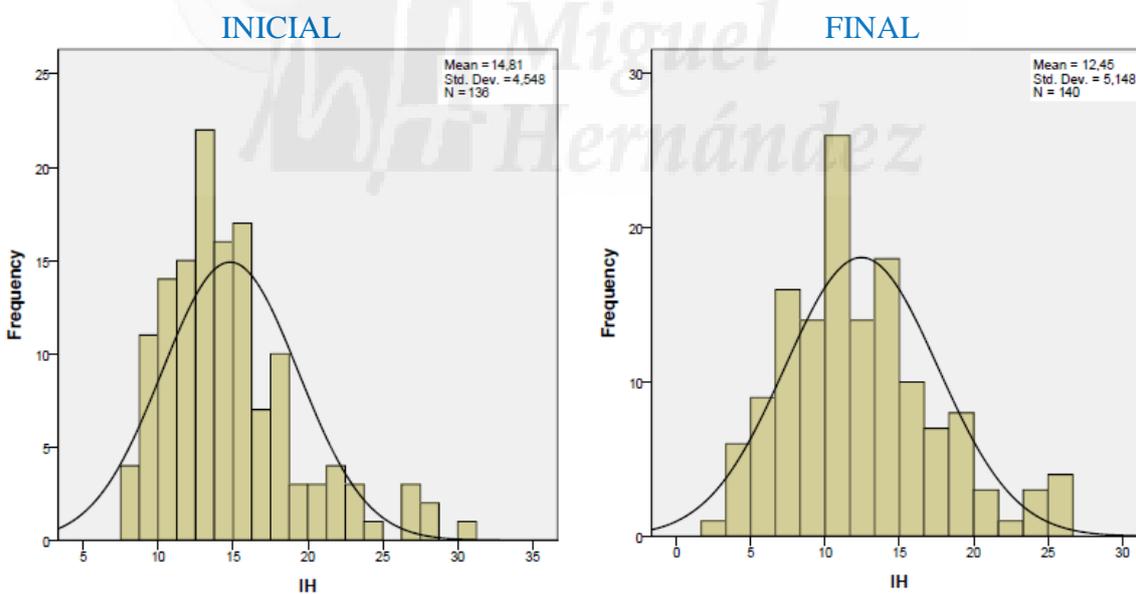


Figura 12. Histograma de frecuencia comparativo sobre el índice de humificación inicial y final de los compost (Grupo A).

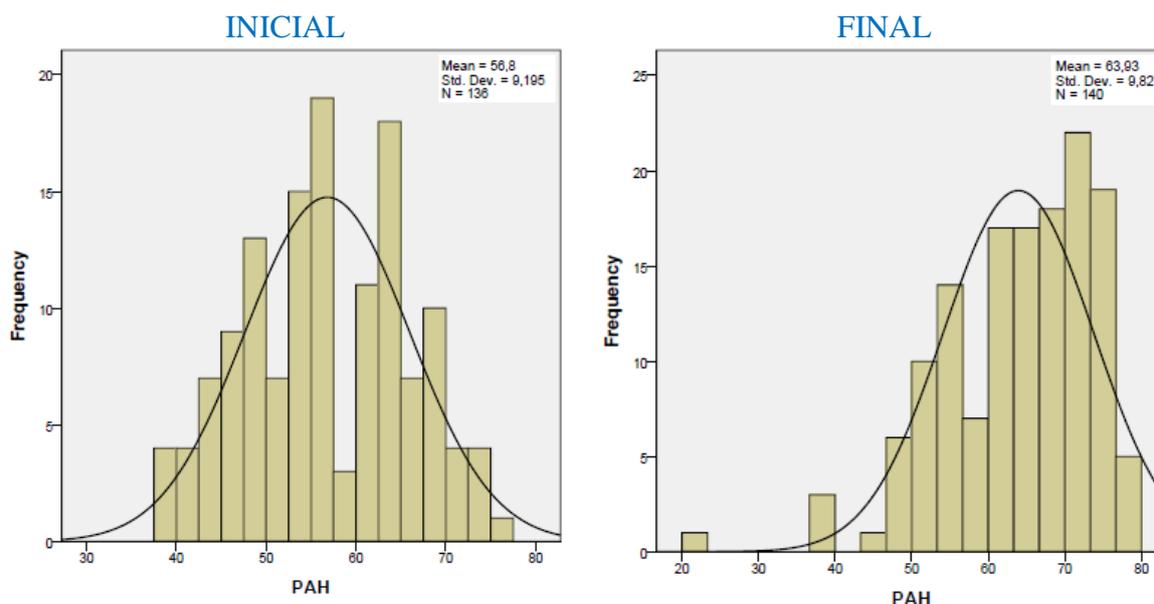


Figura 13. Histograma de frecuencia comparativo del porcentaje de ácidos húmicos inicial y final de los compost (Grupo A).

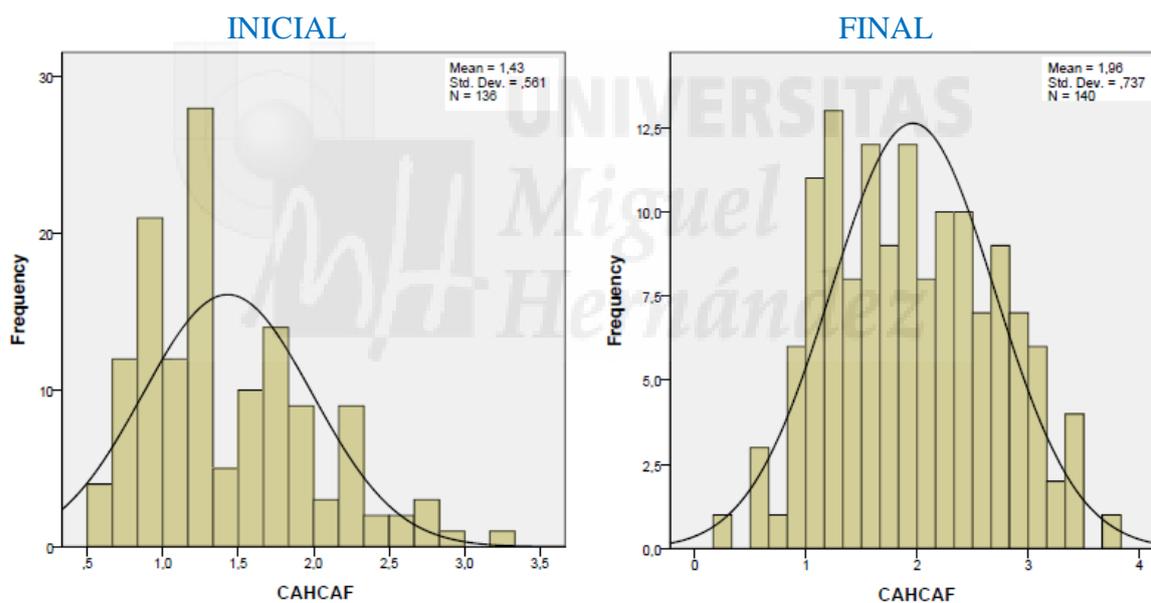


Figura 14. Histograma de frecuencia comparativo sobre la relación carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos inicial y final de los compost (Grupo A).

En las **Figuras 11, 12, 13 y 14**, vemos los índices de evolución de la materia orgánica estudiados: relación de humificación (carbono total extraíble/carbono orgánico total), índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total), porcentaje de ácidos húmicos (carbono de los ácidos húmicos/carbono total extraíble) y relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos) respectivamente.

Observamos que tanto en la relación de humificación como en el índice de humificación la evolución es negativa (-27,0) y (-16,1) respectivamente, es decir, hay una pérdida a lo largo del proceso de compostaje, mientras que para el porcentaje de los ácidos húmicos y la relación de polimerización esta evolución es positiva (12,7) y (37,1) respectivamente, es decir, aumentando según evoluciona el proceso de compostaje.

Según Moreno *et al.*, (2014), en su estudio de optimización del fraccionamiento de sustancias húmicas en muestras procedentes del compostaje de restos hortícolas, obtuvo un aumento significativo para todos los índices de evaluación de la materia orgánica, mientras que en nuestro caso solo se percibe un aumento en el porcentaje de ácidos húmicos y en la relación de polimerización.

No obstante, la utilidad de este tipo de parámetros indicadores depende, en gran parte, del tipo de materias primas que componen la mezcla original, de la calidad y características del propio proceso de compostaje así como el proceso de extracción y separación de los materiales considerados como humificados.

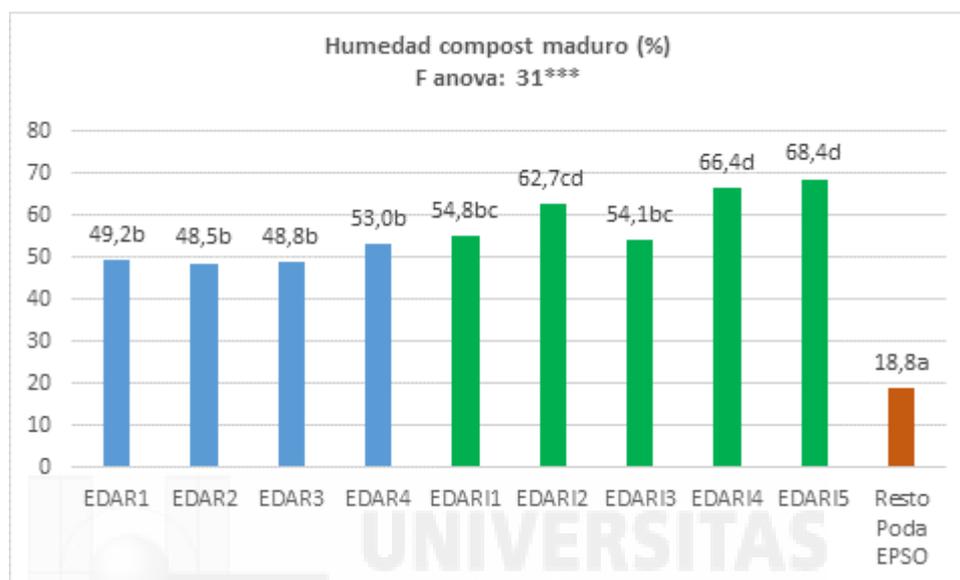
4.1.2. Contenido en parámetros relacionados con la materia orgánica y las sustancias húmicas en recursos orgánicos para los compost maduros en el grupo de materiales A (compost de distinta naturaleza)

A continuación, dentro de los materiales del grupo A (compost de distinta naturaleza), se ha hecho el estudio estadístico de la evolución de los parámetros de interés en función de los ingredientes empleados en la elaboración de los compost, clasificándolos en dos grupos:

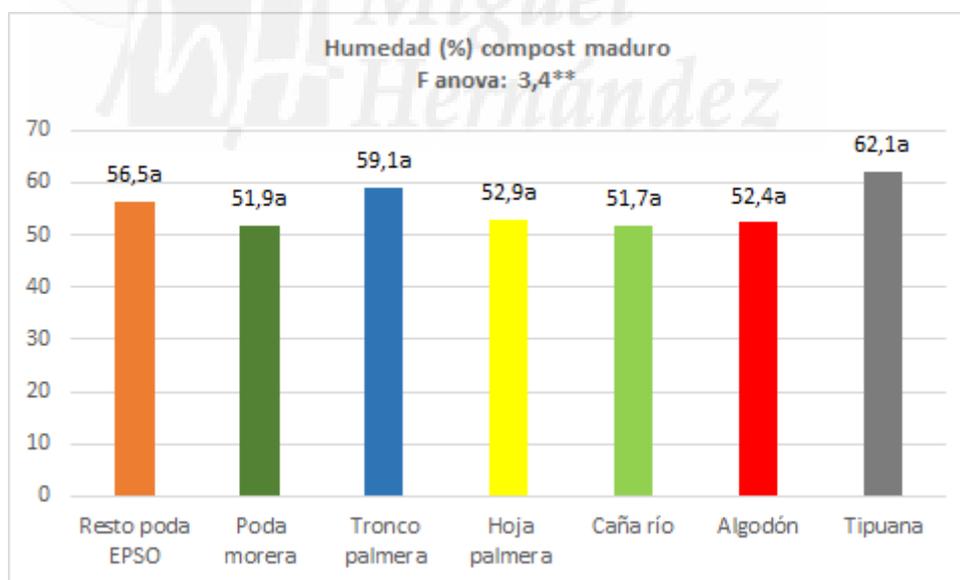
- *Para el ingrediente 1* se distingue entre los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR), lodos de depuradora de aguas residuales de la industria agroalimentaria (EDARI) y restos de poda EPSO (**Tabla 6**, Clave estadística para el ingrediente 1).
- Para el ingrediente 2, a su vez se distingue también según la especie vegetal estructurante utilizada (resto de poda EPSO, poda de morera, tronco de palmera,

hoja de palmera, caña de río, retos de algodón y tipuana). (Tabla 7, Clave estadística para el ingrediente 2).

4.1.2.1. Humedad (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 15. Comparación del contenido en humedad en el grupo A de materiales (compost maduros).

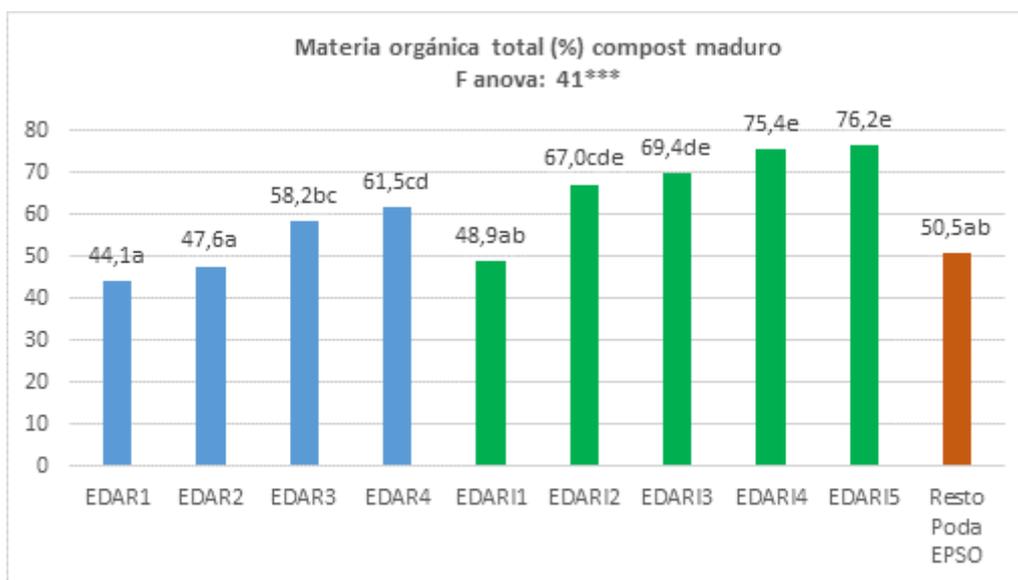
Algunos autores (Haug, 1993; Madejón *et al.*, 2002; Jeris *et al.*, 1973) consideran que la humedad de los materiales es la variable más importante en el compostaje y ha sido calificada como un importante criterio para la optimización del compostaje.

En la **Figura 15**, vemos el porcentaje de humedad en los compost en su fase madura. Primero vemos cómo afecta estadísticamente la influencia del ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) pudiendo decir que aquellos compost que tienen en su composición lodos EDARI poseen niveles más altos de humedad (54,8-68,4%) debido a que son de industrias agroalimentarias que emplean más agua en su procesado, frente aquellos compost que tienen lodos EDAR que presentan niveles de humedad más bajos (49,2-53,0%) debido al proceso de deshidratación que sufren en las estaciones depuradoras de aguas residuales y en último lugar está el compost que tiene restos de poda EPSO que es el que más bajo nivel de humedad tiene (18,8%) debido a que en su composición solo tiene ese ingrediente. Respecto al ingrediente 2 (*agente estructurante*) empleado en la elaboración del compost podemos observar que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las especies vegetales utilizadas.

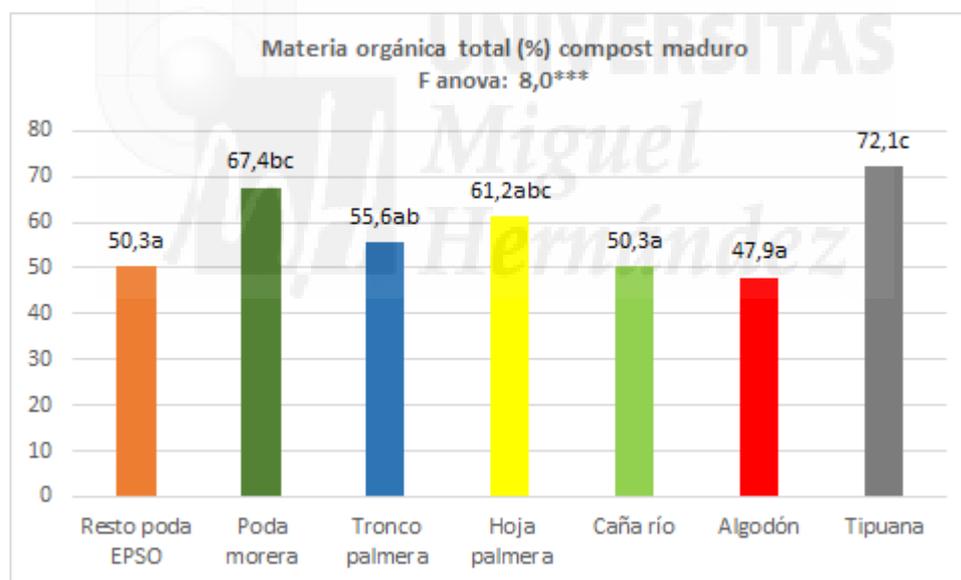
La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%, coincidiendo con los valores de nuestro estudio. La actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacio libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso.

El RD 506/2013 sobre productos fertilizantes, específica para enmiendas orgánicas (compost) un valor mínimo en humedad del 40% cumpliendo con este requisito todos los compost maduros estudiados.

4.1.2.2. Materia orgánica total (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 16. Comparación del contenido en materia orgánica total en el grupo A de materiales (compost maduro).

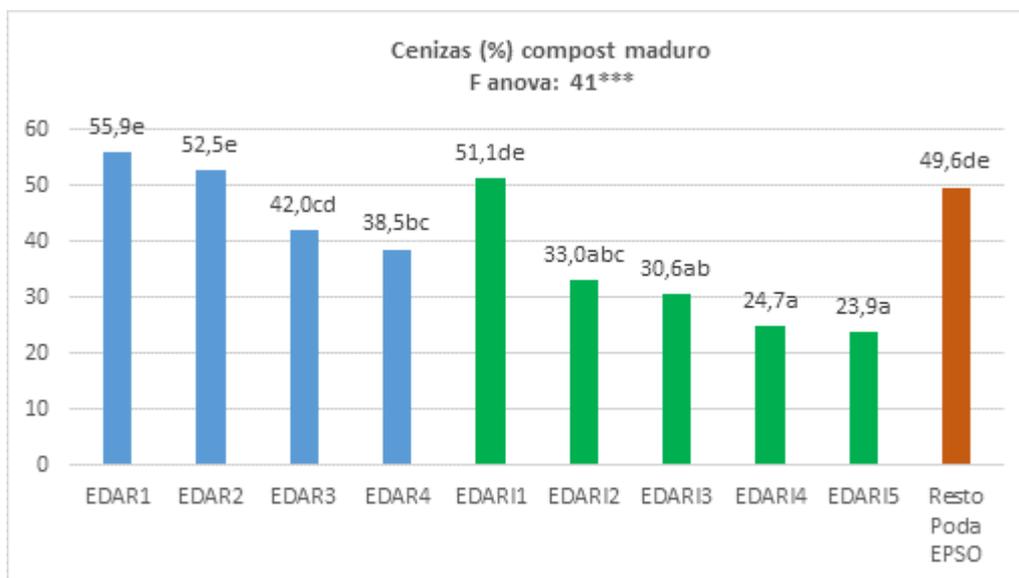
El estudio de la evolución de la materia orgánica total nos proporciona información acerca de los procesos que ocurren durante el compostaje y de la mayor o menor intensidad microbiana durante el progreso del mismo.

El porcentaje de materia orgánica total presente en el compost, es indicativo de la naturaleza, más o menos orgánica que tiene la pila. En teoría, la tasa de materia orgánica total debe ir descendiendo debido a la descomposición que ocurre en la etapa bio-oxidativa. El contenido final de materia orgánica total en el compost dependerá del valor inicial, de su degradabilidad y de la transformación que hayan sufrido sus componentes durante el proceso. Es un parámetro importante porque en el caso de aplicarse al suelo incide de forma global en todas sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) y en caso de utilizarse como sustrato la materia orgánica incidirá sobre sus propiedades físicas, siendo indispensable además conocer su estabilidad.

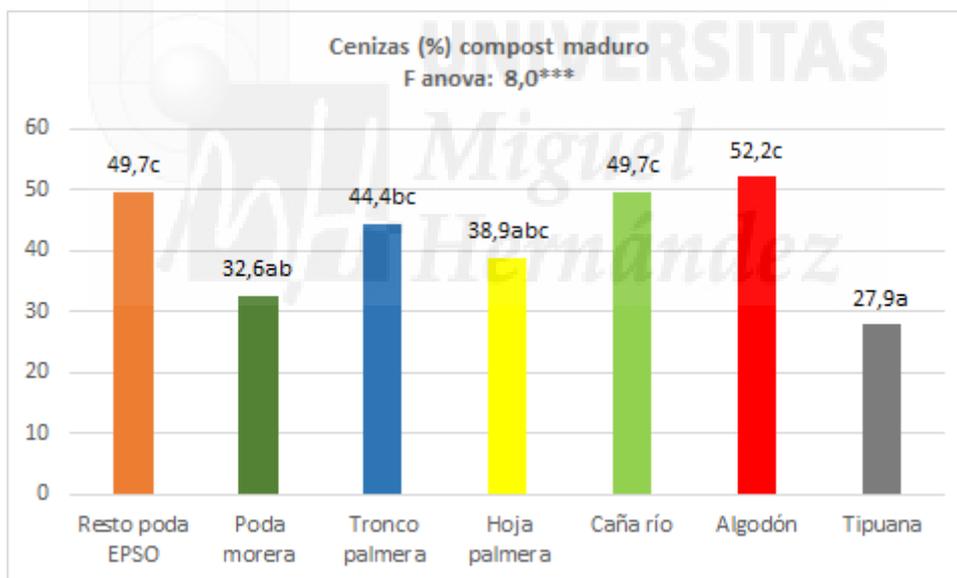
En la **Figura 16**, vemos que para el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) los valores más elevados de materia orgánica total los aporta los lodos EDARI 4 y 5 (75,4-76,2%), correspondiéndose a industrias del procesado de la fresa y al procesado de la industria de elaboración de postres y dulces con elevada carga de DQO y DBO. Por otro lado, los lodos EDAR 1 y 2 presentan los niveles más bajos de materia orgánica total (44,1-47,6%) del grupo. Así mismo para el ingrediente 2 (*agente estructurante*), destaca la tipuana como agente estructurante que aporta mayor nivel de materia orgánica total a los compost maduros (72,1%), frente a los restos de poda, caña de río y restos de algodón que poseen niveles de materia orgánica total en torno al 50%.

El RD 506/2013 sobre productos fertilizantes, específica para enmienda orgánicas (compost) un valor mínimo en materia orgánica total (MOT) del 35% cumpliendo con este requisito todos nuestros compost estudiados. Así mismo el compost elaborado solo con restos de poda EPSO, está clasificado como enmienda orgánica o compost vegetal en el RD 506/2013 el cual establece un contenido mínimo en materia orgánica total (MOT) del 40% cumpliendo también los compost maduros estudiados este criterio.

4.1.2.3. Cenizas (%)



Análisis en función del ingrediente 1



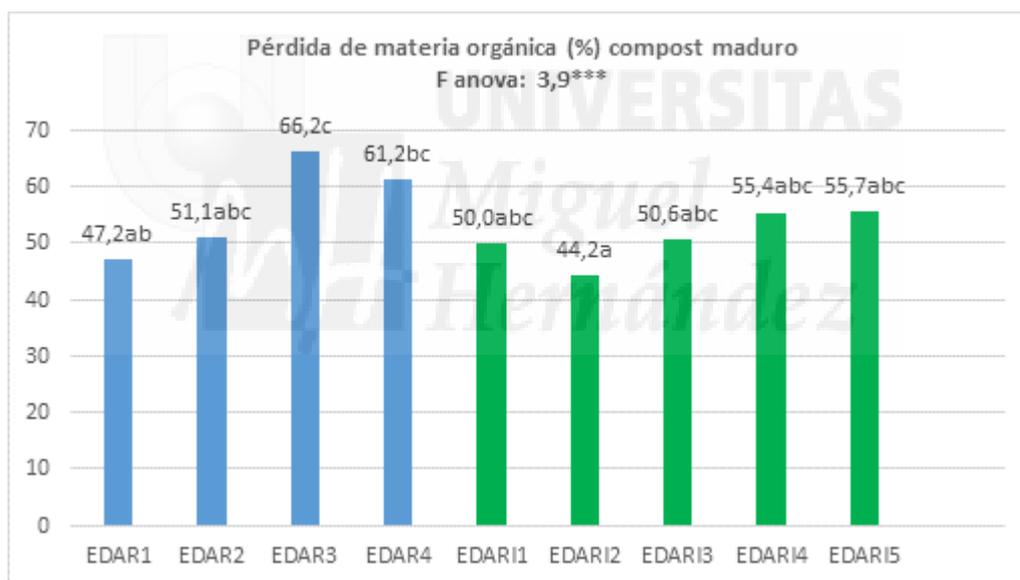
Análisis en función del ingrediente 2

Figura 17. Comparación del contenido en cenizas en el grupo A de materiales (compost maduro).

