



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**Escuela Técnica Superior  
de Ingeniería Industrial**



## **EFFECTOS SOBRE EL SISTEMA SUELO-PLANTA DE COMPOST DE LODO ANAEROBIO. COMPARACIÓN CON UN FERTILIZANTE TRADICIONAL DE LA COMARCA DE CARTAGENA.**

**Titulación:** Máster en Ingeniería Ambiental y de  
Procesos Químicos y Biotecnológicos  
**Alumno/a:** Pedro José Giménez Fernández  
**Director/es:** Juan Ignacio Moreno Sánchez  
José Antonio Fernández López

Cartagena, julio de 2010



## **ABREVIATURAS**

LAE=Lodo aerobio

LAN=Lodo anaerobio

CLAE-D1=Compost de lodo aerobio en dosis 1

CLAE-D2=Compost de lodo aerobio en dosis 2

CLAN-D1=Compost de lodo anaerobio en dosis 1

CLAN-D2=Compost de lodo anaerobio en dosis 2

CONTROL=Suelo con fertilización inorgánica



---

## ÍNDICE

---

1. <b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	3
<b>1.1. El suelo</b> .....	<b>5</b>
1.1.1. Componentes del suelo y formación .....	5
1.1.2. La importancia del suelo.....	7
1.1.3. Definición de calidad del suelo.....	8
1.1.4. Indicadores de calidad del suelo.....	9
1.1.5. Degradación del suelo: causas naturales y antrópicas.....	12
<b>1.2. La materia orgánica del suelo</b> .....	<b>13</b>
1.2.1. Concepto y composición de la materia orgánica.....	13
1.2.2. Importancia de la materia orgánica en los suelos.....	16
1.2.3. Fuentes de materia orgánica en los suelos.....	19
<b>1.3. La problemática de los residuos</b> .....	<b>20</b>
1.3.1. Residuos derivados del sector primario.....	21
1.3.2. Residuos derivados del sector secundario y terciario.....	22
<b>1.4. El agua y su problemática actual. Necesidad de depurar las aguas residuales</b> .....	<b>25</b>
1.4.1. Proceso de depuración de aguas residuales.....	28
<b>1.5. Reciclado en el suelo de lodos de depuradora</b> .....	<b>36</b>
1.5.1. Sistemas de eliminación y utilización de lodos.....	42
1.5.2. Aplicación de los lodos en la agricultura.....	42
<b>1.6. Compostaje de residuos con fines agrícolas</b> .....	<b>49</b>
1.6.1. Antecedentes generales del compostaje.....	49
1.6.2. El proceso de compostaje.....	50
1.6.3. Materias primas para el proceso de compostaje.....	51
1.6.4. Técnicas de compostaje.....	53
1.6.5. Parámetros críticos en el proceso de compostaje.....	57
1.6.6. Evaluación de la calidad del compost.....	64
2. <b><u>OBJETIVOS</u></b> .....	<b>69</b>
<b>2.1. Objetivos generales</b> .....	<b>71</b>
<b>2.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>72</b>

<b>3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u></b> .....	<b>73</b>
<b>3.1. Materiales utilizados</b> .....	<b>75</b>
<b>3.2. Métodos seguidos</b> .....	<b>78</b>
<b>3.3. Técnicas</b> .....	<b>86</b>
3.3.1. Determinación de parámetros físicos.....	86
3.3.2. Determinación de parámetros físico-químicos.....	87
3.3.3. Determinación de parámetros químicos.....	87
3.3.4. Determinación de parámetros biológicos.....	93
3.3.5. Parámetros de toxicidad.....	94
<b>3.4. Análisis estadístico</b> .....	<b>95</b>
<b>4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u></b> .....	<b>97</b>
<b>4.1. Parámetros de control durante los cultivos</b> .....	<b>99</b>
<b>4.2. Efecto de los materiales orgánicos utilizados sobre las propiedades del suelo y los cultivos</b> .....	<b>100</b>
4.2.1. Rendimiento sobre la materia vegetal.....	100
4.2.2. Humedad.....	102
4.2.3. pH.....	107
4.2.4. Conductividad eléctrica.....	110
<b>4.3. Propiedades químicas</b> .....	<b>113</b>
4.3.1. Metales pesados.....	114
4.3.2. Nitrógeno.....	123
4.3.3. Fósforo total.....	131
4.3.4. Potasio total.....	136
<b>4.4. Contenido en carbono orgánico total en el suelo durante los cultivos</b> .....	<b>139</b>
<b>4.5. Estudio de las sustancias húmicas</b> .....	<b>142</b>
<b>4.6. Estudio del carbono de biomasa microbiana</b> .....	<b>144</b>
<b>4.7. Estudio de la actividad deshidrogenasa</b> .....	<b>146</b>
<b>5. <u>CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>149</b>
<b><u>ANEXOS</u></b> .....	<b>153</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	<b>165</b>



# 1. INTRODUCCIÓN



## 1.1. EL SUELO

### 1.1.1. COMPONENTES DEL SUELO Y FORMACIÓN

Se entiende por suelo aquel medio natural no consolidado, formado por materiales inorgánicos y orgánicos con una profundidad mínima de 10 cm, y que se encuentra sobre la corteza terrestre con capacidad de mantener el desarrollo de las plantas (*Environmental Protection Service de Canadá, 1984*).

#### Componentes del suelo

Los componentes del suelo se pueden dividir en sólidos, líquidos y gaseosos:

#### **SÓLIDOS**

Este conjunto de componentes representa lo que podría denominarse el esqueleto mineral del suelo, y entre estos componentes sólidos del suelo destacan:

- Silicatos, tanto residuales como los no completamente meteorizados (micas, feldespatos, y fundamentalmente cuarzo).
  - Como productos no plenamente formados, singularmente los minerales de arcilla (caolinita, illita, etc.).
- Óxidos e hidróxidos de Fe (hematites, limonita, goethita) y de Al (gibbsite, bohemita), liberados por el mismo procedimiento que las arcillas.
- Clastos y granos poliminerales, como materiales residuales de la alteración mecánica y química incompleta de la roca originaria.
- Otros diversos compuestos minerales cuya presencia o ausencia y abundancia condicionan el tipo de suelo y su evolución.
  - Carbonatos (calcita, dolomita).
  - Sulfatos (aljez).
  - Cloruros y nitratos.
- Sólidos de naturaleza orgánica o complejos órgano-minerales, la materia orgánica muerta existente sobre la superficie, el humus o mantillo:

- Humus joven o bruto, formado por restos distinguibles de hojas, ramas y restos de animales.
- Humus elaborado, formado por sustancias orgánicas resultantes de la total descomposición del humus bruto, de un color negro, con mezcla de derivados nitrogenados (amoníaco, nitratos), hidrocarburos, celulosa, etc. Según el tipo de reacción ácido-base que predomine en el suelo, éste puede ser ácido, neutro o alcalino, lo que viene determinado también por la roca madre y condiciona estrechamente las especies vegetales que pueden vivir sobre el mismo.

## **LÍQUIDOS**

Esta fracción está formada por una disolución acuosa de las sales y los iones más comunes, como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,... así como por una amplia serie de sustancias orgánicas. La importancia de esta fase líquida en el suelo estriba en que éste es el vehículo de las sustancias químicas en el seno del sistema.

## **GASES**

La fracción de gases está constituida fundamentalmente por los gases atmosféricos, y tiene gran variabilidad en su composición por el consumo de  $\text{O}_2$  y la producción de  $\text{CO}_2$ . El primero siempre menos abundante que en el aire libre y el segundo más, como consecuencia del metabolismo respiratorio de los seres vivos del suelo, incluidas las raíces. Otros gases comunes en suelos con mal drenaje son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

### *Formación del suelo*

El proceso de formación del suelo se denomina **edafogénesis** y comprende:

- 1) La descomposición y alteración del material original o roca madre.
- 2) La formación de la materia orgánica o humus, a partir de restos vegetales depositados sobre el suelo. En esta etapa también se produce la formación y

transporte de materia soluble y coloidal, con la formación de horizontes de lavado y acumulación.

En el proceso de edafogénesis intervienen:

**Factores climáticos**, como las temperaturas y precipitaciones, que influyen sobre la rapidez y la forma de la descomposición de la roca madre y la migración de la materia soluble y coloidal.

**Factores litológicos**, como la composición y características de la roca madre.

**Factores topográficos**, como la altitud y la pendiente.

**Factores hidrológicos**, como la presencia y profundidad de la capa freática (capa del suelo que alberga agua).

### **1.1.2. LA IMPORTANCIA DEL SUELO**

El suelo es un conjunto muy complejo formado por elementos físicos, químicos y biológicos, de manera que en él tienen lugar gran parte de las transformaciones de materia y energía de los ecosistemas. Además, como su regeneración es muy lenta, el suelo debe considerarse como un recurso no renovable (a escala de tiempo humano) y cada vez más escaso, debido a que está sometido a constantes procesos de degradación y destrucción.

Según *Larson y Pierce (1991)*, el suelo desempeña tres funciones fundamentales:

- Es un medio de crecimiento de las plantas, ya que funciona como soporte físico y como reservorio de agua y nutrientes esenciales para ellas.
- Actúa como regulador del flujo hídrico en el medio ambiente.
- Es un sistema con cierta capacidad de atenuar los efectos nocivos de contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

### **1.1.3. DEFINICIÓN DE CALIDAD DEL SUELO**

A diferencia del agua y el aire, los cuales poseen estándares de calidad determinados, la del suelo es difícil de definir y cuantificar. Esto es debido a que los criterios de calidad de un suelo pueden variar según el uso que se le dé, las prácticas que en él se desarrollen, o incluso de las necesidades socioeconómicas y/o políticas.

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos (*Doran y Parkin, 1994*). *La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter et al., 1997)*. En el pasado, este concepto fue equiparado con el de productividad agrícola por la poca diferenciación que se hacía entre tierras y suelo. Tierras de buena calidad eran aquéllas que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión.

Para *Gregorich (1994)* *la calidad de suelo es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico. Arshad y Coen (1992)* le dieron a este concepto una connotación más ecológica; la definieron *como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano.*

Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo, y no sólo en un uso específico, pero este concepto continúa evolucionando (*Singer y Ewing, 2000*). Estas definiciones fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America (*Karlen et al., 1997*) como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

#### **1.1.4. INDICADORES DE CALIDAD DE UN SUELO**

A pesar de la preocupación creciente acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo (*Arshad y Coen, 1992*).

Los indicadores de calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él (*SQI, 1996*). Para *Dumanski et al. (1998)* dichos indicadores, no podrían ser un grupo seleccionado para cada situación particular, sino que deben ser los mismos en todos los casos. *Astier et al. (2002)* y *Hünнемeyer et al. (1997)* establecieron que los indicadores deberían permitir: (a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible; (b) analizar los posibles impactos antes de una intervención; (c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y (d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

##### Indicadores físicos

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar fácilmente (*Singer y Ewing, 2000*). Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo (**Tabla 1.1.4.1**) son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad.

### Indicadores químicos

Los indicadores químicos propuestos (**Tabla 1.1.4.1**) se refieren a condiciones de este tipo que afectan a las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos (*SQI, 1996*). Algunos indicadores son la disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, carbono orgánico lábil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno mineralizable.

### Indicadores biológicos

Los indicadores biológicos propuestos (**Tabla 1.1.4.1**) integran gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como la abundancia y subproductos de micro y macroorganismos, incluidos bacterias, hongos, nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos. Incluyen funciones como la tasa de respiración, ergosterol y otros subproductos de los hongos, tasas de descomposición de los residuos vegetales, N y C de la biomasa microbiana (*SQI, 1996; Karlen et al., 1997*). Como la biomasa microbiana es mucho más sensible al cambio que el C total, se ha propuesto la relación  $C_{\text{microbiano}}:C_{\text{orgánico}}$  del suelo para detectar cambios tempranos en la dinámica de la materia orgánica (*Sparling, 1997*).

**Tabla 1.1.4.1.** Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo (*Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold et al., 1997*).

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>		
<b>PROPIEDAD</b>	<b>RELACIÓN CON LA CONDICIÓN Y FUNCIÓN DEL SUELO</b>	<b>VALORES O UNIDADES RELEVANTES ECOLÓGICAMENTE; COMPARACIONES PARA EVALUACIÓN</b>
<b>Textura</b>	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo	% de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje
<b>Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces</b>	Estima la productividad potencial y la erosión	cm ó m
<b>Infiltración y densidad aparente</b>	Potencial de lavado; productividad y erosividad	Minutos/2.5 cm de agua y g/cm <sup>3</sup>
<b>Capacidad de retención de agua</b>	Relación con la retención de agua, transporte y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica	% (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ), cm de humedad aprovechable/30 cm; intensidad de precipitación
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>		
<b>Materia orgánica (C y N total)</b>	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión	kg de C ó N ha <sup>-1</sup>
<b>pH</b>	Define la actividad química y biológica	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
<b>Conductividad eléctrica</b>	Define la actividad vegetal y microbiana	dS m <sup>-1</sup> ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
<b>P, N y K extraíbles</b>	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de calidad ambiental	kg ha <sup>-1</sup> ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
<b>PROPIEDADES BIOLÓGICAS</b>		
<b>C y N de la biomasa microbiana</b>	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	kg N ó C ha <sup>-1</sup> relativo al C y N total ó CO <sub>2</sub> producidos
<b>Respiración, contenido de humedad y temperatura</b>	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa	kg de C ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C contra entrada al reservorio total de C
<b>N potencialmente mineralizable</b>	Profundidad del suelo y suministro potencial de N	kg de N ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> relativo al contenido de C y N total

### 1.1.5. DEGRADACIÓN DEL SUELO: CAUSAS NATURALES Y ANTRÓPICAS

La degradación del suelo es un proceso, inducido por la actividad del hombre o por causas naturales, que afecta negativamente a la capacidad de un terreno para funcionar efectivamente dentro de un ecosistema para aceptar, almacenar y reciclar agua, energía y nutrientes.

Las causas naturales de degradación del suelo más importantes son:

- **Meteorización:** es la alteración que experimentan las rocas en contacto con el agua, el aire o los seres vivos. Se pueden distinguir dos tipos de meteorización:
  - Meteorización física o mecánica: es aquella que se produce cuando, al bajar las temperaturas, se congela el agua que ocupa las grietas de las rocas, aumentando su volumen y provocando la fractura de las rocas.
  - Meteorización química: es aquella que se produce cuando los materiales rocosos reaccionan con el agua o con las sustancias disueltas en ella.
- **Erosión:** consiste en el desgaste y fragmentación de los materiales de la superficie terrestre por acción del agua, el viento, etc. Los fragmentos que se desprenden reciben el nombre de detritos.
- **Transporte:** consiste en el traslado de los detritos de un lugar a otro.
- **Sedimentación:** consiste en el depósito de los materiales transportados, los cuales reciben el nombre de sedimentos. Cuando los sedimentos se cementan reciben el nombre de rocas sedimentarias.

En condiciones naturales, los fenómenos naturales anteriores de degradación del suelo se encuentran en equilibrio con los de formación de nuevo suelo (edafogénesis). Sin embargo este estado de equilibrio que alcanzan los suelos puede verse perturbado por acciones antrópicas, entre las que destacan las siguientes:

- **Agricultura intensiva:** es el uso indebido o abusivo del suelo que perjudica enormemente a la calidad del mismo, y hace que alcance niveles de calidad mucho menores que los que mantienen los suelos naturales. Además, el empleo

de terrenos marginales propensos a la degradación ambiental (por ejemplo, los del Mediterráneo español) y pocos aptos para el cultivo, han dado lugar a una pérdida de calidad y fertilidad de estos suelos que han provocado su posterior abandono agrícola.

- **Compactación del suelo:** es el aumento de densidad de los materiales del suelo en capas superficiales o profundas. Se produce como consecuencia de técnicas agrícolas inadecuadas, explotación de suelos con fines urbanísticos, etc.
- **Contaminación química:** está provocada por el uso irracional de grandes cantidades de fertilizantes y sustancias químicas para el control de plagas y enfermedades por encima de niveles requeridos. A ello hay que añadir el lixiviado de contaminantes en suelos próximos a plantas de residuos, industrias químicas, etc.
- **Conflicto de usos:** los suelos agrícolas se pierden o transforman en suelos para urbanización.

## 1.2. LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

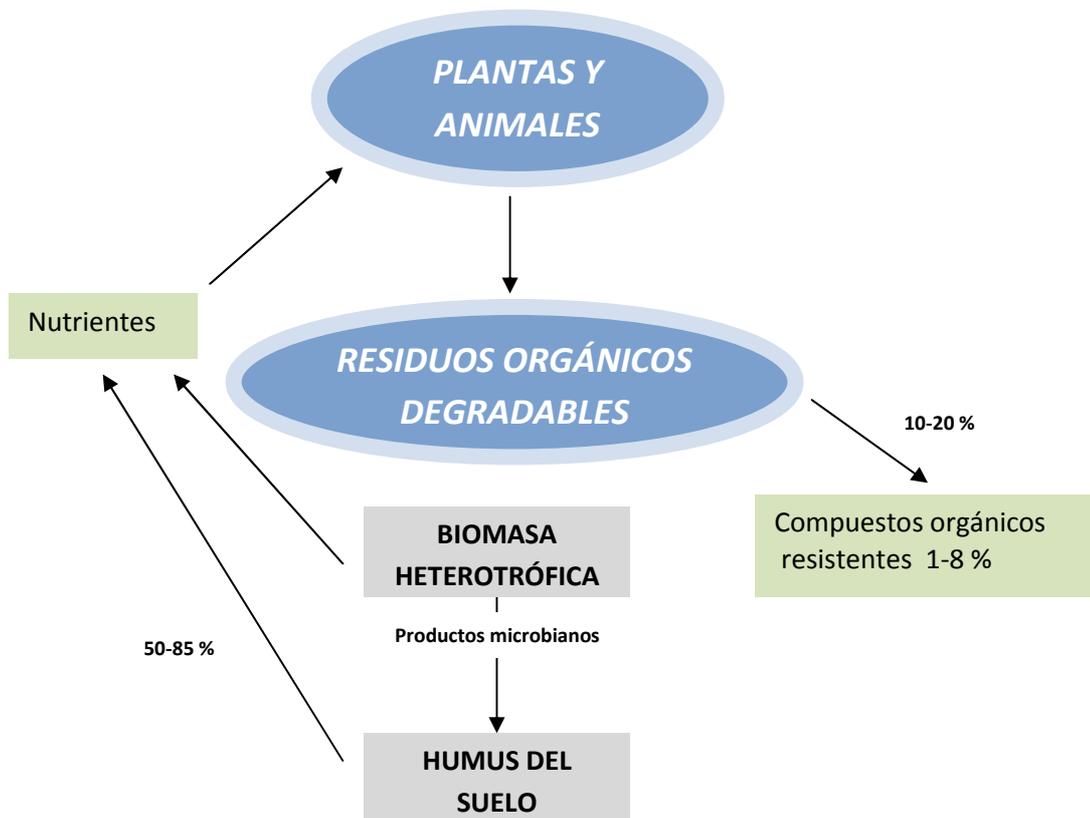
### 1.2.1. CONCEPTO Y COMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Se define la materia orgánica del suelo como *un sistema complejo, en un estado dinámico permanente, producido por la incorporación de residuos orgánicos al suelo, principalmente de origen vegetal y en menor cuantía animal, y su continua degradación bajo la acción de factores biológicos y químicos, físicos y bioquímicos (García et al., 1996)*. De esta manera, la materia orgánica incorporada a los suelos está sujeta a una serie de transformaciones que nos relacionan las formas vivas y las no vivas de ésta (Doran y Smith, 1987) como indica la **Figura 1.2.1.1**.

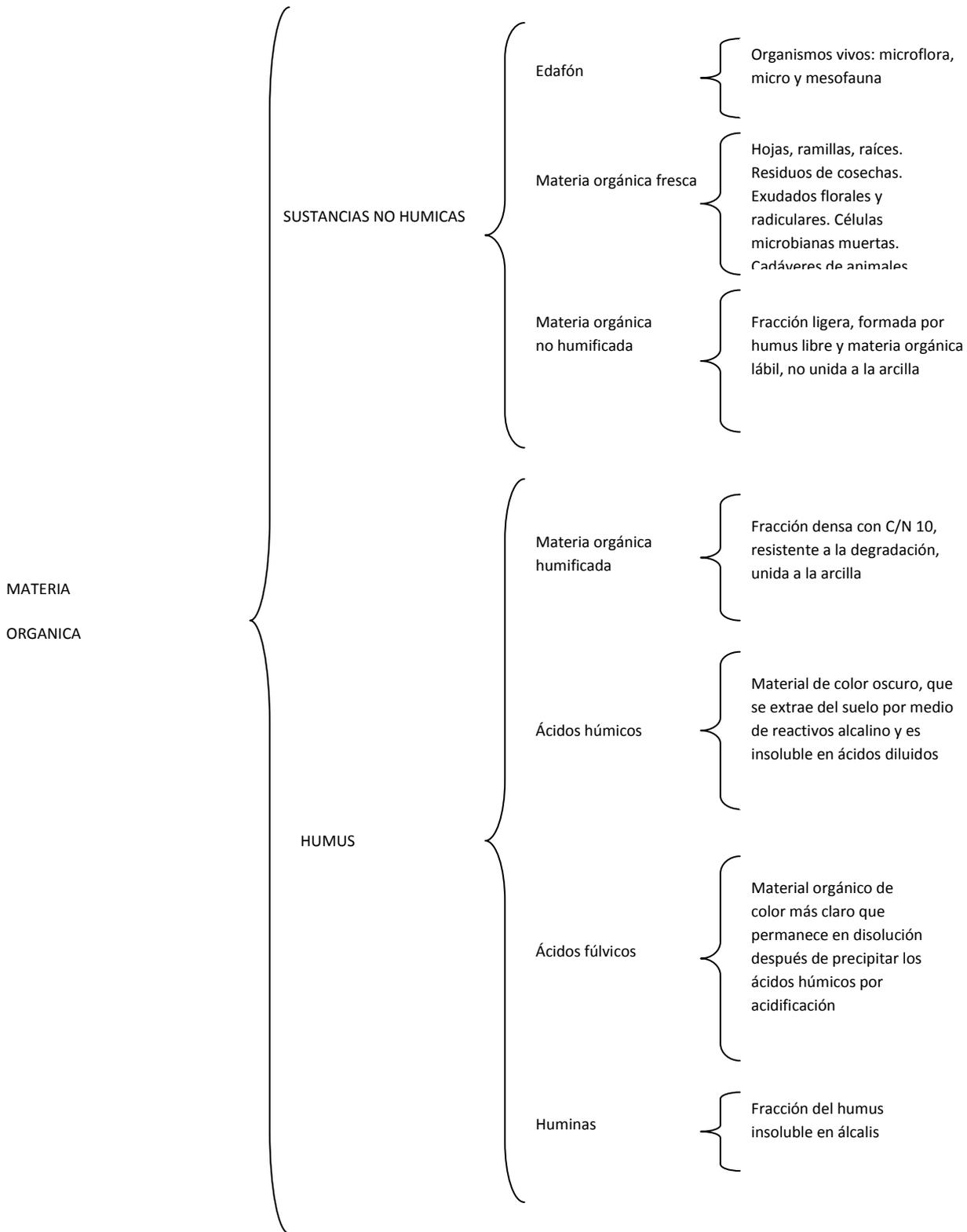
La composición de la materia orgánica es muy compleja. Generalmente la materia orgánica del suelo se suele dividir en dos grupos: la fracción no húmica y el humus. La fracción no húmica está constituida por residuos de plantas y animales más o

menos alterados, la biomasa del suelo y sustancias de composición definida tales como proteínas, hidratos de carbono, grasas alcoholes, auxinas, aldehídos y ácidos orgánicos.

El humus es una mezcla de sustancias orgánicas muy complejas y sin composición definida, estable a la degradación y que tiene una naturaleza coloidal. Dicha mezcla se puede dividir a su vez, en función de la solubilidad en álcalis y ácidos, en otras tres fracciones: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas. La **Figura 1.2.1.2** muestra algunas características básicas de las distintas fracciones que constituyen la materia orgánica del suelo.



**Figura 1.2.1.1** Fracciones orgánicas y sus relaciones en el suelo



**Figura 1.2.1.2.** Fracciones de la materia orgánica del suelo

### **1.2.2. IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS SUELOS**

Antiguamente 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 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.

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 graves problemas. Esto se debe a que la materia orgánica en el suelo rige procesos importantes dentro del sistema suelo-planta e incide en sus propiedades. Entre las funciones más importantes en las que interviene destacan las siguientes:

#### **- Propiedades físicas del suelo:**

- **Formación de agregados y estabilidad estructural (*García, 1992*).** Las sustancias húmicas, al igual que los polisacáridos presentes en la materia orgánica, desempeñan una función importante en la estabilidad de los agregados de los suelos (*Swift, 1991*) y por ello en el mantenimiento de su estructura.
- **Unión a las arcillas formando el complejo de cambio, estabilizando la estructura del suelo y su cohesión.** Este complejo de cambio posee unas características químicas que le permiten actuar de reserva de nutrientes para la planta y los organismos del suelo.

- **Favorece la penetración del agua y su retención** (*Waters y Oades, 1991*). Esta circunstancia conduce al aumento de la reserva hídrica del suelo, la disponibilidad para las plantas y la reducción de las pérdidas.
- **Disminución de la erosión** (*Gabrielis y Michiels, 1991*). Consigue aumentar la resistencia de los suelos a los fenómenos hidrodinámicos, ayudado también porque favorece el desarrollo de la vida vegetal y de los organismos del suelo (*Francis, 1990*).
- **Favorece el intercambio gaseoso, la aireación y disponibilidad de oxígeno para raíces y microorganismos.** La porosidad y respiración de los suelos se ven influenciadas positivamente por la presencia de materia orgánica en proporciones adecuadas.

#### **- Propiedades químicas:**

- **Mantiene y aumenta el contenido de materia orgánica y nutrientes en el suelo.** Este hecho se realiza tanto por aporte directo o la mineralización de la materia orgánica, como por la influencia en la solubilización y aumento de disponibilidad de nutrientes ya existentes en el propio suelo al cambiar las características reactivas del mismo (*Environmental Protection Service de Canadá, 1984*).
- **Aumenta la capacidad de cambio y la reserva de nutrientes para la vida vegetal** (*Cegarra et al., 1983*). La existencia de materia orgánica en el suelo promueve la formación del complejo arcillo-húmico incrementando los lugares de fijación iónica, siendo una autentica reserva de nutrientes de los suelos.
- **Formación de compuestos solubles y materia orgánica-metal,** favoreciendo la disponibilidad de determinados metales que son necesarios para el desarrollo de la cubierta vegetal, y que en otras condiciones no podrían estar a disposición de la misma como Fe, Mn y Cu.
- **Incremento de la capacidad tampón de los suelos,** evitando cambios bruscos de pH (*White, 1987*) y manteniendo unas condiciones de reactividad optimas para la vida en los suelos.

**- Propiedades biológicas:**

- **Favorece los procesos de mineralización**, y por lo tanto el aporte de nutrientes y energía para la vida microbiana.
- **Favorece el desarrollo de la cubierta vegetal**, derivado de las modificaciones físicas y químicas del suelo y la existencia de elementos esenciales y agua para el desarrollo.
- **Facilita la reactividad y los mecanismos de absorción de sustancias peligrosas** como plaguicidas y otros agentes tóxicos, ayudando a su degradación (*Harrod et al., 1991*).
- **Puede estimular el crecimiento de las plantas por la presencia de sustancias que activan los mecanismos fisiológicos de las mismas y el control de enfermedades** (*Vaidyanathan y Eagle, 1991*) y plagas, ya que ayuda a mantener un sistema ecológico equilibrado.

En algunas zonas de España, especialmente la zona del Levante, la presencia de materia orgánica en los suelos suele ser escasa, y son contadas excepciones en las que ésta se halla presente por encima del 2 %. Si a ello unimos la naturaleza caliza de la mayor parte de nuestros suelos (en ocasiones superior al 50 %), que favorece las condiciones degradativas de la materia orgánica, nos daremos cuenta que nos encontramos en un área con suelos deficitarios en fracción orgánica. Para darnos una idea, el contenido de materia orgánica en los suelos no debe ser inferior al 1.7% en los de secano y al 3.4% en los de regadío. Sin embargo en España, el contenido medio de los suelos no supera el 1%.

Se revela, por tanto, como útil el empleo de enmiendas orgánicas en los suelos, con objeto de mantener en ellos la productividad. Se llega así al término tan empleado en los últimos años de *agricultura sostenible*. Se puede definir como *aquella capaz de conseguir una aceptable producción de los suelos sin perjudicar su calidad*. En este sentido se cree muy apropiado el mantener en ellos un adecuado contenido de materia orgánica, debido a la función fundamental que esta desempeña en la productividad y calidad del suelo.

### **1.2.3. FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA EN LOS SUELOS**

Como se ha indicado anteriormente, es muy importante conseguir un nivel adecuado de materia orgánica en los suelos. Según **Parc (1983)**, existen tres motivos principales que incitan a alcanzar este objetivo:

- Una concentración adecuada de materia orgánica en el suelo mejora sus propiedades, tanto físicas, como químicas y biológicas.
- Favorece la vida, especialmente el desarrollo de la cubierta vegetal y el mantenimiento de la productividad de los suelos.
- Evita la pérdida de recursos y energía.

La aplicación de materiales vegetales o de compost preparado con desechos urbanos (RSU y lodos de depuradora) e industriales puede contribuir a solucionar los graves problemas que surgen de la escasez de materia orgánica, y su adición ayuda al mantenimiento de los niveles nutritivos del suelo (**Gatí, 1983**). Estudios realizados en el Reino Unido en 286 parcelas de cultivo durante 1989-90, han puesto de manifiesto las escasas necesidades de aporte de nitrógeno en los suelos que han sido fertilizados con una gran variedad de materiales orgánicos, detectando que sólo el 14 % de ellos han requerido el aporte suplementario de 40 kg de N/ha con el fin de que hubiera suficiente cantidad para garantizar el aporte a las plantas y que se desarrollaran adecuadamente los procesos de mineralización en el suelo y el mantenimiento de los niveles nutritivos (**Vaidyanathan et al., 1991**). Este hecho es muy significativo y nos muestra claramente las posibilidades de ahorro en abonos químicos, en este caso de fertilizante nitrogenado que es el más empleado y demandado en todo el mundo (**Anderson, 1988**).

Sin embargo el empleo de estas fuentes de materia orgánica para el suelo no debe ser en ningún caso aleatorio, sino que se debe realizar conociendo claramente qué material orgánico es el que tenemos, y en qué condiciones debe ser usado para no originar problemas. De este modo, los objetivos que se van a perseguir en utilización de estas sustancias en los suelos son:

- Minimizar la introducción de elementos y sustancias tóxicas en el ecosistema.
- Evitar la pérdida por lavado del suelo de nutrientes y tóxicos.
- Desarrollar técnicas adecuadas para realizar el aporte de los residuos orgánicos.

### 1.3. LA PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS

Se pueden definir los residuos como *“aquellas materias derivadas de actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico”*, según la Legislación Española (ley 42/75) y, por otra parte, la directiva de la CEE 75/442 los define como *“cualquier sustancia u objeto del cual se desprende su poseedor o tiene obligación de desprenderse”*. Estas definiciones son muy amplias y abarcan a la totalidad de los productos residuales que origina nuestro sistema de vida.

Sin lugar a dudas, en los países desarrollados es donde existe el mayor índice de consumo y por tanto el de mayor producción de residuos. Éstos pueden acarrear problemas importantes, sobre todo para el medio ambiente. A esta situación se debe unir el agotamiento de los recursos naturales no renovables, lo que puede conducir a una escasez de muchos de ellos a medio o corto plazo. Por tanto, deben ser estudiados, analizados y transformados, en la medida que sea posible, los residuos originados por nuestro modo de vida, lo que permitiría una disminución de los daños sobre el medio ambiente y su consideración como recursos. No se puede olvidar que en este empeño está también el mantenimiento de nuestra calidad de vida y nuestra salud.

Los residuos se pueden clasificar en función del sector productivo que los origina, lo que nos permite establecer dos grandes grupos:

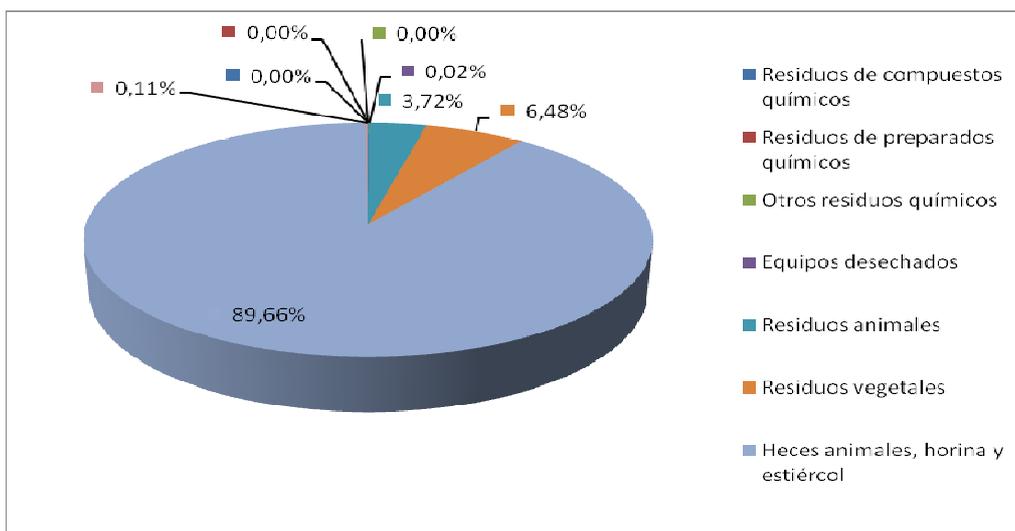
- Los derivados del sector primario, de actividades como la agricultura, ganadería, forestales y extractivas (carteras y minas).
- Los obtenidos del sector secundario y terciario, formado por residuos industriales y urbanos básicamente.

### **1.3.1. RESIDUOS DERIVADOS DEL SECTOR PRIMARIO**

Dentro de los residuos derivados del sector primario se pueden distinguir los siguientes grupos:

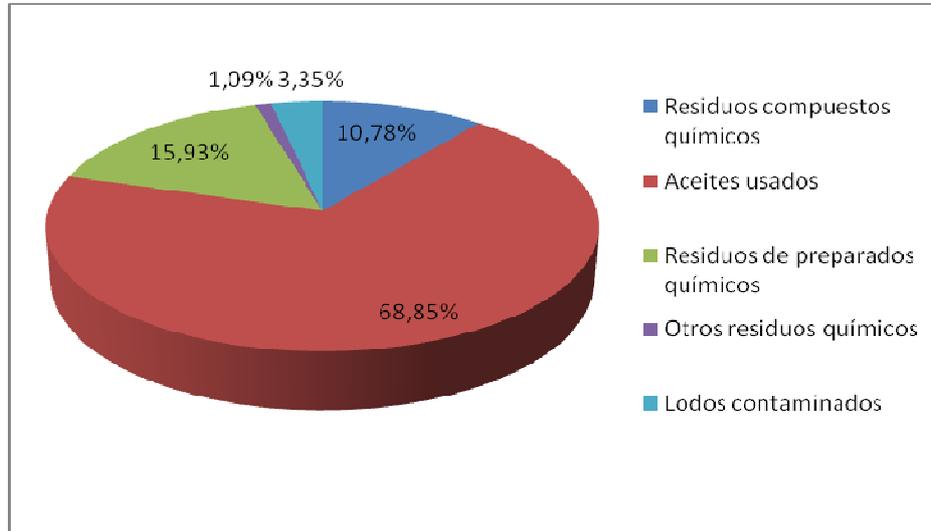
- **Residuos agrícolas:** restos de cosechas y derivados, siendo los más abundantes y dispersos, de difícil control.
- **Residuos ganaderos:**
  - Residuos ganaderos de cría: excrementos, camas y lechos, y al igual que los anteriores presentan una gran dispersión.
  - Residuos de mataderos (industrias cárnicas): huesos, sangre, pellejos, etc., que pueden ser más fácilmente controlables que los anteriores al tener una localización más detallada de los mataderos e industrias agroalimentarias.
- **Residuos forestales:** restos de poda y de diversas labores de silvicultura, de dudoso control y de amplia difusión.
- **Residuos mineros y de cantería:** escombros de minas y metalurgia, que también se encuentran muy localizados en zonas concretas.

En el año 2003 se generaron en España un total de 43,334,931 toneladas de residuos no peligrosos correspondientes al sector primario. La distribución de estos residuos no peligrosos fue la siguiente:



**Figura 1.3.1.1.** Distribución de residuos no peligrosos en España (2003)

En cuanto a los residuos peligrosos correspondientes al sector primario durante 2003, se generaron un total de 21,840.5 toneladas, siguiendo la siguiente distribución:



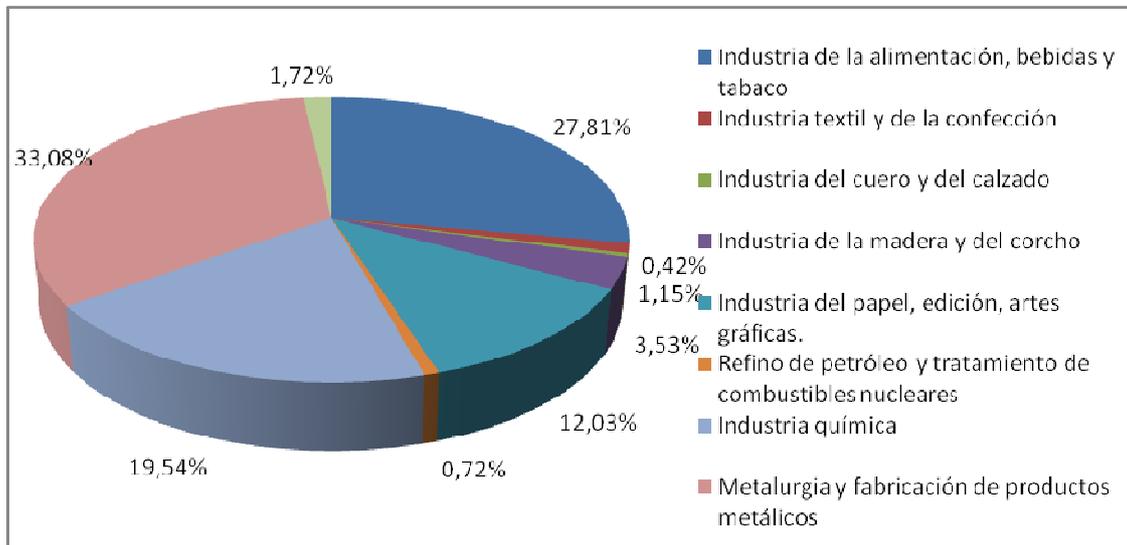
**Figura 1.3.1.2.** Distribución de residuos peligrosos en España (2003)

### **1.3.2. RESIDUOS DERIVADOS DEL SECTOR SECUNDARIO Y TERCARIO**

Dentro de los residuos derivados del sector secundario, se encuentran los siguientes:

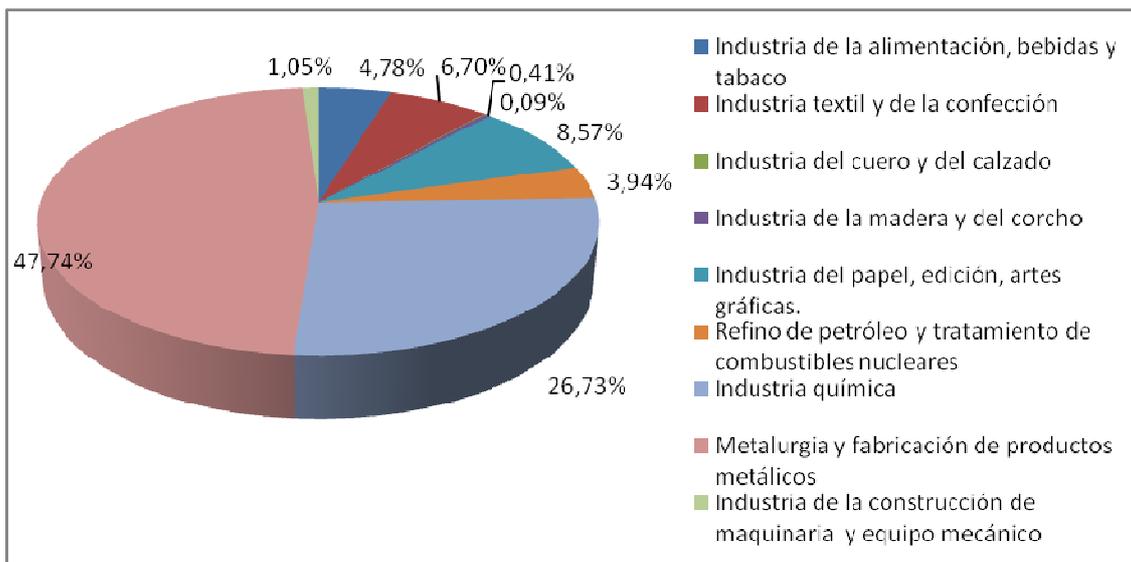
- **Residuos industriales:**
  - Residuos industriales inertes: materiales apagados, restos de industrias no peligrosas, tales como chatarras, vidrios, cenizas, escorias, arenas, etc., de mayor producción en las comunidades más industrializadas de España, y por tanto con mayores efectos negativos de éstas.
  - Residuos tóxicos y peligrosos: ácidos, residuos radiactivos, etc., en definitiva, materiales que contienen sustancias que presentan un riesgo para la salud humana.

En el año 2003, se produjeron en España un total de 17,149,014 toneladas de residuos industriales inertes, cuya distribución fue la siguiente según el tipo de industria:



**Figura 1.3.2.1.** Distribución de residuos industriales inertes

En cuanto a los residuos industriales tóxicos y peligrosos, su producción en España durante 2003 fue de 1,579,292 toneladas.



**Figura 1.3.2.2.** Distribución de residuos industriales peligrosos

- **Residuos urbanos:**

- Residuos Sólidos Urbanos: principalmente de origen doméstico, aunque también se incluyen los procedentes de mataderos, mercados de alimentación, comercios, centros sanitarios, obras, etc. La fracción orgánica de estos residuos puede ser reciclada para su uso como enmendadamente orgánico de suelos, tanto frescos como compostados.
- Lodos de depuradora: procedentes de la depuración de aguas residuales, también se emplean como bioenmendantes del suelo, ya sea como lodos frescos o compostados.

En España, cada español genera 524 kg de residuos urbanos (dato de 2007, INE), dato inferior a la media de los países de la Unión Europea, que alcanza los 567 kg por habitante. De esta manera, se calcula que los casi 45 millones de españoles generaron un total de 24.75 millones de toneladas de residuos urbanos.

Como se indicó anteriormente, la cantidad de residuos atribuible a cada hogar está muy vinculada al sistema de producción, al crecimiento económico y a los hábitos de consumo. Según los últimos indicadores ambientales del Ministerio de Medio Ambiente, las Comunidades Autónomas que registraron un mayor valor per cápita de residuos urbanos fueron Ceuta y Melilla con un indicador de 2.30 seguidas de Canarias (2.23) y Baleares (2.02). En el otro extremo, la que menos residuos genera es Galicia (1.05), seguida de Castilla y León, con un (1.08).

**Tabla 1.3.2.1.** Volumen de residuos urbanos generados en España (2007)

CC.AA	Residuos (t/año)	Nº de Hogares	t. Residuos/(hogar·año)
Galicia	913,740	867,803	1.05
Castilla y León	1,017,693	940,147	1.08
Castilla-La Mancha	762,571	623,274	1.22
Extremadura	476,863	374,599	1.27
Aragón	597,489	446,015	1.34
Asturias	533,015	377,323	1.41
Murcia	567,076	401,298	1.41
La Rioja	149,791	102,325	1.46
Navarra	273,188	185,368	1.47
País Vasco	1,077,819	720,084	1.50
C. Valenciana	2,371,378	1,568,156	1.51
Cataluña	3,978,978	2,404,533	1.65
Madrid	3,320,101	1,937,038	1.71
Cantabria	316,019	183,538	1.72
Andalucía	4,175,245	2,381,961	1.75
Baleares	704,155	349,045	2.02
Canarias	1,405,336	628,893	2.23
Ceuta y Melilla	84,685	36,859	2.30

#### **1.4. EL AGUA Y SU PROBLEMÁTICA ACTUAL. NECESIDAD DE DEPURAR LAS AGUAS RESIDUALES**

Las aguas, tanto las superficiales como las subterráneas, han constituido y constituyen hoy en día el gran motor para el desarrollo de la humanidad. Por ello, se le considera como algo esencial en el mundo actual; pero a la vez el agua representa un elemento de fragilidad ya que se encuentra expuesta a diversas acciones naturales o

antrópicas, las cuales muchas veces pueden resultar negativas, contribuyendo así a su contaminación.

Aparentemente, si se realizan consideraciones a escala mundial respecto a la cantidad global de agua existente, no debería haber problema alguno ya que dicha cantidad es suficiente en el mundo, contabilizando la superficial y la subterránea, constituyendo esta última una aceptable “reserva estratégica” que no interesa desperdiciar. Sin embargo, no hay que olvidar un hecho innegable: el agua no está repartida de forma uniforme al nivel de continentes, y ni siquiera al nivel de regiones dentro de los propios países. Un ejemplo claro está en nuestro país, donde el sureste padece constantes sequías, y en donde el agua constituye un bien escaso; el agua es un factor limitante para el desarrollo de estas regiones, en donde se incluye claramente la Región de Murcia.