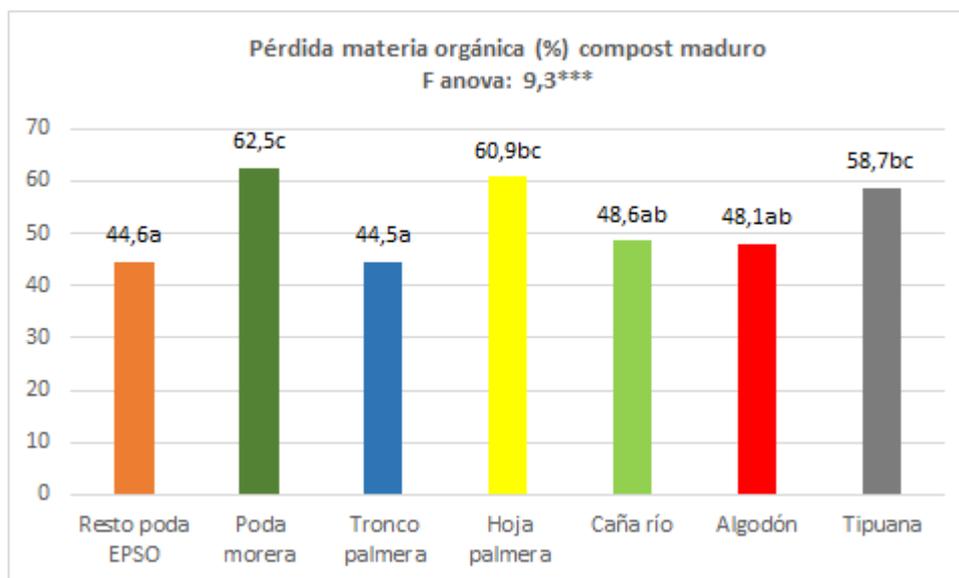
En la **Figura 17**, vemos cómo influye el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) y el ingrediente 2 (*agente estructurante*), referente a su contenido en cenizas.

Para el ingrediente 1, el contenido en cenizas de los compost que contienen lodos EDARI es menor (23,9-33%) en comparación con los compost que contienen lodos EDAR (38,5-55,9%), excepto la EDARI 1 (51,1%) que tiene un valor más parecido a los compost EDAR. Respecto al ingrediente 2, el porcentaje en cenizas es mayor cuando aplicamos restos de poda, caña de río y restos de algodón (49,7-52,2%), a nuestras pilas de compost a diferencia de añadir tipuana (27,2%) que tiene el nivel más bajo en cenizas del grupo, acorde con el comportamiento del parámetro materia orgánica total estudiado anteriormente.

4.1.2.4. Pérdida de materia orgánica



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 18. Comparación del contenido en pérdida de materia orgánica en el grupo A de materiales (compost maduro).

En la **Figura 18**, vemos cómo influye el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) y el ingrediente 2 (*agente estructurante*), respecto a su contenido en pérdida de materia orgánica. Para el ingrediente 1, vemos que la aplicación de lodo EDAR 3 al compost, presenta mayores pérdidas de materia orgánica (66,2%), mientras que la aplicación de lodos EDARI 2 implica muy poca pérdida de materia orgánica en los compost (44,2%). Para el análisis del ingrediente 2, vemos que la pérdida de materia orgánica es mayor cuando se aplica poda de morera (62,5%), y la mínima pérdida de materia orgánica se da con el tronco de palmera y con restos de poda EPSO (44,5-44,6%).

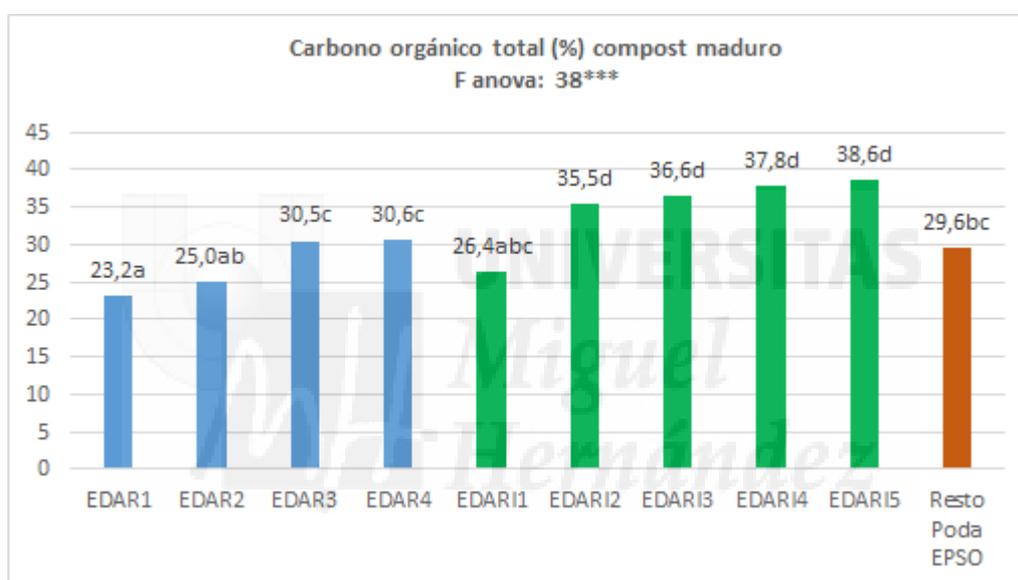
La pérdida de materia orgánica refleja la evolución sufrida por la mezcla de residuos estudiada. Éstas se calcularon a partir del contenido de cenizas inicial (X_1) y en el punto de estudio (X_n), de acuerdo con la ecuación de Viel *et al.*, (1987):

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

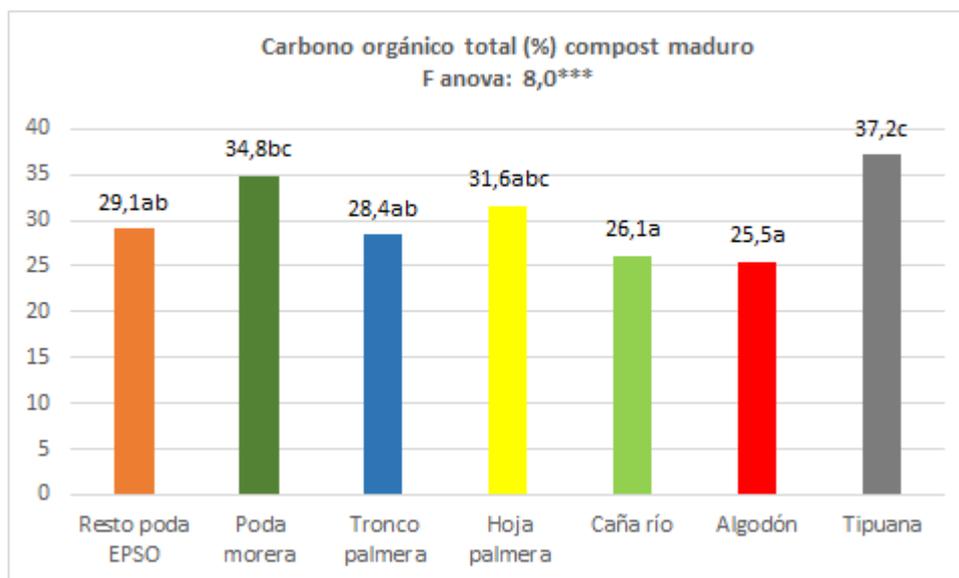
Esta ecuación representa el porcentaje de materia orgánica perdida con respecto a la cantidad inicial, para ello se considera que el contenido de cenizas a lo largo del proceso es constante y de este modo se evita el efecto concentración provocado por las pérdidas de peso de la pila debidas a la degradación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

Cáceres *et. al.*, (2014) observaron mayores pérdidas de materia orgánica en el compostaje de residuos vegetales y fracción sólida de estiércoles al aumentar la proporción de restos vegetales en las pilas.

4.1.2.5. Carbono orgánico total (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

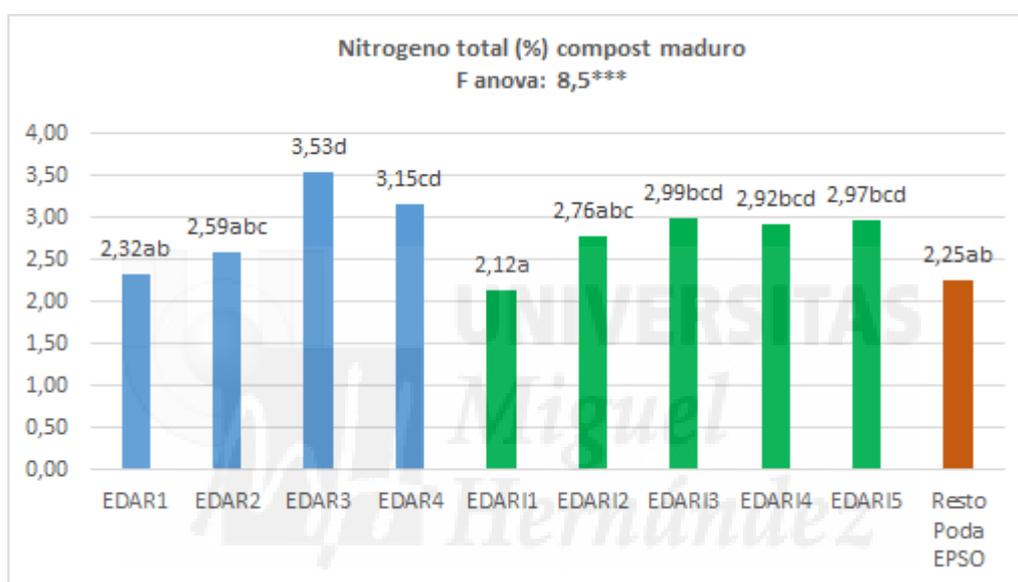
Figura 19. Comparación del contenido en carbono orgánico total en el grupo A de materiales (compost maduro).

Asimismo, el incremento de los niveles de carbono orgánico del suelo es un objetivo clave en el desarrollo de estrategias sostenibles de manejo del mismo, que permitan atenuar los efectos del cambio climático (Barral *et al.*, 2009; Van-Camp *et al.*, 2004).

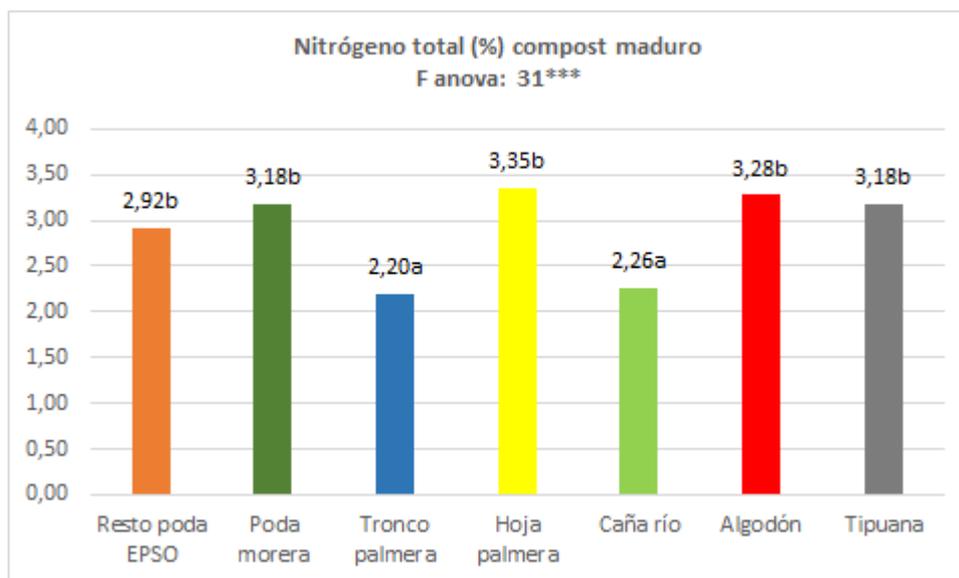
Podemos observar de la **Figura 19**, que para el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) el nivel más alto de carbono orgánico total lo tienen todos los lodos EDARI (35,5-38,6%) menos EDARI 1 (26,4%), al igual que sucedía para la materia orgánica total y los que tienen niveles más bajos de carbono orgánico total son los compost elaborados con lodos EDAR (23,2-30,6%). Y si observamos el comportamiento que sufren los compost con el ingrediente 2 (*agente estructurante*), vemos que el contenido más bajo de carbono orgánico total lo aporta los restos de algodón y la caña de río (25,5-26,1%) y el valor más alto lo aporta la tipuana (37,2%), coincidiendo con lo que ocurría para la materia orgánica total. En un estudio realizado por Moreno *et al.*, 2014 sobre compost realizados con restos agrícolas obtuvieron valores de carbono orgánico total ligeramente menores (16,73%).

Durante el compostaje la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi *et al.*, 1987). Del mismo modo que el contenido de materia orgánica total, el contenido de carbono orgánico disminuye a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización que sufre la pila de compostaje por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

4.1.2.6. Nitrógeno total (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 20. Comparación del contenido en nitrógeno total en el grupo A de materiales (compost maduro).

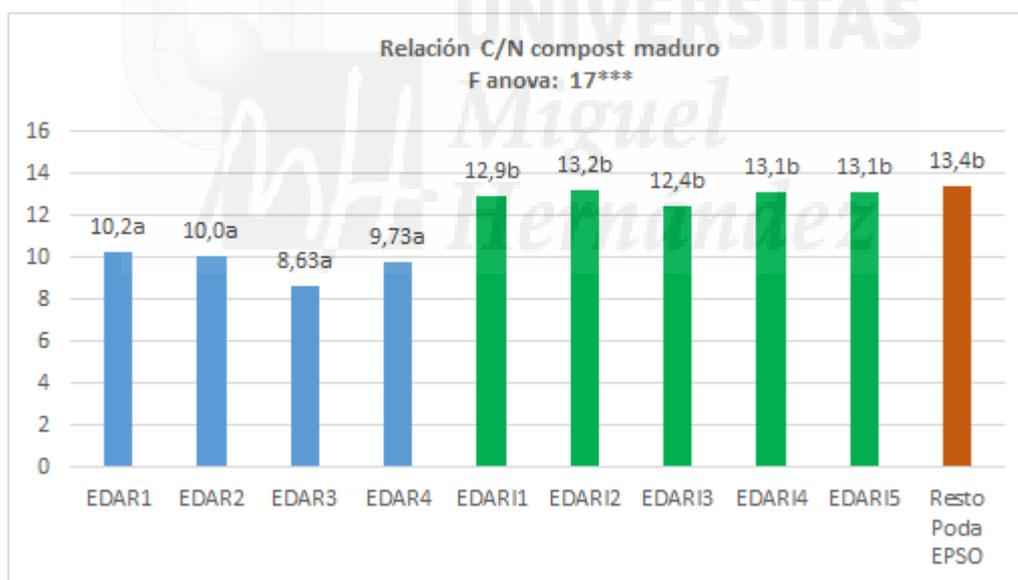
El nitrógeno es un nutriente esencial para la vida vegetal cuya toma, por parte de las plantas, se produce en su forma inorgánica. Los contenidos de nitrógeno en un residuo fresco o compostado de naturaleza orgánica condiciona su capacidad fertilizante. El nitrógeno se encuentra tanto en forma orgánica como en forma inorgánica, aunque mayoritariamente es la forma orgánica la que está presente en los residuos orgánicos.

A lo largo del proceso de compostaje, se produce una descomposición de la materia orgánica y, por tanto, también de su fracción nitrogenada, siendo de esperar que durante el proceso de compostaje el nitrógeno orgánico se irá transformando, paulatinamente, en especies inorgánicas. Sin embargo, la pérdida de materia orgánica que se produce a lo largo del compostaje, traducida por tanto en una reducción en el peso de la pila a compostar, hace que las especies nitrogenadas, tanto orgánicas como inorgánicas, experimenten el llamado “efecto concentración”, es decir, al final del proceso de compostaje, a pesar de que se pierde nitrógeno, éste estará más concentrado en el compost final debido a esa reducción en la masa de la pila comentada anteriormente.

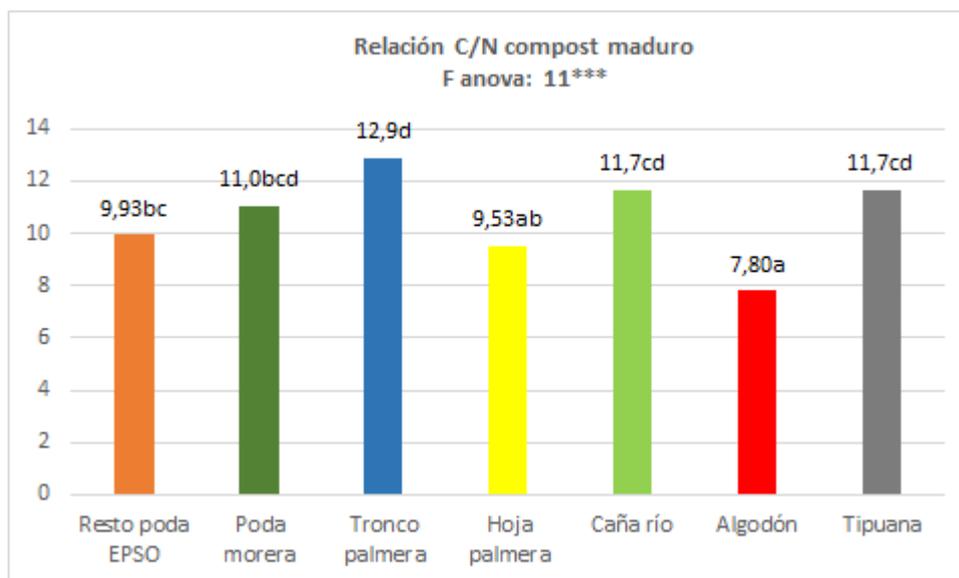
El estudio de la dinámica del nitrógeno es de gran interés a la hora de aplicar una dosis de compost –acorde con su capacidad para liberar nitrógeno mineral– que pueda complementar o reemplazar la fertilización mineral y, de este modo, proporcionar parte de la cantidad de nitrógeno requerida por los cultivos (Hadas *et al.*, 2004).

En la **Figura 20**, observando el efecto del ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*), podemos decir que los compost con lodo EDAR 3 poseen valores más altos de nitrógeno total (3,53%) y el más bajo lo presenta la incorporación de lodo EDARI 1 (20,12%). Para el ingrediente 2 (*agente estructurante*), vemos que todos los materiales estructurantes aportan valores altos de nitrógeno (2,92-3,35%), excepto el uso de tronco de palmera y la caña de río (2,20-2,26%) que aportan menos nitrógeno total a los compost.

4.1.2.7. Relación carbono/nitrógeno



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 21. Comparación del contenido en relación C/N en el grupo A de materiales (compost maduro).

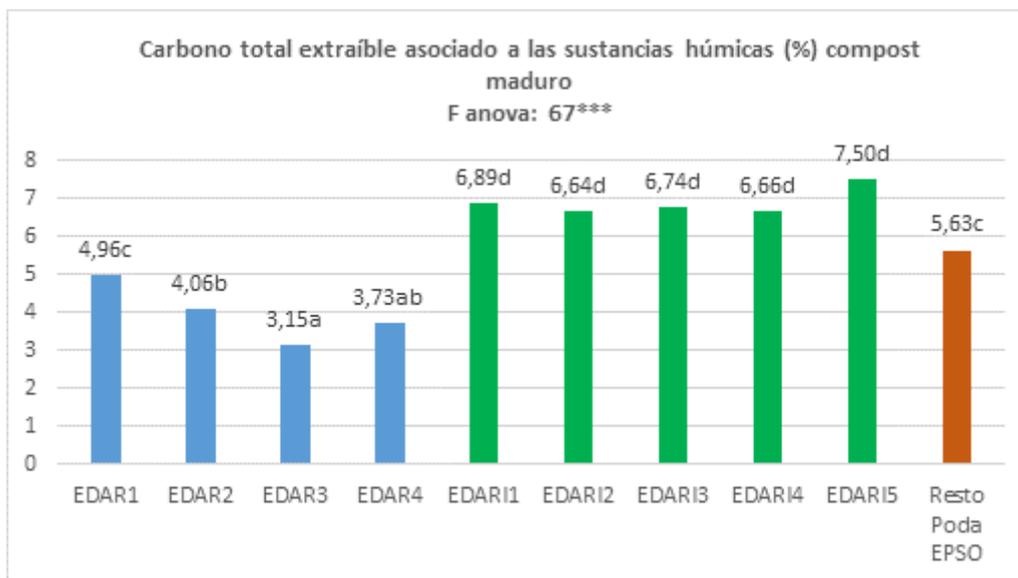
La relación carbono orgánico total/ nitrógeno total es uno de los índices más utilizados para estudiar la evolución de materia orgánica durante el compostaje, ya que por un lado, representa la pérdida de carbono orgánico, como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica, mientras que por otro, mide el aumento de la concentración de nitrógeno debido a la pérdida de peso. Como resultado se obtiene una disminución de este parámetro, cuyos valores al final del proceso son prácticamente constantes, causados por la estabilización de la materia orgánica. La importancia de esta relación está en que, para que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada, se considera que el material de partida debe tener una relación C/N entre 25-35 (Jhorar *et al.*, 1991). También es sabido que una relación C/N demasiado elevada limita la cantidad de nitrógeno disponible para el crecimiento celular a expensas de la materia orgánica, lo que conduce a la inactivación o ralentización del proceso; mientras que lo contrario acelera inicialmente el crecimiento microbiano y la descomposición de la materia orgánica. Esto último, sin embargo, agotaría rápidamente las reservas de oxígeno, dando lugar a condiciones de anoxia. El exceso de nitrógeno además conduce a pérdidas de nitrógeno en lixiviados (nitratos) o en gases (amoníaco).

Iglesias Jiménez y Pérez García (1992), para compost de residuos sólidos urbanos (RSU) y Bernal *et al.*, (1998) para compost de diversos orígenes, establecen como criterio más seguro de madurez del compost una relación C/N inferior a 12. En la legislación española se sugiere valores de dicha relación inferiores a 20 en los compost (RD sobre productos fertilizantes, 2013), cumpliendo todos nuestros compost finales dicho requisito.

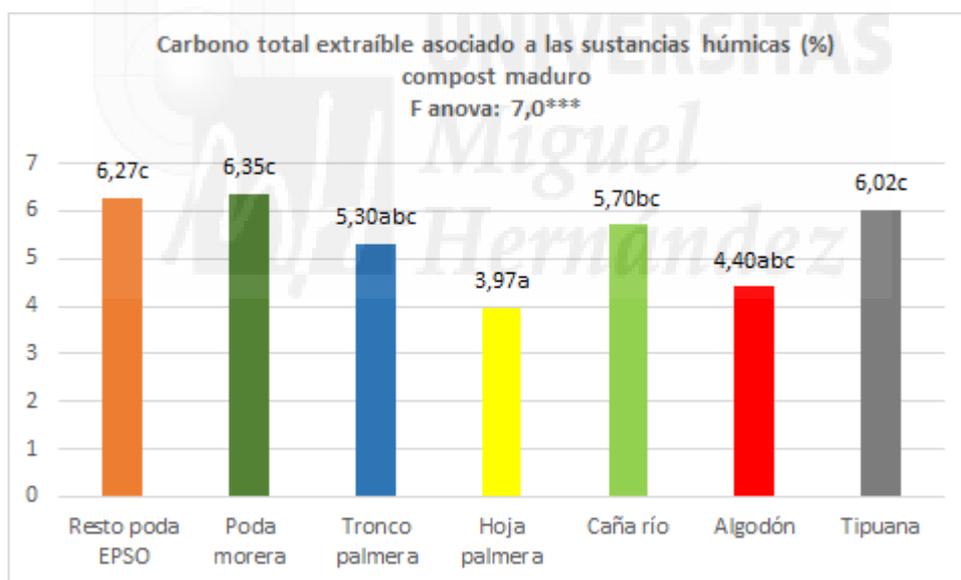
De manera general, una relación C/N inferior a 20 se considera como buen indicador de la mineralización neta de nutrientes, mientras que un valor superior de este cociente se relaciona con la inmovilización (Costa *et al.*, 1991; Sikora y Szmidt, 2005), aunque en los últimos años se ha demostrado que este ratio no debe ser el único parámetro a tener en cuenta para predecir la mineralización (Cabrera *et al.*, 2005a; Gabrielle *et al.*, 2004, Tognetti *et al.*, 2008). En lo referente a este aspecto, Amlinger *et al.*, (2003) indicaron que, además de la influencia de factores específicos del cultivo y el lugar de aplicación del compost (características y manejo del suelo, y condiciones ambientales del emplazamiento, principalmente), la dinámica del nitrógeno del suelo tras la aplicación de compost depende de distintos factores: relación C/N del material residual (fresco, original) objeto de compostaje, condiciones del proceso, tasa de descomposición/estabilización y duración del compostaje, acondicionamiento posterior del compost, parámetros de calidad del compost final producido (relación C/N, fracciones biodisponibles de carbono y nitrógeno), y época (momento) de aplicación de este último, entre otros.

De la **Figura 21**, vemos que para el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) todos los compost donde se ha utilizado tanto lodo EDARI como restos de poda EPSO, tienen relaciones C/N finales más altas (12,4-13,4) frente a la utilización de lodos EDAR en los compost finales que tienen una relación C/N más baja (8,63-10,2). Por último, respecto a la influencia del ingrediente 2 (*agente estructurante*) cabe mencionar que cuando se utiliza restos de algodón obtenemos una relación C/N más baja (7,80) que cuando utilizamos tronco de palmera que tenemos una relación C/N más alta (12,9).