Hay que señalar, por otra parte, que una cosa es la cantidad de agua existente y otra muy diferente es su calidad. Cuando la cantidad es escasa (como sucede, como hemos indicado, en las regiones del sureste mediterráneo español), los recursos subterráneos se van agotando por su sobreexplotación; si además, las condiciones meteorológicas existentes no son lo más adecuadas para favorecer un aumento significativo en la cantidad de agua (ejemplo, periodos amplios de sequía), se puede llegar a padecer situaciones preocupantes. Una manera de intentar paliar, en parte, este problema es la reutilización del agua tras un tratamiento adecuado para devolver la calidad al agua usada. Interesa entonces tener muy presente la necesidad de depurar las aguas de forma conveniente para poder reutilizarla sin problemas. Esta imperiosa necesidad va a ser cada vez más acuciante debido a las normativas impuestas por las Leyes Comunitarias en este sentido. En concreto, actualmente la normativa obliga a depurar la totalidad de aguas residuales en municipios con más de 2000 habitantes equivalentes.

En definitiva, tanto en zonas urbanas como en áreas industriales es preciso depurar las aguas antes de su vertido, lo que supone una generación desmedida de lodos como consecuencia de las actividades de este tratamiento de aguas residuales urbanas. Paradójicamente cuanto más se depura más residuos se generan (*Elías, 2000*). La

generación de fangos va en aumento debido a la efectiva aplicación por uno de los Estados miembros de los objetivos que establece la Directiva 91/271/CE relativa al saneamiento y depuración de las aguas residuales urbanas. Esta Directiva obligaba a partir del 2005 a la totalidad de las aglomeraciones urbanas que componen la actual Unión Europea a dotarse de sistemas colectores que recojan esta agua y de estaciones depuradoras que las sometan a un tratamiento secundario, o cuando menos adecuado, antes de ser vertidas.

Los procesos de depuración de aguas urbanas son indispensables para eliminar sustancias contaminantes de naturaleza diversa (aceites, grasas, espumas, microorganismos...). *Passino (1980)* indicó que la depuración de aguas de naturaleza fundamentalmente urbana consta de un pretratamiento, seguido de un tratamiento primario (flotación, sedimentación, precipitación química), y de un tratamiento secundario donde se reducen los materiales coloidales y la materia orgánica en suspensión y disuelta (oxidación de lodos activos, sedimentación de los biológicos y desinfección). Los tratamientos terciarios en los que se reducen al mínimo la materia orgánica, los elementos nutritivos, y las sales disueltas, y en los que se utilizan procesos como los de nitrificación-desnitrificación, precipitación del fósforo, ósmosis inversa, y electrodiálisis, son hoy por hoy bastantes escasos y no están previstos a medio plazo en la mayoría de las instalaciones existentes en la Región de Murcia.

Las plantas depuradoras van a producir un agua con características concretas, conteniendo una aceptable cantidad de materia orgánica disuelta y nutrientes, lo cual puede ser al principio positivo para la utilización en agricultura siempre que ésta se realice en condiciones. Por otra parte, los lodos procedentes de diferentes sistemas de tratamiento de aguas urbanas constituyen una aceptable fuente de materia orgánica y nutrientes para los suelos, por lo que siempre que se les aplique un tratamiento de estabilización y saneamiento adecuado podrán ser empleados como bioenmendantes para conseguir la recuperación de la productividad natural de los suelos, tanto con fines agrícolas como con fines de recuperación de suelos degradados o de reforestación.

### **1.4.1. PROCESO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

La depuración de aguas residuales está formada por una serie de procesos físico-químicos y biológicos, tanto aerobios como anóxicos (vía anaerobia) complementarios entre sí, que permiten realizar una depuración integral en las mejores condiciones técnicas y económicas posibles.

La eficacia de un proceso de tratamiento de aguas residuales se expresa en términos de tanto por ciento de disminución de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Esta es una medida de la cantidad de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica presente en el agua. Cuanto mayor es el nivel de materiales oxidables orgánicos e inorgánicos, más elevada es la DBO y peor es la calidad del agua. Una planta de tratamiento de aguas residuales que funcione bien puede eliminar el 95 % o más de la DBO inicial.

En una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) podemos distinguir tres líneas:

- Línea de aguas: comprende un Pretratamiento, Tratamiento primario, Tratamiento secundario, y Tratamiento terciario.
- Línea de fangos: es la línea en la que se acondicionan los fangos extraídos al agua en la línea de aguas. Comprende el Espesamiento de los fangos, Digestión, Acondicionamiento, Secado, y Eliminación.
- Línea de gas: es la línea que se encarga de recoger y acondicionar el metano liberado en el proceso de digestión de los fangos, que es llevado a cabo por bacterias productoras de metano.

#### **a) LÍNEA DE AGUAS**

##### *1) Pretratamiento*

En toda EDAR resulta necesaria la existencia de un tratamiento previo o pretratamiento que elimine del agua residual aquellas materias que pueden

obstruir las bombas y canalizaciones, o bien interferir en el desarrollo de los procesos posteriores.

Con el pretratamiento se elimina la parte de polución más visible: cuerpos voluminosos, trapos, palos, hojas, arenas, grasas y materiales similares, que llegan flotando o en suspensión desde los colectores de entrada. Una línea de pretratamiento convencional consta de las etapas de **desbaste, desarenado y desengrasado**.

El **desbaste** se lleva a cabo mediante rejillas formadas por barras verticales o inclinadas, que interceptan el flujo de la corriente de agua residual en un canal de entrada a la estación depuradora. Su misión es retener y separar los sólidos más voluminosos, a fin de evitar las obstrucciones en los equipos mecánicos de la planta y facilitar la eficacia de los tratamientos posteriores. Estas rejillas pueden ser de dos tipos: entre 50 y 150 mm de separación de los barrotes (desbaste grueso) y entre 10 y 20 mm (desbaste fino). Estas rejillas disponen de un sistema de limpieza que separa las materias retenidas.

Las instalaciones de **desarenado** se sitúan en las EDAR después del desbaste y tienen como objetivo el extraer del agua bruta las partículas minerales de tamaño superior a uno fijado en el diseño, generalmente 200 micras. El funcionamiento técnico del desarenado reside en hacer circular el agua en una cámara de forma que la velocidad quede controlada para permitir el depósito de arena en el fondo. Normalmente, esta arena sedimentada queda desprovista casi en su totalidad de materia orgánica y es evacuada, mediante bombas, al clasificador de arenas y, posteriormente, a un contenedor.

La fase de **desengrasado** tiene por objeto eliminar las grasas, aceites y en general los flotantes, antes de pasar el agua a las fases posteriores del tratamiento. El procedimiento utilizado para esta operación es el de inyectar aire a fin de provocar la desemeulsión de las grasas y su ascenso a la superficie, donde se extraen por algún dispositivo de recogida superficial, normalmente rasquetas, para acabar en contenedores.

2) Tratamiento primario

Se entiende por tratamiento primario a aquel proceso o conjunto de procesos que tienen como misión la separación por medios físicos de las partículas en suspensión no retenidas en el pretratamiento.

El proceso principal del tratamiento primario es la decantación, fenómeno provocado por la fuerza de gravedad que hace que las partículas suspendidas más pesadas que el agua se separen sedimentándose. Normalmente, en decantadores denominados **dinámicos**, los fangos son arrastrados periódicamente hasta unas purgas mediante unos puentes móviles con unas rasquetas que recorren el fondo. En los denominados decantadores **circulares**, de gran tamaño, el agua entra por el centro y sale por la periferia, mientras que los fangos son arrastrados hacia un pozo de bombeo de donde son eliminados por purgas periódicas.

Otros procesos de tratamiento primario incluyen el mecanismo de **flotación con aire**, en donde se eliminan sólidos en suspensión con una densidad próxima a la del agua, así como aceites y grasas, produciendo unas burbujas de aire muy finas que arrastran las partículas a la superficie para su posterior eliminación.

El tratamiento primario permite eliminar en un agua residual urbana aproximadamente el 90% de las materias decantables y el 65% de las materias en suspensión. Se consigue también una disminución de la DBO de alrededor del 35%.

3) Tratamiento secundario

Su finalidad es la reducción de la materia orgánica presente en las aguas residuales una vez superadas las fases de pretratamiento y tratamiento primario. El tratamiento secundario más comúnmente empleado para las aguas residuales urbanas consiste en un proceso biológico aerobio seguido por una decantación, denominada secundaria.

El proceso biológico puede llevarse a cabo por distintos procedimientos. Los más usuales son el proceso denominado **fangos activos** y el denominado de **lechos bacterianos o percoladores**. Existen otros procesos de depuración aerobia de aguas residuales empleados principalmente en pequeñas poblaciones: **sistema de lagunaje, filtros verdes, lechos de turba o contractores biológicos rotativos**.

El proceso biológico mediante **fangos (lodos) activos** consiste en un proceso continuo en el que el agua residual se estabiliza biológicamente en tanques o **balsas de activación**, en las que se mantienen condiciones aerobias. El efluente de los decantadores primarios pasa a estas balsas de fangos activos, que necesitan un aporte de oxígeno para la acción metabólica de los microorganismos. Este aporte se efectúa mediante turbinas, o bien a través de difusores dispuestos en el interior de la balsa. El sistema consiste en desarrollar un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculo. Después de un tiempo de contacto suficiente, 5-10 horas, el licor de mezcla se envía a un clarificador (**decantador secundario**) destinado a separar el agua depurada de los fangos. Estos decantadores constituyen el último escalón en la consecución de un efluente bien clarificado, estable, de bajo contenido en DBO y sólidos en suspensión (menos del 10 % en comparación con el influente).

**Los lechos bacterianos** son tanques circulares rellenos de piedras o materiales sintéticos, formando un filtro con un gran volumen de huecos, destinado a degradar biológicamente la materia orgánica del agua residual. El agua a tratar se rocía sobre el lecho filtrante, mediante un brazo giratorio, provisto de surtidores, y da lugar a la formación de una película que recubre los materiales filtrantes y que está formada por bacterias, protozoos y hongos alimentados por la materia orgánica del agua residual. Al fluir el agua residual sobre la película, la materia orgánica y el oxígeno disuelto son extraídos de ésta.

4) Tratamiento terciario

Este tratamiento consiste en un proceso físico-químico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos del efluente final. El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano considerable. Algunos de estos tratamientos son los siguientes:

**Adsorción:** Propiedad de algunos materiales de fijar en su superficie moléculas orgánicas extraídas de la fase líquida en la que se encuentran.

**Cambio iónico:** Consiste en la sustitución de uno o varios iones presentes en el agua a tratar por otros que forman parte de una fase sólida finamente dividida (cambiador), sin alterar su estructura física. Suelen utilizarse resinas y existen cambiadores de cationes y de aniones. Debido a su alto precio, el proceso de intercambio iónico se utiliza únicamente en aquellos casos en los que la eliminación del contaminante venga impuesta por su toxicidad o que se recupere un producto de alto valor (eliminación de isótopos radiactivos, descontaminación de aguas con mercurio, eliminación de cromatos y cianuros, recuperación de oro, etc.).

**Procesos de separación por membranas:** tanto mediante membranas semipermeables (procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa) como mediante membranas de electrodiálisis.

De todas formas, en la mayoría de los casos el tratamiento terciario de aguas residuales urbanas queda limitado a una desinfección para eliminar patógenos, normalmente mediante la adición de cloro gas, en las grandes instalaciones, e hipoclorito, en las de menor tamaño.

b) **LÍNEA DE LODOS**

En un tratamiento biológico de aguas residuales se obtienen volúmenes considerables de fangos. A estos fangos hay que someterlos a determinados procesos que reducirán su facultad de fermentación y su volumen. El tratamiento de los fangos depende de su composición y del tipo de agua residual del que proviene. Las fases más usuales en un proceso de tratamiento y evacuación de fangos son: **concentración o espesamiento, digestión, acondicionamiento, secado, incineración y/o eliminación.**

**Espesamiento:** La misión del espesamiento de los fangos es concentrarlos para hacerlos más densos, reduciendo el volumen global para facilitar el manejo de los mismos y abaratar los costes de las instalaciones posteriores. Existen varios tratamientos posibles:

- **Concentración en espesadores:** Un espesador es un depósito cilíndrico terminado en forma cónica. Normalmente, el fango que llega a estos espesadores es de tipo mixto. Suelen tener un cono de descarga de gran pendiente. La concentración que cabe esperar es de hasta un 5-10 %.
- **Flotación:** Es una alternativa al espesamiento propiamente dicho. Consiste en inyectar aire a presión al fango a tratar formando un manto en la superficie que, mediante una rasqueta superficial, es barrido hacia una arqueta. Este tipo de espesamiento se utiliza para fangos muy ligeros con gran cantidad de bacterias filamentosas.
- **Centrifugación:** Se utiliza tanto para concentración como para deshidratación.

**Digestión:** El proceso de digestión de fangos puede llevarse a cabo por vía anaerobia (la principal) o por vía aerobia. Ambas soluciones tienen sus ventajas e inconvenientes, si bien puede decirse que en instalaciones importantes resulta más conveniente la primera, reservándose la vía aerobia para estaciones de menor importancia:

- **Digestión anaerobia:** La digestión anaerobia consiste en una serie de procesos microbiológicos que convierte la materia orgánica en metano en ausencia de oxígeno. El proceso se lleva a cabo en unos depósitos cerrados (de hasta 30 m de diámetro y casi 20 de altura) denominados digestores, que permiten la realización de las reacciones correspondientes y la decantación de los fangos digeridos en su parte baja de forma cónica. En el proceso se produce un gas, denominado gas biológico (mezcla de metano y CO<sub>2</sub> principalmente) que se evacua del recinto. Para facilitar el proceso de digestión y reducir su duración, los fangos se calientan a temperaturas de alrededor de 30-37 °C, siendo conveniente que este calor se aporte utilizando como combustible el propio gas de la digestión.
- **Digestión aerobia:** Es otro procedimiento alternativo de digestión de fangos que, como se ha indicado, suele aplicarse solamente en pequeñas instalaciones. Consiste en estabilizar el fango por aireación, destruyendo así los sólidos volátiles. El tiempo de aireación suele oscilar entre 10 y 20 días, según la temperatura.

**Acondicionamiento de los fangos:** Los fangos urbanos y muchos industriales tienen una estructura coloidal que los hace poco filtrables a la hora del secado posterior a la digestión, por lo que el sistema de filtración consigue un bajo rendimiento. Para evitar este inconveniente se añade a los fangos reactivos floculantes que rompen la estructura coloidal y le confiere otra de carácter granular de mayor filtrabilidad. Los reactivos más utilizados son las sales de hierro (FeCl<sub>3</sub>), sales de aluminio, cal (CaO) y/o polielectrolito.

**Secado:** Su objetivo es eliminar agua del fango para convertirlo en una pasta sólida fácilmente manejable y transportable. El sistema depende de la cantidad de fango y del terreno disponible. Los sistemas más importantes son los **filtros de banda, filtros prensa y/o centrifugación.**

### c) LÍNEA DE GAS

Como se ha indicado anteriormente, cuando el proceso de digestión de fangos se efectúa por anaerobia, como consecuencia de las reacciones bioquímicas del mismo, se produce un gas denominado **gas biológico** o **biogás**, que tiene un contenido de metano de alrededor del 65-70%. El resto de su composición lo constituyen gases inertes. La mayor parte dióxido de carbono.

El biogás puede convertirse, reutilizándolo, en un valioso subproducto a través del cual se suministra una gran parte de la energía que la EDAR necesita para su funcionamiento (hasta un 60% del total de la energía empleada). Las aplicaciones de este gas de digestión son, por un lado, las de su uso como calefacción tanto de edificios como de los propios fangos de digestión y, por otro lado en instalaciones importantes, las de su empleo como combustible para producción de energía. En este último caso, a la planta depuradora se le dota de motores que se alimentan con el biogás, y a estos motores se le acoplan generadores cuya energía eléctrica producida sirve para abastecer las distintas partes de la estación.

## ESQUEMA DE TRATAMIENTO

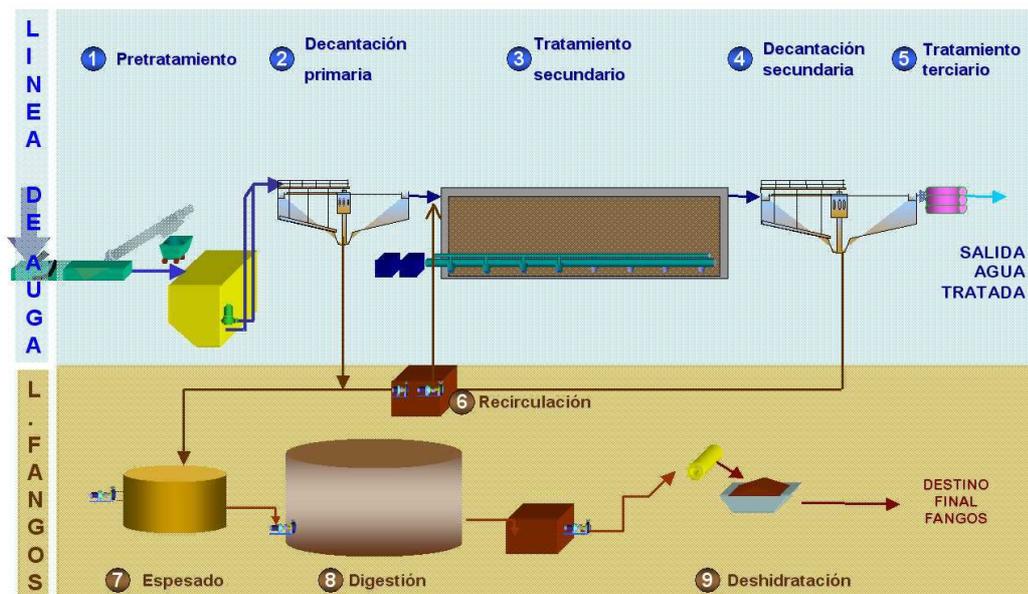


Figura 1.4.1.1. Esquema de una EDAR

## 1.5. RECICLADO EN EL SUELO DE LODOS DE DEPURADORA

Parece evidente el beneficio que para nuestros suelos puede suponer su enmienda con materia orgánica. Los lodos de depuradora pueden constituir una “*f fuente nueva de materia orgánica económica y eficaz*”.

Los lodos procedentes de la depuración de aguas urbanas cuentan con elevados contenidos en materia orgánica y nutrientes, en particular nitrógeno y fósforo, debido de una parte, a su propia constitución, y de otra, a los restos de detergentes con carga de fosforo que incorporan. Tal y como se indicó anteriormente, al depurarse cada vez una mayor cantidad de agua, habrá cantidades cada vez mayores de lodos de depuradora.

Como se ha mencionado anteriormente, las características de los lodos producidos en una estación depuradora dependen no sólo del origen del efluente que se trate, sino también de la tecnología y tipo de depuración empleados, del tratamiento final que se les dé y de la época del año (*Moreno. 1985*).

Las principales características de los lodos son:

- Su contenido de materia seca, que influye en su tratamiento, transporte y utilización posterior.
- La cantidad de materia orgánica y de elementos fertilizantes que contienen, los cuales condicionan su utilización como abono.
- El contenido en materias indeseables y tóxicas, que pueden limitar su utilización y exigir la adopción de medidas de precaución en su eliminación.

En la **Tabla 1.5.1** se recogen datos sobre la composición química habitual de lodos frescos y digeridos. En ella se observa que, tras el proceso de digestión, se produce una reducción de sólidos volátiles, proteínas y ácidos orgánicos y un aumento de sustancias inorgánicas tales como P, K, Fe, y CaCO<sub>3</sub>, debido a la pérdida de peso que sufren los lodos durante el proceso de digestión.

**Tabla 1.5.1.** Composición típica de los lodos frescos y digeridos

CARACTERÍSTICAS	LODOS FRESCOS		LODOS DIGERIDOS	
	Intervalo	Valor típico	Intervalo	Valor típico
Sólidos secos totales (%MS)	2 – 8	5	6 – 12	10
Sólidos volátiles (%MS)	60 – 80	65	30 – 60	40
Proteínas (%MS)	20 – 30	25	15 – 20	18
Nitrógeno (N, %MS)	1.5 – 6	4	1.6 – 6	4
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %MS)	0.8 – 3	2	1.5 – 4	2,5
Potasio (K <sub>2</sub> O, %MS)	0 – 1	0.4	0 – 3	1
Celulosa (%MS)	8 – 15	10	8 – 15	10
Fe (excepto sulfuros) (%MS)	2 – 4	2.5	3 – 8	4
Sílice (SiO <sub>2</sub> , %MS)	15 – 20	-	10 – 20	-
Ph	5 – 8	6	6.5 – 7.5	7
CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	500 – 1500	600	2500 -3500	3000
Ácidos orgánicos (mg HAc/L)	200 – 200	500	100 – 600	200

La aplicación de lodos de depuradora como fuente de materia orgánica para los suelos no debe ser una cuestión aleatoria. Se deben analizar detenidamente los componentes de los lodos para constatar su beneficio como bioenmendante.

A continuación se van a describir algunos de los aspectos que pueden influir definitivamente en la catalogación de los lodos como "aptos" o "no aptos" para su reciclado en el suelo como fuentes de materia orgánica.

### Aspectos positivos

Tal y como se muestra en la **Tabla 1.5.1**, los lodos constituyen un residuo rico en materia orgánica, y este aspecto es fundamental para poder considerarlos como una buena fuente de material orgánico para ser adicionada a los suelos, precisamente empobrecidos,

la mayor parte de las veces, en materia orgánica. Además, los lodos cuentan con elevados contenidos en nitrógeno (no hay que olvidar que son materiales claramente proteicos debido a su origen), así como en fósforo, posiblemente procedente de detergentes que terminan en las estaciones de depuración de aguas. Quizá estas cantidades de macronutrientes no son suficientes para considerar a estos productos como "fertilizantes" propiamente dichos, pero es innegable que disponen de un cierto carácter fertilizante.

**Tabla 1.5.2.** Características físico-químicas típicas de los lodos de depuración

PARÁMETROS	VALOR MÍNIMO-MÁXIMO
pH	6-12
Conductividad Eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )	0.8-11
Materia orgánica ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	500-800
Relación C/N	5-8
Nitrógeno ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	20-60
Fósforo (como $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	20-50
Potasio (como $\text{K}_2\text{O}$ ) ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	5-10

El nitrógeno de los lodos se encuentra en su mayor parte en forma orgánica siendo necesario que este nitrógeno se mineralice a formas inorgánicas para que pueda ser asimilado por las plantas. Los tratamientos a los que son sometidos los lodos influyen en la capacidad de mineralización de este nitrógeno orgánico. El nitrógeno de los lodos contribuirá a la nutrición nitrogenada de las plantas y se incorporará también al humus del suelo, interviniendo en los complejos procesos de la humificación, contribuyendo de este modo a mejorar la fertilidad del suelo. Sin embargo, si la adición de lodos no se hace de modo adecuado pueden producirse efectos negativos derivados de la contaminación por nitratos. Para evitarlo hay que establecer el aporte de lodos a los suelos en función de su riqueza en nitrógeno, de las características del suelo y del lodo, de la climatología, y de los requerimientos nitrogenados del cultivo que desee desarrollar.

El fósforo contenido en los lodos de depuradora se encuentra también, en su mayor parte, en forma orgánica, siendo necesaria su mineralización a formas inorgánicas para que pueda ser utilizado por las plantas.

En cuanto al potasio, los niveles de este macronutriente en los lodos son relativamente bajos ya que este elemento forma sales solubles, que permanecen en su mayor parte en las aguas ya depuradas una vez finalizado el proceso de depuración que da origen a los lodos. Sin embargo, la mayor parte de este elemento se encuentra en el lodo, en formas directamente asimilables por las plantas. No obstante, para evitar bajadas en el rendimiento de las cosechas es conveniente complementar la adición de lodo al suelo con el empleo de fertilizaciones potásicas. Pero hay que tener en cuenta que un exceso de potasio reduce la asimilación de magnesio por las plantas.

Los lodos de depuración de aguas residuales mantienen también una elevada carga microbiana, y esto es un aspecto muy positivo. Una de las maneras de recuperar en los suelos su calidad y fertilidad perdidas es la mejora de su actividad microbiana. Esa actividad microbiana hará poner en marcha los ciclos biogeoquímicos de elementos importantes, mejorando así la calidad biológica del suelo. Para conseguir este objetivo, el empleo de fuentes de biomasa microbiana como son los lodos de depuradora puede ser una estrategia adecuada ya que, bien empleados, pueden actuar en los suelos como "catalizador" de la mencionada actividad microbiana, y llevar a los suelos hacia su recuperación definitiva. Sin embargo, no todos los aspectos relacionados con la composición de estos materiales indican que puedan ser considerados como "positivos" a la hora de su reciclaje en el suelo.

### **Aspectos negativos**

Los biosólidos también poseen aspectos negativos que hay que conocer si no se quiere correr riesgos innecesarios en el momento de su reciclado en el suelo. Entre estos aspectos negativos hay que destacar su contenido en metales pesados, que a veces suele ser excesivo (*Ciba et al., 2003*). Debido a su peligrosidad, este apartado merece especial

atención. A priori, no deberían existir problemas derivados de metales pesados en el caso de lodos obtenidos en la depuración de aguas urbanas.

Sin embargo, debido a pequeñas industrias urbanas (talleres de automóviles, laboratorios de diversa índole, etc.), así como a la introducción dentro de las líneas de aguas urbanas de aquellas procedentes de industrias peri-urbanas, es hasta cierto punto "normal" observar contaminación de algunos metales pesados no deseables en estos biosólidos. En este sentido, es claro que si esos contenidos pueden no ser admisibles, el lodo debe tener un destino que no sea el suelo (como la incineración), ya que de no ser así, dichos metales llegarían al suelo como productos tóxicos (*Mena, 2001*). Se ha de indicar que existe legislación al respecto, la cual se recoge en el Anexo final.

Otros problemas en los lodos pueden venir derivados de un **exceso de materia orgánica lábil**, lo cual le confiere características no deseables, ya que este material se encuentra sometido a continuos cambios en función del uso que los microorganismos hagan de esa materia orgánica lábil. La introducción en el suelo de una materia orgánica lábil en exceso puede provocar además lo que se conoce como "hambre de nitrógeno". Consiste en que el nitrógeno es consumido preferentemente por biomasa microbiana existente en el suelo, cuyo desarrollo es estimulado por materia orgánica lábil aportada por el lodo, ya que ésta es utilizada como fuente energía por los mismos. Esto puede impedir que las plantas tengan a su disposición el mencionado nutriente.

El **olor** es un aspecto muy negativo de estos biosólidos, puesto que materiales orgánicos frescos tienen un olor desagradable característico debido posiblemente a la fase de descomposición de ácidos. Los olores desagradables pueden aparecer en el centro de la pila de lodos, bajo condiciones de anaerobiosis, con producción de ácido sulfhídrico, amoníaco y aminas.

Hay varias opciones para el tratar de eliminar el mal olor, incluyendo tratamiento químico, la destrucción térmica y la bio-filtración. En muchos casos es la última técnica la opción más económica y la más efectiva, y, hoy en día, es de interés generalizado en la industria de compostaje. El control del olor es uno de los intereses primarios en las grandes instalaciones de compostaje, especialmente si se ubica cerca de áreas

residenciales. Estos malos olores desaparecen con la estabilización la materia orgánica contenida en el lodo. Así, el producto resultante tras someter al lodo a un proceso de compostaje, está exento de malos olores presentando un olor semejante a suelo de bosque, olor causado por los actinomicetos.

A destacar asimismo el contenido en los lodos de **microorganismos patógenos**, los cuales pueden generar un riesgo cuando los mencionados productos quieren ser usados directamente ("en fresco") en agricultura. En los lodos de depuradora, debido al origen fecal de las aguas residuales depuradas, pueden existir microorganismos capaces de generar enfermedades como hepatitis, gastroenteritis, tubérculo meningitis, etc. Por ello, resulta imprescindible realizar procesos acondicionamiento que permitan controlar y eliminar este riesgo de contaminación por patógenos.

No hay que olvidar tampoco los contenidos en **metabólicos orgánicos** que pueden ser considerados "tóxicos", y que en ocasiones encontramos en los biosólidos (restos de plaguicidas, etc.), y el contenido de sales de estos residuos, que cuando es excesivo los hacen inadecuados para su reciclado en el suelo.

En resumen, los principales problemas derivados de la adición al suelo de residuos orgánicos urbanos se deben, entre otras, a las siguientes causas:

- Presencia de metales pesados
- Presencia de materia orgánica lábil
- Exceso o déficit de nutrientes
- Olor desagradable
- Existencia de organismos patógenos
- Presencia de sustancias tóxicas
- Salinidad

Por tanto, se puede concluir que existe una clara necesidad de analizar de manera exhaustiva los lodos de depuradora antes de decidir su destino, con el fin de no correr riesgos innecesarios.

### **1.5.1. SISTEMAS DE ELIMINACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LODOS**

Los principales destinos que se dan a los lodos de depuradora se pueden incluir en tres grandes grupos:

- *Vertido*: ya sea en vertederos controlados en tierra o al mar. La primera de las alternativas presenta menos problemas medioambientales que la segunda, pero tampoco está exenta de riesgos, debido a los arrastres por lixiviación de sustancias contaminantes de los cauces públicos o aguas subterráneas. En cualquier caso, el terreno receptor queda inutilizado durante un periodo largo de tiempo.
- *Incineración*: supone una reducción del peso y volumen de los lodos, sin embargo se produce un desperdicio energético considerable además de la contaminación atmosférica generada y emisión de sustancias peligrosas, como dioxinas y furanos (*Werther and Ogada, 1999*).
- *Reciclaje*: este uso de los lodos tiene dos vertientes; de una parte, su empleo en agricultura como enmendante orgánico del suelo; de otra, su uso para la recuperación de suelos degradados, incluyendo la recuperación de suelos de minas.

### **1.5.2. APLICACIÓN DE LOS LODOS EN LA AGRICULTURA**

Los lodos procedentes de una depuradora contienen un elevado contenido de materia orgánica (entre el 50 y el 80% sobre peso seco) y este hecho es el que hace que se considere a estos subproductos como una fuente de materia orgánica para los suelos. Debido al origen de los lodos, la mayor parte de su materia orgánica es muy bioactiva, por lo que su empleo en suelos áridos es enormemente interesante (*Raviv, 2005, Stofella and Kahn, 2001*).

Los lodos poseen la mayoría de nutrientes necesarios para las plantas; pero su poder fertilizante varía de acuerdo con la procedencia, los procesos de depuración y tratamientos finales a que han sido sometidos. Las características fertilizantes de los lodos se podrían expresar en función de sus contenidos en macronutrientes. Los contenidos en nitrógeno de los lodos de depuradora son realmente elevados, encontrándose en su mayor parte en forma orgánica, lo cual hace que no todo este nutriente sea inmediatamente asimilable por la planta. La cantidad de nitrógeno mineralizable depende de no sólo del tratamiento final que se le dé al lodo, sino de las condiciones climatológicas que se den en la zona de aplicación. Así, los lodos anaerobios poseen un mayor porcentaje de nitrógeno en formas no hidrolizables que los estabilizados aeróbicamente. En cuanto a las condiciones climatológicas, son más influyentes la temperatura y humedad que las características del suelo.

Los lodos pueden considerarse una fuente de fósforo, procedente en su mayor parte de los detergentes que existen en las aguas residuales. Más que el contenido total en fósforo interesa conocer su disponibilidad para las plantas. El porcentaje medio de fósforo en los lodos expresado como  $P_2O_5$  es del 2 al 5%, convirtiéndose en disponible durante el primer año alrededor del 50%.

El potasio es un elemento cuyo contenido en los lodos es bajo en comparación con los otros dos macroelementos, oscilando entre el 0.1 y 0.4%. Sin embargo, al encontrarse principalmente como cloruro, es muy soluble y fácilmente disponible para la planta.

Dicho todo esto, hay que hacer notar que, que la aplicación directa de lodos al suelo no está exenta de riesgos. Los factores limitantes de la utilización de lodos como fertilizantes o enmendantes del suelo son varios:

- **Metales pesados**

Muchos de ellos son necesarios para las plantas, ya que funcionan como macronutrientes esenciales para ellas; pero la presencia de éstos en los lodos en

elevadas cantidades llega a ser perjudicial para el desarrollo vegetal, pudiendo constituir un peligro para los animales y el hombre, debido al paso de estos metales a la cadena trófica. Por supuesto, no hay que olvidar que la adición al suelo de lodos con altos contenidos en metales produce una contaminación del mismo que afecta negativamente a su fertilidad biológica.

El problema de los metales pesados es mayor en los lodos procedentes de estaciones depuradoras que recogen efluentes de zonas industriales, siendo el origen de estos contaminantes diverso (**Tabla 1.5.2.1**).

**Tabla 1.5.2.1.** Origen de algunos metales pesados en los lodos

ELEMENTO	INDUSTRIA
<b>Ag</b>	Material fotográfico, espejos, joyería, electrónica
<b>Cd</b>	Minería, metalurgia, pinturas, barnices baterías
<b>Cr</b>	Metalurgia, pinturas, piel, colorantes, textil, química
<b>Hg</b>	Barnices, pinturas, plaguicidas, medicinas, plásticos, papel
<b>Ni</b>	Revestimientos metálicos, colorantes, electrodos
<b>Pb</b>	Carburantes, vidrios, petróleo, cerámicas, barnices, baterías
<b>Cu</b>	Metalurgia, pinturas, textil, electrónica, conservas
<b>Zn</b>	Metalurgia, plaguicidas, textil, eléctricas, caucho, plásticos

La mayor parte de las legislaciones existentes sobre la utilización de lodos en agricultura establecen un doble control, por una parte fijan los límites para el contenido de metales pesados en lodos, y por otra, establecen unas concentraciones máximas que no deben sobrepasarse en los suelos dedicados a la agricultura. Sin embargo, existen diferencias entre los países en cuanto a establecer los contenidos máximos permisibles de metales pesados, aunque sí parece existir un acuerdo general en cuanto a limitar los contenidos de Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Hg, y Zn. En las **Tablas 1.5.2.2 y 1.5.2.3** se recogen los valores límites de metales en lodos y en los suelos según la legislación española y en la **Tabla 1.5.2.5** se detallan las concentraciones máximas aceptables de metales pesados para la aplicación de lodos a los suelos, para diferentes países de la U.E.

**Tabla 1.5.2.2.** Normativa que regula las concentraciones de metales pesados en suelos (1990)

<b>VALORES LÍMITE DE CONCENTRACION DE METALES PESADOS EN SUELOS (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Suelos con pH &lt; 7</b>	<b>Suelos con pH &gt; 7</b>
<b>Cadmio</b>	1	3
<b>Cobre</b>	50	210
<b>Níquel</b>	30	112
<b>Plomo</b>	50	300
<b>Zinc</b>	150	450
<b>Mercurio</b>	1	1.5
<b>Cromo</b>	100	150

**Tabla 1.5.2.3.** Normativa que regula las concentraciones de metales pesados en lodos de utilización agraria (1990)

<b>VALORES LÍMITE DE CONCENTRACION DE METALES PESADOS EN LOS LODOS DESTINADOS A UTILIZACION AGRARIA (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Suelos con pH &lt; 7</b>	<b>Suelos con pH &gt; 7</b>
<b>Cadmio</b>	20	40
<b>Cobre</b>	1000	1750
<b>Níquel</b>	300	400
<b>Plomo</b>	750	1200
<b>Zinc</b>	2500	400
<b>Mercurio</b>	16	25
<b>Cromo</b>	1000	1500

**Tabla 1.5.2.4.** Cantidades máximas anuales de metales pesados que se pueden introducir en suelos en una media de 10 años

<b>VALORES LÍMITE DE LAS CANTIDADES ANUALES DE METALES QUE SE PODRAN INTRODUCIR EN LOS SUELOS BASANDOSE EN UNA MEDIA DE 10 AÑOS</b>	
<b>Elemento</b>	<b>kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup></b>
<b>Cadmio</b>	0.15
<b>Cobre</b>	12
<b>Níquel</b>	3
<b>Plomo</b>	15
<b>Zinc</b>	30
<b>Mercurio</b>	0.1
<b>Cromo</b>	3

Algunos autores utilizan índices como el llamado *Zn equivalente* y la relación Cd/Zn (Adams y Kissel, 1989) para conocer de forma más rápida si los lodos pueden ser utilizados, ya que puede existir un efecto de toxicidad acumulativo para los diferentes metales. Así el Zn equivalente relaciona la fitotoxicidad de este elemento con la del Cu y la del Ni y se calcula según la fórmula:

$$\text{Zinc equivalente} = (\text{mg kg}^{-1} \text{ Zn}) + 2(\text{mg kg}^{-1} \text{ Cu}) + (\text{mg kg}^{-1} \text{ Ni}) - 200$$

En cuanto a la relación Cd/Zn, es deseable que no sobrepase el valor 0.5, ya que la absorción por las plantas de Cd es reducida al incrementarse la cantidad de Zn disponible en el suelo disminuyendo así el efecto toxico de aquel elemento.

**Tabla 1.5.2.5.** Concentraciones máximas de metales pesados en lodos empleados en agricultura en países europeos

Elemento	Bélgica	Alemania	Dinamarca	Francia	Holanda
<b>Cd</b>	10	20	8	20	5
<b>Cr</b>	500	1200	-	1000	500
<b>Cu</b>	500	1200	-	1000	600
<b>Hg</b>	10	25	6	10	5
<b>Ni</b>	100	200	30	200	100
<b>Pb</b>	300	1200	400	800	500
<b>Zn</b>	2000	3000	-	3000	2000

- **Exceso de nutrientes**

La producción agrícola está estrechamente relacionada con el aporte equilibrado de nutrientes esenciales para las plantas, y un exceso o defecto de éstos puede producir daños en los cultivos. Los lodos pueden considerarse fertilizantes orgánicos que contienen cantidades relativamente altas de nutrientes y por ello se deben hacer algunas consideraciones.

Respecto a la materia orgánica, la adicción de lodos no debe plantear problemas ya que ésta necesitaría en el suelo entre el 1 y el 5%. Al incorporar los lodos al suelo, su materia orgánica se mineraliza más o menos rápidamente, por lo que la adición controlada al suelo y en dosis adecuadas, no provoca un aumento excesivo de materia orgánica.

En relación al potasio tampoco pueden existir problemas, ya que, como se ha señalado antes, su contenido es bajo en los lodos.

Los principales problemas pueden darse por exceso de nitrógeno y fósforo, que no solo producen daños en las plantas sino que pueden contribuir a la contaminación y a la eutrofización tanto de aguas superficiales como subterráneas.

- **Contaminantes orgánicos**

También se han encontrado en los lodos numerosos contaminantes orgánicos. Muchos de estos residuos se metabolizan por los microorganismos más o menos durante los procesos de tratamiento de lodos y tras su incorporación al suelo. La degradación de 96 de estos constituyentes han sido puestos de manifiesto por *Tabak (et al., 1981)*, quienes encontraron que el PCB y algunos plaguicidas son resistentes a la descomposición durante al menos siete años.

En general, se puede decir que después de la aplicación de los lodos al suelo los contaminantes orgánicos se movilizan por procesos químicos, físicos y biológicos, los cuales incluyen la volatilización, fotodescomposición, descomposición microbiana, absorción, lixiviación hacia aguas subterráneas y asimilación por las plantas, siendo los dos últimos procesos los más perjudiciales.

Hay que señalar que no existe normativa a nivel español que regule el contenido máximo de contaminantes orgánicos en lodos de depuradora.

- **Microorganismos patógenos**

Los lodos residuales, a menos que hayan sufrido un tratamiento de esterilización, contienen una gran cantidad de microorganismos patógenos. Esto puede suponer una limitación en su aplicación como abono para determinados cultivos destinados a la alimentación humana y animal.

## 1.6.COMPOSTAJE DE RESIDUOS CON FINES AGRÍCOLAS

### 1.6.1. ANTECEDENTES GENERALES DEL COMPOSTAJE

El compostaje es una técnica utilizada desde hace mucho en la agricultura, consistente en el apilamiento de los residuos de la casa, excrementos animales y restos de cosecha, para descomponerlos y transformarlos en un producto fácilmente manejable y aprovechable como mejorador de suelo. Este era un proceso lento y no siempre se conservaba al máximo la calidad del material.

Sin embargo, el compostaje que se practica en la actualidad es un proceso controlado para conseguir la transformación de un residuo orgánico en un producto estable, aplicable al suelo como mejorador de suelo.

La palabra *Compost* viene del latín componer (juntar). La definición más aceptada de compostaje es “**La descomposición biológica aeróbica (en presencia de aire) de residuos orgánicos en condiciones controladas**”. El compost cumple importantes funciones en la vida del suelo, tales como entregar al suelo nutrientes, mejorando su estructura, textura, aireación y la capacidad de retención de agua, por ejemplo al mezclar el compost con suelos arcillosos estos aumentan su porosidad y se transforman en suelos livianos, en cambio en suelos arenosos aumenta la capacidad de retención de agua. También el compost permite controlar la erosión, se aumenta la fertilidad del suelo y se genera un aumento en el arraigamiento de las plantas. Entre las características del compost se cuentan:

- Su color es oscuro, casi negro.
- Tiene una gran capacidad de retención de agua.
- Su olor es agradable parecido al de la tierra húmeda
- Actúa como mejorador del crecimiento de las plantas y es posible de utilizar en terrenos agrícolas o jardines, siendo un excelente o mejor sustituto a la tierra de hoja.
- Agrega elementos esenciales al suelo y no nitrifica ni acidifica el terreno como suele ocurrir con el uso de fertilizantes químicos.

Además presenta las siguientes ventajas:

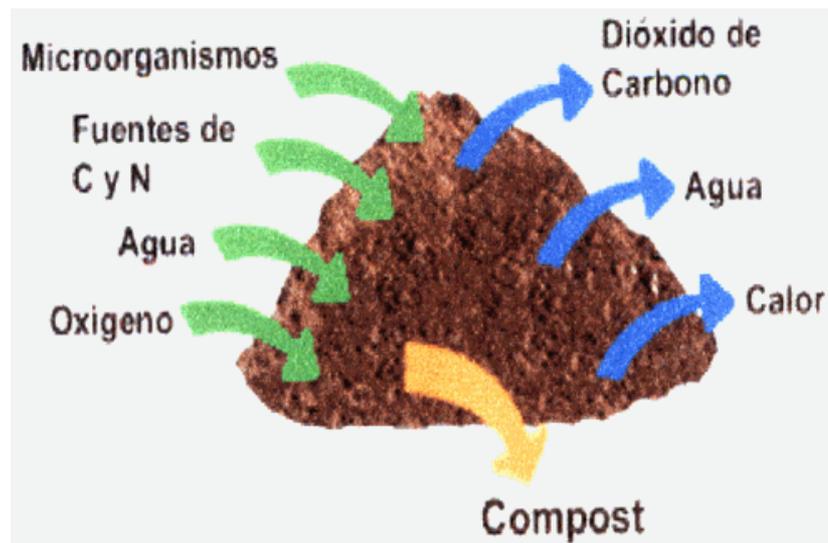
- Disminuye las necesidades de materia orgánica de los suelos y contribuye a su recuperación.
- Reduce la tasa de ocupación de los vertederos, al darles un destino útil a parte de los residuos.
- Es una alternativa las necesidades del sector agrícola y comercial en el campo de los productos que aportan materia orgánica a los suelos.
- Optimiza los recursos existentes en cada zona al aprovechar los residuos que se producen en ellas.

### **1.6.2. EL PROCESO DE COMPOSTAJE**

Fabricar compost es una manera práctica, conveniente y ecológica de transformar los residuos sólidos orgánicos en un recurso útil como mejorador de suelos y, de paso, contribuir a la reducción de los residuos que van a vertedero, con lo cual se logra aumentar la vida útil de estos últimos.

Los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario se descomponen muy lentamente porque en el proceso aislado del aire consumen rápidamente el oxígeno existente, generándose una fase de descomposición en ausencia de oxígeno (descomposición anaeróbica), en la que se produce la transformación del carbono contenido en la materia orgánica en gas metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) los que se difunden a la atmósfera y en parte son responsables del efecto invernadero y el calentamiento global.

Para lograr un buen compost se debe primero favorecer la descomposición aeróbica de los residuos sólidos orgánicos (en presencia de oxígeno y manteniendo una aireación adecuada) y, segundo, se debe realizar una balanceada mezcla de materiales que sirvan de alimento a los agentes que realizan la descomposición (principalmente bacterias, hongos y actinomicetos).



**Figura 1.6.2.1.** Esquema del proceso de compostaje

Desde hace tiempo, el compostaje se realiza en el medio rural, mediante el uso de restos vegetales y estiércol de animal. Se puede utilizar también la fracción orgánica de la basura domiciliaria, en forma controlada, en instalaciones industriales. El compostaje tiene una gran importancia como alternativa de manejo de residuos ya que, por ejemplo, cerca del 50 % de la basura domiciliaria está constituida por materia orgánica.

### **1.6.3. MATERIAS PRIMAS PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE**

En principio, toda materia orgánica tales como desechos vegetales y animales, y restos de alimentos, entre otros, pueden ser utilizados como materia prima para el compostaje. Los sistemas de recolección separada y posterior compostaje de residuos orgánicos en forma exclusiva están teniendo cada vez más aceptación porque la recolección separada permite generar un compost que cumple con los requisitos de calidad del consumidor y con las exigencias ambientales.

***La separación en origen es fundamental para el proceso del compostaje***

Existen dos componentes de la materia orgánica fundamentales en el compostaje: el carbono y el nitrógeno. La proporción C/N en la materia orgánica suficiente para ayudar al proceso de la descomposición es de aproximadamente 30 partes de carbono por 1 de nitrógeno (30:1) en peso. El proceso del compostaje se retarda si no hay suficiente nitrógeno, y demasiado nitrógeno puede causar la generación de amoníaco que puede crear olores desagradables. Además, la aireación y el pH son factores que influyen directamente en las emisiones de amoníaco a la atmósfera durante el proceso de compostaje (*Beck-Friis et al., 2001; Cronje et al., 2002; Grunditz and Dalhammar, 2001*).