4.1.2.8. Carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 22. Comparación del contenido en carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas en el grupo A de materiales (compost maduro).

El proceso de compostaje es un método útil para producir un material orgánico estabilizado que puede usarse como fuente de nutriente y acondicionador del suelo. Esta metodología se divide típicamente en dos fases: activa o bio-oxidativa y la fase de madurez. La primera se caracteriza por una actividad microbiana intensa que conduce a la descomposición de la mayoría del material biodegradable y la estabilidad de los residuos orgánicos. La segunda, se caracteriza por la conversión de parte del material orgánico restante en sustancias húmicas (Chen y Imbar, 1993; Castaldi *et al.*, 2005).

Los ácidos húmicos del compost difieren, en cuanto a su estructura molecular y composición, de los auténticos ácidos húmicos del suelo sobre todo en determinado tipo de residuos, como RSU y lodos de depuradora, donde más se han estudiado.

Además, la IHSS (International Humic Substance Society) solo reconoce como auténticas sustancias húmicas las provenientes de suelos, aguas y sedimentos, y no de compost de residuos. Por ello, en el caso del compost, algunos autores hablan de “carbono total extraíble” para citar al conjunto de compuestos de naturaleza “húmica” extraídos con una solución básica y “carbono precipitable y no precipitable” en medio ácido para hacer referencia a las fracciones “húmicas” y “fúlvicas” respectivamente.

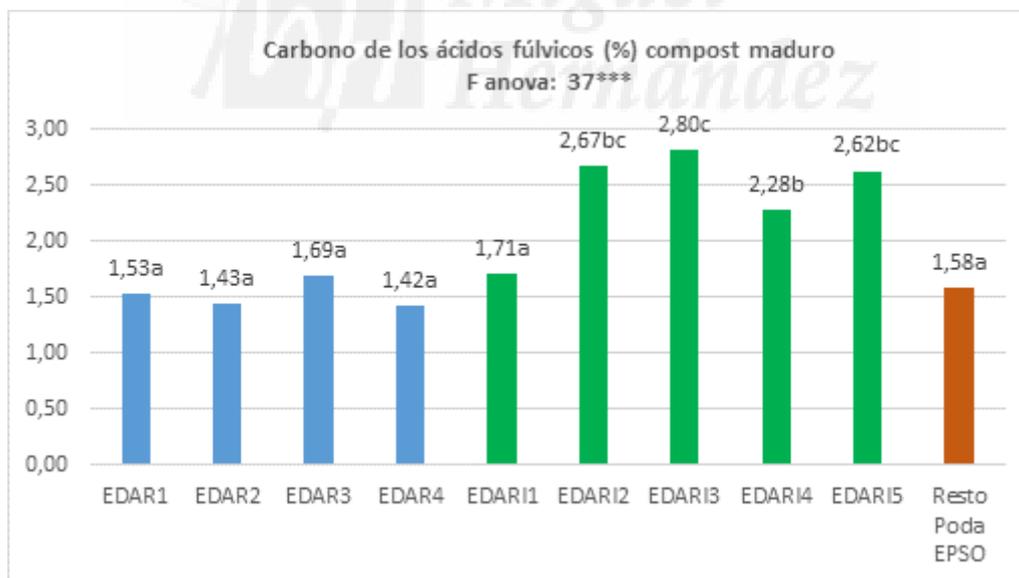
Tradicionalmente, en el estudio de la materia orgánica del suelo, y desde un punto de vista más analítico que en relación a la génesis y propiedades del humus, se definen entre otras dos fracciones húmicas bien diferenciadas: ácidos húmicos, solubles en soluciones alcalinas y que precipitan en medio ácido y ácidos fúlvicos, solubles en soluciones básicas y que no precipitan en medio ácido. En el caso del compostaje de residuos orgánicos no cabe hablar de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos estricto ya que el concepto de humus y humificación implica una relación estrecha con el suelo donde se forma. Durante el proceso de compostaje, parte de la materia orgánica original se mineraliza y la fracción residual se transforma en nuevos materiales orgánicos, que están sujetos a procesos de humificación, produciéndose así las denominadas sustancias húmicas (Campitelli *et al.*, 2006).

Los criterios que se establecen a la hora de evaluar la calidad de la materia orgánica de un compost presentan varios inconvenientes, dando lugar a resultados que pueden ser confusos. Desde hace décadas se ha considerado erróneamente que la

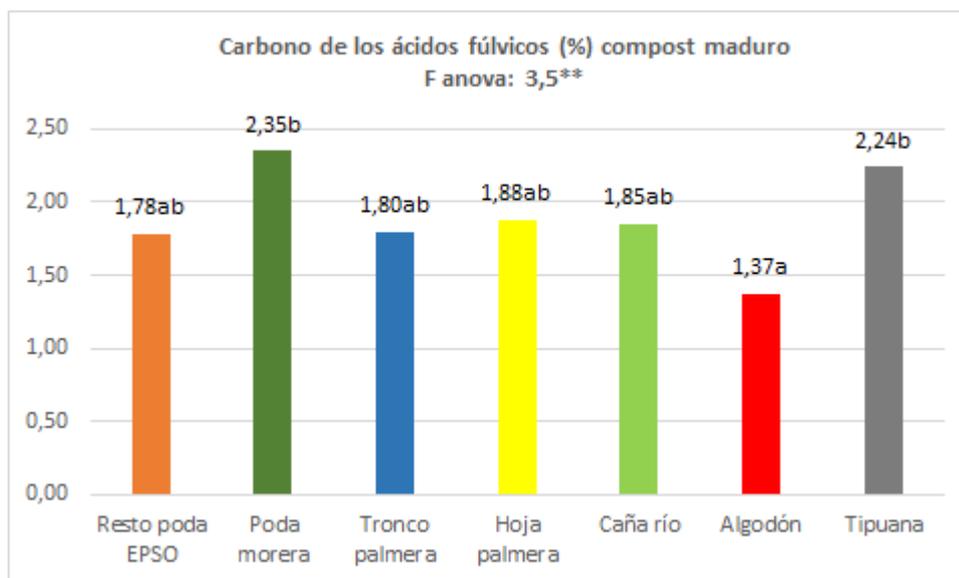
extracción alcalina de sustancias húmicas a partir de suelos u otros materiales orgánicos, da lugar a un extracto húmico total (Kononova, 1996). Nos encontramos, por tanto, ante un proceso tradicional de extracción de sustancias húmicas muy poco específico (Adani *et al.*, 1997; Chefetz *et al.*, 1998).

En la **Figura 22**, vemos que para el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) la aplicación de todos los compost con lodos EDARI aportan los niveles más altos de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (6,64-7,50%) mientras que la aplicación de los compost con lodo EDAR 3 aporta el nivel más bajo de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas comerciales. Por otro lado, estudiado la influencia del ingrediente 2 (*agente estructurante*) vemos que la aplicación de restos de poda, poda de morera y la tipuana aportan los valores más altos de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (6,02-6,35%), mientras que la hoja de palmera es el residuo vegetal que menos carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas tiene (3,97%).

4.1.2.9. Carbono de los ácidos fúlvicos (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 23. Comparación del contenido en carbono de los ácidos fúlvicos en el grupo A de materiales (compost maduro).

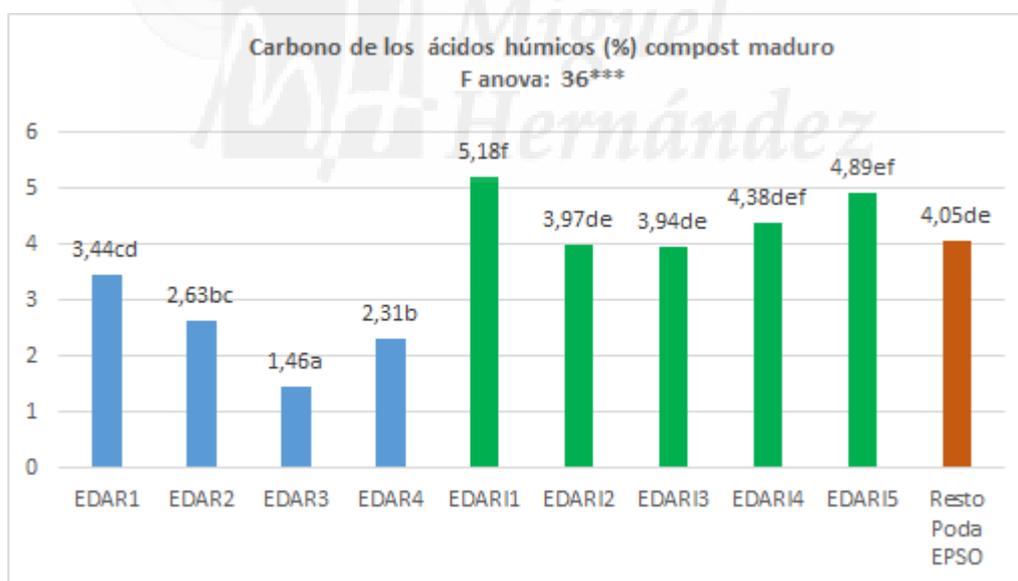
El compostaje se caracteriza por la descomposición del material biodegradable de los residuos y la transformación parcial del material orgánico remanente en sustancias húmicas (Adani *et al.*, 1999; Mondini *et al.*, 2003). En el proceso, a medida que avanza la condensación y polimerización de las moléculas sencillas resultantes de la degradación de la materia orgánica (humificación), se produce un aumento de los ácidos húmicos, mientras que el contenido de ácidos fúlvicos tiende a decrecer (Bernal *et al.*, 2009).

Como la mayoría de las sustancias húmicas utilizadas en la agricultura se derivan actualmente de recursos no renovables como el carbón y la turba, la promoción de esta tecnología también requiere el desarrollo de nuevas fuentes sostenibles de productos húmicos. Además, las respuestas fisiológicas de las plantas a las sustancias húmicas aisladas del carbón pardo (lignito, leonardita, subbituminoso) son menores que las observadas en respuesta a la adición de sustancias húmicas aisladas de turba, compost o vermicompost (Canellas y Olivares, 2014).

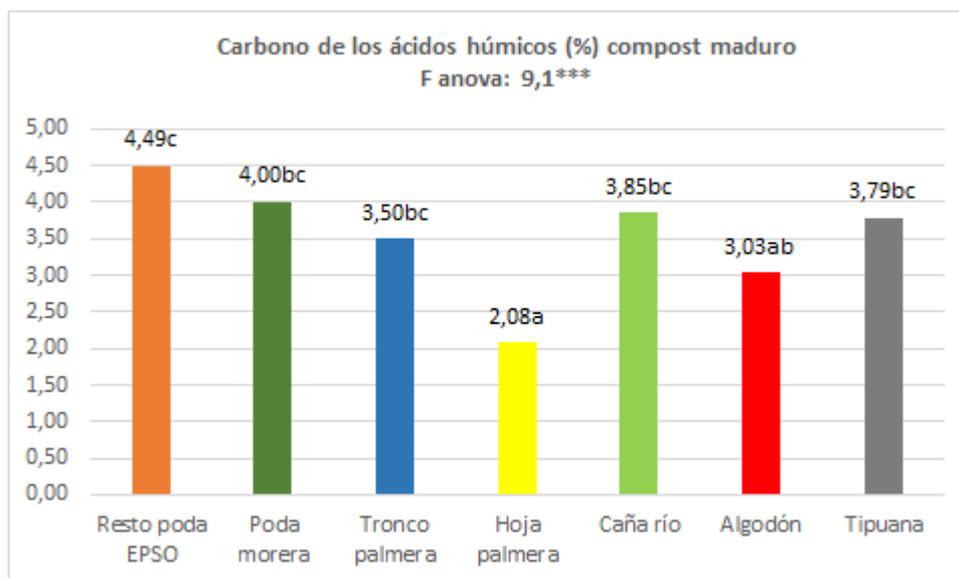
En la **Figura 23**, observamos por un lado la cantidad de carbono de los ácidos fúlvicos que aporta tanto el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) como el ingrediente 2 (*agente estructurante*). Con la presencia del ingrediente 1 aportamos más carbono de los ácidos fúlvicos cuando incorporamos en nuestro compost lodo EDARI 3 (2,80%) y menos con los lodos EDAR 1, 2, 3 y 4, restos de poda EPSO o los lodo EDARI 1 (1,42-1,71%). Mientras que para el ingrediente 2, la presencia de tipuana y restos de poda de morera son los que más carbono asociado a los ácidos fúlvicos aportan (2,24-2,35%), mientras que la incorporación de restos de algodón al compost tiene el menor nivel de aporte (1,37%).

En algunos estudios realizados se ha observado una mejor respuesta del cultivo utilizando sustancias de tipo húmico obtenidas de compost o vermicompost que los extractos húmicos de leonardita (la fuente comercial más común) Azcona *et al.*, (2011), y más por ácidos húmicos que por fúlvicos (Lulakis y Petsas, 1995).

4.1.2.10. Carbono de los ácidos húmicos (%)



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 24. Comparación del contenido en carbono de los ácidos húmicos en el grupo A de materiales (compost maduro).

La humificación del material orgánico durante el compostaje se revela mediante la formación de ácidos húmicos con un peso molecular creciente, características aromáticas, concentraciones de oxígeno y nitrógeno y grupos funcionales, de acuerdo con las teorías de humificación generalmente aceptadas del suelo materia orgánica. (Senesi, 1989).

En la **Figura 24**, observamos por un lado la cantidad de carbono asociado a los ácidos húmicos que aporta tanto el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) como el ingrediente 2 (*agente estructurante*). Con la presencia del ingrediente 1 aportamos más carbono de los ácidos húmicos gracias a la presencia de lodo EDARI 1 (5,18%) y menos con lodo EDAR 3 (1,46%). Para el ingrediente 2, la presencia de restos de poda EPSO aporta más carbono asociado a los ácidos húmicos (4,49%), mientras que la incorporación de hoja de palmera tiene el menor nivel de ácidos húmicos (2,08%).

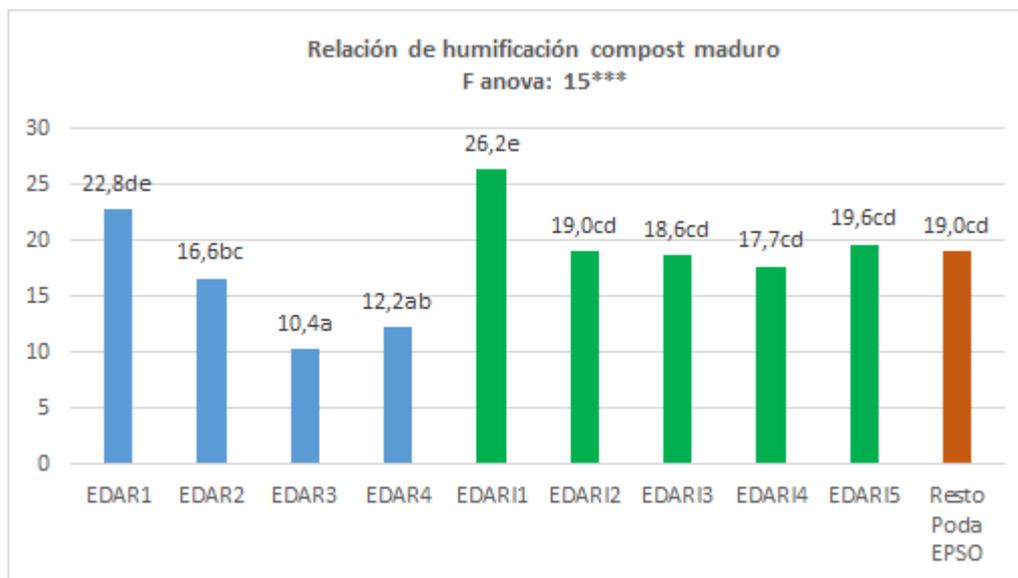
Moreno *et al.*, (2014), encontraron un comportamiento similar respecto a lo que ocurre en nuestro estudio entre el contenido en carbono asociado a los ácidos húmicos y fúlvicos en compost con restos vegetales, siendo mayor la presencia en los compost maduros de carbono húmicos, frente a los ácidos fúlvicos.

De forma tradicional, los contenidos de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos o incluso la suma de ambas, se han considerado parámetros válidos a la hora de determinar el grado de humificación de un material. Sin embargo, la heterogeneidad de las materias primas de naturaleza orgánica así como la complejidad de las sustancias denominadas de tipo-húmico, han hecho imprescindible utilizar otros indicadores de humificación más reales. De hecho, se sabe que el contenido en sustancias humificadas podría ser sobreestimado, sobre todo, en las fases iniciales del proceso de compostaje, ya que parte de los materiales no humificados interferirán con el fraccionamiento de sustancias húmicas (Ciavatta *et al.*, 1990).

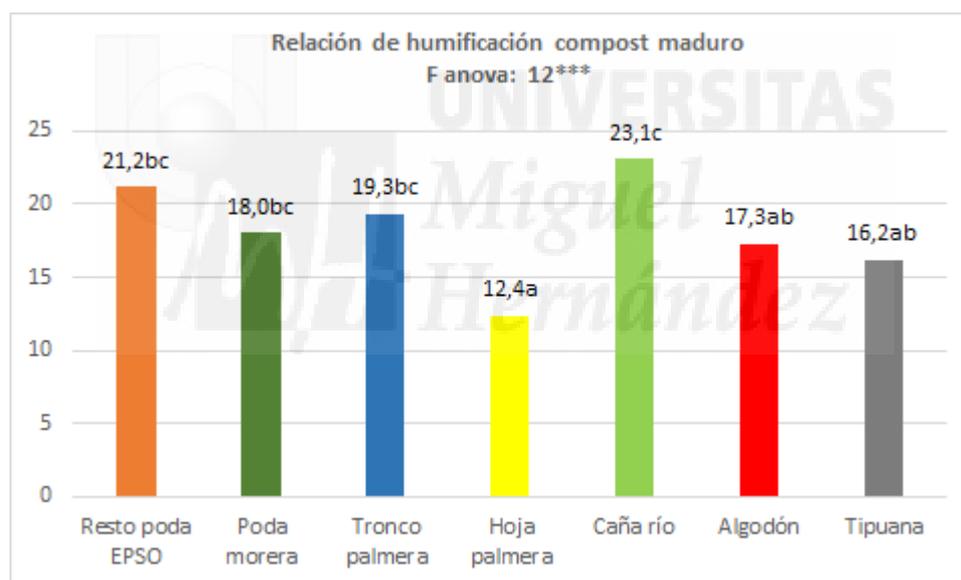
4.1.3. Índices de evolución de la materia orgánica en el grupo de materiales A (compost de distinta naturaleza)

Existen una serie de índices que nos ayudan a estudiar cual es la evolución de las formas de carbono ligadas a la materia orgánica y que vamos a emplear en este trabajo son los índices siguientes: la relación de humificación (carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas/carbono orgánico total), el índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total), el porcentaje de ácidos húmicos (carbono de los ácidos húmicos/carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas) y la relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos).

4.1.3.1. Relación de humificación



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 25. Comparación de la relación de humificación en el grupo A de materiales (compost maduro).

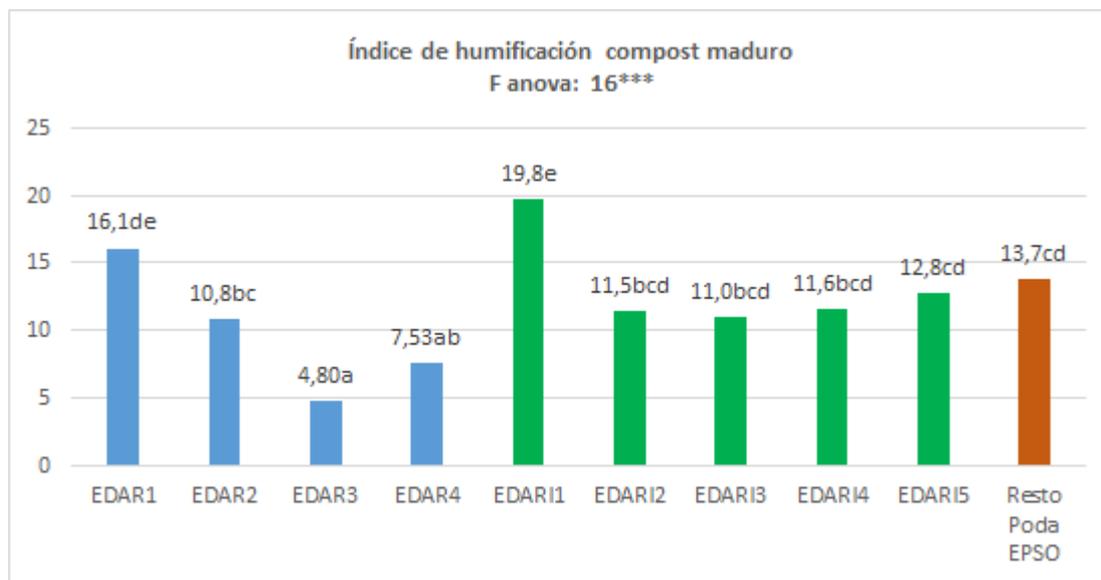
Uno de los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica en los compost, a partir de los porcentajes de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}), carbono de los ácidos húmicos (C_{ah}) y el carbono de los ácidos fúlvicos (C_{af}) es la relación de humificación (carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas/carbono orgánico total). El valor mínimo de

éste índice para evaluar la madurez del compost encontrados por Roletto *et al.*, (1985), en un estudio realizado sobre cinco mezclas preparadas con un residuo lignocelulósico y/o con otro residuo orgánico rico en nitrógeno fue de una relación de humificación > 7%. Luego todos nuestros compost estudiados cumplen este índice indicativo de madurez.

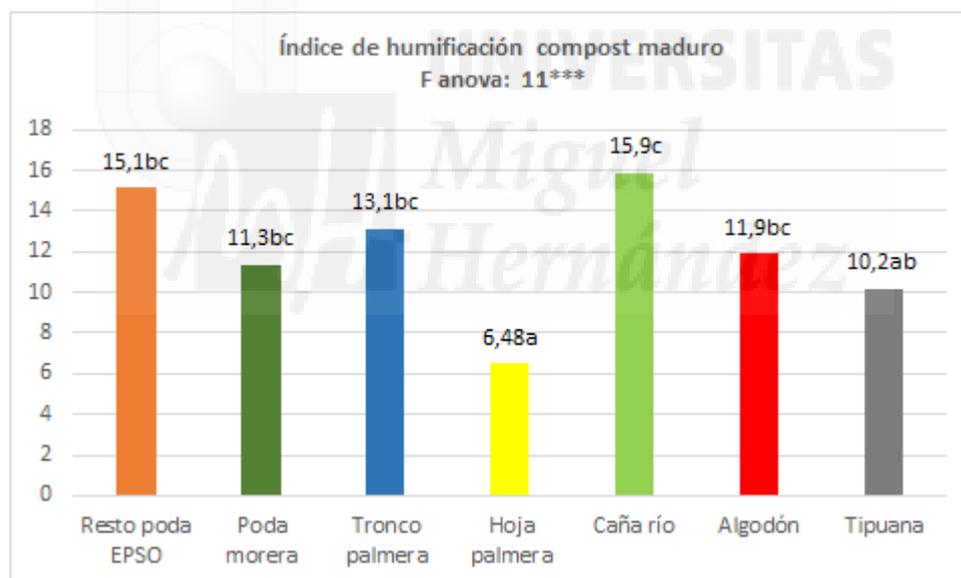
En la **Figura 25**, podemos ver la influencia que tienen tanto el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) como el ingrediente 2 (*agente estructurante*) en la relación de humificación (carbono total extraíble/carbono orgánico total). Para el ingrediente 1 vemos que la incorporación de lodo EDARI 1 influye en una relación de humificación mayor (26,2) frente al compost con lodo EDAR 3 que conforma la relación de humificación más baja (10,4) del grupo. Por otro lado, el ingrediente 2, la caña de río será la que mayor relación de humificación tiene (21,1) sin embargo la incorporación de hoja de palmera constituye la relación más baja (12,4).

Numerosos autores han propuesto el ratio de humificación, así como el índice de humificación como parámetros válidos y sencillos para establecer el estado de humificación de los compost. Así, en el caso del compostaje de RSU, la relación de humificación permanece prácticamente constante durante todo el proceso, como demostraron Iglesias Jiménez y Pérez García (1992).

4.1.3.2. Índice de humificación



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 26. Comparación del índice de humificación en el grupo A de materiales (compost maduro).

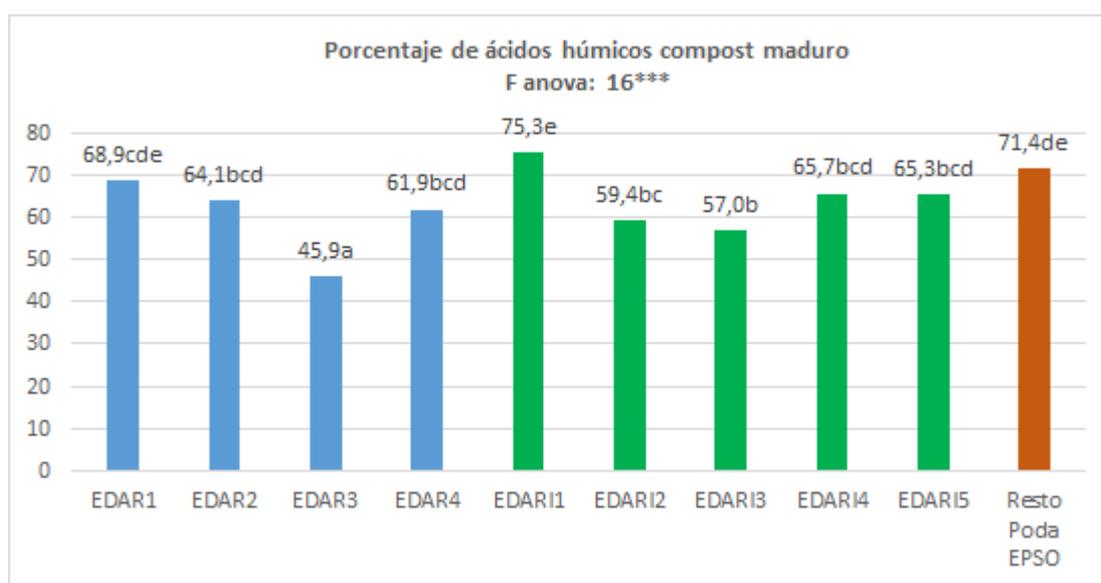
Otro de los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica en los compost, a partir de los porcentajes de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}), carbono de los ácidos húmicos (C_{ah}) y el carbono de los ácidos fúlvicos (C_{af}) es el índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total). El valor mínimo de éste índice para evaluar la

madurez del compost encontrados por Roletto *et al.*, (1985), en un estudio realizado sobre cinco mezclas preparadas con un residuo lignocelulósico y/o con otro residuo orgánico rico en nitrógeno fue de un índice de humificación > 3,5%. Luego todos nuestros compost estudiados cumplen este índice indicativo de madurez.

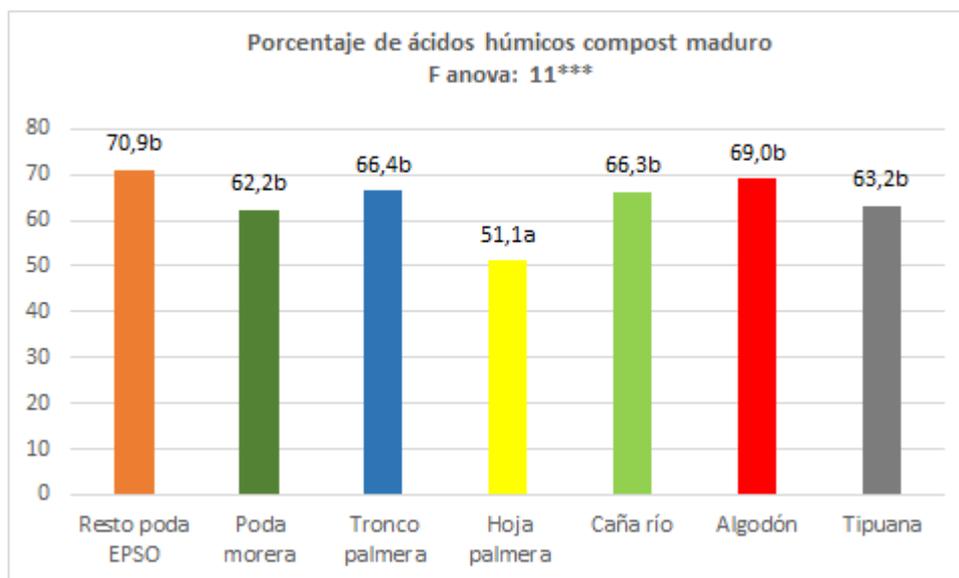
En la **Figura 26**, vamos a discutir la influencia que tienen tanto el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) como el ingrediente 2 (*agente estructurante*) en el índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total). Para el ingrediente 1 vemos que la incorporación de lodo EDARI 1 influye en un índice de humificación mayor (19,8) frente al compost con lodo EDAR 3 que posee el índice de humificación más bajo (4,8). Por otro lado, para el ingrediente 2, la caña de río será la que mayor índice de humificación aporte (15,9) sin embargo la incorporación de hoja de palmera constituye el nivel más bajo (6,48).

Cabe mencionar que tanto la relación de humificación (carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas/carbono orgánico total), como el índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total), presentan el mismo comportamiento en cuanto a la influencia de los ingredientes 1 y 2 en sus compost.

4.1.3.3. Porcentaje de ácidos húmicos



Análisis en función del ingrediente 1



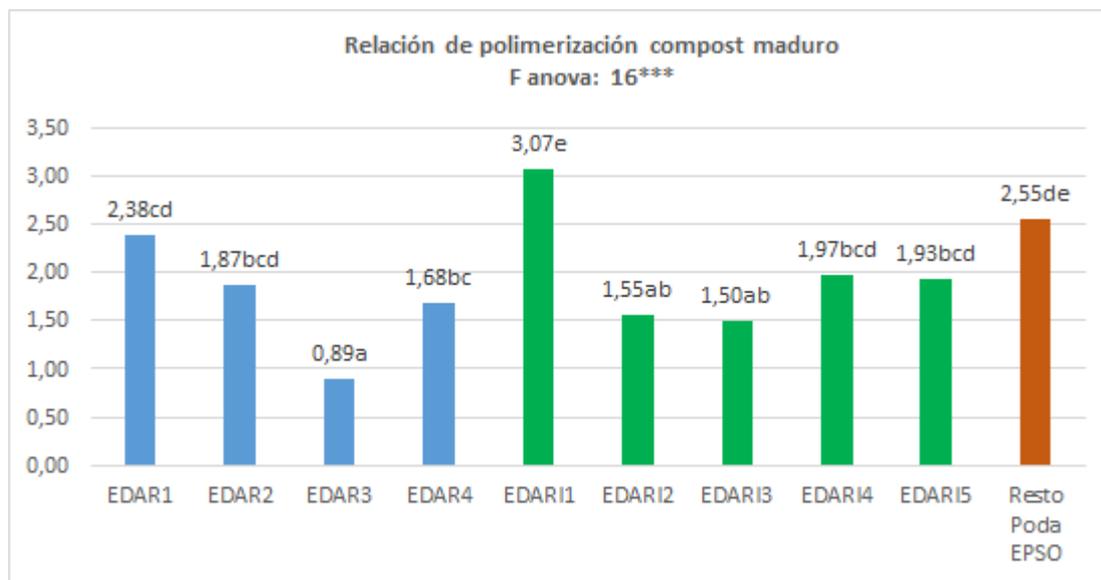
Análisis en función del ingrediente 2

Figura 27. Comparación del porcentaje de ácidos húmicos en el grupo A de materiales (compost maduro).

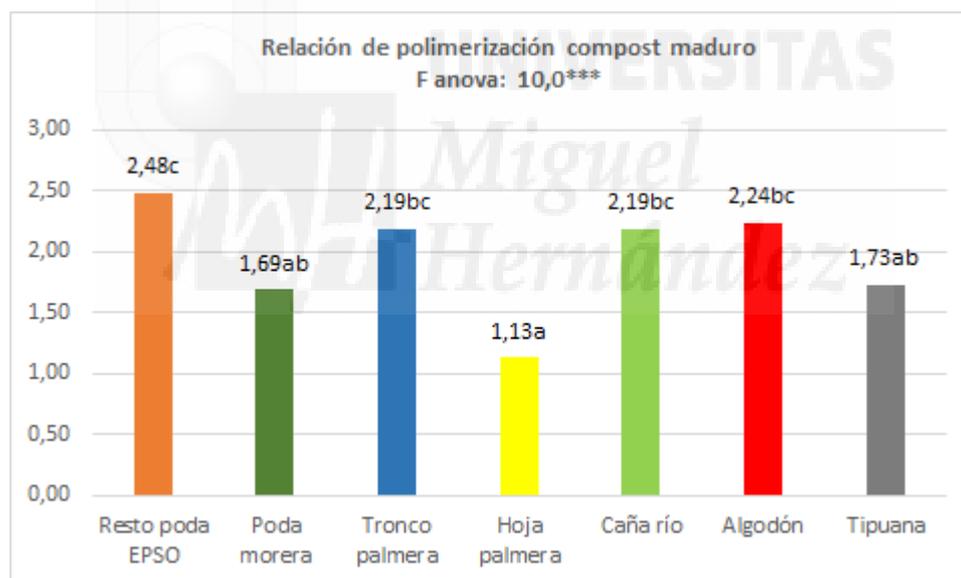
Para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica en los compost, a partir de los porcentajes de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}), carbono de los ácidos húmicos (C_{ah}) y el carbono de los ácidos fúlvicos (C_{af}) es porcentaje de ácidos húmicos (carbono de los ácidos húmicos/carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas).

En la **Figura 27**, podemos ver la influencia tanto el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) como el ingrediente 2 (*agente estructurante*) en el porcentaje de ácidos húmicos (carbono de los ácidos húmicos/carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas). Para el ingrediente 1 vemos que la incorporación al compost de lodo EDARI 1 influye en un porcentaje de ácidos húmicos mayor (75,3) frente a los compost con lodo EDAR 3 que presenta un porcentaje de ácidos húmicos más bajo (45,9). Por otro lado, para el ingrediente 2, vemos que todos los compost con lodos de EDAR y EDARI e incluso la incorporación de restos de poda EPSO influyen en un porcentaje de ácidos húmicos alto (62,2-70,9), excepto la presencia de hoja de palmera que nos aportará el porcentaje más bajo (51,1).

4.1.3.4. Relación de polimerización



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 28. Comparación de la relación de polimerización en el grupo A de materiales (compost maduro).

Por último, tenemos la relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos) como uno de los índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica en los compost, a partir de los porcentajes de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (C_{ex}), carbono de los ácidos

húmicos (C_{ah}) y el carbono de los ácidos fúlvicos (C_{af}). El valor mínimo de este índice para evaluar la madurez del compost encontrado por Roletto *et al.*, (1985), en un estudio realizado sobre cinco mezclas preparadas con un residuo lignocelulósico y/o con otro residuo orgánico rico en nitrógeno fue de una relación de polimerización $> 1\%$. Luego todos nuestros compost estudiados cumplen este índice indicativo de madurez.

Los residuos orgánicos pueden transformarse en complejos orgánicos mediante la acción de los microorganismos que se encuentran en el suelo dando así lugar a la formación de humus cuyo aspecto es negrozco. Este a su vez, se encuentra constituido por ácidos fúlvicos y fulvatos, ácidos húmicos y humatos y por las huminas, que son de vital importancia para un suelo rico en nutrientes, reduciendo la posibilidad de ocasionar daños a las raíces de las plantas cuando existe exceso de acidez. Las raíces, se encuentran mejor en un suelo rico en humus que en uno pobre en esta sustancia.

En la **Figura 28**, vemos la influencia tanto del ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) como del ingrediente 2 (*agente estructurante*) en la relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos). Para el ingrediente 1 observamos que la incorporación al compost de lodo EDARI 1 influye en una relación de polimerización mayor (3,07) frente a los compost de lodo EDAR 3 que representa una relación de polimerización menor (0,89). Por otro lado, para el ingrediente 2, la presencia de restos de poda EPSO nos da la mayor relación de polimerización (2,48), mientras que la hoja de palmera nos aportará la relación de polimerización más baja (1,13).

Se forman preferentemente en primer lugar sustancias tipo fulvoácidos, donde las cadenas alifáticas predominan sobre los núcleos aromáticos, y después, en una fase posterior, se forman ácidos húmicos por aumento del volumen de los núcleos y disminución de las cadenas alifáticas, (Stevenson, 1994). Como demostraron ya González-Vila y Martín (1985), la fracción de ácidos húmicos del compost (RSU) sigue presentando una estructura eminentemente alifática, estructuralmente diferentes a los ácidos húmicos naturales. Los resultados de nuestras experiencias en pilas, consistentes con otros resultados (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1992a, 1992b, 1992c), indican que el tipo de procesos predominante durante el compostaje de RSU es un incremento

paulatino de la fracción de ácidos húmicos y un descenso paralelo de ácidos fúlvicos, y por tanto un incremento de la tasa de polimerización, entendida en sentido amplio como ratio ácidos húmicos/ácidos fúlvicos, al igual que ocurre en nuestro estudio.

4.1.4 Valor económico equivalente de sustancias húmicas en el grupo de materiales A (compost de distinta naturaleza)

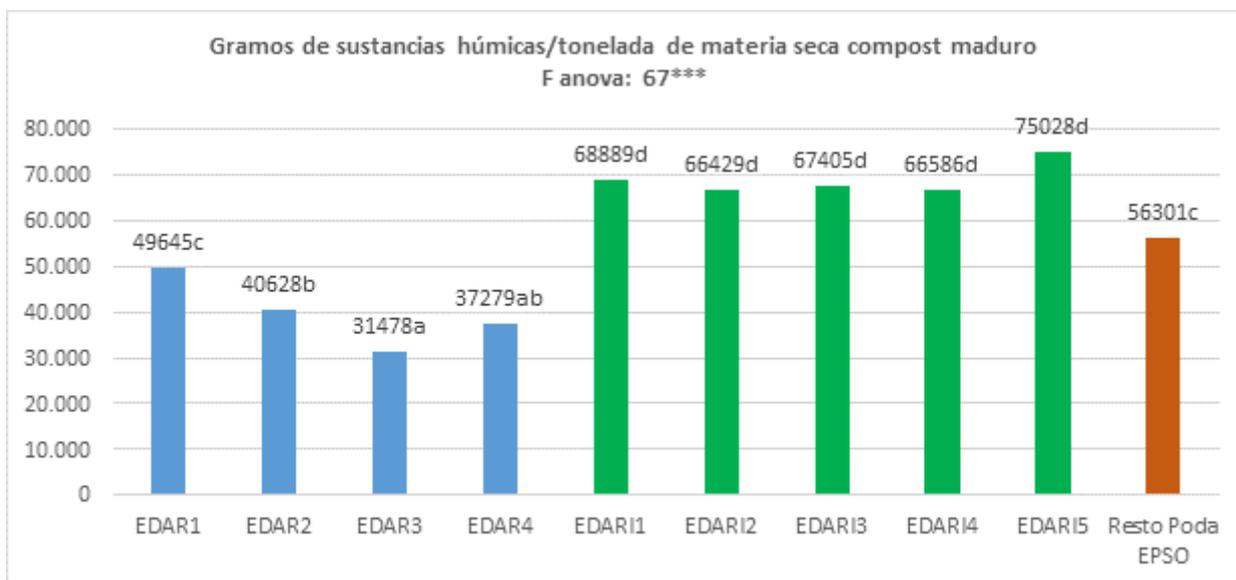
Para determinar el valor equivalente de nuestras muestras en el mercado se ha realizado un análisis estadístico descriptivo. Analizando el precio por unidad de sustancia húmica, obtenido al referenciar el precio de venta al público al porcentaje de sustancias húmicas contenida en el producto. El valor medio de esta variable nos permitirá posteriormente establecer el precio de mercado de nuestro producto, multiplicando dicho valor por el porcentaje de sustancias húmicas que tienen nuestras muestras. Según la estimación realizada el precio medio sería de 0,020 €/gramo de sustancia húmica.

Los cálculos realizados en el apartado de costes económicos, se han llevado a cabo considerando por un lado el contenido en gramos de sustancias húmicas que hay en una tonelada de compost maduro y por otro lado el valor económico que alcanzaría en el mercado nuestros compost en función de las sustancias húmicas que contiene.

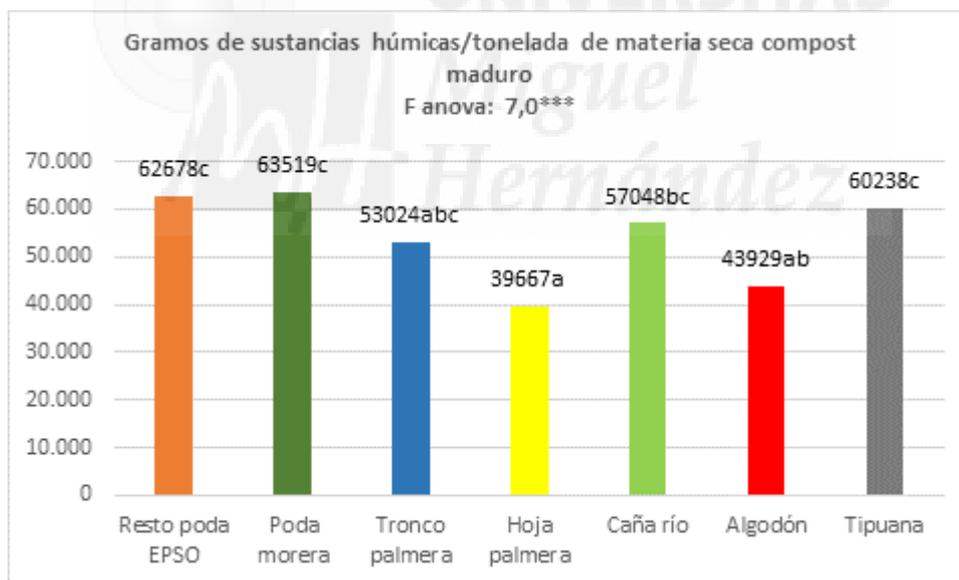
Para ello se ha realizado una recopilación de productos comerciales denominadas sustancias húmicas, puestos actualmente en el mercado, como se muestra en la **Tabla 5**, del apartado de materiales y métodos. Se ha realizado el análisis de varios parámetros orientativos para ayudarnos al estudio económico referidos al precio del compost maduro y pensando en su valor estimativo como sustancias húmicas.

Para determinar el valor equivalente de nuestras muestras en el mercado se ha realizado un análisis estadístico descriptivo. Utilizando el programa IBM SPSS Statistics 23. La variable analizada ha sido el precio por unidad de sustancia húmica, obtenido al referenciar el precio de venta al público al porcentaje de sustancias húmicas contenida en el producto. El valor medio de esta variable nos permitirá

posteriormente establecer el precio de mercado de nuestro producto, multiplicando dicho valor por el porcentaje de sustancias húmicas que tienen nuestras muestras.

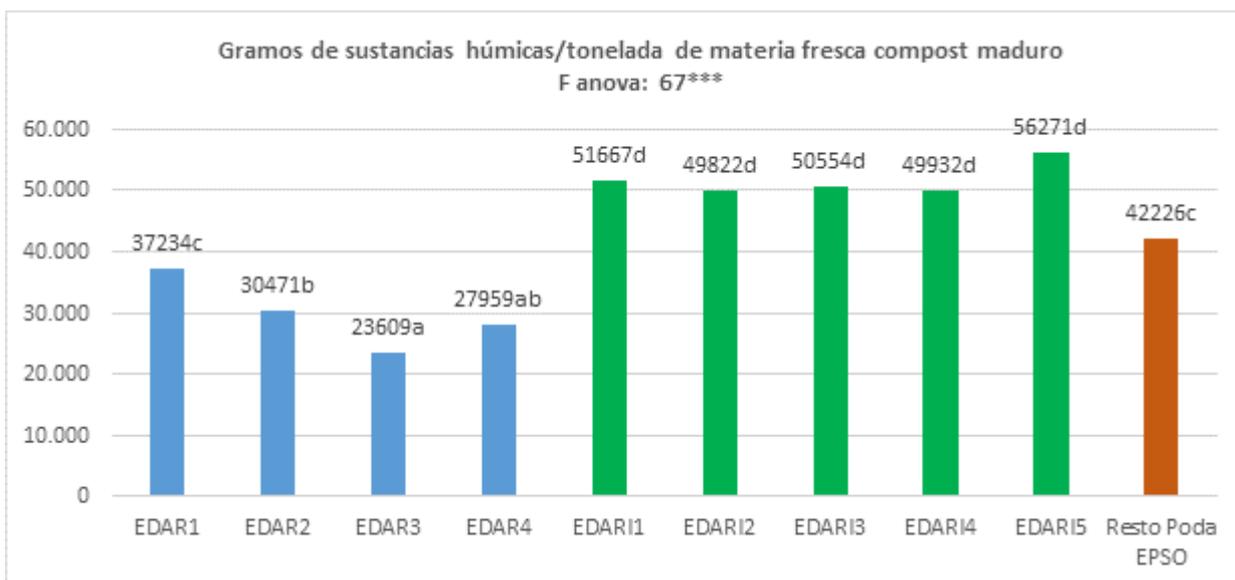


Análisis en función del ingrediente 1

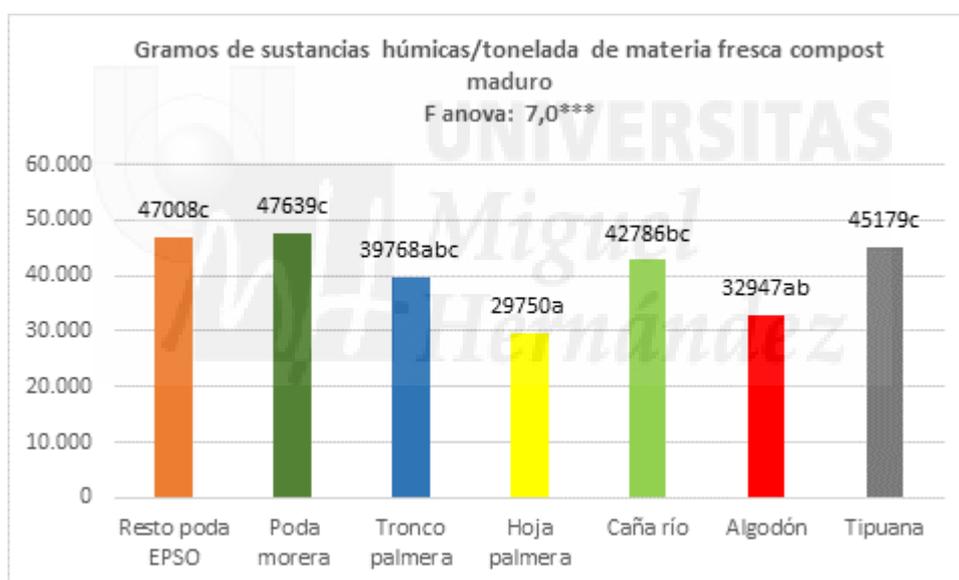


Análisis en función del ingrediente 2

Figura 29. Comparación de los gramos de sustancias húmicas/tonelada de materia seca en el compost maduro.

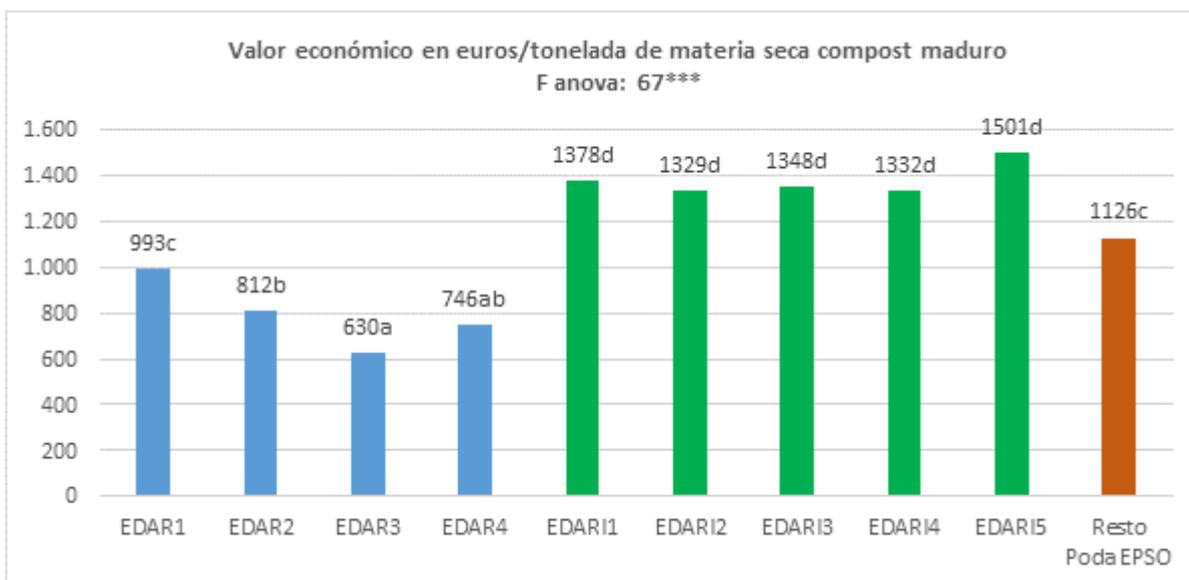


Análisis en función del ingrediente 1

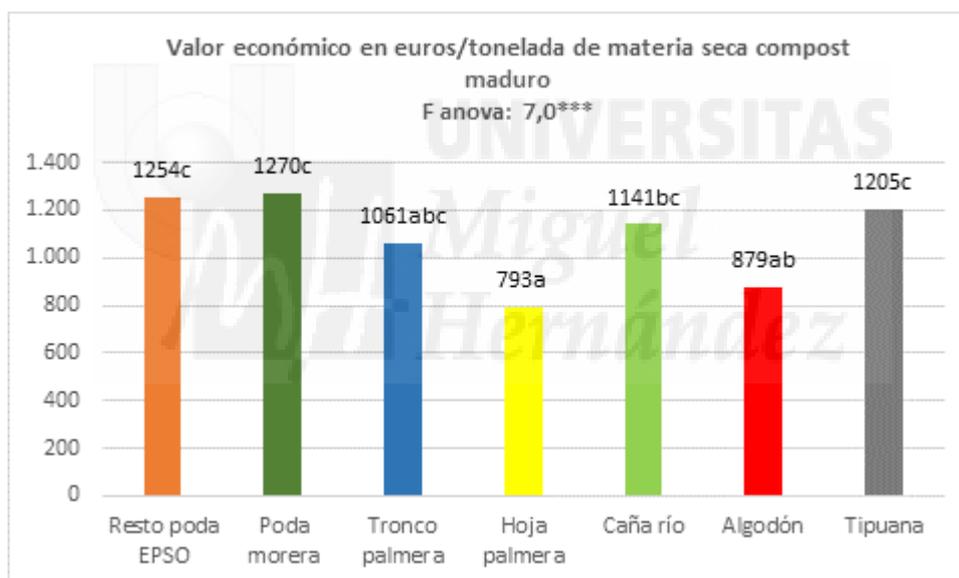


Análisis en función del ingrediente 2

Figura 30. Comparación de los gramos de sustancias húmicas/tonelada de materia fresca en el compost maduro.