Una regla para recordar es que el material seco es alto en carbono y la materia húmeda es alta en nitrógeno. Así pues, se deben combinar 3 porciones secas con 1 porción húmeda. Por ejemplo:

- Materias ricas en carbono (secas) Abono de caballo, hojas, virutas de la madera, periódico, paja, aserrín, entre otros.
- Materias ricas en nitrógeno (húmedo): Residuos vegetales, abono fresco de aves y cerdo, alfalfa, pasto, entre otros
- Materias que no se debe compostar: Restos de plantas enfermas, los residuos de carne y cualquier elemento que tenga altos contenidos de grasa

Los residuos orgánicos posibles de utilizar en un proceso de compostaje son:

- Residuos procedentes de recogida doméstica.
- Desechos de corte y limpieza de parques y jardines.
- Desechos horto-frutícolas y subproductos de industrias alimentarias.
- Restos de cosechas de invernaderos y cultivos hortícolas.

En relación con los residuos generados por la industria alimentaria y agroindustria, existe un interesante potencial de recursos posible de destinar a la fabricación de compost.

#### 1.6.4. TÉCNICAS DE COMPOSTAJE

El proceso de compostaje puede ocurrir por dos métodos:

- **Método natural:** los residuos orgánicos se colocan en pilas de forma variada. La aireación necesaria para el desarrollo del proceso de descomposición biológica se obtiene volteándola periódicamente con la ayuda de un equipo apropiado. El tiempo para que el proceso concluya, varía de tres a cuatro meses.
- **Método acelerado:** la aireación se produce a través de tuberías perforadas, sobre las cuales se colocan las pilas de material orgánico, o en reactores rotatorios, dentro de los cuales se colocan los residuos, que avanzan en sentido contrario al de la corriente de aire. Posteriormente se apilan, como en el método natural. El tiempo de permanencia dentro del reactor es de unos cuatro días, y el tiempo total del compostaje acelerado es de dos a tres meses.

El grado de descomposición o degradación del material sometido al proceso de compostaje es un indicador del estado de avance de la “maduración” del compost orgánico. El aspecto del material – color – olor y humedad da ciertas indicaciones. Así, el color final es oscuro, el olor es similar a tierra mojada, y la humedad se reduce. Al comienzo del proceso de descomposición del material actúan los microorganismos que producen fermentación ácida, y el pH se vuelve más bajo, lo cual es favorable para la retención de amoníaco. Al final del proceso, la humedad del compost para uso agrícola o de jardinería no debe pasar del 40%.

Las técnicas principales de compostaje son las siguientes:

##### a) Compostaje en Pilas Estáticas

Es el sistema más antiguo de compostaje, en el que se forman pilas de reducida altura, que se dejan sin movimiento, ventilándose naturalmente. Por lo tanto, ocurren procesos de anaerobiosis zonales, con generación de malos olores, gases y líquidos.

Lo anterior, genera una fermentación deficiente e irregular, no obteniéndose un producto de alta calidad. El tiempo de estabilización de la pila es entre 4 y 6 meses. En regiones con mucha pluviometría o alta humedad ambiental, se recomienda colocar el material bajo techo o galpones.

***b) Compostaje en Pilas Estáticas Aireadas***

Consiste en colocar el material a compostar y airearla en forma forzada. La altura recomendada de la pila es de 2 a 2.5 metros sobre una red de tuberías de aireación, donde se suministra aire frecuente para proporcionar el medio aeróbico necesario para la compostación. Este material se procesa en un período relativamente rápido, dos meses aproximadamente, el primero con aireación y el segundo sin ella, para la estabilización del material.

Este tipo de compostaje requiere una serie de equipamientos, como un compresor, red de tuberías, válvulas, y sistemas de control de presión de aire, temperatura y humedad, lo que lo hace tener un valor económico mayor. En esta técnica el producto se encuentra estabilizado entre los 4 y 6 meses.

***c) Compostaje en Reactor***

Este proceso se lleva a cabo en un contenedor cerrado, donde se establece un proceso aerobio acelerado para generar compost (alrededor de un mes).

Los distintos tipos de residuos se alimentan a la máquina, y luego se dosifica una cantidad programada de material rico en carbono (serrín, paja) para asegurar el proceso de descomposición. Luego, la mezcla es desmenuzada dentro de la máquina para asegurar un tamaño de partícula adecuado

Una vez realizado el proceso de trituración y mezcla, el material pasa a un contenedor de compostaje provisto de una bomba para inyectar aire a la mezcla, lo que facilita el trabajo de los microorganismos que convierten los desechos en compost.

***d) Compostaje en pilas de volteo o en hileras***

Este sistema considera el volteo del producto ya sea manual o mecánicamente. En este sistema de compostaje en pilas se amontona el material al aire libre o en galpones, con un cargador frontal. Si ésta termina en su parte superior en punta se habla de una pila triangular; si su superficie superior es plana se habla de una pila trapezoidal.

Las pilas deben ser volteadas en forma regular, ya sea con máquinas especialmente destinadas a éste fin (volteadoras) o también se pueden usar cargadores frontales pero conlleva el riesgo de no lograr un mezclado apropiado del material en proceso, también se pueden voltear en forma manual.

El volteo debe ir disminuyendo a medida que pasa el tiempo, se recomienda, por ejemplo, que durante el primer mes se realice dos veces a la semana; en el segundo mes, una vez a la semana; el tercer mes, cada 15 días y los meses restantes, una vez al mes, dependiendo de la mezcla utilizada.

Con el volteo de las pilas se persigue obtener los siguientes efectos:

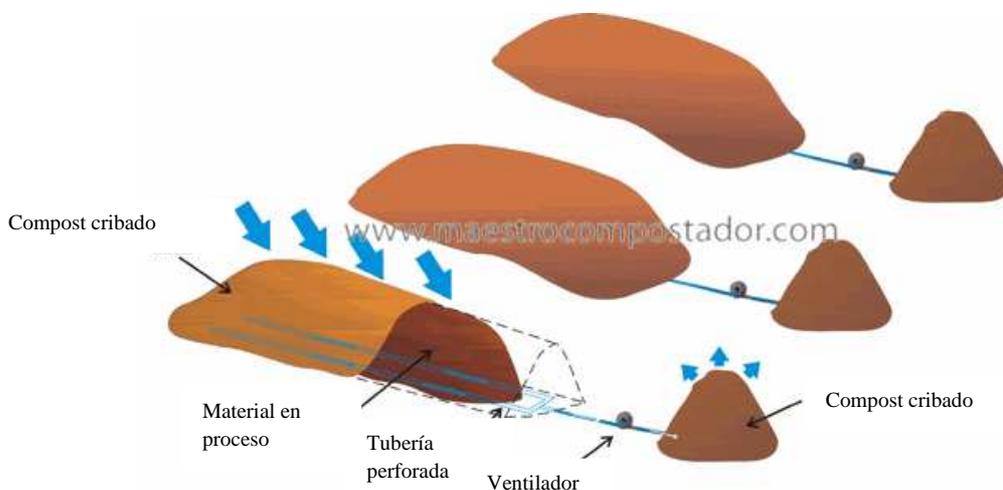
- Mezclado.
- Evitar compactación.
- Intercambio gaseoso.
- Creación de nuevas superficies de ataque para los microorganismos.
- Control de la temperatura, pH y humedad.

Para proteger las pilas del exceso de humedad o de un secado extremo, se pueden proteger con telas especiales de material poroso al aire. Debido al costo y trabajo adicional que esto significa, se evita muchas veces usarlas. Desde el punto de

vista de requerimientos de mano de obra, es conveniente reemplazar el uso de tela por techumbre, especialmente en zonas con alta pluviometría.

Las pilas trapezoidales aprovechan muy bien el espacio disponible, por lo que son especialmente recomendables para instalaciones en recintos cerrados. Sin embargo, existe el peligro de que las pilas se construyan demasiadas altas (superiores a 2.0 m de altura), y si a esto se agrega intervalos demasiados largos entre volteos y técnicas de volteo deficientes, no es posible garantizar el intercambio de aire entre el interior de la pila y el medio. Por tanto, no se garantiza la aireación que es necesaria para mantener las condiciones aeróbicas del medio, produciendo así condiciones anaeróbicas donde se pueden formar gases mal olientes y otros que son relevantes para los aspectos climáticos (por ej.  $\text{CH}_4$ ) y ambientales en general. Estos gases también se pueden formar por anaerobiosis zonales y transitorias, pero en cantidades mucho más pequeñas.

Otro proceso de apilar consiste en una serie de capas intercaladas de material a compostar y tierra usada como material absorbente. Por ejemplo: una primera capa inferior de 10 cm. de tierra con aserrín, una capa con residuos a compostar de 5 cm., una capa de tierra de 5 cm, una capa de residuos de 10 a 15 cm, una capa de tierra de 2 cm, hasta alcanzar la altura de 1 m. Esta mezcla se estabiliza a los 4 a 5 meses, con un volteo semanal. Es recomendable para volúmenes pequeños, por ejemplo el proceso de restos de una vivienda o parcela (compostaje doméstico). La siguiente figura indica formas de manejo de pilas diseñados para ahorrar espacio y mejorar la aireación.



**Figura 1.6.4.1.** Esquema de pilas de compostaje

La técnica de pila de volteo, es relativamente fácil de aplicar, dependiendo del volumen a tratar: Un ejemplo de dimensionamiento y tratamiento de pila de volteo en hilera, puede ser:

- Altura: entre 1.5 y 1.8 m.
- Base: entre 2.4 a 3.6 m.
- Largo: variable
- Paredes verticales con una inclinación cercana a los 30°.
- Humedecimiento: con riego por aspersion o manguera.
- Rango de humedad óptimo: 40 a 60%.
- Periodicidad de volteo: variable, de muy frecuente, 2 veces a la semana en el primer mes a una vez al mes en el último período. Dependiendo del lugar geográfico donde se emplace y tipo de sustrato a trabajar (% de humedad, T°)
- Volteo: puede ser manual, con cargador frontal, o con volteadoras diseñadas para este fin.

#### **1.6.5. PARÁMETROS CRÍTICOS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE**

Debido a que el compostaje es un proceso de conversión microbiológica de materia prima orgánica (residuos orgánicos) en humus estable y suelo enriquecido, donde se requiere de las mejores condiciones internas y externas para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, se hace indispensable que exista un manejo adecuado de los “factores críticos” del proceso.

Los factores críticos corresponden a:

- Temperatura
- pH
- Humedad
- Relación carbono/nitrógeno
- Aireación

- Granulometría
- Tiempo
- Período de estabilización

### ***a) Temperatura***

La temperatura influye en el crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos. Es un parámetro útil para medir el proceso de descomposición ya que en la medida que se desarrolla el metabolismo de las bacterias se genera calor por lo tanto el incremento de temperatura es un buen indicador de cómo está funcionando el proceso.

La velocidad del proceso de compostaje se acelera cuando la temperatura está entre los 35 y 70°C. Sobre esta temperatura los microorganismos mueren y podrían generarse olores desagradables en la medida que la pila se esteriliza a sí misma.

Los microorganismos más eficientes en el compostaje son los microorganismos mesófilos, cuya temperatura óptima corresponde a los 35-40°C, y los termófilos quienes requieren de 55°C o un poco más. Estas temperaturas mantenidas en el tiempo permiten ejercer naturalmente un tratamiento de sanitización, especialmente con respecto a microorganismos patógenos, así como también logran destruir semillas de malezas, esporas de hongos y algunas fitotoxinas que posteriormente significarían un problema al adicionar el compost sobre cultivos agrícolas.

El manejo de la temperatura requiere cuidado y control, ya que así como la alta temperatura es capaz de sanitizar de patógenos, también puede terminar con la flora benéfica antes que el proceso lo haga naturalmente en el momento justo. Las lecturas periódicas mediante el uso del termómetro ayudan a determinar el momento en que la pila debe ser volteada, si ésta alcanza sobre los 70°C. Si una pila de compostaje no logra subir su temperatura por encima de los 48°C pasados algunos días, está indicando que probablemente no hay suficiente nitrógeno en la pila para activar el proceso.

En relación a la temperatura, en el compostaje se distinguen 4 etapas: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración.

### b) pH

Éste es un parámetro importante para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de los residuos. El valor del pH, al igual que la temperatura, varía con el tiempo y el proceso de compostaje. El pH inicial está normalmente entre 5 y 7. En los primeros días de compostaje, el pH cae a 5 o menos, debido a la presencia de ácidos orgánicos simples, y la temperatura sube debido a la producción de organismos mesófilos. Después de aproximadamente 3 días, la temperatura llega a la etapa termófila y el pH comienza a subir hasta aproximadamente 8 a 8.5 para el resto del proceso aeróbico. El valor del pH llega a un valor de 7 a 8 en el compost maduro.

La siguiente gráfica muestra la evolución del pH y la temperatura durante el proceso de compostaje en función del tiempo:

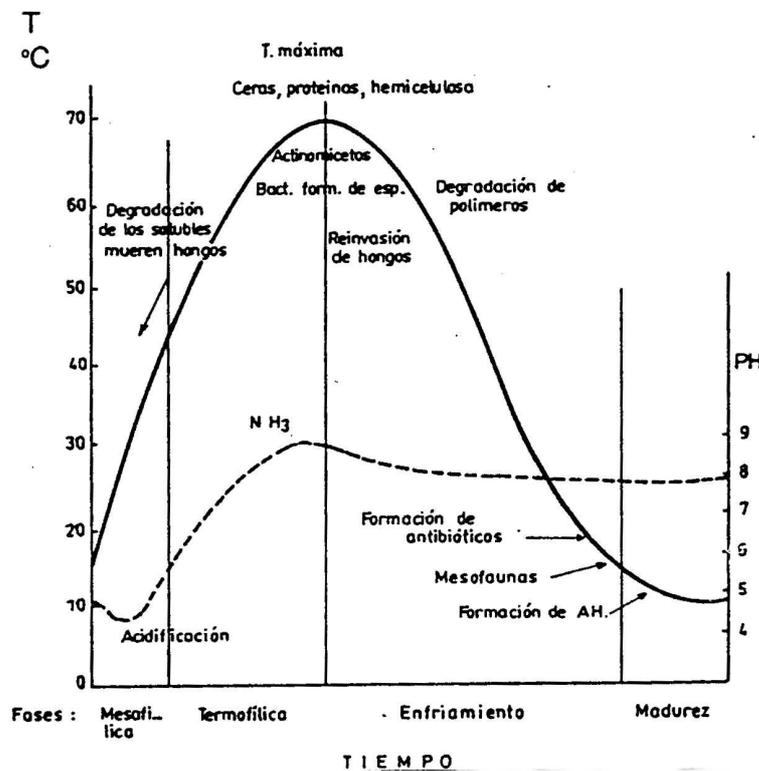


Figura 1.6.5.1. Evolución de la temperatura y el pH durante las etapas del compostaje

c) **Humedad**

Ejerce un efecto importante en la población bacteriana en cuanto a su crecimiento y actividad metabólica. Este factor debe ser expresamente manejado cuando se trata de fabricar compost de modo eficiente (acortando los tiempos del proceso). El valor ideal varía entre 40 – 60%.

La mezcla inicial de los componentes es importante para aumentar o disminuir el contenido de humedad inicial hasta el nivel óptimo. La mezcla sirve también para obtener una distribución más uniforme de nutrientes y microorganismos. A modo de ejemplo, si se tiene un residuo orgánico con una humedad máxima de un 65%, al ingresar al proceso, y un período de compostaje de 15 días, se sugiere la primera vuelta al tercer día. De ahí en adelante se debería voltear cada 2 días hasta un total de 4 a 5 vueltas. En todo caso, la frecuencia del volteo está condicionada exclusivamente por las fluctuaciones de temperatura y el porcentaje de humedad del material.

Para una evaluación rápida del contenido de humedad se debe tomar una porción a mano llena y el material se debe sentir esponjoso, suave y apenas botar una gota de agua si se estruja.

d) **Relación C/N**

Este es otro parámetro de producción muy importante a la hora de dar las condiciones perfectas para que se inicie el desarrollo de los microorganismos, esta relación puede variar entre un substrato y otro pero como rango se ha determinado que una relación 15:1 a 30:1 es la más adecuada (*Haug, 1993*). La fuente de energía para bacterias y hongos es el carbono presente en los carbohidratos provenientes de maderas, material celulósico y hojas. El nitrógeno, un componente de las proteínas, es necesario para soportar el desarrollo de los microorganismos beneficiosos.

e) **Aireación**

Este factor es el cuarto más importante, ya que si la pila o cúmulo en donde se encuentran las materias primas del compost deja de tener aireación, el proceso de fermentación cambia de aeróbico a anaeróbico generándose productos distintos y con manejo diferente (alcoholes, cetonas, ésteres y ácidos orgánicos) y graves problemas de olor por la generación de compuestos sulfurados (*Homas and Fischer, 1992*).

La mayoría de los problemas de olores en los procesos de compostaje aeróbico se deben fundamentalmente, a problemas de deficiencia en el volteo donde se pueden desarrollar condiciones anaeróbicas. Bajo estas condiciones se pueden generar ácidos orgánicos, muchos de los cuales presentan olores desagradables. También se producen malos olores, al agregar materiales cuya descomposición ocurre en un tiempo relativamente largo.

Para evitar y minimizar los problemas potenciales de olores, es importante reducir el tamaño de las partículas y separar plásticos y otros materiales no biodegradables (*Mohee and Unmar, 2007; Davis et al., 2005*).

El oxígeno se mueve dentro de la pila principalmente por difusión. Así, si la pila es muy grande, se dificulta el paso de oxígeno al centro de la misma. Es por eso que en grandes instalaciones o en pilas muy grandes se recomienda hacer aireación forzada.

f) **Tamaño de las partículas (granulometría).**

La mayoría de los materiales que conforman los residuos sólidos son de forma irregular. Se puede reducir esta irregularidad mediante la trituración de los materiales orgánicos. Lo más importante de todo es que un tamaño de partículas reducido, incrementa la velocidad de las reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje aerobio.

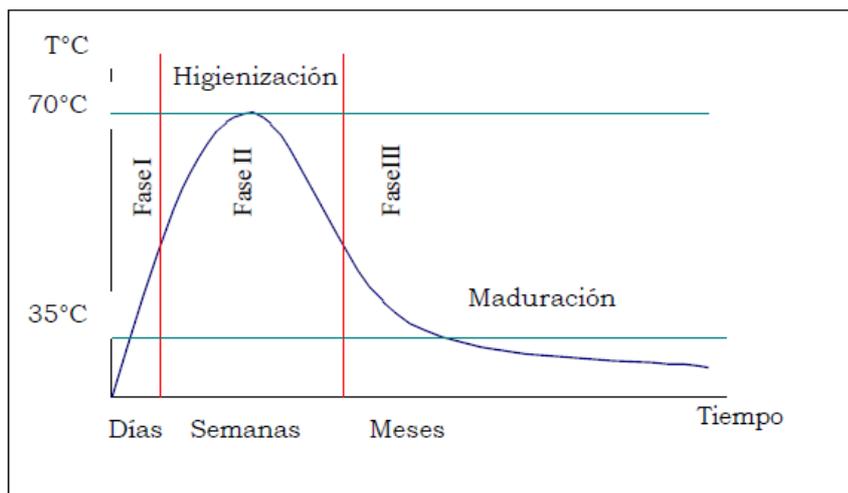
El tamaño de partículas deseable para el compostaje es entre 2 a 5 cm., se pueden procesar partículas más grandes, aumentándose con ello el tiempo de compostaje (Larney, et al., 2000; Mohee and Mudhoo, 2005, Raviv et al., 1986; Romeela et al., 2008).

g) **Tiempo**

Mientras mayor es el tiempo de permanencia de los materiales a compostar dentro de la pila, más seguridad se tendrá de la completa degradación y madurez del compost. Respecto a la curva de compostaje existen diversas interpretaciones de cuando, o a qué temperatura en relación con el tiempo se produce el pico y cuando inicia su descenso.

Algunos trabajos hablan que el máximo se alcanza en pocos días (cuatro a siete). Sin embargo, en otros trabajos y experiencias este punto ocurre al día siguiente que se inicia la pila de compostaje.

El compost debe pasar por todas sus fases para estar maduro Fase I (mesófila), Fase II (termófila) y Fase III (enfriamiento), como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 1.6.5.2.** Evolución de la temperatura con el tiempo durante el compostaje

La fase inicial dura alrededor de 1 a 7 días. En este momento se inicia la actividad degradativa por hongos y bacterias mesófilas sobre materia orgánica fácilmente degradable, tal como azúcares, almidón y proteínas. Luego sobreviene la fase II o fase termofílica en la que ocurre la digestión de la celulosa y hemicelulosa y por último viene la fase III de estabilización en la que disminuye la temperatura conjuntamente con la tasa de descomposición microbiana.

La destrucción de organismos patógenos es un elemento importante de diseño en el proceso de compostaje, porque afectará el perfil de temperatura y al proceso de aireación. La tasa de mortalidad de los patógenos está condicionada en función del tiempo y de la temperatura, la mayoría de los patógenos serán destruidos rápidamente cuando todas las partes de la pila estén sometidas a una temperatura de aproximadamente 55 °C. Solamente unos pocos pueden sobrevivir a temperaturas de hasta 67 °C durante un corto período de tiempo. Se pueden eliminar todos los patógenos existentes dejando el material que esta fermentándose a una temperatura de 70 °C durante 2 horas.

#### ***h) Período de Estabilización del Material***

El proceso de compostaje es variable y depende del material a utilizar, se puede reconocer al producto terminado cuando la temperatura del material baja a aproximadamente 25 °C y se mantiene sin subir por lo menos una semana. Un criterio simple para saber si el producto se encuentra estabilizado es colocar un poco del material dentro de una bolsa plástica cerrada, y esperar 24 horas, esperando no encontrar emanación de malos olores, humedad ni aumentos de temperatura.

Otra manera, consiste en hacer germinar semillas, las cuales efectivamente brotarían pero no serían viables a corto plazo.

Una vez que se considera estabilizado el material, se debe dejar reposar o madurar, entre 15 a 45 días, para posibilitar la higienización del compost, al terminar de degradarse todos los restos de material orgánico.

### 1.6.6. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL COMPOST

La evaluación de la calidad del compost se manifiesta a través de mediciones de parámetros específicos en momentos bien establecidos del proceso (*Chica et al., 2003; Brewer and Sullivan, 2003; Sánchez-Monedero et al., 2001; Wu et al., 2000; Zmora-Nahum et al., 2005*) . A continuación se menciona cada uno de los parámetros y se desarrolla en forma sintética los aspectos principales a considerar:

#### a) Contenido de Humedad

La medición de este parámetro se debe realizar al iniciar el proceso efectuándolo con una periodicidad de 1 a 2 semanas, o cada vez que se realice el volteo de la pila. El nivel de humedad de las pilas debe oscilar entre 40 a 60%.