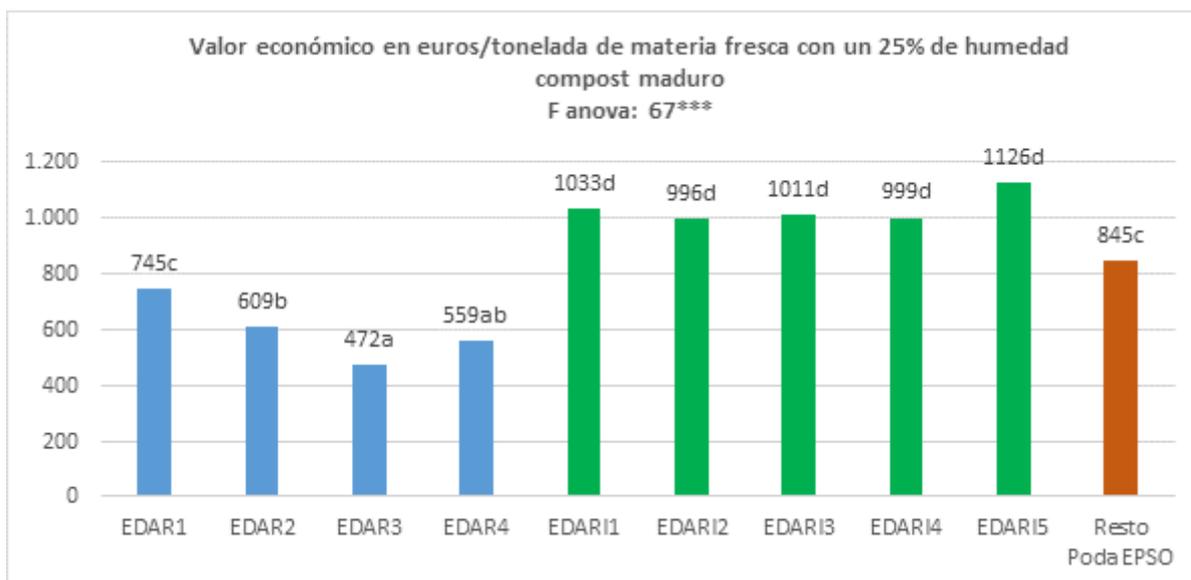


Análisis en función del ingrediente 1

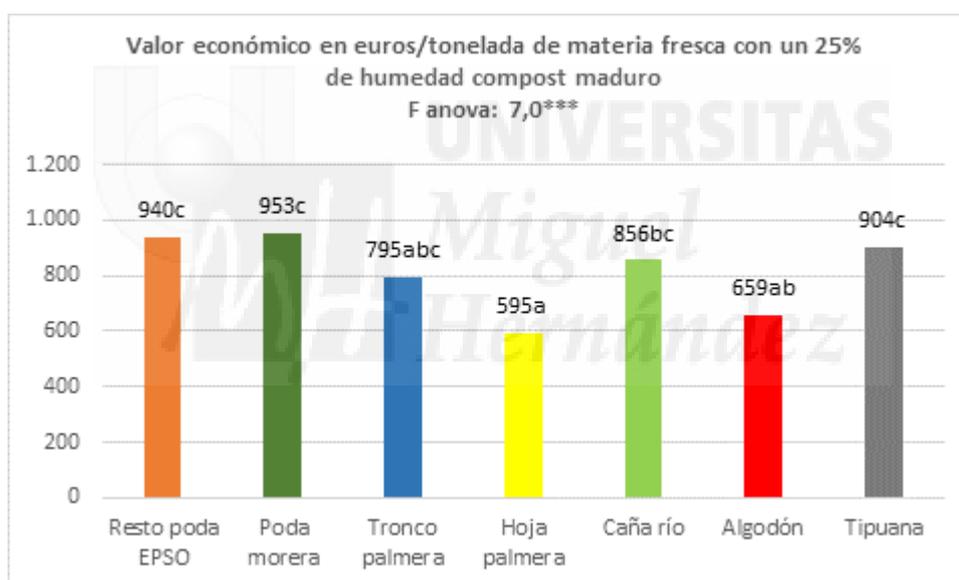


Análisis en función del ingrediente 2

Figura 31. Comparación del valor económico en euros/tonelada de materia seca en el compost maduro.



Análisis en función del ingrediente 1



Análisis en función del ingrediente 2

Figura 32. Comparación del valor económico en euros/tonelada de materia fresca con un 25% de humedad en el compost maduro.

El estudio económico en la gestión de los residuos orgánicos es un tema del cual no hay numerosos trabajos realizados y tampoco en el que se comparen distintos grupos de materiales.

El valor de los recursos orgánicos no se encuentra estandarizado y depende de un valor integrado de las virtudes de los materiales (por ejemplo; calculando el poder fertilizante, el contenido de materia orgánica etc.) En la mayoría de los casos se hacen aproximaciones respecto al contenido equivalente NPK especialmente en los compost. Sin embargo, el contenido en sustancias húmicas nunca se había estandarizado ni tampoco cuantificado. Parece claro que las sustancias húmicas contenidas en recursos orgánicos no específicos están diluidas en una gran masa de materia orgánica, por lo que el valor no puede ser equivalente pero si consideremos que lo son los beneficios generales que sobre el suelo enmendado se ejercen. Por tanto, en un paralelismo entre una mina de oro en Alaska y un lingote refinado de oro, el principio activo es el mismo (oro-sustancias húmicas) pero la concentración es diferente (en la superficie extractiva esta disperso el oro del mismo modo que lo están las SHs en una tonelada de compost por ejemplo), pero los beneficios y funcionalidades de las SHs se encuentran mejor repartidas en una enmienda que en una adición puntual de fertirrigación. El valor equivalente se podría ponderar mediante un factor diferencial entre SHs concentradas y dispersas pero lo que es indiscutible es la oportunidad y el valor económico de lo contenido en las enmiendas orgánicas ya sea a nivel de nutrientes primarios vg. N-P₂O₅-K₂O como ya establecieron Jara-Samaniego (2016) sino también el valor asociado a la presencia de SHs.

Realizando una evaluación integradora, IPTS (2011) establece el coste del compostaje entre los 20-60 €/tonelada según la tecnología empleada, aunque el precio del compost en su venta a granel es mucho menor y está relacionado sobre todo con el transporte a destino, que incrementa en torno a 5 €/tonelada. Unificando costes, se genera un compost que oscila entre 28 y 70 €/tonelada. Considerando el compost a granel, el valor promedio de referencia sería en torno a 25 €/tonelada (Restrepo, *et al.*, 2013). Esto ha generado un elevado consumo de fertilizantes nitrogenados en los últimos años, provocando perjuicios desde el punto de vista económico y medioambiental (Cordovil *et al.*, 2007; Ramos, 2005).

Sin embargo, Jara-Samaniego *et al.*, (2016 y 2017) establecieron el valor económico de los nutrientes de los compost considerando los precios de fosfato de diamonio (PDA), cloruro de potasio y urea en Ecuador publicados en el Boletín de

Agroquímicos y Fertilizantes del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador de julio-2016. Sobre la bases de estos materiales, se determinó el valor de 100 Kg de cada componente respectivamente (N, P₂O₅ y K₂O), considerando un contenido de 25% de materia fresca en todos los compost. En Ecuador el precio promedio de la urea, DPA y cloruro de potasio a julio de 2016 fue \$432,4; \$674 y \$475 respectivamente, el valor de las unidades fertilizantes de N, P₂O₅ y K₂O se podrían promediar en 0,94; 3,33 y 0,96 \$/100 Kg. Con estos valores y la concentración de los nutrientes en los compost finales se estableció el valor de cada compost, dando un promedio de \$47,77/tonelada.

Tabla 9. Valor de cada compost en función del contenido de nutrientes (\$/tonelada de compost sobre base fresca).

Nutrientes ¹	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Promedio
N total	11,28	11,42	11,49	18,19	15,93	15,65	13,99
P ₂ O ₅	18,99	18,99	21,74	25,99	24,49	19,74	21,66
K ₂ O	8,92	9,28	10,15	24,97	11,88	7,48	12,11
Valor total combinado	39,19	39,70	43,98	69,15	52,30	42,88	47,77

¹El valor del contenido de nutrientes se ha calculado considerando el 25% de materia fresca en los compost.

En las **figuras 29 y 30** se representan los gramos de sustancias húmicas por tonelada de materia seca y materia fresca en el compost maduro, respectivamente, para ambos ingredientes estudiados. Se observa un comportamiento común en ambos parámetros. Para la variable ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) podemos observar que la incorporación de lodo EDARI al compost ha supuesto mayor cantidad en gramos de sustancias húmicas frente al aporte en los compost de lodos EDAR, tanto respecto a la materia seca como a la fresca. Respecto al ingrediente 2 (*agente estructurante*) en el compost, tanto la incorporación de tipuana, restos de poda EPSO o restos de poda de morera, tienen el mayor contenido en gramos de sustancias húmicas, mientras que con la adición de hoja de palmera tenemos menos gramos de sustancias húmicas, tanto respecto a la materia seca como a la fresca.

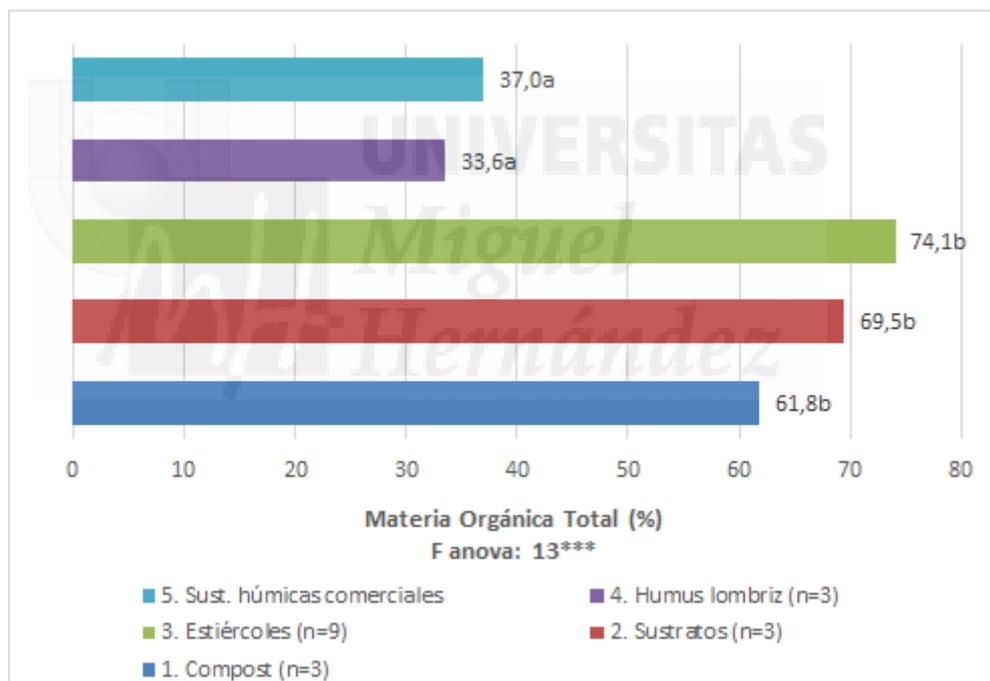
En las figuras 31 y 32 se representa el valor económico en euros por tonelada de materia seca y materia fresca con un 25% de humedad en el compost maduro respectivamente, para ambos ingredientes estudiados. Para el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) todos los compost elaborados con lodos EDARI suponen un mayor valor económico en el mercado frente a la incorporación de lodos EDAR, debido a que el precio viene en función del contenido en gramos de sustancias húmicas tanto para la materia seca como para la materia fresca con un 25% de humedad. Mientras que para el ingrediente 2 (*agente estructurante*), tanto la incorporación de tipuana, restos de poda EPSO o restos de poda suponen una estimación del valor económico mayor, mientras que con la adición de hoja de palmera y restos de algodón tenemos menos gramos de sustancias húmicas por lo tanto nuestros compost tendrán menor valor económico, tanto para la materia seca como para la materia fresca con un 25% de humedad.

Por lo observado anteriormente, las sustancias húmicas se encuentran más próximas al material vegetal frente a otros materiales residuales (los lodos EDARI que proceden de la producción vegetal tienen más SHs que los lodos EDAR). Además si observamos la evolución en función del ingrediente estructurante (ingrediente 2), parece observarse más valor económico cuanto más estructurante es el material. Esto es, cuanto mayor es el tejido estructural, que contiene lignina, lignino-celulosa y en menor grado celulosa, conforman más SHs. Esto es esperable puesto que los precursores estructurales en la formación de SHs son precisamente esos polímeros vegetales y cuanto más refractarios son a su degradación, más posible es que puedan formar parte de las sustancias denominadas húmicas en los recursos orgánicos estabilizados.

4.2.1. Contenido en parámetros relacionados con la materia orgánica y las sustancias húmicas en recursos orgánicos en el grupo de materiales B (recursos orgánicos comerciales de distinta naturaleza)

A continuación, dentro del grupo B compuesto por 20 productos comerciales de distinta naturaleza y tipología (estiércoles, compost humus de lombriz, sustratos y sustancias húmicas comerciales) se ha hecho un estudio estadístico del contenido en materia orgánica total, cenizas, carbono orgánico total, nitrógeno total, C/N, carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, carbono de los ácidos fúlvicos y carbono de los ácidos húmicos.

4.2.1.1. Materia orgánica total (%) y Cenizas (%)



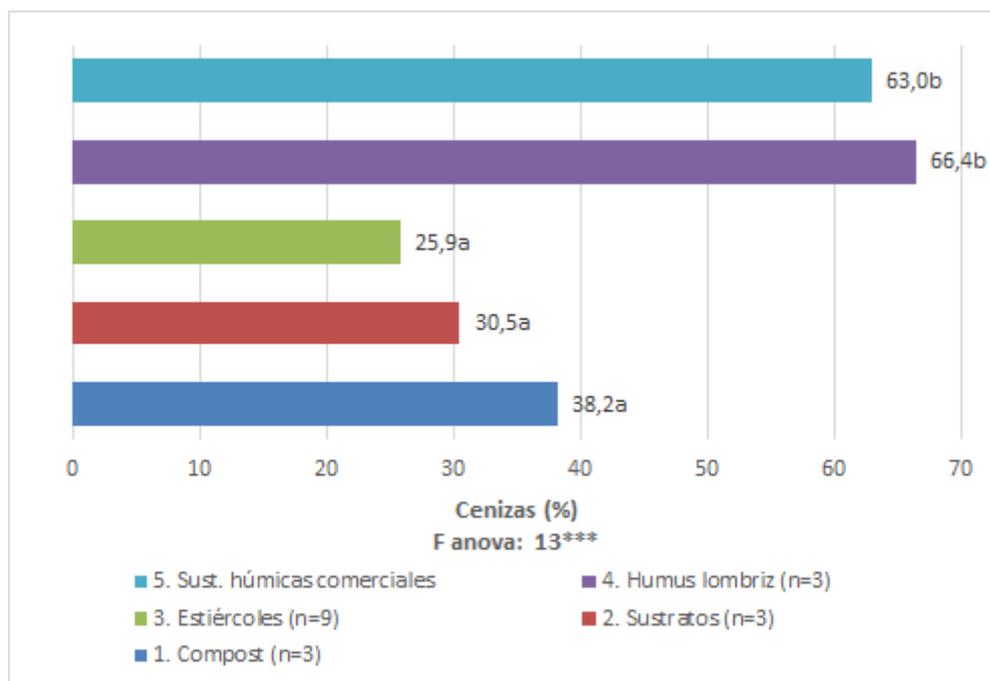


Figura 33. Comparación del contenido en materia orgánica total y ceniza en el grupo B de materiales.

En la **Figura 33**, observamos el porcentaje en materia orgánica total y cenizas para el grupo B de materiales (sustancias húmicas comerciales, estiércoles, compost, humus de lombriz y sustratos). Podemos observar que los cinco tipos de materiales se separan en dos grandes grupos diferenciados estadísticamente cuando hablamos de la materia orgánica total, por un lado las sustancias húmicas comerciales y el humus de lombriz que presentan porcentajes de materia orgánica más bajos en torno al 33,6-37%, frente al resto de materiales, que son, compost, sustratos y estiércoles con porcentajes en materia orgánica más altos entre 61,8-74,1%. Los grupos de materiales especificados en el RD 506/2013 sobre productos fertilizantes establecen para vermicompost (MOT 30%), compost (MOT 35%) y las enmiendas orgánicas húmicas (MOT 25%) cumpliendo nuestras muestras con los contenidos mínimos de materia orgánica total. Así también, en el RD 865/2010 sobre sustratos de cultivo se establece el valor mínimo que debe tener de materia orgánica total los sustratos (20%) cumpliendo también este requisito. Destacan los elevados niveles de MOT (74%), para el grupo de los estiércoles analizados a pesar de la distinta naturaleza de las especies animales representadas (gallina, oveja, cabra, conejo, elefante y rinoceronte). Moral *et al.*, (2005), encontraron

que el contenido medio de materia orgánica en 32 muestras de estiércoles de entre 39,6-69,7%.

También observábamos el porcentaje en cenizas de los materiales, mostrando correctamente el comportamiento inverso frente a la materia orgánica total. El porcentaje en cenizas nos informa acerca de los compuestos inorgánicos que presentan los materiales, y por tanto fácilmente disponibles para la planta siendo mayor este porcentaje en las sustancias húmicas comerciales y humus de lombriz 63-66,4% e inferior en el compost, estiércoles y sustratos 25,9-38,2%.

El valor medio para los humus de lombriz presentan los valores más altos de cenizas frente al resto de materiales. Pérez Espinosa *et al*, (2016) observaron, en general, un descenso de los niveles de materia orgánica total tras el vermicompostaje, como consecuencia de una mayor mineralización de la materia orgánica a la que son sometidos los compost por las lombrices. El vermicompostaje favorece que los elementos de la materia orgánica se mineralicen hasta formas químicas solubles que son fácilmente asimiladas por la planta (Edwards, 1988; Orozco *et al*, 1996).

4.2.1.2. Carbono orgánico total (%)

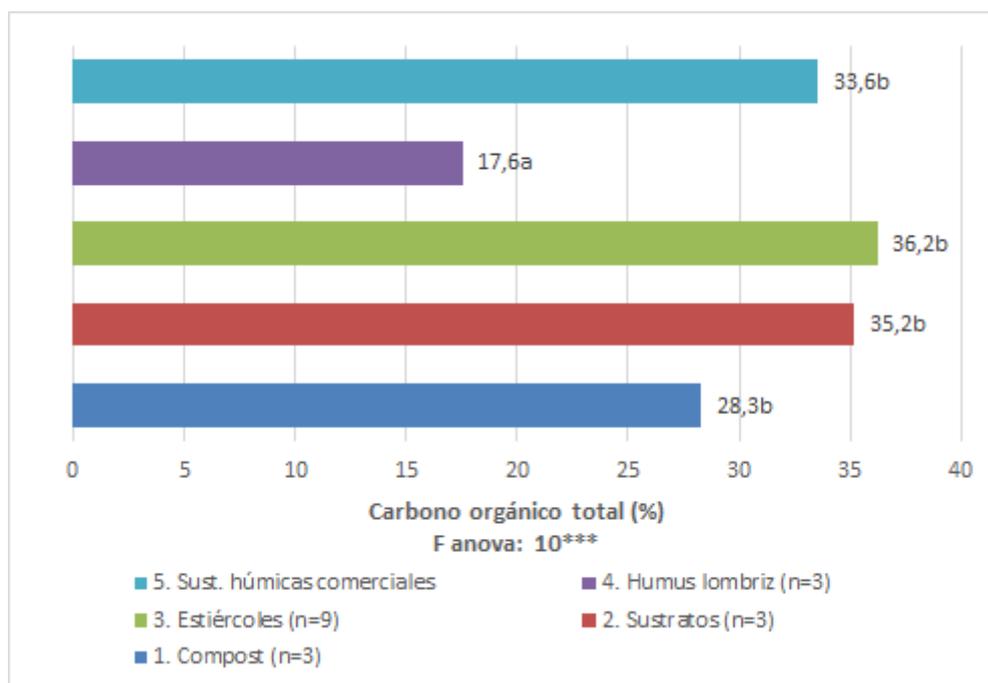


Figura 34. Comparación del contenido en carbono orgánico total en el grupo B de materiales.

Respecto a la **Figura 34**, podemos observar que el carbono orgánico total, en los vermicompots presenta niveles estadísticamente más bajos en comparación al resto de materiales 17,6% frente al rango 28,3-36,2% del resto, correspondiente así a los valores de materia orgánica total más bajos y los mayores de carbono orgánico, al grupo de los estiércoles con los valores más altos de todos.

El humus de lombriz, presenta un contenido en carbono orgánico total más bajo acorde con su valor más bajo de materia orgánica total a diferencia de los sustratos comerciales que a pesar de tener bajo contenido en materia orgánica total su contenido en carbono orgánico es más elevado.

La degradación de los residuos orgánicos durante los procesos de vermicompostaje se refleja principalmente en la mineralización de las moléculas orgánicas de estos residuos hasta compuestos inorgánicos y formas orgánicas más simples entre las cuales destaca la producción de CO₂. Originado por este proceso bio-oxidativo. De esta forma, en cualquier proceso de vermicompostaje se produce una

disminución de los valores de carbono total del residuo orgánico inicial, la cual ocurre en un grado variable.

El grado de disminución varía dependiendo de diferentes factores como naturaleza del residuo orgánico, su biodegradabilidad, la especie de lombriz utilizada y su densidad, así como de las condiciones en las que se desarrolla el vermicompostaje y su duración (Nogales *et al.*, 2008).

4.2.1.3. Nitrógeno total (%)

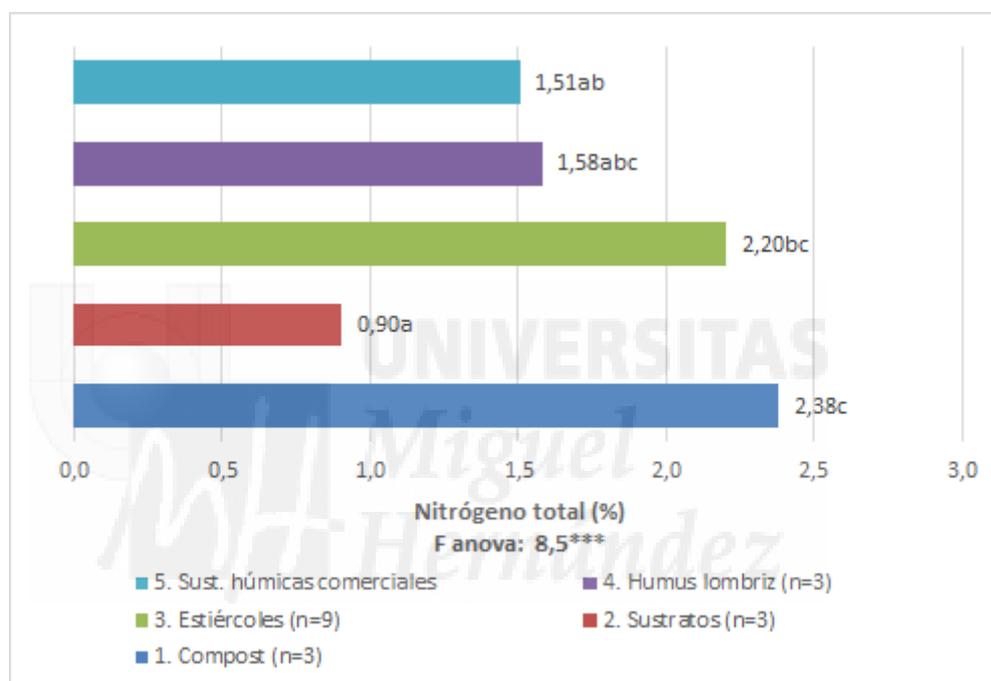


Figura 35. Comparación del contenido en nitrógeno total en el grupo B de materiales.

Respecto a la **Figura 35**, vemos el porcentaje en nitrógeno total de los cinco materiales, destacando el valor bajo de los sustratos (0,90%) frente al resto de materiales. Los valores obtenidos para los cinco grupos de materiales presentan valores sensiblemente más bajos que los de otros recursos orgánicos como son los lodos de depuradora, con valores entorno al 4-5 % en nitrógeno total (Torrecillas, 2011).

4.2.1.4. Relación carbono/nitrógeno

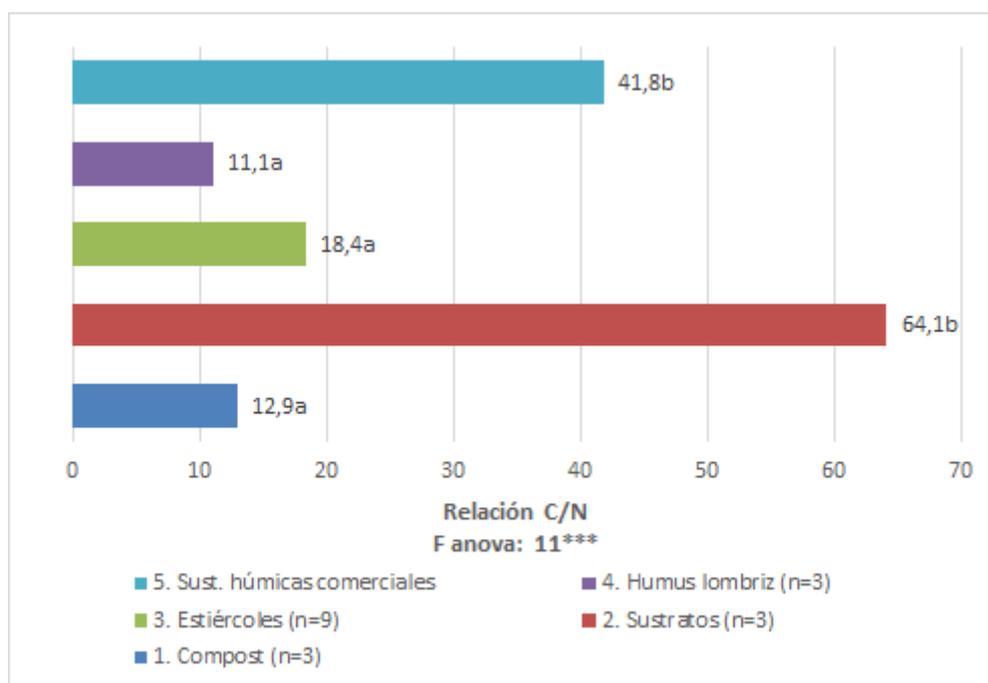


Figura 36. Relación carbono/nitrógeno en el grupo B de materiales.

La relación C/N es un indicador de la fuente de sustancias húmicas en sistemas naturales.

Respecto a la **Figura 36**, podemos conocer cuál es la relación carbono/nitrógeno de los cinco grupos de materiales analizados, observamos claramente dos grupos estadísticamente distintos, por un lado los que tienen una relación C/N alta 41,8-64,1 que son las sustancias húmicas comerciales y los sustratos, mientras que los estiércoles, compost y productos comerciales tienen una relación muy baja entre 11,1-18,4.

Debido a los descensos del carbono orgánico total y a las modificaciones que experimentan los valores de nitrógeno, la relación C/N del residuo disminuye apreciablemente tras su vermicompostaje. Un descenso en la relación C/N ha sido siempre observado en todos los procesos de vermicompostaje, independientemente del tipo de residuo o sustrato orgánico ensayado (Kale *et al.*, 1982; Edwards, 1988; Nogales *et al.*, 2008).

Los vermicompost obtenidos deben presentar relaciones C/N inferiores a 20, valor referencial utilizado para indicar un grado de estabilización de la materia orgánica adecuado en el producto obtenido, así como los valores C/N indicados en compost también $C/N < 20$. (RD 2013, sobre productos fertilizantes).

Según Torrecillas, (2011), en un estudio de caracterización de lodos de depuradora, la relación C/N fue sensiblemente menor (5,5-6,8). Campitelli y Ceppi, (2008) encontraron valores de relación C/N alrededor de 10-20 en compost y vermicompost, tal y como ocurre en nuestro caso aunque más rozando el rango inferior para estos dos materiales en nuestro caso. Bustamante *et al.*, (2008), encontraron valores entre 10 y 15 en diversos compost de tipo agroalimentario, más acordes con nuestros resultados.

4.2.1.5. Carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (%)

Las sustancias húmicas se definen operativamente como la fracción que representa la parte insoluble en ácido y soluble en álcalis de la materia orgánica (IHSS, 2015). Desde el punto de vista químico los ácidos húmicos consisten en una mezcla de pequeñas moléculas orgánicas vinculados en los dominios supramoleculares hidrófilos/hidrofóbicos (Piccolo, 2002; Canellas *et al.*, 2002).

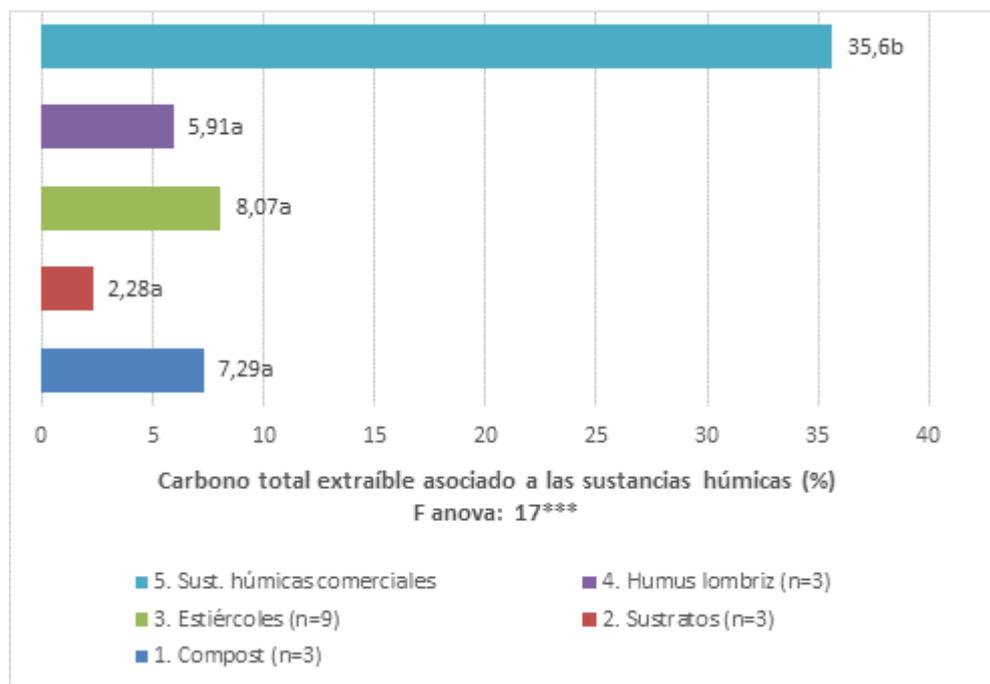


Figura 37. Comparación del contenido en carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas en el grupo B de materiales.

Durante el compostaje, la concentración de ácidos húmicos aumenta debido fundamentalmente a la degradación de la lignina, combinándose a posteriori los productos así obtenidos para formar moléculas más complejas (García-Gómez *et al.*, 2005). En este contexto, Hue y Liu (1995) establecieron algunos valores óptimos en relación con las distintas formas de carbono orgánico, concretamente carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas.

Los procedimientos de compostaje y vermicompostaje son métodos útiles para producir un material orgánico estabilizado y maduro; rico en sustancias húmicas, que pueden cambiar algunas propiedades en la solución del suelo. Aunque en ambos procesos se estabiliza y madura la materia orgánica, rica en ácidos húmicos y contribuyen a las funciones esenciales de la fertilidad y la salud global del suelo. La evaluación de la calidad del compost y/o vermicompost no siempre es suficiente; Muchos investigadores todavía están explorando diferentes metodologías, en particular desde el punto de vista de sus actividades nutritivas y microbianas.

En la **Figura 37**, podemos observar el contenido de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, donde hay 4 grupos diferentes, destacando los bajos valores de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas en los sustratos comerciales, después le siguen el humus de lombriz y los compost, con valores estadísticamente parecidos y superados por el grupo estiércoles. Finalmente y muy separados del resto, destacan los elevados niveles presentes en las sustancias húmicas comerciales diseñadas para tal fin con valores en carbono superiores al 50%.

Scaglia *et al.*, (2016), encuentran también valores de carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas de vermicompots maduros en el mismo rango que nosotros de 7,1 -9,8 (%).

4.2.1.6. Carbono de los ácidos fúlvicos (%)

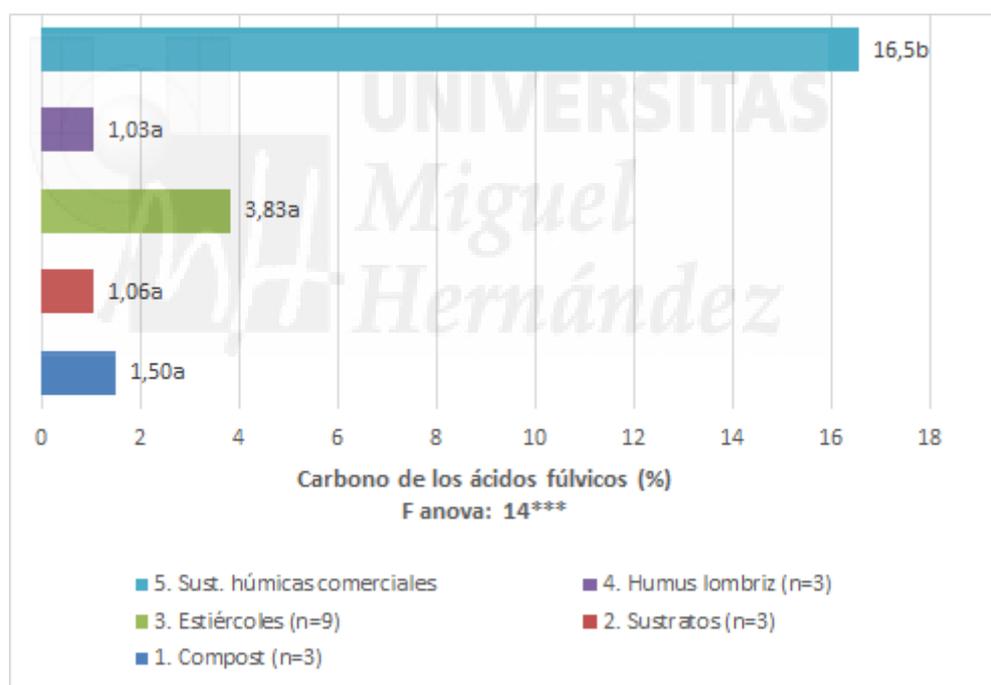


Figura 38. Comparación del contenido en carbono de los ácidos fúlvicos en el grupo B de materiales.

En la **Figura 38**, vemos el contenido de carbono asociado a los ácidos fúlvicos en nuestros materiales, clasificándose en dos grupos muy diferenciados por un lado vemos que el contenido de ácidos fúlvicos productos comerciales es muy elevado

16,5% frente al bajo nivel del resto de tipos de materiales como son los compost, estiércoles, vermicompost y sustratos que tienen niveles comprendidos entre 1,03-3,83%.

Durante las etapas finales del proceso de vermicompostaje y/o durante la maduración (sin lombriz) de los vermicomposts obtenidos la materia orgánica que no ha sido mineralizada tiende a humificarse, polimerizarse y policondensarse, aumentando así los niveles de las sustancias húmicas (ácidos húmicos y en menor medida ácidos fúlvicos) en los productos resultantes del vermicompostaje entre un 20-60% respecto a los registrados en los materiales de partida.

4.2.1.7. Carbono de los ácidos húmicos (%)

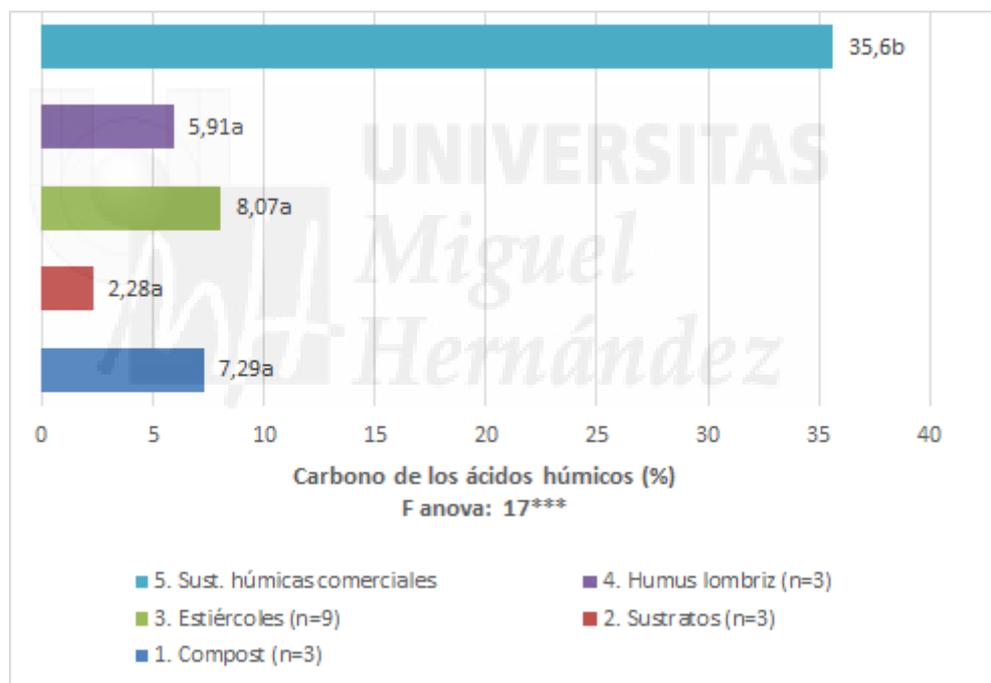


Figura 39. Comparación del contenido en carbono de los ácidos húmicos en el grupo B de materiales.

En la **Figura 39**, vemos el contenido de ácidos húmicos en nuestros materiales, clasificándose en dos grupos muy diferenciados, al igual que hemos visto con los ácidos fúlvicos, por un lado vemos que el contenido de ácidos húmicos comerciales es muy elevado 35,6% frente al bajo nivel del resto de tipos de materiales como son los

compost, estiércoles, vermicompost y sustratos que tienen niveles comprendidos entre 2,28-8,07%.

Hay mayor cantidad de carbono húmico que carbono de los ácidos fúlvicos, para los cinco grupos de materiales estudiados lo que supone un mayor contenido de carbono más evolucionado en las formas carbonadas presentes en los recursos orgánicos. Estos resultados están acordes con Campitelli and Ceppi (2008) encuentran que en compost y vermicompost, predominan los ácidos húmicos sobre los ácidos fúlvicos. Ello indica la mayor estabilidad de estos materiales comparados con los lodos de depuradora.

Sin embargo, Moral *et al.*, (2005) encontraron lo contrario para los estiércoles analizados donde el contenido en carbono asociado a los ácidos fúlvicos es mayor que el contenido de carbono asociado a los ácidos húmicos.

Según Franco y Bañón (1998) es importante tener presente que la fracción extraíble de los materiales humificados comprende un abanico que va desde los ácidos fúlvicos a los ácidos húmicos. Cuando la materia prima sea joven y poco humificada, se obtendrán fracciones fúlvicas en su mayoría, con predominio de estructuras alifáticas que son altamente hidrofílicas y muy activas en cuanto a su interacción con los micronutrientes. Por el contrario, en las fracciones procedentes de materiales muy carbonizadas predominarán ácidos húmicos con estructuras aromáticas muy condensadas y de elevados pesos moleculares.

4.2.2. Índices de evolución de la materia orgánica en el grupo de materiales B (recursos orgánicos comerciales de distinta naturaleza)

Existen una serie de índices que nos ayudan a estudiar cual es la evolución de las formas de carbono ligadas a la materia orgánica y que vamos a emplear en este trabajo son los índices siguientes: la relación de humificación (carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas/carbono orgánico total), el índice de humificación (carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total), el porcentaje de ácidos húmicos (carbono de los ácidos húmicos/carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas) y la

relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos).

4.2.2.1. Relación de humificación

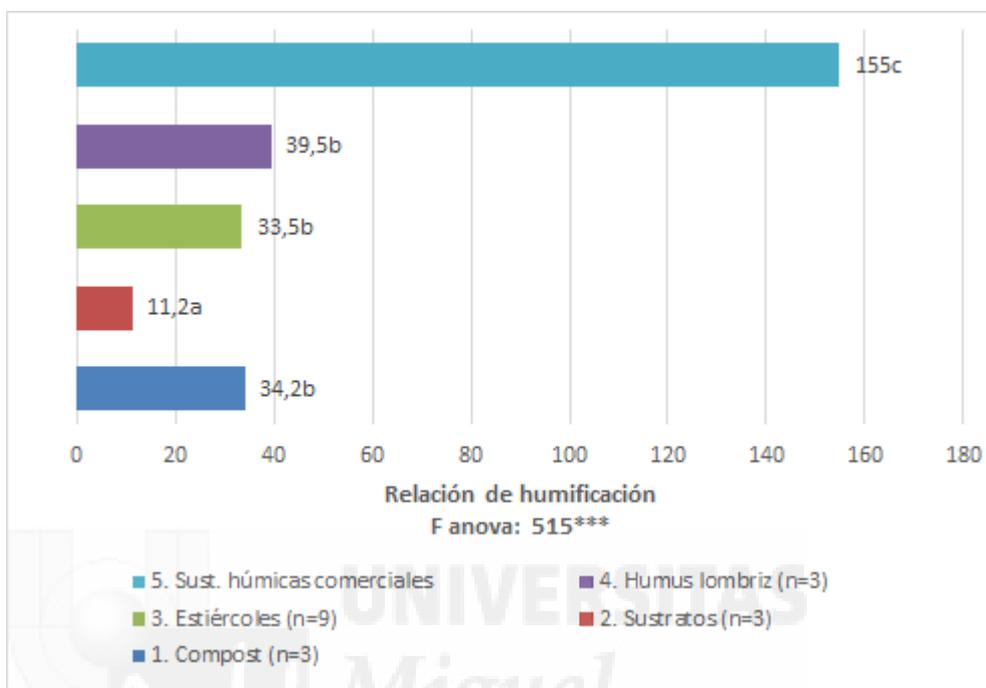


Figura 40. Relación de humificación en el grupo B de los distintos grupos de materiales.

De la **Figura 40**, podemos destacar que las sustancias húmicas comerciales presentan una relación de humificación estadísticamente muy superior (155) al resto de materiales. Le siguen el grupo de humus de lombriz, estiércoles, compost y como valor más bajo están los sustratos (11,2).

4.2.2.2. Índice de humificación

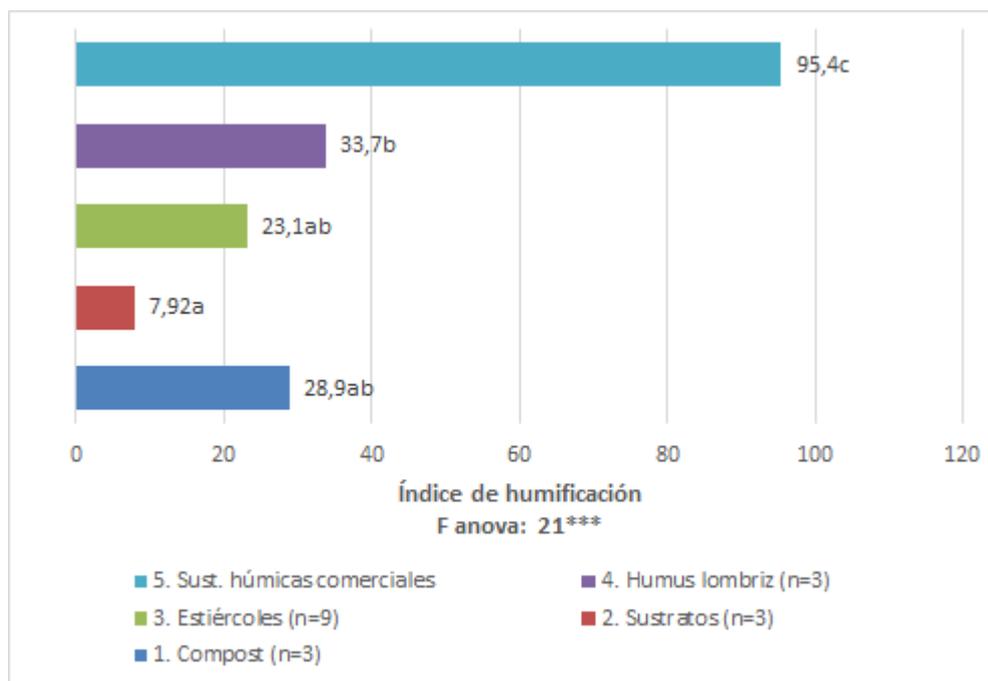


Figura 41. Relación índice de humificación en el grupo B de materiales.

La materia orgánica no humificada en residuos orgánicos potencialmente agrícolas, puede producir fitotoxicidad en las plantas. A fin de estimar el nivel de estabilidad de la materia orgánica se determinaron índice de humificación.

En la **Figura 41**, podemos ver que la tendencia es la misma para este índice que para el que muestra la relación de humificación donde claramente destaca el valor tan elevado que presentan las sustancias húmicas comerciales (95,4) frente al resto de materiales de este grupo, destacando de nuevo el valor más bajo que tiene el grupo de los sustratos (7,92).

4.2.2.3. Porcentaje de ácidos húmicos

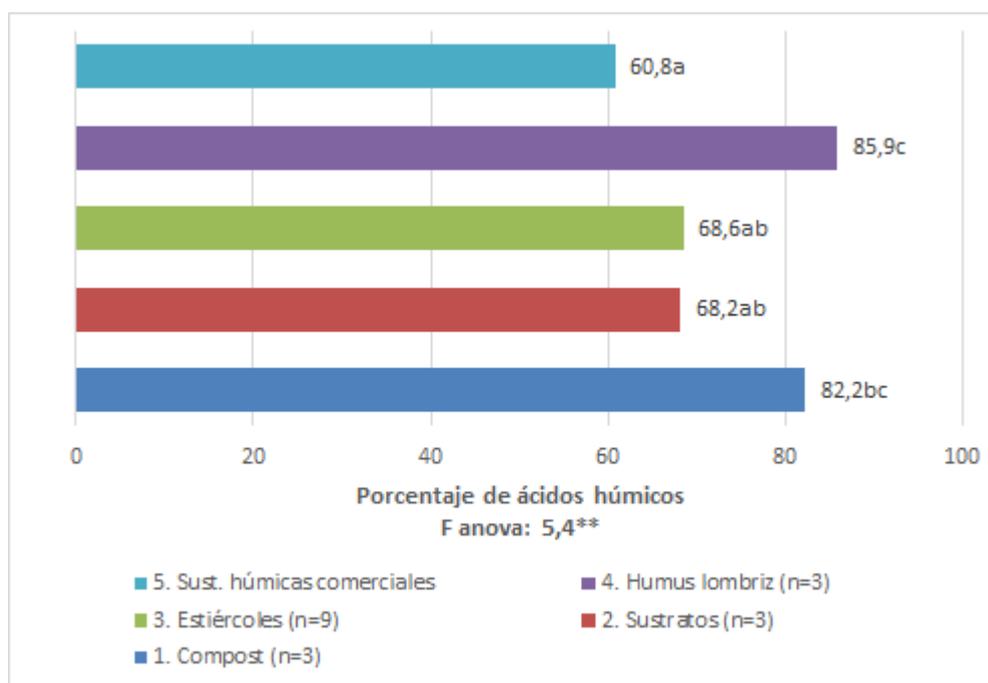


Figura 42. Relación porcentaje de ácidos húmicos en el grupo B de materiales.

Tal y como podemos observar en la **Figura 42**, los materiales humus de lombriz y compost son los que presentan los porcentajes más altos (85,9-82,2) de carbono asociado a los ácidos húmicos respecto al carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas de todos los materiales.

4.2.2.4. Relación de polimerización

Este parámetro nos da idea de la evolución de la materia orgánica que presentan estos materiales y del balance entre los ácidos húmicos/fúlvicos en estos materiales orgánicos, de manera que si predominan los ácidos húmicos, se trata de un material más humificado frente a un material algo menos humificado en el que predominan los ácidos fúlvicos. Así en los materiales donde la relación es mayor significa que son materiales más evolucionados frente a otros materiales con la relación más baja, que implican unos valores entre las formas de carbono más parecidas entre sí.

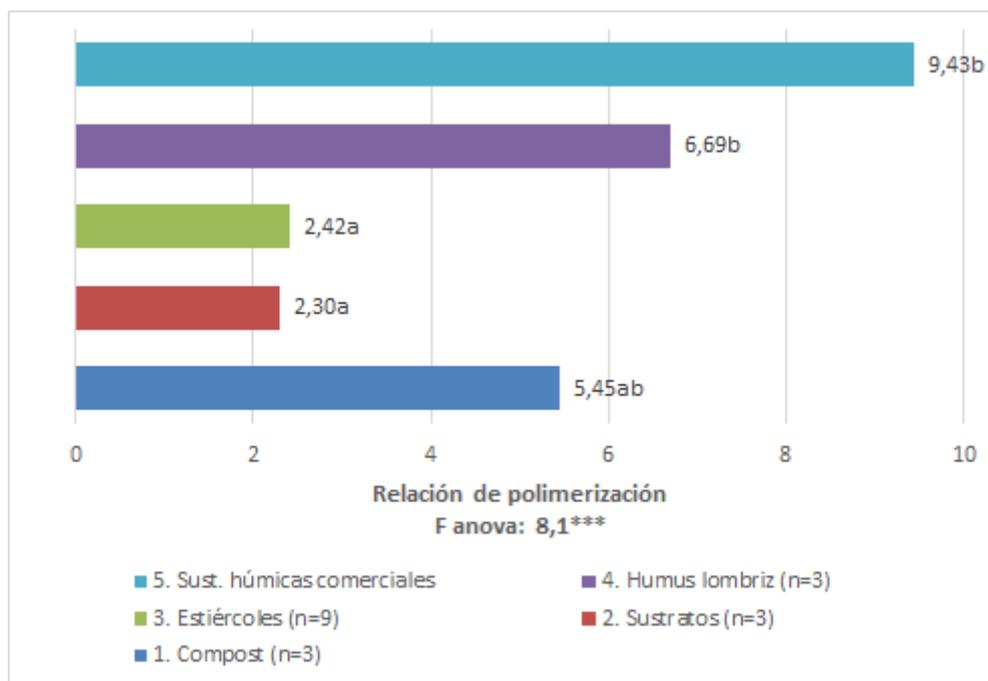


Figura 43. Relación carbono ácidos húmicos frente a carbono ácidos fúlvicos en el grupo B de materiales.

En la **Figura 43**, podemos observar que el grupo de las sustancias húmicas comerciales y humus de lombriz presentan unos valores para esta relación elevados (6,69-9,43), indicativo del predominio del carbono de los ácidos húmicos frente al carbono de los fúlvicos. Le siguen los compost, mostrando los valores intermedios y estadísticamente iguales para los sustratos y los estiércoles dentro del grupo de materiales, con los valores más bajos y muy iguales entre sí, indicando valores de carbono de los ácidos húmicos y fúlvicos parecidos entre sí.