#### b) Relación Carbono/Nitrógeno

Para poder establecer la relación C/N es necesario primero analizar separadamente la concentración de cada elemento en una muestra. La medición de este parámetro se debe efectuar al inicio del proceso de compostaje y al producto terminado. Los niveles que deberían reflejarse al inicio sería 15/1-30/1, y al final del proceso 19/1 aproximadamente.

#### c) pH

Es un parámetro que se debe controlar periódicamente. La materia a compostar debe tener un pH aproximadamente neutro (7-8), al igual que al final del proceso.

#### d) Contenido en metales pesados

Debe realizarse al iniciar el proceso y al producto final sólo si existen dudas de la procedencia de la materia prima, ya sea que provenga de lodos de plantas de tratamiento, desechos orgánicos de procesos químicos, etc. El análisis debe hacerse en

laboratorio especializado para los siguientes elementos: Níquel, Zinc, Plomo, Cadmio, Cobre, Arsénico, Cianuro, Cromo, Selenio, Mercurio.

La Organización Mundial de la Salud ha establecido los rangos tolerables de metales pesados que puede contener el compost maduro o final. Estos rangos son expuestos en la siguiente tabla:

**Tabla 1.6.5.1.** Límites de concentración de metales pesados en el compost final (OMS, 1985)

<b>METALES PESADOS (mg/kg de materia seca)</b>	<b>RANGOS NORMALES</b>
<b>Boro</b>	60-360
<b>Cadmio</b>	15-40
<b>Cobre</b>	90-260
<b>Hierro</b>	8000-15000
<b>Mercurio</b>	1-5
<b>Manganeso</b>	300-1300
<b>Molibdeno</b>	10
<b>Plomo</b>	200-400
<b>Zinc</b>	800-1200

***e) Presencia de microorganismos patógenos***

El producto final debe carecer de microorganismos patógenos, para asegurar que se puede utilizar sin riesgo en procesos agrícolas de mejora o fertilización de suelo.

***f) Presencia de fitotóxicos al iniciar el proceso***

Tanto al inicio como al final del proceso, el producto debe contener una concentración de fitotóxicos dentro de la normativa, para poder ser aplicado beneficiosamente en procesos agrícolas de mejora o fertilización de suelo.

**g) Contenido en oxígeno**

La concentración de oxígeno óptima en una muestra durante el compostaje deber ser aproximadamente de un 5 %.

**h) Temperatura durante el compostaje**

Deben efectuarse mediciones desde el inicio y con cierta periodicidad durante el tiempo de compostaje, especialmente al momento de los volteos o, por lo menos una vez por semana con termómetro de varilla; si el proceso se realiza en pilas de gran longitud, la temperatura debe medirse cada 15 a 20 metros, estableciendo un control gráfico

El termómetro es un instrumento esencial en una planta de compostaje. Idealmente debería medir un rango de temperatura entre 0°C y 200°C. La temperatura durante el proceso debería fluctuar entre 55° a 70° C durante el proceso.

**i) Nitrógeno, fósforo y potasio disponible**

Se deben realizar mediciones en laboratorio de estos elementos, sobre todo si el producto está destinado como fertilizante en actividades de tipo agrícolas.

Como se puede apreciar en el siguiente cuadro, la Organización Mundial de la Salud ha establecido rangos normales para compost comercial de sus componentes de humedad, materia orgánica, materia inerte, pH (acidez) y tamaño de las partículas.

**Tabla 1.6.5.2.** Propiedades generales de un compost para ser comercializado según la OMS (1985)

<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO NORMAL</b>
<b>Contenido en humedad (%)</b>	30-50
<b>Materia inerte (%)</b>	30-70
<b>Contenido materia orgánica (%)</b>	10-30
<b>pH</b>	6-9
<b>Tamaño máximo de las partículas (mm)</b>	2-10







## 2.1. OBJETIVOS GENERALES

Como respuesta a la problemática de la generación de residuos y la escasez de materia orgánica en los suelos de nuestra Región que se ha planteado en la Introducción, el presente proyecto tiene como objetivo general evaluar la posibilidad de utilizar lodos procedentes de estaciones depuradoras, como bioenmendantes de suelos agrícolas. De este modo, se quiere demostrar que los lodos de depuradora pueden constituir una “fuente nueva de materia orgánica económica y eficaz”.

Sin embargo, como se dijo en la Introducción, hay riesgos potenciales asociados al reciclaje de materiales procedentes de desechos urbanos. El riesgo más importante es el ocasionado por los metales pesados presentes, como consecuencia de su toxicidad y su acumulación. El potencial para la acumulación a largo plazo de estos contaminantes en el suelo, la planta y las inquietantes funciones del suelo necesitan ser tratados cuidadosamente (*O'Connor, 1996*). Por eso, el uso eficiente requiere que los riesgos y las ventajas de las diversas categorías de basuras orgánicas estén bien documentados. Por tanto, es necesario analizar las características de los lodos, el suelo, y las plantas para poder evaluar la posibilidad de utilizar estos materiales como bioenmendantes de suelos agrícolas sin peligro para el medioambiente ni para la salud humana.

Esquemáticamente, en el trabajo que se propone efectuar se plantean los siguientes objetivos:

- 1.- Evaluar mediante cultivos hortícolas el valor agronómico de los compost obtenidos a partir de lodos de depuradora.
- 2.- Comparar los rendimientos obtenidos con los distintos enmendantes.
- 3.- Valorar los efectos sobre el sistema suelo-planta.

## **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos que persigue el presente proyecto son:

1.- Evaluar la posibilidad de aprovechamiento de lodos procedentes de una estación depuradora de aguas residuales de régimen anaerobio, para su empleo como bioenmendantes en suelos agrícolas. Esta evaluación se llevará a cabo mediante análisis de parámetros físico-químicos de los lodos, el suelo y los cultivos.

2.- Determinar si existen riesgos derivados de la utilización de los lodos como bioenmendantes.

3.- Evaluar el efecto positivo o negativo del compost sobre la calidad del suelo.

4.- Cuantificar y analizar los cultivos obtenidos con el objetivo de valorar el efecto de los lodos estabilizados sobre el sistema suelo-planta.

5.- Comparar las características del suelo y de los cultivos obtenidos en función del tipo de bioenmendante utilizado (orgánico e inorgánico) y de la dosis aplicada.

6.- Demostrar que es posible utilizar lodos estabilizados procedentes de aguas residuales como bioenmendantes de suelos agrícolas en sustitución de fertilizantes inorgánicos.



### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**



### 3.1. MATERIALES UTILIZADOS

En este proyecto se ha utilizado un lodo anaerobio procedente de la estación de depuración de aguas residuales urbanas de Cabezo Beaza, de régimen anaerobio y situada en el término municipal de Cartagena (Murcia). Esta estación se caracteriza por tener un caudal diario de 28000 m<sup>3</sup> y una producción de lodos anual de 9000 toneladas, aproximadamente. Las aguas que llegan a esta depuradora proceden de las industrias cercanas a la zona y de la ciudad de Cartagena y pedanías. La estación depuradora de Cabezo Beaza consta de las siguientes fases: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento biológico y tratamiento secundario, siendo sus caudales máximos principales los que a continuación se detallan:

- Pretratamiento:
  - Caudal diario máximo de desbaste = 2100 m<sup>3</sup>
- Tratamiento primario:
  - Caudal máximo tratamiento primario = 2100 m<sup>3</sup>/h
  - Caudal máximo por decantador primario = 1050 m<sup>3</sup>/h
- Tratamiento biológico:
  - Caudal máximo tratamiento biológico = 2100 m<sup>3</sup>
- Tratamiento secundario:
  - Caudal máximo por decantador secundario = 1050 m<sup>3</sup>/h
  - Caudal recirculación máximo unitario = 1021 m<sup>3</sup>/h

En la **Tabla 3.1.1** aparecen detalladas las características del lodo anaerobio utilizado en esta estación depuradora. De todos los parámetros analizados, los más importantes que se deben tener en cuenta para asegurar una correcta aplicación del lodo como enmendante del suelo son los metales pesados, presencia de microorganismos patógenos, y conductividad eléctrica.

Tabla 3.1.1. Principales características del lodo anaerobio.

PARÁMETROS	VALORES
Humedad (%)	74.10
pH (unidades de pH)	7.05
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	5200
Materia Orgánica Total (g/kg)	337.0
Carbono Orgánico total (g/kg)	196.0
Carbonatos totales (g/kg)	26.2
Nitrógeno total (g/kg)	39.0
Nitrógeno nítrico (mg/kg)	17.3
Nitrógeno amónico (g/kg)	2.2
Fósforo total (como $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (g/kg)	60.4
Potasio total (como $\text{K}_2\text{O}$ ) (g/kg)	4.2
Cloruros (mg/kg)	1121.0
Sulfatos (mg/kg)	19283.0
METALES PESADOS TOTALES	
Fe (mg/kg)	12353.0
Cu (mg/kg)	821.3
Mn (mg/kg)	164.0
Zn (mg/kg)	3408.0
Pb (mg/kg)	111.2
Ni (mg/kg)	24.0
Cr (mg/kg)	31.1
Cd (mg/kg)	31.3
Ca (mg/kg)	6.4
Na (mg/kg)	0.2
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	
E. Coli (ufc/kg)	$1.1 \cdot 10^4$
Streptococos fecales (ufc/g)	$>1.1 \cdot 10^6$
Salmonella (ufc/25 g)	Ausencia

Durante el proceso de compostaje se utilizó serrín como agente estructurante, empleándose una proporción lodo/serrín de 1:1 en masa.

- LODO ANAEROBIO + SERRÍN → LAN + S

**Tabla 3.1.2.** Características del compost obtenido

PARÁMETROS	VALORES
Contenido en cenizas (%)	33.95
pH (unidades de pH)	6.38
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	5560
Carbono Orgánico total (g/kg)	348.5
Carbono hidrosoluble (g/kg)	6.223
Carbohidratos (g/kg)	0.686
Nitrógeno total (g/kg)	27.50
Nitrógeno nítrico (mg/kg)	193
Nitrógeno amónico (g/kg)	9.70
Fósforo total (mg/kg)	257.65
Potasio total (g/kg)	4.261
METALES PESADOS TOTALES	
Fe (mg/kg)	24695.3
Cu (mg/kg)	588.1
Mn (mg/kg)	215.7
Zn (mg/kg)	2999.8
Pb (mg/kg)	204.0
Ni (mg/kg)	37.5
Cr (mg/kg)	70.6
Cd (mg/kg)	21.3
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	
E. Coli (ufc/g)	230
Estreptococos fecales (ufc/g)	$>24 \cdot 10^2$
Salmonella (ufc/25 g)	Ausencia

Por otro lado, las principales características del serrín empleado como agente estructurante quedan detalladas en la **Tabla 3.1.3**.

**Tabla 3.1.3.** Principales características del agente estructurante, serrín.

PARÁMETROS	SERRÍN
Humedad (%)	13.32
pH (unidades de pH)	5.08
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	199.3
Materia Orgánica Volátil (g/kg)	994.6
Carbonatos totales (g/kg)	12
Nitrógeno total (g/kg)	1.8

### 3.2. MÉTODOS SEGUIDOS

La experiencia se realizó en la Finca Tomás Ferro, perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena y ubicada en La Palma (Cartagena). Para evaluar mediante cultivos hortícolas el valor agronómico de los lodos frescos y compostados, así como el ahorro de fertilizantes nitrogenados y fosforados que el empleo de estos materiales conlleva, se diseñaron parcelas por triplicado de 3x3 m, separadas entre ellas con una distancia de 1.75 m. En ellas se estudió el efecto sobre el desarrollo del cultivo y la calidad del suelo, tanto de los lodos frescos como de los compost obtenidos en proceso de compostaje. El riego de estas parcelas se realizó con agua normal de la zona.

Las parcelas fueron las siguientes:

- Suelo + compost de lodo anaerobio
- Suelo + lodo fresco anaerobio
- Suelo + fertilización inorgánica

En la **Figura 3.2.1**, se puede ver la representación de la distribución de las parcelas.

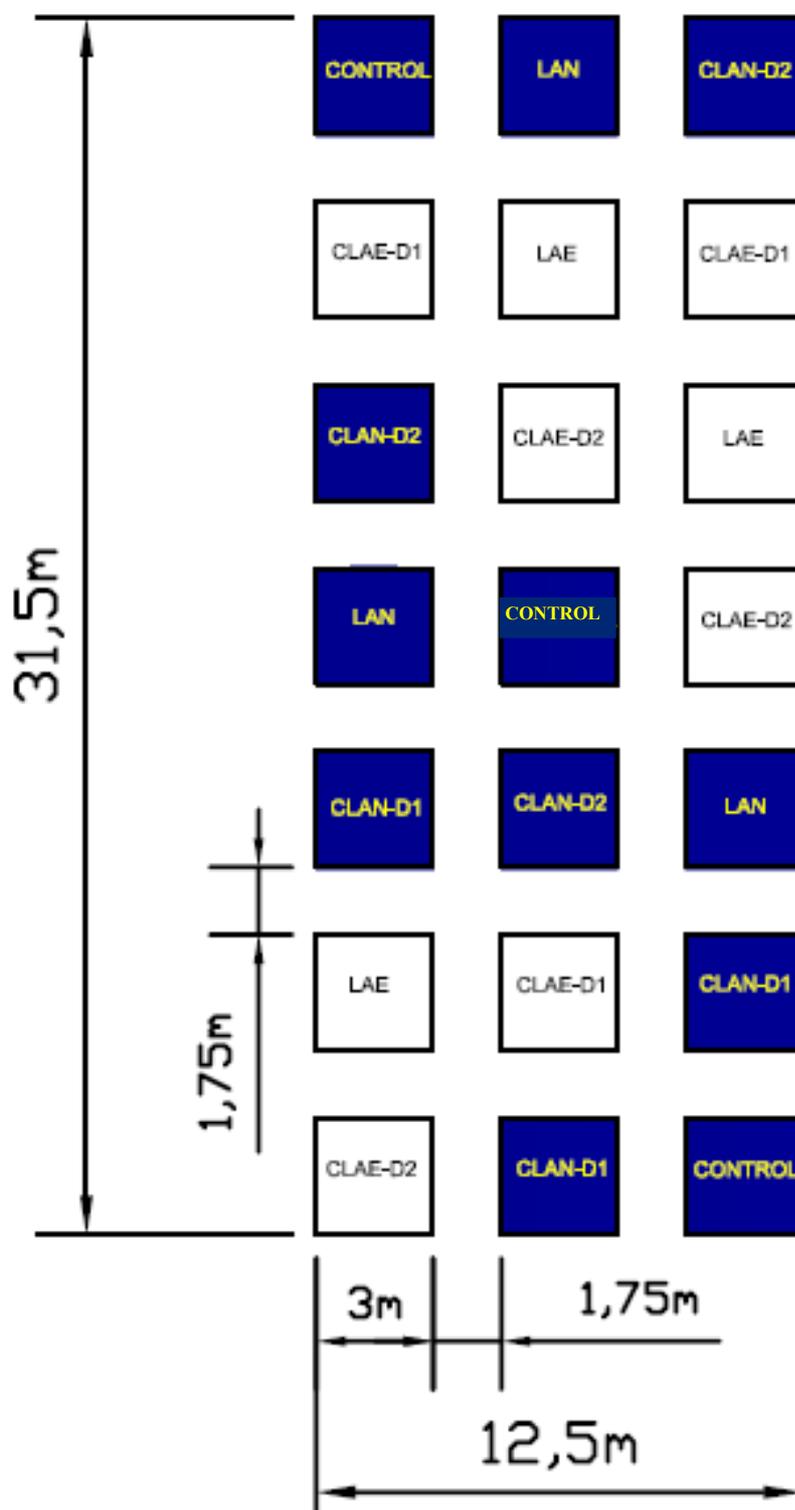


Figura 3.2.1. Esquema de la distribución de parcelas

Para la realización de este experimento se utilizó el suelo de una parcela en barbecho. Se trata de un suelo pobre en materia orgánica, representativo de los suelos de la comarca de Cartagena. Sus principales características se recogen en la **Tabla 3.2.2**.

Como puede verse, este suelo es de textura franco – arenosa y con escaso contenido en materia orgánica, lo que hace que se pueda considerar idóneo para su recuperación con enmiendas orgánicas. El alto contenido en carbonatos es típico de los suelos de esta zona. El análisis nutricional pone también de manifiesto la baja fertilidad química del suelo elegido, pudiéndose considerarse como normales su contenido en metales pesados, por lo dicho el suelo se estimó apto para la realización del estudio previsto.

Se llevaron a cabo dos tipos de tratamientos. Uno empleando una dosis de compost equivalente a 20 t/ha, es decir 2 kg/m<sup>2</sup>. El otro se realizó con una dosis de compost de 40 t/ha, o sea, 4 kg/m<sup>2</sup>.

Cuando se abonó con lodo fresco, la dosis utilizada fue de 15 t/ha, igual a 1.5 kg/m<sup>2</sup>.

**Tabla 3.2.1.** Dosis de la fertilización inorgánica.

NUTRIENTES	kg/ha
N	100
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	58
K <sub>2</sub> O	245
Ca	45
Mg	15

La fertilización inorgánica se realizó siguiendo las reconsideraciones de agricultores de la zona. En la **Tabla 3.2.1** se representan las dosificaciones realizadas.

Todos estos tratamientos se realizaron por triplicado y realizando dos cultivos sucesivos con plantas hortícolas; estas plantas fueron lechuga y melón. El primer cultivo

se hizo con lechuga (*Lactuca sativa*, L.). Después se cultivó melón (*Cucumis melo*, L.).

En este segundo proceso se abonaron la mitad de las parcelas, y la otra mitad se dejó sin abonar para estudiar el efecto residual de duración del compost. Ambos cultivos representan los típicos de la zona, y además han sido utilizados en diversos trabajos de investigación relacionados con la aplicación de residuos orgánicos al suelo, lo que permitirá disponer de datos de referencia para discutir nuestros resultados.

Los análisis realizados en los suelos enmendados y control fueron los siguientes:

1. pH y Conductividad eléctrica.
2. Nutrientes totales (N, P, K).
3. Fracciones de Carbono (Carbono orgánico total, Carbono en biomasa microbiana y Carbono de sustancias húmicas).
4. Metales pesados: Mn, Fe, Cd, Cr, Pb, Zn, Cu y Ni.
5. Actividad deshidrogenasa.
6. Análisis de parámetros físicos: humedad (capacidad de retención hídrica).

El análisis que se realizó sobre el material vegetal fue:

1. Rendimiento (peso fresco).
2. Metales pesados: Mn, Fe, Cd, Cr, Pb, Zn, Cu y Ni.
3. Nutrientes (N, P).

Tabla 3.2.2. Principales características del suelo.

PARÁMETROS	VALORES
pH (unidades de pH)	8.03
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	361
Cloruros (meq/100g)	0.62
Sulfatos (meq/100g)	0.23
Sodio asimilable (meq/100g)	0.99
Potasio asimilable (meq/100g)	1.20
Calcio asimilable (meq/100g)	13.21
Magnesio asimilable (meq/100g)	4.23
Materia Orgánica Volátil (g/100g)	1.24
Carbono Orgánico Total (g/100g)	0.72
Nitrógeno total (g/100g)	0.26
Relación C/N (g/100g)	2.77
Carbonatos Totales (g/100g)	22.90
Caliza activa (g/100g)	7.60
Fósforo asimilable (mg/kg)	61.30
Hierro asimilable (mg/kg)	7.40
Cobre asimilable (mg/kg)	2.40
Manganeso asimilable (mg/kg)	19.60
Zinc asimilable (mg/kg)	5.30
TEXTURA (USDA)	Franco arenosa –Gruesa
Arena gruesa (2 – 0.25 mm) (g/100g)	4.37
Arena fina (0.25 – 0.05 mm) (g/100g)	68.27
Limo (0.05 – 0.002 mm) (g/100g)	11.52
Arcilla (< 0.002 mm) (g/100g)	15.84



**Figura 3.2.2.** Inicio cosecha lechuga.



**Figura 3.2.3.** Cartel distintivo de parcelas en la cosecha de lechuga.



**Figura 3.2.4.** Dos meses después de la plantación de la cosecha de lechuga.



**Figura 3.2.5.** Lechugas en el punto final de la cosecha.



**Figura 3.2.6.** Recubrimiento del melón para evitar las heladas.



**Figura 3.2.7.** Cartel distintivo de parcelas en la cosecha de melón.



**Figura 3.2.8.** Melón en el punto final de la cosecha.

### 3.3. TÉCNICAS

#### 3.3.1. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS

- **Humedad**

Determinación del porcentaje de agua con respecto a muestra húmeda.

*Procedimiento:*

Se pesan de 1-1.5 g de la muestra en un pesasustancias previamente tarado, y se seca en estufa a 105 °C durante dos horas. A continuación, se enfría el pesasustancias en desecador y se pesa, volviendo a repetir la operación hasta obtener peso constante. La pérdida de peso se da como humedad, expresada en tanto por ciento de muestra en las condiciones operativas.

### 3.3.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS

- **Medida del pH**

Se obtiene un extracto acuoso en la relación sólido líquido 1:10 por agitación mecánica durante dos horas. Sobre este extracto se realizó la medida de pH utilizando un pH-metro Radiometer Copenhagen, modelo pH-meter 29.

- **Conductividad eléctrica**

El extracto obtenido para la medida del pH se centrifugó y, sobre el sobrenadante, se leyó directamente la conductividad con un conductímetro Crison, modelo 522. La conductividad de los materiales orgánicos se expresa en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

### 3.3.3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS

- **Nitrógeno total**

Método Kjeldahl modificado (Jackson, 1964)

*Reactivos:*

- Ácido sulfúrico concentrado

- Mezcla catalizadora:

Selenio metálico (polvo)	10 %
--------------------------	------

Sulfato de cobre	25 %
------------------	------

Sulfato potásico	65 %
------------------	------

- Hidróxido sódico al 35 %

- Ácido sulfúrico 0.1 N

- Reactivo indicador (disolución alcohólica al 0.015 % de verde de bromocresol y 0.03 % de rojo de metilo)
- Reactivo bórico-indicador (disolución acuosa al 2 % de ácido bórico y con un 1% de reactivo indicador)

*Procedimiento:*

Se pone 1 g de muestra seca en tubos Kjeldahl, 0.8 g de mezcla catalizadora y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado calentando a 360° C en el bloque digestor durante dos horas. Se enrasa a 100 mL con agua destilada en matraz aforado. Frío, se destila con arrastre de vapor el amoniaco desplazado por adición de 15 mL de hidróxido sódico, el cual se recoge en 10 mL de la disolución de ácido bórico más indicador, y se valora con ácido sulfúrico 0.1 N hasta pH = 4.80.

El contenido en nitrógeno total de un compost se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\% N = (A \cdot 0.0014 \cdot 100) / C$$

donde:

A = mL consumidos de ácido sulfúrico 0,1 N

C = gramos de compost

- **Nitrógeno amónico**

Obtención del amonio extraíble mediante agitación mecánica de la muestra con disolución de cloruro potásico 2 N, provocando el desplazamiento del ión amonio de los lugares de cambio por los iones potasio, y destilación en medio alcalino (MgO) mediante corriente de vapor de los iones amonio; reducción (aleación de Devarda) y destilación en medio alcalino de los nitratos.