4.2.3. Valor económico equivalente de sustancias húmicas en el grupo de materiales B (recursos orgánicos comerciales de distinta naturaleza)

A continuación se va a realizar el estudio de valor económico equivalente de las sustancias húmicas en el grupo de materiales B, para ellos se ha seguido la misma metodología que en el grupo A de materiales. Para ello se ha considerado la misma recopilación de datos que aparece en la **Tabla 5**.

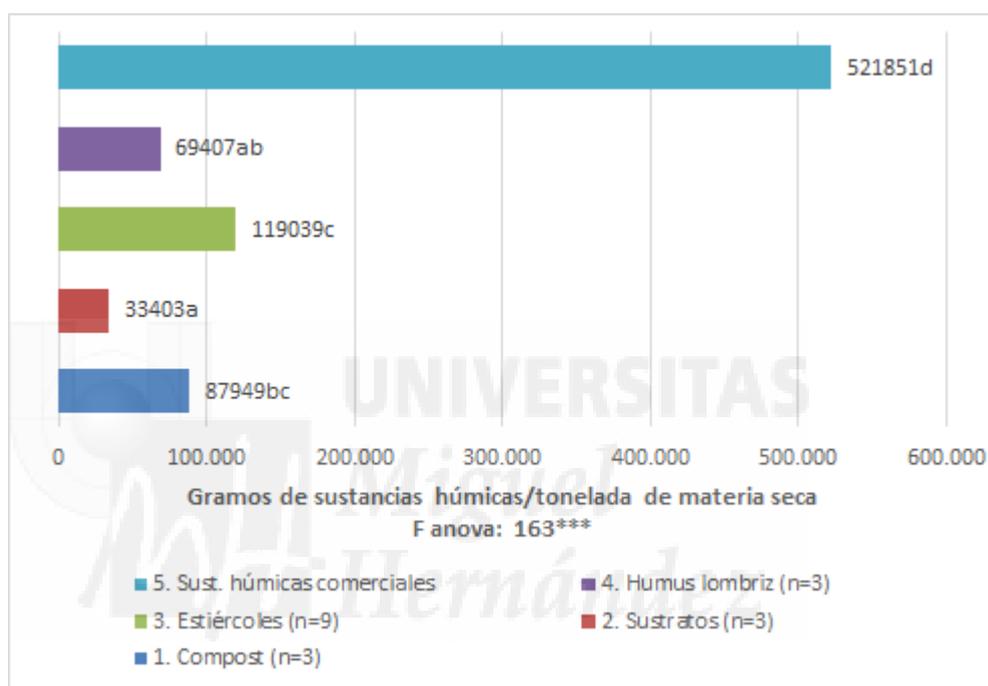


Figura 44. Comparación gramos de sustancias húmicas/tonelada de materia seca en el grupo B de materiales.

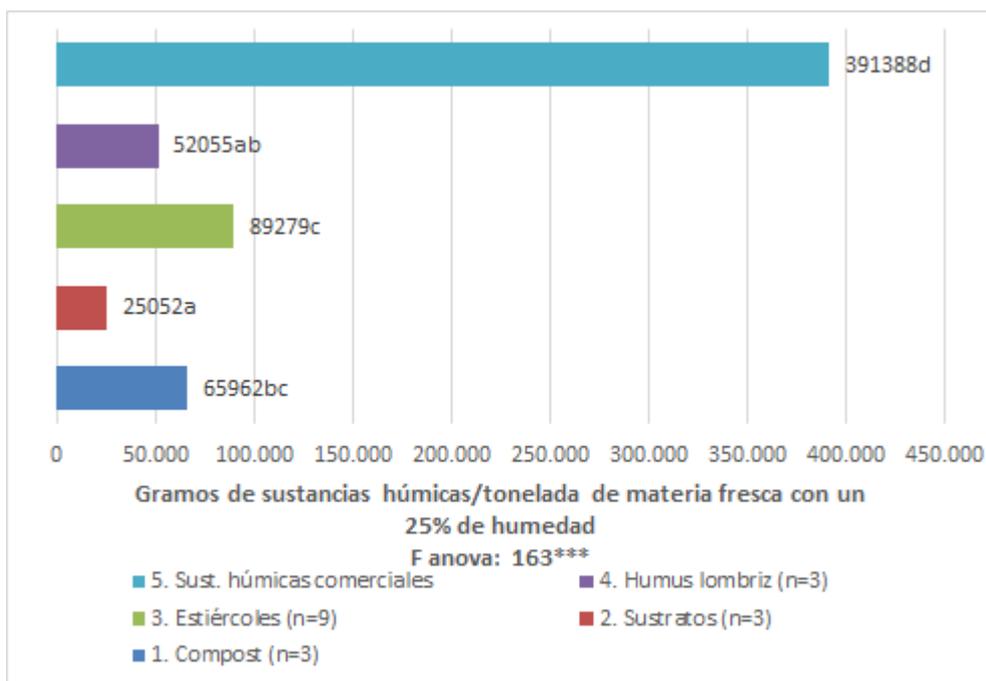


Figura 45. Comparación gramos de sustancias húmicas/tonelada de materia fresca con un 25% de humedad en el grupo B de materiales.

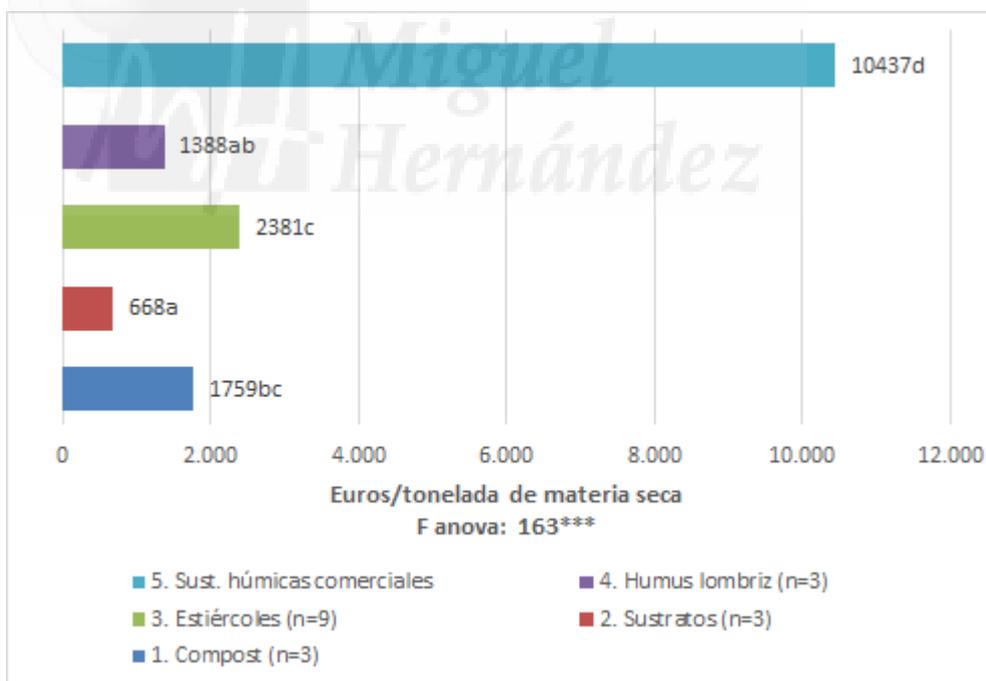


Figura 46. Comparación euros/tonelada de materia seca en el grupo B de materiales.

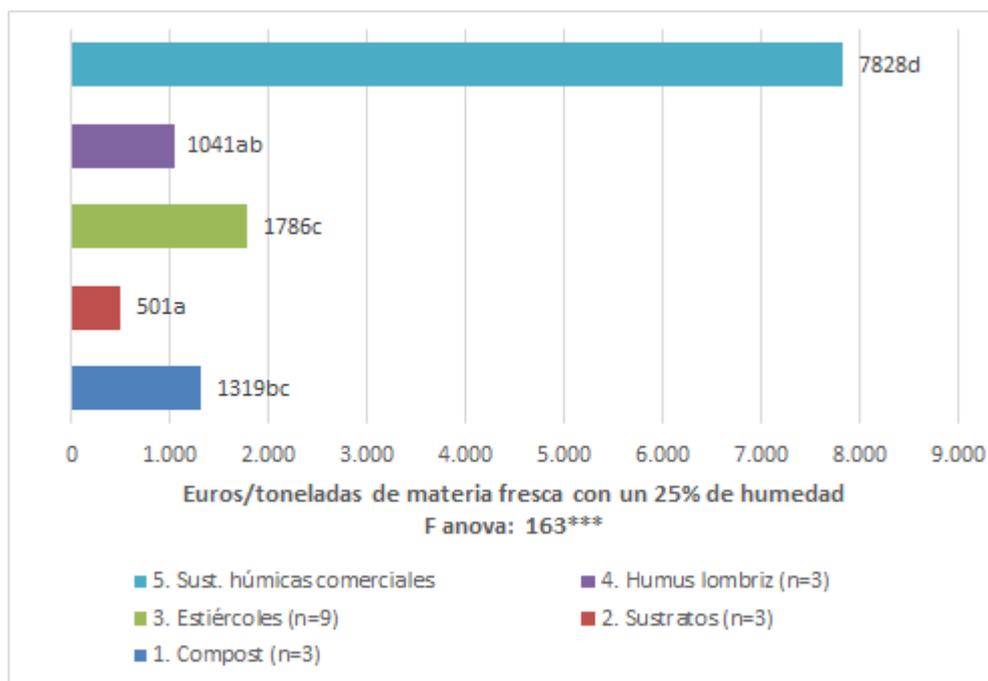


Figura 47. Comparación euros/tonelada de materia fresca con un 25% de humedad en el grupo B de materiales.

Los cálculos realizados en el apartado de costes económicos, se han llevado a cabo considerando por un lado el contenido en gramos de sustancias húmicas que hay en una tonelada tanto de materia seca como de materia fresca con un 25% de humedad, para cada tipo de material analizado (compost, sustratos, estiércoles, humus de lombriz y sustancias húmicas comerciales) y por otro lado el valor económico que alcanzaría en el mercado nuestros distintos grupos de materiales en función de las sustancias húmicas que contienen.

Para ello se ha realizado una recopilación de productos comerciales denominadas sustancias húmicas, puestos actualmente en el mercado, como se muestra en la **Tabla 5**, del apartado de materiales y métodos. Se ha realizado el análisis de varios parámetros orientativos para ayudarnos al estudio económico referidos al precio de cada uno de los materiales analizados en este trabajo y pensando en su valor estimativo como sustancias húmicas.

Para determinar el valor equivalente de nuestras muestras en el mercado se ha realizado un análisis estadístico descriptivo. Utilizando el programa IBM SPSS Statistics 23. La variable analizada ha sido el precio por unidad de sustancia húmica, obtenido al referenciar el precio de venta al público al porcentaje de sustancias húmicas contenida en el producto. El valor medio de esta variable nos permitirá posteriormente establecer el precio de mercado de nuestro producto, multiplicando dicho valor por el porcentaje de sustancias húmicas que tienen nuestras muestras.

En las **figuras 44 y 45** destacan con valores estadísticamente muy superiores al resto de materiales (gramos por tonelada), tanto sobre materia seca como sobre materia fresca con un 25% de humedad, las sustancias húmicas comerciales con valores por otro lado esperados lógicamente por la finalidad específica comercial de estos productos diseñados para un aumento directo de las sustancias húmicas en el suelo, frente al resto de los otros materiales, destacando los niveles bajos en gramos de sustancias húmicas que presentan los sustratos.

Respecto a los valores económicos estudiados indicados, en las **Figuras 46 y 47**, destaca que las sustancias húmicas comerciales son las que presentan mayor valor económico debido a su alto contenido en sustancias húmicas, tanto sobre materia seca como sobre materia fresca con un 25% de humedad, frente al resto de materiales y especialmente respecto al valor económico que presenta los sustratos.

Tabla 10. Valores promedio de los parámetros analizados para cada uno de los grupos de materiales comerciales orgánicos (grupo B de muestras).

PARÁMETRO/ÍNDICE	COMPOST	SUSTRATOS	ESTIÉRCOLES	HUMUS DE LOMBRIZ	SUSTANCIAS HÚMICAS COMERCIALES
MOT (%)	61,8	69,5	74,1	33,6	37,0
CENIZAS (%)	38,2	30,5	25,9	66,4	63,0
COT (%)	28,3	35,2	36,2	17,6	33,6
NT (%)	2,38	0,90	2,20	1,58	1,51
C/N	12,9	64,1	18,4	11,1	41,8
Cetx (%)	7,29	2,28	8,07	5,91	35,6
Caf (%)	1,50	1,06	3,83	1,03	16,5
Cah (%)	7,29	2,28	8,07	5,91	35,6
RH	34,2	11,2	33,5	39,5	155
IH	28,9	7,92	23,1	33,7	95,4
Pah	82,2	68,2	68,6	85,9	60,8
C _{ah} /C _{af}	5,45	2,30	2,42	6,69	9,43

Podemos concluir que los humus de lombriz y las sustancias húmicas comerciales son los materiales menos orgánicos o más mineralizados (mayor % de cenizas y menor de materia orgánica total). Los compost y estiércoles destacan por su capacidad fertilizante nitrogenada. Todos los materiales tienen tendencia a la mineralización después de su incorporación al suelo debido a su ratio C/N baja salvo los sustratos y las SHs.

A nivel de SHs, destacan claramente las SHs comerciales que son 4-5 veces superiores a estiércoles y compost que destacan como aportadores significativos de SHs en formato diluido. En todos los casos el carbono en forma equivalente a ácidos húmicos es mayoritario frente al C fúlvico indicando la mayor abundancia de compuestos de peso molecular elevado con menor contenido en hidroxilos y carboxilos, orientados a la configuración de compuestos arcillo-húmicos mas que a la de complejos órgano-metálicos (usualmente formados por sustancias fúlvicas).

UNIVERSITAT
Miguel Hernández

5. CONCLUSIONES

UNIVERSITAT
Miguel Hernández

5. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado, tanto respecto al contenido en sustancias húmicas como respecto al valor económico equivalente de las mismas en ambos grupos de materiales establecidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Para el **grupo A** compuesto por compost de distinta naturaleza, se ha estudiado el proceso de compostaje mediante parámetros e índices de evolución de la materia orgánica, destacando que de los parámetros representados a través de su *histograma de frecuencias* se puede indicar que el nitrógeno total inicial y la relación C/N inicial son los parámetros que mejor se ajustan a una distribución Gaussiana, coincidiendo los máximos de las frecuencias con el valor máximo de la campana de Gauss, mientras que el resto de parámetros no se ajusta a este modelo de distribución.

Del estudio de evolución del proceso de compostaje podemos indicar que en general, se ha producido un descenso (pérdida) en todos los *parámetros* tras el compostaje, excepto en cenizas y en nitrógeno total en las pilas finales que han aumentado a causa del efecto concentración. Respecto a los índices de evolución se observa un aumento en el porcentaje de ácidos húmicos y en la relación de humificación debido a un aumento en carbono de los ácidos húmicos frente al carbono de los ácidos fúlvicos. Para los parámetros analizados destacan los elevados niveles de materia orgánica total, carbono orgánico total, relación C/N y carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas de los compost elaborados con lodos EDARI frente a los compost con lodos EDAR. En cuanto al aporte de restos vegetales como material estructurante en los compost cabe destacar que la tipuana es la especie que aporta más materia orgánica total y carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas (junto con restos de poda EPSO y poda morera) de los ingredientes vegetales estudiados.

Cabe mencionar que todos los *índices de evolución* de la materia orgánica estudiados: relación de humificación, índice de humificación, porcentaje de ácidos húmicos y relación de polimerización, presentan el mismo comportamiento en cuanto a la influencia del ingrediente 1 (residuo rico en nitrógeno) en los compost, aumentando

su valor para los compost que emplean lodos de EDARI 1 procedente de la depuración de aguas residuales generadas en el procesado de congelados vegetales y de vegetales de cuarta gama (campana de pimiento) como ingrediente y el valor más bajos para los compost que presentan lodo EDAR 3.

Respecto al estudio de la *cuantificación de las sustancias húmicas* por tonelada de materia seca y materia fresca en el compost maduro, respectivamente, se ha visto que para la variable ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) la incorporación de lodos EDARI al compost supone mayor cantidad en gramos de sustancias húmicas frente al aporte en los compost de lodos EDAR, tanto respecto a la materia seca como a la fresca. Respecto al ingrediente 2 (*agente estructurante*) en el compost, tanto la incorporación de tipuana, restos de poda EPSO o restos de poda de morera, tienen el mayor contenido en gramos de sustancias húmicas, mientras que con la adición de hoja de palmera tenemos menos gramos de sustancias húmicas, tanto respecto a la materia seca como a la fresca.

Para la *estimación económica* del valor de los compost en euros por tonelada de materia seca y materia fresca con un 25% de humedad en el compost maduro respectivamente, hemos visto que para el ingrediente 1 (*residuo rico en nitrógeno*) todos los compost elaborados con lodos EDARI suponen un mayor valor económico (1329-1150 €/tonelada en materia seca) y (999-1126 €/tonelada en materia fresca con un 25 % humedad) en el mercado frente a la incorporación de lodos EDAR (630-993 €/tonelada en materia seca) y (472-745 €/tonelada en materia fresca con un 25 % humedad), debido a que el precio viene en función del contenido en gramos de sustancias húmicas tanto para la materia seca como para la materia fresca con un 25% de humedad. Mientras que para el ingrediente 2 (*agente estructurante*), tanto la incorporación de tipuana, restos de poda EPSO o restos de poda morera los compost ha supuesto una estimación del valor económico mayor (1205-1270 €/tonelada en materia seca) y (904-953 €/tonelada en materia fresca con un 25 % humedad), mientras que con la adición de hoja de palmera tenemos menos gramos de sustancias húmicas por lo tanto nuestros compost tendrán menor valor económico (793 €/tonelada en materia seca) y (595 €/tonelada en materia fresca con un 25 % humedad).

Para el **grupo B** compuesto por recursos orgánicos de distinta naturaleza (sustancias húmicas comerciales, sustratos, humus de lombriz, compost y estiércoles), cabe mencionar que para los *parámetros* estudiados destacan los elevados niveles de materia orgánica total que presentan los estiércoles, sustratos y compost (74,1-61,8%) frente a los bajos niveles que presentan las sustancias húmicas comerciales y el humus de lombriz (33,6-37%). Respecto a los niveles en carbono total extraíble asociado a las sustancias húmicas, carbono de los ácidos fúlvicos y húmicos la secuencia para los distintos tipos de materiales es: sustancias húmicas comerciales > estiércoles > compost > sustratos > humus de lombriz. Del contenido nitrogenado en los distintos tipos de materiales se puede decir que en general, no presentan valores elevados comparados con otros grupos de recursos orgánicos, únicamente destacando estiércoles y compost.

Respecto a los *índices* de evolución, podemos destacar que las sustancias húmicas comerciales son las que presentan estadísticamente una relación de humificación, un índice de humificación y una relación de polimerización mayor, a diferencia de los sustratos, que tienen la menor relación para estos tres parámetros estudiados.

Respecto al estudio de la *cuantificación de las sustancias húmicas* destacan con valores estadísticamente muy superiores al resto de materiales (gramos por tonelada), tanto sobre materia seca como sobre materia fresca con un 25% de humedad, las sustancias húmicas comerciales con valores por otro lado esperados lógicamente por la finalidad específica comercial de estos productos diseñados para un aumento directo de las sustancias húmicas en el suelo, frente al resto de los otros materiales, destacando los niveles bajos en gramos de sustancias húmicas que presentan los sustratos.

Para la *estimación económica* del valor de los recursos orgánicos de distinta naturaleza expresados en euros por tonelada de materia seca y materia fresca con un 25% de humedad en el compost maduro respectivamente, destaca que las sustancias húmicas comerciales son las que presentan un elevado valor económico debido a su alto contenido en sustancias húmicas, tanto sobre materia seca como sobre materia fresca con un 25% de humedad, frente al resto de materiales y especialmente respecto al valor económico que presenta los sustratos.

Como conclusión final podemos decir que la cuantificación de las sustancias húmicas en los diferentes tipos de recursos orgánicos disponibles es una herramienta poderosa de cara a establecer el valor de estos materiales altamente variados y cuyo valor intrínseco es difícilmente objetivable. Podemos considerar que incluye elementos individuales valorizables como concentración en elementos fertilizantes primarios NPK, pero que también incluyen contenidos nada desdeñables de sustancias orgánicas de valor añadido denominadas genéricamente como sustancias húmicas, cuya determinación es compleja a nivel analítico y cuyo valor económico equivalente puede ser ponderado pero nunca discutido ni ocultado.

Adicionalmente, estas sustancias húmicas como indicadores de propiedades de valor añadido se ven afectadas por los procesos de estabilización de los flujos orgánicos residuales como el compostaje y vermicompostaje, como hemos podido observar en este trabajo.

En este sentido, consideramos de interés seguir trabajando en la línea de establecer el valor asociado a la materia orgánica como generadora de fertilidad sostenible en agricultura e incluso incluir otras externalidades como el valor asociado al secuestro de carbono orgánico en el suelo como pilar de la mitigación del cambio climático.

UNIVERSITAS
Miguel Hernández

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- ADANI, F., GENEVINI, P.L. GASPERI, F., ZORZI, G. 1997. Organic matter evolution index (OMEI) as a measure of composting efficiency. *Compost Sci. Util.* 5: 53-62.
- ADANI, F., GENEVINI, P., ZACCHERO, P., ZOCCHU, G. (1998). The effect of comercial humic acido on tomato plant growth and mineral nutrition. *J Plant Nutr* 21: 561-575.
- ADANI, F., GENEVINI, P.L., GASPERI, F. and TAMBONE, F., 1999. Composting and humification. *Compost Science & Utilization* 7: 24-33.
- ALBUZIO, A., CONCHERI, NARDI, S., DELL'AGNOLA, G. 1994. Effect of humic fractions of different molecular size on the development of oat seedlings grown in varied nutritional conditions. In N. Senesi, T.M. Miano (eds) *Humic sustances in the global environment and implications on human health*. Elsevier Science B. V. Amsterdam.
- AMLINGER, F., GÖTZ, B., DREHER, P., GESZTI, J. and WEISSTEINER, C., 2003. Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability - A review. *European Journal of Soil Biology* 39: 107-116.
- ANÓNIMO, 1988. *Manual de fertilidad de suelos*. Potash & Phosphate Institute. Georgia. USA, 85 p.
- ARANDA A, ET AL. (1998). The yeast FBP1 poly(A) signal functions in both orientations and overlaps with a gene promoter. *Nucleic Acids Res* 26(20):4588-96.
- ARENS, P. L., 1983. En: *El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina*. FAO. Roma. Italia.
- AYUSO, L.M. 1995. Utilización de residuos urbanos como enmiendas orgánicas sólidas y líquidas: Valoración agronómica y efectividad frente a enmiendas tradicionales. Tesis Doctoral. CEBAS-CSIC. Murcia.
- AZCONA, I., PASCUAL, I., AGUIRREOLA, J., FUENTES, M., GARCÍA-MINA, J., SÁNCHEZ-DÍAZ, M., 2011. Growth and development of popper are affected by humic substances derived from composted sludge. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 916-924.

- BARÓN, R. BENÍTEZ, I.C. Y GONZÁLEZ, J. L. 1995. Influencia de la dosis creciente de un abono orgánico en un cultivo de trigo. *Agrochimica* XXXIX, 5-6; 280-289.
- BARRAL, M.T., PARADELO, R., MOLDES, A.B., DOMÍNGUEZ, M. and DÍAZ-FIERROS, F., 2009. Utilization of MSW compost for organic matter conservation in agricultural soils of NW Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 53: 529-534.
- BENITO, M., MASAGUER, A., MOLINER, A., ARRIGO, A., PALMA, R. M., EFRON, D. 2005. Evaluation of maturity and stability of pruning waste compost and their effect on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Sci.* 170 (5): 360-370.
- BERNAL, M.P., PAREDES, C., SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A., CEGARRA, J., 1998. Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technol.* 63, 91-99.
- BERNAL, M.P., GONDAR, D.M. 2008. Producción y gestión de residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. En: Moreno casco, J. y Moral, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa. Madrid.
- BERNAL, M.P., ALBURQUERQUE, J.A. and MORAL, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* 100: 5444-5453.
- BIDEGAIN, R.A., KAEMMERER M., GUIRESSE, M., HAFIDI, M., REY, F., MORAD, P., REVEL, J.C. (2000). Effects of humic substances from composted or chemically decomposed poplar saedust on mineral nutrition of ryegrass. *J Agric Sci*: 259-267.
- BOE. 2010. Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. *Boletín Oficial del Estado*. 170: 61831-61859.
- BOE. 2011. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- BOE. 2013. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado*. 164: 51119-51207.
- BUCKMAN; BRADY. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. UTEHA. Ed. Omega.

- BUENO, P., DÍAZ, M., CABRERA, F. 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje. En: Compostaje. (Eds.) Moreno, J., Moral, R. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, pgs 570.
- BUSTAMANTE, M.A., PARDES, C., MARHUENDA-EGEA, F.C., PÉREZ-ESPINOSA, A., MERNAL, M.P., MORAL, R. 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manures: carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere* 72:551-557.
- CABRERA, M.L., KISSEL, D.E. and VIGIL, M.F., 2005a. Nitrogen mineralization from organic residues: research opportunities. *Journal of Environmental Quality* 34: 75-79.
- CÁCERES, D. M., ESTEBAN TAPELLA, FABIEN QUÉTIER Y SANDRA DÍAZ (2014). The Social Value of Biodiversity and Ecosystem Services from the Perspectives of Different Social Actors, Manuscrito inédito, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- CADAHÍA, C. 1997. Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- CAMPITELLI, P.A., VELASCO, M.I. and CEPPI, S.B., 2006. Chemical and physicochemical characteristics of humic acids extracted from compost, soil and amended soils. *Talanta* 69: 1234-1239.
- CAMPITELLI, P., CEPPI, S. 2008. Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids. *Geoderma* 144. 325-333.
- CANELLAS, L.P., OLIVARES, F.L., OKOROKOVA-FACANHA, A.L., FACANHA, A.R., 2002. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiol.* 130, 1951-1957.
- CANELLAS, L.P., OLIVARES, F.L., 2014. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 1,1-11.
- CANELLAS, L.P., OLIVARES, F.L., AGUIAR, N.O., JONES, D.L., NEBBIOSO, A.N., MAZZEI, P., PICCOLO, A. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulture* 196 (2015) 15-27.
- CÁRDENAS, R. P. Y WANG, L. K. 1980. Composting process. En: *Handbook of Environmental Engineering*. Vol. II. The Human Press. New York. pp. 269-327.

- CASTALDI, P., ALBERTI, G., MERELLA, R., MELIS, P., 2005. Study of the organic matter evolution during municipal soil waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Manage.* 25, 209-213.
- CEGARRA, J; REVERTE, L.; LAX, A. Y COSTA, F. 1974. Factores que influyen en la extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. *Anal. Edaf. Agrobiología*, 33: 575-590.
- CEGARRA, J. 1978. Fraccionamiento de fertilizantes orgánicos y de sus productos de humificación. Tesis doctoral. Universidad autónoma de Madrid. Ed. CEBAS, Murcia.
- CHAVES, RM; TEN-CATEN, A; PINHEIRO, HA; RIBEIRO, ACF; DAMATTA, FM. 2008. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees* 22:351-361.
- CHEFETZ, B., HATCHER, P.G., HADAR, Y., CHEN., Y (1996). Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste, *J Environ Qual* 25:779-785.
- CHEFETZ, B., ADANI, F., GENEVINI, F., TAMBONE, F., HADAR, Y., CHEN, Y. 1998. Humic-acid transformation during composting of municipal solid waste. *J. Environ. Qual.* 27: 794-800.
- CHEN, Y. and AVIAD, T., 1990. Effects of humic substances on plant growth. In: McCarthy, P., Clapp, C.E., Malcolm, R.L. and Bloom, P.R. (Eds.). *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings.* pp. 161-187. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison.
- CHEN, Y., IMBAR, Y., 1993. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting in relation to compost maturity. In: Hoiyink, H.A.J., Keener, H.M. (Eds.), *Science and Engineering of Composting.* The Ohio State University, pp. 551-600.
- CHEN, Y., CLAPP, C.E., MAGEN, H. (2004). Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: the role of organo iron complexes. *Soil Sci Plant Nutr* 50: 1089-1095.

- CHINA, A., ARTOLA, A., ROSAL, A., SOLÉ-MAURI, F., FERNÁNDEZ F., GARCÍA-MORALES, J, DIOS, M., DÍAZ, M., PLANA, R., FONT, X.2015. Procesos de biotransformación de la materia orgánica: Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aerobia. (Eds.) Morero, J., Moral, R., García-Morales, J., Pascual, J., Bernal, M.P. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, pgs 289.
- CIAVATTA, C.; VITTORI ANTISARI, V. Y SEQUI, P. 1988. A first approach to the characterization of the presence of humified materials in organic fertilizers. *Agrochimica*, 32:510-517.
- CIAVATTA, C., GOVI, M., ANTISARI, L.V., SEQUI, P.1990. Characterization og humified compounds by extration and fractionation on solid polyvinlpyrrolidone. *J. Chromatogr.* 509:141-146.
- CIAVATTA, C., GOVI, M., 1993. Use of insoluble polyvinylpyrrolidone and isoelectric focusing in the study of humic substances in soils and organic wastes. *J. Chromatogr.* 643: 261-270.
- CORDOVIL, C.M.S., CABRAL, F. and COUTINHO, J., 2007. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops. *Bioresource Technology* 98: 3265-3268.
- COSTA, F., GARCÍA, C., HERNÁNDEZ, M.T. y POLO, A., 1991. Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización. Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura y Caja Murcia, Murcia.
- COURTNEY, R.G. and MULLEN, G.J., 2008. Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. *Bioresource Technology* 99: 2913-2918.
- CSICSOR ET AL., 1994; GALLI ET AL., 1994; BARÓN ET AL., 1995; VARANINI ET AL., 1995. The biostimulant effect of diffreent humic substances fraction on seed germination. In N. Senesi, T.M. Miano (Eds.) *Humic substances in the global environment and implications on human health*. ElsevierScience B. V. Amsterdam.
- DROZD, J. y WEBER. 1996. The role of humic substances in the ecosystem and in environmental protection. Proc. 8 Meeting of the International Humic Substances Society. Wroclaw.

- DUBBINI, G. 1995. Intereses de los Bioestimulantes. Volumen 2. Número 2. Hortoinformación. Revistas JDC. 9: 50-51.
- EDWARDS, C.A., 1988. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. En: Edward, C. A., Neuhauser, E.F. (Eds.), Earthworms in waste and environment management. SPB Academic Publishing BV, The Hague, pp. 21-31.
- ERTEL, J.R., BEHMEL, P., CHRISTMAN, R.F., FLAIG, W.J.A., HAIDER, K.M., HARVEY, G.R., HATCHER, P.G. HEDGES, J.I., MARTÍN, J.P., PFAENDER, F.K., AND SCHULTEN, H.R. 1988. Genesis. En Humic substances and their role in the environment (F.H. Frimmel, R.F. Christman, Eds.), pp. 105-112. John Wiley and Sons, Chichester.
- EVANYLO, G., SHERONY, C., SPARGO, J., STARNER, D., BROSIUS, M. and HAERING, K., 2008. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. Agriculture, Ecosystems & Environment 127: 50-58.
- EYHERAGUIBEL, B., SILVESTRE, J. MORARD, P. (2008). Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. Bioresour Technol 99: 4206-4212.
- FASSBENDER, H.W. 1972. *Química de suelo*. Ed. Turrialba. Costa Rica, pp. 66-109.
- FINSTEN, M.S., MILLER, F.C. (1985). Principles of composting leading to maximization of decomposition rate, odor control and cost effectiveness. En: J.K.R. Gasser (Ed.), Composting of Agricultural and other Wastes. Elsevier App. Sci. Publ., London & New York, pp. 13-26.
- FLAIG, W., BEUTELSPACHER, -H., AND RIETZ, E. 1975. "Chemical composition and physical properties of humic substances." In Soil components, I: Organic components. Gieseking (Ed.) Springer-Verlag. Berlin. pp: 1-212.
- FRANCO, J.A. Y BAÑÓN S. 1998. Posibilidades agrícolas de los ácidos húmicos comerciales. Horticultura, 69.
- GABRIELLE, B., DA-SILVEIRA, J., HOUOT, S. and FRANCOU, C., 2004. Simulating urban waste compost effects on carbon and nitrogen dynamics using a biochemical index. Journal of Environmental Quality 33: 2333-2342.
- GALLARDO, J.F. 1980. El Humus investigación y ciencia. 46,8-16.

- GARCÍA, D., CEGARRA, J., BERNAL, M. P. & NAVARRO, A. F. 1993. Comparative evaluation of methods employing alkali and sodium pyrophosphate to extract humic substances from peat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 24 (13-14), 1481-1494.
- GARCÍA-ALVAREZ, A. AND IBAÑEZ, J.J. 1994. Seasonal fructuations and crop influence on microbiota and enzyme activity in fully developed soils of Central Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation*. 8: 161-178.
- GARCÍA-GÓMEZ, A. and BERNAL, M.P., 2005. The feasibility of olive husk co-composting with cotton waste. In: Bernal, M.P., Moral, R., Clemente, R. and Paredes, C. (Eds.). *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety*. pp. 281-283. FAO and CSIC, Murcia.
- GOLOUKE, C. G. 1981. Principles of biological resource recovery. *BioCycle*, 22, 36-40.
- Harada, Y. e Inoka, A. 1980. The measurement of the cation-exchange capacity of composts for estimation of degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26, 127-134.
- GONZÁLEZ-VILA, F.J., MARTÍN, F. (1985). Chemical structural characteristics of humic acids extracted from composted municipal refuse. *Agric. Ecosystems Environ.*, 14: 267-278.
- GREENLAND, D.J. *Land use and soil carbon in different agroecological zones*. En: *Soil management and greenhouse effect. Advances in Soil Science Series*. Lewis Pubs. 1995. Estados Unidos.
- GROS, A. Y DOMÍNGUEZ, A., 1992. *Abonos guía práctica de la fertilización*. 8va. edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 450 p.
- GUTIÉRREZ, M.C., MARTÍN, M.A., CHINA, A.F. 2014. Usual variables and adour concentration to evaluate composting process and odour impact. *Environment Technology.*, 35 (6): 709-718.
- HADAS, A., KAUTSKY, L. and PORTNOY, R., 1995. Mineralization of composted manure and microbial dynamics in soil as affected by long-term nitrogen management. *Soil Biology & Biochemistry* 28: 733-738.
- HADAS, A., AGASSI, M., ZHEVELEV, H., KAUTSKY, L., LEVY, G.J., FIZIK, E. and GOTESMAN, M., 2004. Mulching with composted municipal solid wastes in the Central Negev, Israel. II. Effect on available nitrogen and phosphorus and on organic matter in soil. *Soil & Tillage Research* 78: 115-128.

- HAUG, R.T. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers. Boca Raton. Florida.
- HUE, N.V. and LIU, J., 1995. Predicting Compost Stability. Compost Science & Utilization 3: 8- 15.
- HUNCHAK-KARIOUK, K. Y SUFFET, I.H. 1994. Binding of organic pollutants to dissolved organic matter in anoxic pore waters. In N. Senesi, T.M. Miano (Eds.) Humic substances in the global environment and implications on human health. Elsevier Science B.V. Amsterdam.
- IGLESIAS JIMÉNEZ, E. Y PÉREZ GARCÍA, V. 1989. Evaluation of city refuses compost maturity: a review. Biol. Wastes, 27, 115-142.
- IGLESIAS JIMÉNEZ, E. Y PÉREZ GARCÍA, V. 1992 a. Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. Resources, Conservation and Recycling. 6. 243-257.
- IGLESIAS JIMÉNEZ, E. Y PÉREZ GARCÍA, V. 1992 b. Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. Resources, Conservation and Recycling. 6. 243-257.
- IGLESIAS JIMÉNEZ, E. Y PÉREZ GARCÍA, V. 1992 c. Determination of maturity indices for city refuse composts. Agric. Ecosystems Environ., 38: 331-343.
- IHSS-INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY, 2015. What are humic substances? <http://www.humicsubstances.org/>. (Accesed Jul 13 2015).
- INBAR, Y., HADAR, Y., CHEN, Y., 1993. Recycling of cattle manure: The composting process and characterization of maturity, Journal of Environmental Quality, 22 (4):857-863.
- INGELMO, F. y RUBIO, J.L., 2008. Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. En: Moreno, J. y Moral, R. (Eds.). Compostaje. pp. 305-327. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- IPTS. 2011. End-of-waste criteria on Biodegradable waste subject to biological treatment: second working document. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). Available online at: http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/waste/documents/20111012005713_IPTSEoWBiodegradablewaste2ndworkingdocument.pdf (Website accessed: May 14, 2012).

- JARA SAMANIEGO, L.J. 2016. Oportunidades de valorización mediante compostaje de los residuos orgánicos de origen urbano y afines en Ecuador: Propuesta de gestión para la provincia de Chimborazo. Tesis Doctoral Universidad Miguel Hernández de Elche.
- JENKINSON D.S AND LADD J.N (1981). Microbial biomass in soil: measurement and turnover. *In soil Biochemistry.eds E.A.Paul and J.N.Ladd. vol.5. pp 415-471. Marcek Dekker,New York.*
- JERIS, J.S., REGAN, R.W. 1973. Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting. Part II, *Compost Sci. 14 (March-April): 8-15.*
- JHORAR, B.S., PHOGAT, V Y MALIK, E. (1991). Kinetics of composting rice staw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil.*
- JUSTE, C. 1980. Avantages et inconvenients de l'utilisation des composts d'ordures ménagères comme amnendement organique des sols on support. *Jornadas Internacionales sobre el Compost. Madrid.*
- JUSTUS VON LIEBIG. 1843. En: Navarro Pedreño, J., Moral Herrero, Gómez Lucas y Mataix Beneyto., 1995. *Residuos orgánicos y agricultura.* Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones. 108 p.
- KALE, R.D., BANO, K., KRISGNAMOORTHY, R.V. 1982. Potential of Perionix excavatus for utilizing organic wastes. *Pedobiologia, 23: 419-425.*
- KEENER, H. M., 1998. *Composting Principles & Practices for Design and Operation.* The Ohio State University. Ohio Compost Association.
- KHALED, H., FAWY, H.A. (2011). Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil Water Res 6: 21-29.*
- KILLI, D., KAVDIR, Y. 2013. Effects of olive solid waste and olive solid waste compost application on soil properties and growth of *Solanum lycopersicum*. *Int. Biodeter. Biodegr., 82: 157-165.*
- KONONOVA, M. M. 1996. *Soil organic matter.* Pergamon Press, Oxford.
- LAL, R.; STEWART., A. 1995. *Soil Management, Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality.* CRC Press. Inc. 555 p.
- LABRADOR MORENO J. 1996. *La materia orgánica en los agrosistemas.* Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España: 174 p.

- LAOS, F. 2003. Compostaje de residuos orgánicos de actividades productivas y urbanas en la región Andino-Patagónica: determinación de índices de madurez para su utilización agronómica. Tesis doctoral Universidad nacional del Comahue, Argentina. 148 pp.
- LULAKIS, M.D., PETSAS, S.L., 1995. Effect of humic substances from vine-canecan mature compost on tomato seedling growth. *Bioresour. Technol* 54, 179-182.
- MADEJÓN, E., DÍAZ, M.J., LÓPEZ, R., CABRERA, F. 2002. New approaches to establish optimum moisture content for compostable materials. *Biores. Technol.*, 85: 73-78.
- MADRID, F., LÓPEZ, R., CABRERA, F. and MURILLO, J.M., 2011. Nitrogen mineralization of immature municipal solid waste compost. *Journal of Plant Nutrition* 34: 324-336.
- MAGDOFF, F., WEIL, R.R. (2004). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, Upper Saddle River.
- MCCARTHY, JOHN AND PRINCE, ALAN 1990. Foot and word in Prosodic Morphology: The Arabic broken plural, *Natural Language and Linguistic Theory* 8: 209–82.
- MIYATAKE F., IWABUCHI K, 2006. Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Biores. Technol.*, 97: 961–965.
- MONDINI, C., DELL'ABATE, M.T., LEITA, L. and BENEDETTI, A., 2003. An integrated chemical, thermal, and microbiological approach to compost stability evaluation. *Journal of Environmental Quality* 32: 2379-2386.
- MORAL, R., MORENO-CASELLES, J., PEREZ-MURCIA, M.D., PEREZ-ESPINOSA, A., RUFETE, B., PAREDES, C. Characterisation of the organic matter pool in manures. *Bioresource Technology* 96 (2005) 153-158.
- 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.
- MOREL, J.L. COLIN, F., GERMON, J.C., GODIN, P., JUSTE, C. (1985). Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost. En: Gasser, J.K.R. (Ed.), *Composting of Agricultural and other Wastes*. Elsevier App. Sci. Publ., London & New York, pp. 56-72.

- MORERO, J., SUÁREZ-ESTRELLA, F.; VARGAS-GARCÍA, M.C., LÓPEZ-GONZÁLEZ, J.A., JURADO, M.M., CERVERA, O. Optimización del fraccionamiento de sustancias húmicas en muestras procedentes del compostaje de restos agrícolas. Avances en la investigación sobre compost. III Jornadas de la Red Española de Compostaje (REC) Santiago de Compostela, 26-29 de junio de 2014.
- MORENO, J., MORAL, R., GARCÍA, J., PASCUAL, J., BERNAL, M. 2015. Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aeróbica. En: De Residuos a Recurso. Ed.: Mundi-Prensa. pp. 25-45.
- MUSTIN, M., 1987. *Le compost*. Ed. François Dubusc. París, 954 p.
- NAVARRO, A.F.; CEGARRA, J.; ROIG, A.; GARCÍA, D. 1993. Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes. *Biosource Technology*, 44: 203-207.
- NAVARRO PEDREÑO, J., MORAL HERRERO, GÓMEZ LUCAS Y MATAIX BENEYTO., 1995. *Residuos orgánicos y agricultura*. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones. Alicante. España, 108 pp.
- NOGALES, R., DOMÍNGUEZ, J., MATO, S. 2008. Vermicompostaje, En: Morero, J., Moral, R., (Eds.), *Compostaje*. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, pp. 187-208.
- OCIO, J.A., Y BROKERS, P. C. 1990. *SOIL BIOLOGICAL BIOHEMISTRY*, 22, 685.
- OKALEBO, J.R., OTHIENO, C.O., WOOPER, P.L., KARANJA, N.K., SEMOKA, J.R.M., BEKUNDA, M.A., MUGENDI, D.N., MUASYA, R.M., BATIONO, A., MUKHWANA, E.J., 2006. *Available technologies to replenish soil fertility in East Africa*. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 76, 153-170.
- OROZCO, F.H., CEGARRA, J., TRUJILLO, L.M., ROIG, A, 1996. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*: Effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Soil. Fert. Soils*, 22:162-166.
- ORTÍZ, O., 2001. Uso de la materia orgánica como criterio de aplicación de residuos. En: Boixadera, J y Teira, R.M. (Eds.). *Aplicación Agrícola de Residuos Orgánicos*. pp. 279-291. Universitat de Lleida, Lleida.
- PAREDES, G. C., BERNAL., M.P., CEGARRA, J. Y ROIG, A. 2002. Bio-degradation of olive mill wastewatersludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology* 85,1-8.

- PÉREZ-ESPINOSA, A., CAMILETTI, J., PÉREZ-MURCIA M.D., AGULLÓ, E., ANDREU, J. M^a ANGELES BUSTAMANTE, M.A.; PAREDES, C., FERNÁNDEZ, M., MORAL, R. 2016. Biotransformación de residuos orgánicos de distinta naturaleza combinando compostaje y vermicompostaje. V Jornadas de la Red Española de Compostaje. Sevilla. 16-18 de noviembre de 2016.
- PICCOLO, A. y MBAGWU J.S.C. 1997. Exogenous humic substances as conditioners for the rehabilitation of degraded soils. Agro-Food-Industry HiTech. Marzo/Abril 2-4.
- PICCOLO, A., 2002. The supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. Adv. Agron, 75, 57-134.
- POINCELOT, R. P. 1974. A scientific examination of the principles and practice of composting. Compost Sci., 15, 24-31.
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEBEDO, M., RAQUERO, C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- PROVENZANO, MR, OLIVEIRA, SC., SILVA, MRS, SENESI, N., (2001). Assessment of maturity degree of compost from domestic solid wastes by fluorescence and fourier transform infrared spectroscopies. J Agric Food Chem 49:5874-5879.
- RAMOS, C., 2005. El análisis del nitrógeno mineral del suelo como guía para la fertilización nitrogenada de los cultivos hortícolas. Actas de Horticultura 44: 95-102.
- RESTREPO, A., GARCÍA GARCÍA, J., MORAL, R.¹, VIDAL, F., PÉREZ-MURCIA, M.D., BUSTAMANTE, M.A. AND PAREDES, C. 2013. A comparative cost analysis for using compost derived from anaerobic digestion as a peat substitute in a commercial plant nursery. 2013. Cienc. Inv. Agr. vol.40 no.2 Santiago May 2013.
- RICE J. A. AND MCCARTHY P. (1988). Comments on the literature of the humin fraction of humus. Geoderma. 43, 65-73.
- ROE, N.E., 2005. Efectos de los compost sobre el desarrollo y el rendimiento en horticultura comercial. En: Stoffella, P.J. y Kahn, B.A. (Eds.). Utilización de Compost en los Sistemas de Cultivo Hortícola. pp. 123-134. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

- ROIG, A.; LAX, A.; CEGARRA, J.; COSTA, F.; HERNÁNDEZ, M.T. (1988). Cation-exchange capacity as a parameter for measuring the humification degree of manures. *Soil science*, 146: 311-316.
- ROLETTO, E., BARBERIS, R., CONSIGLIO, M., JODICE, R., 1985. Chemical parameters for evaluating compost maturity. *BioCycle* 26, 46-47.
- SAID-PULLICIANO, D., ERRIQUENS, F.G., GIGLIOTTI, G., 2007. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology*, 101 (7): 1412.
- SCAGLIA, B., RACHIDE NUDES, R., OLIVEIRA REZENDE, M.O., TAMBONE, F., ADANI, F. Investigating organic molecules responsible of auxin-like activity of humic acid fraction extracted from vermicompost. *Science of the Total Environment* 562 (2016) 289-295.
- SCHNITZER, M., AND S.U. KHAN. 1978. *Soil organic matter*. 319 p. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- SCHNITZER, M. 1991. *Soil organic matter the next 75 years*. *Soil Sci.* 151: 41-58.
- SENESI, N., 1989. Composted materials as organic fertilizers. *Science of the Total Environment*. 81-82, 521-542.
- SENESI, N., BRUNETTI, G., 1996. Chemical and physico-chemical parameters for quality evaluation of humic substances produced during composting. In: Bertoli, M., Sequi, P., Lemmes, B., Papi, T. (Eds.). *European Commission Int. Symp. The Science of Composting*. Chapman and Hall, London, pp. 195-212.
- SEQUI, P., CIAVATTA, C., ANTISARI, L.V. 1991. Organic substances and sediments in water-humic and soils. pp. 351-367. En: R.A. Baker (ed.), *Lewis*, Chelsea.
- SIKORA, L.J. and SZMIDT, R.A.K., 2005. Los compost como fuentes de nitrógeno, aportación a la mineralización y ventajas para la nutrición nitrogenada de las plantas. In: Stoffella, P.J. y Kahn, B.A. (Eds.). *Utilización de Compost en los Sistemas de Cultivo Hortícola*. pp. 287-305. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- SOLIVA, M. y PAULET, S., 2001. Compostaje de residuos orgánicos y aplicación agrícola. En: Boixadera, J. y Teira, M.R. (Eds.). *Aplicación Agrícola de Residuos Orgánicos*. pp. 63-78. Edicions de la Universitat de Lleida, Lleida.

- SPACCINI, R., PICCOLO, A., HABERHAUER, G., GERZABEK, M.H., (2002). Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by ¹³C distribution and CPDAS-NMR spectra. *Eur J Soil Sci* 51: 583-594.
- SPOHN, E. 1978. Determination of compost maturity. *Compost Sci.*, 19, 26-27.
- STEVENSON, F.J. (1982). *Humus Chemistry*, Wiley, New York.
- STEVENSON, F.L. (1994). *Humus Chemistry*. John Wiley & Sons., 2nd edition, 496 pp.
- STEVENSON FJ. 1994. *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. 2nd Edition, Wiley, New York, USA. p. 512.
- STOATE, C., BOATMAN, N.D., BORRALHO, R.J., RIO CARVALHO, C., DE SNOO, G.R., EDEN, P., 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europa. *Journal of Environmental Management* 63, 337-365.
- SWIFT, M.J.; HEAL, O.W. y ANDERSON, J.M. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. University of California Press. Berkeley.
- TATE, R. L. SOIL ORGANIC MATTER. Biological and Ecological Effects. Wiley: New York, 1987, 291.
- TOGNETTI, C., MAZZARINO, M.J. and LAOS, F., 2008. Compost of municipal organic waste: Effects of different management practices on degradability and nutrient release capacity. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 2290-2296.
- TORRECILLAS MARTÍNEZ, C. 2011. Estudio de formas de carbono y nitrógeno indicadoras de la calidad de la fracción orgánica de los lodos de depuradora. Trabajo fin de Master. Master Universitario en Gestión, Tratamiento y valorización de residuos orgánicos.
- TOUNTAIN, F. 1981. Les humus forestiers, structures et modes de fractionnement. *Revue Forest. Fran.* 33(6): 449-465.
- VALMASEDA M, MARTINEZ AT, ALMENDROS G. 1989. Contribution by pigmented fungi to P-type humic acid formation in two forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 21, 23-28.

- VAN-CAMP, L., BUJARRABAL, B., GENTILE, A.R., JONES, R.J.A., MONTANARELLA, L., OLAZÁBAL, C. AND SELVARADJOU, S. (Eds.), 2004. Reports of the Technical Working Groups established under the Thematic Strategy for Soil Protection – Volume III - Organic Matter. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- VARANINI, Z. y PINTON, R. 1995. Humic substances and plant nutrition. Progress in Botany, 56, 97-116.
- VIEL, M., SAYAG, D., PEYRE, A. Y ANDRÉ, L. 1987. Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. Biol. Wastes, 20, 167-185.
- WU, L., MA, L.Q., MARTINEZ, G.A., 2000. Method comparison for evaluating biosolids compost. Journal of Environmental Quality 29, 424–429.
- YONEBAYASHI, K. 1994. Humic component distribution of humic acids as shown by adsorption chromatography using XAD-8 resin. In N. Senesi, T.M. Miano (Eds.) Humic substances in the global environment and implications on human health. Elsevier Science B.V. Amsterdam.
- ZUCCONI, F., PERA, A., FORTE, M. Y de BERTOLDI, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. BioCy.
- ZUCCONI, F., DE BERTOLDI, M. 1987. Specifications for solid waste compost. Biocycle 28 (5/6): 56- 61.