*Reactivos:*

- Solución extractora: Cloruro potásico 2 N

- Alcalinizante: MgO
- Reductor: Aleación de Devarda
- Colector: Ácido bórico
- Indicador:
  - Rojo de metilo al 0.066 % en alcohol (50 %)
  - Verde de bromo-cresol al 0.033 % en alcohol (50 %)
- Valorador: Ácido sulfúrico 0.1 N

*Procedimiento:*

10 g de la muestra de lodo homogeneizada y seca al aire se extraen con 100 mL de KCl 2 N y se pone en agitación mecánica durante 2 horas. Se centrifuga a 3000 rpm durante 15 minutos y se filtra. Alícuotas de 25 mL se añaden a matraces Kjeldahl del destilador de nitrógeno, donde anteriormente se habrán puesto 0.1 g de MgO y 0.2 g de aleación de Devarda. Se destila durante tres minutos sobre 50 mL de ácido bórico y se valora con ácido sulfúrico 0.1 N hasta pH = 4.80. Se hace una prueba en blanco con el extractante.

- **Nitrógeno nítrico**

Obtención del nitrógeno extraíble mediante agitación mecánica de la muestra con agua desionizada y determinación de los nitratos en un cromatógrafo iónico HPLC.

*Reactivos:*

- Agua desionizada
- Nitrato sódico

*Procedimiento:*

Se realiza una extracción de la muestra con agua desionizada en la proporción 1:20 (sólido / líquido). Se agita durante dos horas, se centrifuga y se filtra con papel de filtro lavado a los ácidos.

Se hace una dilución adecuada de la muestra con agua desionizada, calidad HPLC y se inyecta en el cromatógrafo iónico previamente calibrado con una disolución de  $\text{NaNO}_3$ , recientemente preparada, que contenga 4 ppm de  $\text{NO}_3^-$ .

- **Preparación de las muestras para la determinación de fósforo y potasio.**

Digestión nítrico - perclórica de la muestra, y posterior cuantificación de los elementos por los respectivos métodos que a continuación se indican.

*Reactivos:*

- Ácido nítrico concentrado ( $\rho = 1.33 \text{ g/mL}$ )
- Ácido perclórico (60 %)

*Procedimiento:*

A 1 g de muestra se le añaden 20 mL de la mezcla nítrico-perclórica (1:1) y se calienta a  $210^\circ \text{C}$  durante una hora y media en el bloque digestor. El contenido de los tubos se filtra a través de papel lavado a los ácidos recogiendo el filtrado en un matraz aforado de 100 mL. Los tubos de digestión y el filtro se lavan repetidas veces con ácido clorhídrico 0.5 N, a fin de trasvasar todo el contenido del tubo. A continuación se lleva a un volumen a 100 mL. La digestión también se realiza con un blanco.

- **Fósforo total**

Medida espectrofotométrica de la intensidad del color azul del extracto (Murphy and Riley, 1962).

*Reactivos:*

- Ácido sulfúrico (14.8 mL en 1 L)
- Ácido sulfúrico 5 N
- Molibdato amónico
- Tartrato de antimonio III

- Ácido ascórbico

*Preparación del reactivo:*

Reactivo A: 12 g de molibdato amónico en 250 mL de agua destilada se añaden a 0.2908 g de tartrato de antimonio III disueltos en 100 mL de H<sub>2</sub>O; ambos se agregan a 1 L de ácido sulfúrico 5 N, y se lleva todo a 2 L.

Reactivo B: Se disuelve 1.056 g de ácido ascórbico en 200 mL del reactivo A. Este reactivo hay que prepararlo al día (sólo se mantiene 24 horas).

*Procedimiento:*

A 2 mL del extracto o de su dilución pertinente obtenido en la digestión nítrico-perclórica se le añaden 4 mL de agua destilada, 2 mL de ácido sulfúrico (14.8 mL en 1 litro), y 2 mL del reactivo B, se mezcla bien y se deja en reposo durante 30 minutos; el líquido tomará una coloración azul; a continuación se mide en espectrofotómetro a 696 nm. Paralelamente se realiza una curva patrón con ácido fosfórico, representándose en ordenadas la absorbancia y en abscisas las ppm de fósforo. La absorbancia obtenida para las muestras se lleva a esta recta y se calculan las ppm en el líquido, teniendo en cuenta multiplicar por la dilución realizada.

- **Potasio total**

Determinación directa por fotometría de llama en el extracto nítrico-perclórico, utilizando un patrón de potasio de 10 ppm. Se empleó un fotómetro de llama JENWAY PFP 7 de lectura directa dada en unidades de una escala de 0 a 100.

- **Carbono orgánico total**

La medida de este parámetro se realizó con un analizador de Carbono FLASH 1112 SERIES (Termo Finningan). La muestra, previamente tratada con HCl para eliminar

los carbonatos, pasa por un horno de grafito a 900° C, en el cual el carbono pasa a CO<sub>2</sub> y sigue circulando por medio de un gas portador (Helio), atravesando un tubo de reducción el cual no altera el estado de oxidación del carbono. Finalmente el carbono como CO<sub>2</sub> pasa por una columna cromatográfica hasta ser detectado en un detector de conductividad eléctrica.

En el caso de materiales orgánicos, en los que el contenido de carbonatos es despreciable, se puede obviar el tratamiento previo de la muestra con HCl (*Marín, 2004*).

- **Extracción de la materia orgánica**

El proceso se realiza agitando las muestras, secas al aire y molidas, con pirofosfato sódico.

*Reactivos*

- Pirofosfato sódico 0.1 M a pH 9.8

*Procedimiento:*

Se realiza una extracción en la proporción 1:10 mediante agitación mecánica durante cuatro horas; se centrifuga a 10000 rpm durante 15 minutos y se filtra a través de una malla de 27 µm.

- **Carbono de sustancias húmicas (carbono extraíble en pirofosfato)**

*Reactivos:*

- Acido sulfúrico concentrado
- Dicromato potásico
- Glucosa

*Procedimiento:*

A 4 mL del extracto de materia orgánica se le añaden 98 mg de dicromato potásico y 4 mL de ácido sulfúrico (c); se coloca 15 minutos en bloque digestor a

150 °C, dejándolo a continuación reposar durante una noche. Se lleva a 10 mL con agua destilada y se lee en espectrofotómetro a 590 nm. La curva patrón se realiza con glucosa en concentraciones de 0, 50, 100, 200 y 500 mg.kg<sup>-1</sup> de glucosa.

En el caso de los materiales orgánicos se coge 1 mL de extracto y se vierte en un vaso de precipitados, dejándolo desecar a temperatura ambiente. Luego se mide el carbono de las sustancias húmicas por el procedimiento que se describió para el COT.

### **3.3.4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS BIOLÓGICOS**

- **Determinación de la actividad deshidrogenasa**

Determinación de la actividad metabólica global de los microorganismos.

*Reactivos:*

- INT (Cloruro de 2-p-yodofenil-3-p-nitrofenil-5-feniltetrazolio).
- Tampón tris-HCl 1 M a pH 7.5.
- Etanol.
- DMF (N,N-dimetilformamida).

*Procedimiento:*

Se incuba a 40 °C y durante una hora, en oscuridad, 1 g de suelo en presencia de 1.5 mL de tampón tris-HCl 1 M a pH 7.5 y de 2 mL de INT al 0.5 %. El INTF (yodonitrotetrazolioformazán) formado se extrae empleando 10 mL de una mezcla 1:1 en volumen de etanol y DMF. A continuación se filtra y se mide el INTF formado a una longitud de onda de 490 nm. La concentración de INTF presente en la muestra se calcula en referencia a una recta patrón preparada de modo análogo a la muestra, aunque en ausencia de INT y añadiendo en su lugar INTF. Los resultados se expresan en mg INTF/g·h.

### 3.3.5. PARÁMETROS DE TOXICIDAD

- **Metales pesados totales**

Determinación directa por espectrometría de absorción atómica sobre dilución adecuada del extracto nítrico-perclórico de las muestras.

*Reactivos:*

- Ácido nítrico concentrado
- Ácido perclórico 60 %
- Disoluciones patrón

*Procedimiento:*

El extracto nítrico-perclórico se obtiene igual que en el apartado de fósforo total y potasio total de este mismo capítulo. Para la determinación de los metales pesados, se partió de diluciones adecuadas de este extracto realizando las medidas en un equipo de Absorción Atómica AA 6200 Shimadzu, en las condiciones de trabajo expresadas en el manual de uso. El cálculo de las concentraciones en metales pesados de las muestras se hace mediante la utilización de patrones de concentración conocida.

- **Metales pesados extraíbles con DTPA**

Determinación por espectrofotometría de absorción atómica de la fracción de metales extraídos con DTPA según el procedimiento de *Lindsay and Norvell (1978)*.

*Disolución extractante:*

Disolución de DTPA (Ácido dietilentriaminopentacético) 0.005 M, CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y trietanolamina 0.1 M. Esta disolución se lleva a pH 7.3 con HCl 1 N.

*Procedimiento:*

Se pesan 2.5 g de muestra y se le añaden 50 mL de la disolución extractante anterior. Se agitan mecánicamente durante dos horas, tras las cuales se centrifugan los

sobrenadantes y se filtran sobre matraces aforados, para llevarlos finalmente todos a un volumen fijo.

### **3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Todos los análisis estadísticos se han realizado con el programa informático STATISTIX.





## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



#### **4.1. PARÁMETROS DE CONTROL DURANTE LOS CULTIVOS**

Para una correcta aplicación agrícola de los compost obtenidos a partir de los lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales, deben evaluarse previamente los efectos que estos producirán sobre el suelo, cultivos y medio ambiente.

Para ello, se han llevado a cabo una serie de determinaciones analíticas según los procedimientos descritos en el capítulo 3 del presente Proyecto.

Como se dijo anteriormente, uno de los objetivos principales de este Proyecto es evaluar la posibilidad de emplear compost obtenidos a partir de lodos de depuradora, para el cultivo de productos alimenticios (en nuestro caso melones y lechugas). Por tanto, nos debemos asegurar con total certeza que los productos pueden ser consumidos sin ningún tipo de riesgo para el consumidor. Por ello, los parámetros a controlar con mayor exhaustividad será la presencia de metales pesados en los productos cultivados y en el suelo, así como la presencia de microorganismos patógenos. Este estrecho control se debe a la elevada toxicidad que tienen algunos metales pesados y a su bioacumulación en los organismos, y a la capacidad que tienen los microorganismos patógenos de causar enfermedades o inducirlos. Otro parámetro que se ha tenido muy en cuenta ha sido la conductividad del suelo, ya que es un factor limitante por su efecto fitotóxico sobre las plantas y otros organismos vegetales.

También se han controlado otros parámetros físico-químicos y nutrientes, con el objetivo de evaluar qué tipo de compost o lodo, y en qué proporción es más adecuado para conseguir niveles adecuados en el suelo y en los cultivos. Esta evaluación se consigue analizando los rendimientos que se han alcanzado a partir de los cultivos obtenidos y la presencia de nutrientes en el suelo.

## 4.2. EFECTO DE LOS MATERIALES ORGÁNICOS UTILIZADOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y LOS CULTIVOS

### 4.2.1. RENDIMIENTO SOBRE LA MATERIA VEGETAL

Una de las maneras de evaluar la calidad de un compost es determinar los rendimientos obtenidos en los cultivos, ya que es una manera de comprobar su fertilidad. Para ello se han contabilizado las unidades (lechugas y melones) obtenidas en cada parcela, así como el peso de estas unidades. De este modo, obtenemos también el peso medio de las unidades obtenidas en cada parcela.

**Tabla 4.2.1.1.** Número y peso de lechugas cosechadas

MUESTRA	Nº Lechugas / parcela	Nº Total Lechugas	Peso Lechugas / parcela (g)	Peso medio Lechugas / parcela (g)	Peso medio total (g)
CONTROL	53	148	15031.0	283.6	337.2
	46		17562.0	381.8	
	49		17310.0	353.3	
LAN	50	146	19097.5	382.0	400.0
	49		21028.5	429.2	
	47		18278.5	388.9	
CLAN- D1	48	146	15154.0	315.7	321.2
	50		14772.0	295.4	
	48		16968.5	353.5	
CLAN- D2	46	145	11504.0	250.1	292.7
	51		16857.5	330.5	
	48		14086.0	293.5	

Como se puede ver en la **Tabla 4.2.2.1** el número total de lechugas obtenidas por parcela vería entre 145 y 148, por lo que número de unidades cosechadas en cada parcela es muy similar. En cuanto al peso de las lechugas, las obtenidas en las parcelas abonadas con el lodo anaerobio son las que tienen un mayor peso medio con 400.0 g,

seguidas de aquellas parcelas abonadas con el fertilizante inorgánico con 337.2 g de peso medio.

En referencia a la dosis de abono más adecuada en el compost, no hay diferencias significativas entre las parcelas abonadas con compost en dosis 1 (20 t/ha) a aquellas que han sido abonadas con compost en dosis 2 (40 t/ha). En concreto se obtiene un peso medio ligeramente superior en las parcelas abonadas con la dosis más baja.

**Tabla 4.2.1.2.** Número y peso de melones cosechados

<b>MUESTRA</b>	<b>Nº Melones / parcela</b>	<b>Nº Total Melones</b>	<b>Peso Melones / Parcela (kg)</b>	<b>Peso medio Melones / parcela (kg)</b>	<b>Peso medio total (kg)</b>
<b>CONTROL</b>	59	<b>150</b>	113.74	1.93	<b>1.99</b>
	37		70.71	1.91	
	54		113.56	2.10	
<b>LAN</b>	57	<b>152</b>	109.51	1.92	<b>1.89</b>
	47		85.35	1.82	
	48		92.17	1.92	
<b>CLAN- D1</b>	52	<b>156</b>	99.78	1.92	<b>1.94</b>
	55		102.99	1.87	
	49		99.57	2.03	
<b>CLAN-D2</b>	62	<b>151</b>	121.63	1.96	<b>1.95</b>
	37		68.82	1.86	
	52		103.53	1.99	

En la **Tabla 4.2.2.2** aparecen el número de melones y sus pesos en cada una de las parcelas. Como se puede ver, en la parcela abonada con el compost CLAN-D1 se consigue un mayor número de melones con 156. En el resto de parcelas, el número de melones recogidos es muy similar, variando su número entre 150 y 152, por lo que el número de unidades cosechadas es muy similar en todos los casos. En cuanto a los pesos, éstos son mayores en el caso de las parcelas abonadas con fertilizante inorgánico y con el compost anaerobio. Sin embargo, las diferencias vuelven a ser poco significativas.

*En definitiva, se puede concluir, basándose en el seguimiento llevado a cabo en el número de melones y lechugas obtenidos y en sus pesos, que en el caso de las lechugas se consigue un mayor peso medio de éstas en las parcelas abonadas con el lodo sin compostar. Una posible explicación podría ser el mayor contenido en materia orgánica que tienen los lodos sin compostar, en comparación con los lodos compostados y con el compost inorgánico. En el caso de los melones, se consigue un mayor número de unidades en las parcelas abonadas con el CLAN-D1, mientras que en el resto el número de unidades es muy similar. Sin embargo, para las lechugas, el mayor peso medio se consigue en las parcelas abonadas con el fertilizante inorgánico.*

*Por tanto, el tipo de abono utilizado en las parcelas no parece ser un factor determinante en la consecución de un mejor rendimiento en las cosechas. Además, la dosis de abono empleada no parece traducirse en una mejora en los rendimientos productivos.*

#### **4.2.2. HUMEDAD**

La humedad en el suelo es un parámetro importante a controlar durante el cultivo de productos agrícolas. La importancia de este parámetro, en relación al valor agrícola de un lodo, es consecuencia de la cantidad de sales minerales disueltas en el agua y la materia orgánica en suspensión.

La humedad de un compost depende del proceso de compostaje seguido. Es importante que durante el proceso de compostaje se mantenga una humedad en los lodos entre un 40 y un 60 %, con el objetivo de que la actividad microbiana sea la adecuada para obtener un compost de calidad.

**Tabla 4.2.2.1.** Humedad del suelo al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	HUMEDAD SUELO INICIO LECHUGA (% w/w)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media humedad	MDS +/-
LAN	2.06	2.75	2.49	<b>2.43</b>	<b>0.35</b>
CLAN-D1	2.34	1.97	2.20	<b>2.17</b>	<b>0.19</b>
CLAN-D2	2.21	2.21	2.38	<b>2.27</b>	<b>0.10</b>

Como se ve en la **Tabla 4.2.2.1.** la humedad del suelo al inicio del cultivo de la lechuga se mueve en torno al 2.2-2.4 %. El lodo anaerobio le proporciona al suelo una humedad ligeramente superior en comparación con los composts. El hecho de emplear una dosis de compost mayor (4 kg/m<sup>2</sup>) parece suministrar al suelo una humedad levemente mayor en comparación con la dosis más baja. Si bien, los resultados son muy similares en todos los casos.

**Tabla 4.2.2.2.** Humedad del suelo al final del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	HUMEDAD SUELO FINAL LECHUGA (% w/w)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media humedad	MDS +/-
LAN	1.14	1.63	1.15	<b>1.31</b>	<b>0.28</b>
CLAN-D1	1.08	1.15	1.32	<b>1.18</b>	<b>0.12</b>
CLAN-D2	1.30	1.27	2.01	<b>1.53</b>	<b>0.42</b>
CONTROL	1.26	1.54	1.33	<b>1.38</b>	<b>0.15</b>

Como se puede apreciar en la **Tabla 4.2.2.2.** la humedad del suelo ha disminuído en todos los casos. Esta disminución puede deberse a que el lodo o el compost se ha ido biodegradando, y por tanto, el suelo ha perdido su capacidad de retener agua. Esto se traduce en un menor porcentaje de humedad.

El suelo que menor porcentaje de humedad presenta es el abonado con el compost anaerobio en la dosis más baja, mientras que el que mayor humedad tiene es el abonado con el compost anaerobio en la dosis 2. El resto de suelos presentan una humedad muy similar en torno al 1.3-1.4 %.

**Tabla 4.2.2.3.** Humedad del suelo al inicio del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	HUMEDAD SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN (% w/w)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media humedad	MDS +/-
LAN	2.04	2.04	1.66	<b>1.91</b>	<b>0.22</b>
CLAN-D1	1.57	1.61	1.60	<b>1.59</b>	<b>0.02</b>
CLAN-D2	1.42	1.97	1.62	<b>1.67</b>	<b>0.28</b>
CONTROL	1.95	1.47	1.87	<b>1.76</b>	<b>0.26</b>

En el cultivo del melón, la humedad inicial del suelo es inferior a la que tenían al inicio del cultivo de la lechuga. Esto se puede deber a la biodegradación que ha ido experimentando el suelo durante el cultivo de la lechuga, de manera que su capacidad de retención de agua ha ido disminuyendo.

Las parcelas que presentan una mayor humedad son las abonadas con el lodo sin compostar, como consecuencia de su mayor contenido en agua. El resto de parcelas presentan una humedad comprendida entre 1.6-1.7 %. De nuevo, se aprecia como el hecho de emplear una dosis más elevada de compost se traduce en un mayor contenido en humedad en el suelo.

**Tabla 4.2.2.4.** Humedad del suelo al final del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	HUMEDAD SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (% w/w)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media humedad	MDS +/-
LAN	0.97	1.32	0.72	<b>1.00</b>	<b>0.30</b>
CLAN-D1	0.75	0.62	0.61	<b>0.66</b>	<b>0.08</b>
CLAN-D2	1.42	0.58	1.00	<b>1.00</b>	<b>0.42</b>
CONTROL	0.61	0.82	0.75	<b>0.73</b>	<b>0.11</b>

La pérdida de humedad experimentada por el suelo al final del cultivo del melón es mayor que la experimentada al final del cultivo de la lechuga. Esto se puede deber a que los requerimientos de agua para el cultivo del melón son mayores a los del cultivo de la lechuga. También se puede deber a que las condiciones climatológicas en el cultivo del melón eran más secas que en el caso de la lechuga. Al final del cultivo del melón sin renovación de abono se aprecia que las parcelas que presentan una mayor humedad son las abonadas con el compost en dosis alta, y con el lodo sin compostar. Por tanto el patrón de comportamiento es parecido al observado al final del cultivo de la lechuga.

**Tabla 4.2.2.5.** Humedad del suelo al inicio del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	HUMEDAD SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN (% w/w)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media humedad	MDS +/-
LAN	1.23	2.00	1.73	<b>1.65</b>	<b>0.39</b>
CLAN-D1	1.76	1.70	2.45	<b>1.97</b>	<b>0.42</b>
CLAN-D2	1.44	1.94	1.65	<b>1.68</b>	<b>0.25</b>
CONTROL	1.95	1.47	1.87	<b>1.76</b>	<b>0.26</b>

Al inicio del cultivo del melón cuando hay renovación de abono, la humedad en las parcelas es muy similar a la que tenían las parcelas en las que el abono no se renovó. La humedad media se vuelve a situar entre 1.6-1.7 %, si bien destaca la parcela abonada con el compost en dosis baja, con un 1.97 % de humedad.

**Tabla 4.2.2.6.** Humedad del suelo al final del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	HUMEDAD SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (% w/w)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media humedad	MDS +/-
LAN	1.25	1.56	0.21	<b>1.01</b>	<b>0.71</b>
CLAN-D1	1.53	0.72	0.47	<b>0.91</b>	<b>0.55</b>
CLAN-D2	0.78	0.69	0.69	<b>0.72</b>	<b>0.05</b>
CONTROL	0.61	0.82	0.75	<b>0.73</b>	<b>0.11</b>

Cuando hay renovación de abono, la humedad final del suelo de las parcelas es mayor que cuando el abono no se renueva, exceptuando el suelo abonado con el compost anaerobio en la dosis alta y con el lodo anaerobio. La humedad media se sitúa en torno al 0.8-0.9 %.

La humedad máxima se consigue en la parcela abonada con el lodo anaerobio sin compostar.

En este caso las parcelas que menor pérdida de peso experimentan son las abonadas con los lodos sin compostar, seguidas por las abonadas con el compost anaerobio. La pérdida media de humedad se sitúa sobre el 45-50 %.

*Analizando la humedad de las parcelas al inicio y al final de los cultivos realizados, se puede concluir que el suelo presenta un mayor contenido en humedad al inicio de los respectivos cultivos que al final. Esto se debe a la biodegradación experimentada por el suelo, lo que minimiza su capacidad de retención de agua.*

*La humedad al inicio y al final del cultivo de la lechuga es superior a la humedad al inicio y al final del melón. Eso se debe a que la lechuga se cultivó primero, de modo que cuando se cultivó el melón el terreno ya estaba bastante biodegradado.*

*Al renovar el abono durante el cultivo del melón se consigue una menor pérdida de humedad, si bien las diferencias no parecen ser demasiado significativas.*

*Con respecto a la dosis de compost empleado, el hecho de utilizar una dosis más elevada hace que la pérdida de humedad del suelo tienda a ser menor, si bien las diferencias no parecen ser transcendentales en la mayoría de los casos.*

#### **4.2.3. pH**

La incorporación de abonos al suelo puede afectar en mayor o menor medida al pH del suelo. Estos cambios de pH en los suelos dependen, tanto de la procedencia del compost (origen de los lodos), como de la capacidad tampón del propio suelo.

La degradación de los ácidos orgánicos de bajo peso molecular durante la descomposición de la materia orgánica contenida en el lodo, así como una producción de  $\text{NH}_4^+$  (afectado por las bacterias proteolíticas y por la temperatura), son procesos que tienen lugar durante el compostaje y que influyen en el pH del producto final. Además, cantidades elevadas de calcio y otros compuestos inorgánicos en los lodos de partida, tienen como efecto un aumento del pH.

En nuestro caso, el lodo anaerobio tiene un pH de 7.02, mientras que los compost obtenidos tienen un pH de 6.38 y 6.20. Mientras, el suelo antes de ser abonado presentaba un pH de 8.03, tal y se puede ver en el capítulo 3 en la **Tabla 3.2.2**.

Tras el abonado al inicio del cultivo de la lechuga, las parcelas tenían un pH en torno a 7.8, siendo menor el pH en la parcela abonada con el compost en la dosis más baja, con un pH de 7.47. Estos datos quedan reflejados en la **Tabla 4.2.3.1**.

**Tabla 4.2.3.1.** pH del suelo al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	pH SUELO INICIO LECHUGA				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media pH	MDS +/-
LAN	7.67	7.85	7.92	<b>7.81</b>	<b>0.13</b>
CLAN-D1	7.59	7.35	7.48	<b>7.47</b>	<b>0.12</b>
CLAN-D2	7.78	7.84	7.83	<b>7.82</b>	<b>0.03</b>
CONTROL	8.03	8.03	8.03	<b>8.03</b>	<b>0.00</b>

**Tabla 4.2.3.2.** pH del suelo al final del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	pH SUELO FINAL LECHUGA				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media pH	MDS +/-
LAN	8.12	8.12	7.84	<b>8.03</b>	<b>0.16</b>
CLAN-D1	7.79	8.16	8.03	<b>7.99</b>	<b>0.19</b>
CLAN-D2	7.86	7.90	7.76	<b>7.84</b>	<b>0.07</b>
CONTROL	7.76	8.27	7.84	<b>7.96</b>	<b>0.27</b>

**Tabla 4.2.3.3.** pH del suelo al inicio del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	pH SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media pH	MDS +/-
LAN	7.83	8.03	7.90	<b>7.92</b>	<b>0.10</b>
CLAN-D1	7.92	7.94	7.75	<b>7.87</b>	<b>0.10</b>
CLAN-D2	7.92	7.29	7.86	<b>7.69</b>	<b>0.35</b>
CONTROL	7.69	7.80	7.88	<b>7.79</b>	<b>0.10</b>

**Tabla 4.2.3.4.** pH del suelo al final del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	pH SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media pH	MDS +/-
LAN	7.40	7.35	8.09	<b>7.61</b>	<b>0.41</b>
CLAN-D1	7.67	7.60	7.65	<b>7.64</b>	<b>0.04</b>
CLAN-D2	7.20	7.90	7.82	<b>7.64</b>	<b>0.38</b>
CONTROL	7.57	7.45	7.44	<b>7.49</b>	<b>0.07</b>

**Tabla 4.2.3.5.** pH del suelo al inicio del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	pH SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media pH	MDS +/-
LAN	8.00	8.00	7.91	<b>7.97</b>	<b>0.05</b>
CLAN-D1	8.07	7.80	7.86	<b>7.91</b>	<b>0.14</b>
CLAN-D2	7.75	7.71	8.11	<b>7.86</b>	<b>0.22</b>
CONTROL	7.69	7.80	7.88	<b>7.79</b>	<b>0.10</b>

**Tabla 4.2.3.6.** pH del suelo al final del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	pH SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media pH	MDS +/-
LAN	7.40	7.40	7.42	<b>7.41</b>	<b>0.01</b>
CLAN-D1	7.60	7.45	7.58	<b>7.54</b>	<b>0.08</b>
CLAN-D2	8.01	7.44	7.54	<b>7.66</b>	<b>0.30</b>
CONTROL	7.57	7.45	7.44	<b>7.49</b>	<b>0.07</b>

*Se puede apreciar que en el caso del cultivo de la lechuga, el pH al inicio es menor que al final. Mientras al inicio el pH está en torno a 7.7-7.8, al final del cultivo sube hasta 8.0 aproximadamente. Esto se puede deber a la formación de amonio por parte de las bacterias.*

*En el cultivo del melón, tanto cuando se renueva el abono como cuando no se renueva, el pH al inicio del cultivo es más alto que al final. Al inicio, el pH está en torno a 7.9-8.0, mientras que al final desciende en torno a 7.5-7.6. Esto se puede deber a la pérdida de amonio por volatilización, lo que vuelve a demostrar un mayor estado de biodegradación del terreno en el cultivo del melón en comparación al cultivo de la lechuga.*

*Los valores de pH obtenidos quedan dentro del rango permitido que la bibliografía indica para materiales de este tipo (Portal, 1986; Pérez et al., 1986; García, 1992; Mena, 2001; El-Housseini et al., 2002).*

#### **4.2.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

La conductividad eléctrica da una idea de la proporción de sales solubles en el extracto acuoso de la muestra, es decir, de los contenidos en iones.

Una de las limitaciones que tiene la aplicación de los residuos orgánicos cuando se emplean como enmiendas para el suelo, es el incremento de la conductividad eléctrica que puede generar en dicho suelo, debido a la elevada cantidad de aniones y cationes solubles que poseen estos materiales (Portal, 1986).

*Santamaría y Ferrera (2001)* dieron cuenta de que las concentraciones de sales en los compost por encima de 8000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  afectan negativamente a las poblaciones microbianas, así como la biotransformación de la materia orgánica. *García y Hernández (1996)* también observaron un efecto negativo de la salinidad sobre la

actividad y el desarrollo microbiano, particularmente cuando esta salinidad era debida a cloruros.

Una elevada conductividad eléctrica en el suelo puede ejercer un efecto fitotóxico, provocando la inhibición del desarrollo vegetal. Por ello la conductividad eléctrica de un compost ha de ser tenida en cuenta a la hora de establecer las dosis de aplicación de ese compost al suelo, pudiendo ser un factor limitante para su uso. Lo deseable es que la conductividad eléctrica de los compost se encuentre por debajo de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Tabla 4.2.4.1.** Conductividad del suelo al inicio del cultivo de la lechuga ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD SUELO INICIO LECHUGA ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media conductividad	MDS +/-
LAN	222.5	173.8	206.8	<b>201.0</b>	<b>24.9</b>
CLAN-D1	369.0	363.0	354.0	<b>362.0</b>	<b>7.5</b>
CLAN-D2	160.5	258.0	182.5	<b>200.3</b>	<b>51.1</b>
CONTROL	361.0	361.0	361.0	<b>361.0</b>	<b>0.0</b>

**Tabla 4.2.4.2.** Conductividad del suelo al final del cultivo de la lechuga ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD FINAL LECHUGA ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media conductividad	MDS +/-
LAN	191.2	175.2	214.3	<b>193.6</b>	<b>19.7</b>
CLAN-D1	221.0	212.5	236.0	<b>223.2</b>	<b>11.9</b>
CLAN-D2	150.8	215.5	227.2	<b>197.8</b>	<b>41.2</b>
CONTROL	229.7	213.5	210.4	<b>217.9</b>	<b>10.4</b>

**Tabla 4.2.4.3.** Conductividad del suelo al inicio del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media conductividad	MDS +/-
LAN	209.5	228.0	196.4	<b>211.3</b>	<b>15.9</b>
CLAN-D1	203.0	213.8	226.0	<b>214.3</b>	<b>11.5</b>
CLAN-D2	189.0	242.0	212.0	<b>214.3</b>	<b>26.6</b>
CONTROL	225.0	196.2	264.0	<b>228.4</b>	<b>34.0</b>

**Tabla 4.2.4.4.** Conductividad del suelo al final del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media conductividad	MDS +/-
LAN	189.7	222.8	249.0	<b>220.5</b>	<b>29.7</b>
CLAN-D1	223.0	234.4	255.5	<b>237.6</b>	<b>16.5</b>
CLAN-D2	259.0	226.0	319.0	<b>268.0</b>	<b>47.1</b>
CONTROL	298.6	190.4	289.0	<b>259.3</b>	<b>59.9</b>

**Tabla 4.2.4.5.** Conductividad del suelo al inicio del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media conductividad	MDS +/-
LAN	239.0	223.0	223.0	<b>228.3</b>	<b>9.2</b>
CLAN-D1	223.0	172.7	247.0	<b>214.2</b>	<b>37.9</b>
CLAN-D2	216.0	218.0	221.3	<b>218.4</b>	<b>2.7</b>
CONTROL	225.0	196.2	264.0	<b>228.4</b>	<b>34.0</b>

**Tabla 4.2.4.6.** Conductividad del suelo al final del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media conductividad	MDS +/-
LAN	215.1	247.0	318.0	<b>260.0</b>	<b>52.7</b>
CLAN-D1	234.4	251.4	302.0	<b>262.6</b>	<b>35.2</b>
CLAN-D2	241.0	223.7	171.7	<b>212.1</b>	<b>36.1</b>
CONTROL	298.6	190.4	289.0	<b>259.3</b>	<b>59.9</b>

*Analizando los valores de conductividad en el suelo, se puede afirmar que al inicio del cultivo de la lechuga y del melón (sin renovación de abono) ésta tiende a mantenerse o incluso a aumentar ligeramente con respecto a los valores obtenidos al*

*final de las cosechas. Esto puede deberse a la concentración que experimentan las sales en el terreno como consecuencia de la pérdida de humedad del suelo a lo largo del cultivo.*

*Además, cuando se lleva a cabo una renovación de abono en el suelo, la conductividad al final de la cosecha tiende a aumentar aún más en comparación con las parcelas en las que no se renueva el abono. Esto se debe a que la salinidad se va acumulando en el terreno, ya que el suelo no tiene tanta capacidad de depuración.*

*Al principio de la cosecha de la lechuga y del melón sin renovación de abono, la conductividad se sitúa entre 200-300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que al final se sitúa rondando los 200-220  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Como se indicó anteriormente, lo deseable es que la conductividad eléctrica en el suelo no supere los 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido al efecto fitotóxico que tiene una excesiva concentración de sales. Por tanto, los valores de conductividad eléctrica obtenidos quedan ligeramente por encima de lo que se considera deseable, si bien debemos tener en cuenta la naturaleza salina de nuestros suelos calizos y de nuestra agua.*

*La aportación de compost al suelo en la dosis más alta, tiende a proporcionar una mayor conductividad eléctrica al suelo.*

### **4.3. PROPIEDADES QUÍMICAS**

Al utilizar con fines agrícolas los lodos procedentes de la depuración de aguas residuales, se aportan a los suelos una gran variedad de elementos químicos. Algunos de ellos pueden contribuir al desarrollo vegetal, mientras que otros pueden ser fitotóxicos, e incluso bastantes de ellos pueden ser poco o nada necesarios para las plantas. Además, algunos de los elementos que sirven como nutrientes pueden llegar a ser tóxicos para los vegetales si se presentan en cantidades excesivas.

Por tanto, la adición a los suelos de abonos procedentes de lodos compostados altera en mayor o menor medida la composición química de éstos, no sólo en el

contenido total de cada nutriente particular, sino también en la proporción de las diferentes formas químicas bajo las cuales cada uno de ellos se presenta normalmente.

Los elementos químicos generalmente considerados como esenciales para la mayoría de las plantas, suelen encontrarse presentes en la composición de los lodos empleados como bioenmendantes del suelo. Si bien, algunos de estos elementos pueden encontrarse en concentraciones muy escasas o excesivas para un correcto equilibrio de la fertilidad del suelo. Por eso, es importante conocer la composición de los lodos compostados, así como las características del suelo y sus necesidades nutricionales para conseguir un adecuado manejo de los suelos agrícolas.

#### **4.3.1. METALES PESADOS**

Para una correcta aplicación agrícola de los lodos residuales urbanos, deben evaluarse previamente los efectos que estos producirán sobre el suelo, los cultivos, la cadena alimentaria y el medio ambiente.

Se considera el suelo como un sistema depurador, porque a través de él ciertos iones aportados con los residuos orgánicos se inmovilizan al formar complejos con los coloides minerales y orgánicos del mismo, la materia orgánica es degradada por la actividad microbiana, y además actúa como un filtro que puede retener desde bacterias hasta partículas en suspensión de mayor tamaño. Muchas propiedades del suelo, particularmente las de mayor significado agrícola, dependen de la actividad de los microorganismos, cuya existencia queda condicionada a poder alimentarse para su desarrollo. Sin embargo, los productos y los desechos vegetales que llegan al suelo pueden ser insuficientes, y no permiten el crecimiento y la reproducción de los microorganismos, por lo que si no se adiciona materia orgánica al suelo, existe el grave peligro de reducir drásticamente la población microbiana y condicionar así la agricultura a una dependencia energética externa.

En la utilización del suelo como sistema depurador hay que considerar también la intervención de los vegetales que en él se desarrollan, ya que al asimilar una cantidad considerable de nutrientes, impiden su pérdida por lavado.

Consecuentemente, el suelo es un sistema dinámico a través del cual los elementos nutritivos pueden reciclarse pasando de los residuos a las plantas, al aire o al agua, y por tanto representa el destino natural y óptimo de los residuos. Existen muchas limitaciones que dependen de la calidad de los residuos, y otras muchas que derivan de las propiedades del suelo a tratar.

Un factor importante que puede limitar la utilización agrícola de los lodos es la presencia de cantidades elevadas de metales pesados, entendiendo como tales aquellos que presentan una densidad mayor de  $5.0 \text{ g/cm}^3$  (Cd, Co, Cr, Cu, Zn, Fe, Mn, etc.). Esta limitación se debe a que a partir de una determinada concentración resultan tóxicos para la planta, y con el subsiguiente riesgo para la cadena alimentaria (*Amir et al., 2005*).

El grado de peligrosidad de los metales pesados va ligado a dos propiedades principales: su toxicidad y su persistencia, sin olvidar que en el suelo hay que añadir a estas propiedades la cantidad que la planta posee para absorber cualquier elemento. Tampoco deben olvidarse los efectos sinérgicos y antagónicos que un elemento puede desplegar frente a otro. En conjunto, todas estas propiedades son importantísimas al evaluar el grado de peligrosidad de los metales pesados en el suelo.

Los metales pesados contenidos en los lodos pueden ser absorbidos por las plantas. Si en esas plantas no se consumen, vuelven a restituir nuevamente esos elementos al suelo, en forma relativamente asimilable. Se verificarán pues, en el curso de los años, una acumulación continua de metales pesados con posibilidad de un creciente efecto nocivo.

Son muy numerosos los factores que intervienen en este paso de los metales pesados del suelo a la planta, podemos distinguirlos:

- **Factores relativos al lodo**
  - Grado de enlace y disponibilidad de los metales.
  - Carácter complejante de la materia orgánica y su propia biodegradabilidad.
  - pH del lodo.
  
- **Factores relativos al suelo**
  - pH del suelo.
  - Capacidad de cambio de cationes.
  - Contenido en materia orgánica.
  - Contenido en arcillas.
  - Características de drenaje del suelo.
  - Condiciones redox, en relación con el grado de saturación de agua.
  - Composición granulométrica de suelo.
  
- **Factores relativos a la planta**
  - Naturaleza y sensibilidad específica de la especie vegetal.

Hemos de señalar que el cromo no debe de ser un factor limitante pues la mayoría de plantas tolera niveles relativamente altos.

El cinc es esencial para las plantas, por eso su abundancia en los lodos lo hace muy útil para la nutrición vegetal.

El cadmio es extremadamente peligroso para los animales y el hombre y es absorbido inicialmente del suelo como ión de cambio (*McLaughlin et al., 1999; Cooker, 2006; Misra and Pandey, 2005*).

El cobre es esencial para las plantas y el níquel es rápidamente absorbido por la planta y no se le conoce una función esencial en ellas.

## - METALES PESADOS TOTALES

**Tabla 4.3.1.1.** Metales pesados totales en el suelo al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	METALES PESADOS TOTALES SUELO INICIO LECHUGA							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	472	22915	10	142	116	0	0	21
CLAN D1	448	21384	0	128	192	10	1	0
CLAN D2	401	19813	0	77	152	13	0	0
MDS +/-	<b>36</b>	<b>1551</b>	<b>6</b>	<b>34</b>	<b>38</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>12</b>

**Tabla 4.3.1.2.** Metales pesados totales en el suelo al inicio del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS TOTALES SUELO INICIO MELÓN (SIN RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	456	14888	109	179	183	46	0	45
CLAN D1	439	18114	125	178	157	37	0	39
CLAN D2	458	15718	103	194	105	36	0	44
CONTROL	434	13999	129	206	107	29	0	68
MDS +/-	<b>12</b>	<b>1768</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>38</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>13</b>

**Tabla 4.3.1.3.** Metales pesados totales en el suelo al final del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS TOTALES SUELO FINAL MELÓN (SIN RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	443	77433	37	231	111	22	0	5
CLAN D1	439	80890	55	218	74	16	0	0
CLAN D2	399	87942	55	188	107	16	0	0
CONTROL	413	78926	129	218	75	16	0	0
MDS +/-	<b>21</b>	<b>4650</b>	<b>41</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>3</b>

**Tabla 4.3.1.4.** Metales pesados totales en el suelo al inicio del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS TOTALES SUELO INICIO MELÓN (CON RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	453	16249	87	258	348	50	0	17
CLAN D1	453	18404	94	252	289	38	0	14
CLAN D2	443	17258	92	210	368	43	0	9
CONTROL	434	13999	96	217	107	29	0	68
MDS +/-	<b>9</b>	<b>1872</b>	<b>4</b>	<b>24</b>	<b>119</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>28</b>

**Tabla 4.3.1.5.** Metales pesados en el suelo al final del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS TOTALES SUELO FINAL MELÓN (CON RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	443	76009	134	236	112	31	0	0
CLAN D1	404	71449	147	158	74	21	0	0
CLAN D2	313	77497	121	157	102	19	0	0
CONTROL	413	78926	105	194	75	16	0	0
MDS +/-	<b>56</b>	<b>3241</b>	<b>18</b>	<b>37</b>	<b>19</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

*Comparando los datos obtenidos sobre los metales pesados con los valores límite impuestos en el Real Decreto 1310/1990 de 29 de octubre, en donde se recogen los valores máximos de metales pesados permitidos en suelos de uso agrícola, se puede decir que en nuestros suelos la concentración de metales pesados está por debajo de los valores impuestos.*

*En el cultivo de la lechuga y en el melón cuando no se renueva el abono, la tendencia de los metales pesados es a disminuir la concentración al finalizar la cosecha. Esto demuestra el poder depurador del suelo y su capacidad para diluir y complejar los metales pesados. La excepción a esta tendencia la dan el Pb, que mantiene su concentración e incluso tiende a aumentar ligeramente, y el Fe, cuya concentración aumenta notablemente al final del cultivo.*

*La concentración de metales pesados en el terreno cuando se renueva el abono es muy similar a cuando no se lleva a cabo esta renovación. Si bien, la tendencia a disminuir la concentración de metales pesados parece ser ligeramente menos acusada. Además, la concentración de Cr aumenta al final de la cosecha, por lo que la concentración de este elemento no sólo no se reduce al final del cultivo, sino que se incrementa.*

*La concentración de metales pesados en el suelo tiende a ser menor cuando se abona con compost que cuando se abona con lodo fresco sin compostar. Eso se puede deber a la acción diluyente del agente estructurante (serrín).*

#### - **METALES PESADOS EXTRAÍBLES**

El ácido dietilentriaminopentacético (DTPA) es un agente quelante que extrae la fracción de metales considerada como potencialmente disponible para las plantas (*Lindsay and Norvell, 1978*).

*García et al (1997)* encontraron que el compostaje hacia menos asimilables a algunos metales pesados por la planta, durante el proceso de compostaje conlleva a una complejación de dichos metales. Esto hace considerar a los compost como positivos, ya que debido a esa complejación metálica, se impide que los metales pesados pasen a la planta, con su correspondiente peligro. No obstante hay que aclarar que nunca deberá ser utilizado, para su compostaje y posterior adicción al suelo, un residuo orgánico que posea un contenido metálico elevado.

**Tabla 4.3.1.6.** Metales extraíbles en el suelo al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	METALES PESADOS EXTRAÍBLES SUELO INICIO LECHUGA							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	203	48	0	106	28	0	0	0
CLAN D1	125	65	0	88	27	0	0	0
CLAN D2	304	50	0	73	38	0	0	0
CONTROL	62	6	0	24	11	0	0	0
MDS +/-	<b>104</b>	<b>25</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tabla 4.3.1.7.** Metales extraíbles en el suelo al inicio del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS EXTRAÍBLES SUELO INICIO MELÓN (SIN RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	112	12	9	63	19	1	0	0
CLAN D1	137	14	9	73	15	0	0	0
CLAN D2	99	14	11	65	16	0	0	0
CONTROL	62	5	0	114	10	0	0	0
MDS +/-	<b>31</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>24</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tabla 4.3.1.8.** Metales pesados extraíbles en el suelo al final del cultivo del melón (sin renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS EXTRAÍBLES SUELO FINAL MELÓN (SIN RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	99	24	1	87	19	0	0	0
CLAN D1	103	37	6	81	15	0	0	0
CLAN D2	131	47	0	84	16	0	0	0
CONTROL	75	14	0	89	10	0	0	0
MDS +/-	<b>23</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tabla 4.3.1.9.** Metales pesados extraíbles en el suelo al inicio del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS EXTRAÍBLES SUELO INICIO MELÓN (CON RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	140	24	1	90	18	0	0	0
CLAN D1	275	70	0	107	30	0	0	0
CLAN D2	176	35	0	103	27	0	0	0
CONTROL	62	5	0	117	5	0	0	0
MDS +/-	<b>88</b>	<b>27</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tabla 4.3.1.10.** Metales pesados extraíbles en el suelo al final del cultivo del melón (con renovación de abono)

MUESTRAS	METALES PESADOS EXTRAÍBLES SUELO FINAL MELÓN (CON RENOVACIÓN)							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	83	26	3	89	17	1	0	0
CLAN D1	101	43	5	85	18	0	0	0
CLAN D2	102	39	5	88	16	0	0	0
CONTROL	70	13	0	89	10	0	0	0
MDS +/-	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

La concentración de metales extraíbles también se encuentra dentro de la legalidad marcada por el Real Decreto 1310/1990. En este caso la tendencia es la misma que en los metales pesados totales. Es decir, cuando no se renueva el abono, la concentración de metales pesados tiende a disminuir en todos los casos. Sin embargo, cuando se renueva el abono, esta disminución es menos acusada, incluso tiende a aumentar ligeramente en el caso del Fe, Cr, y Cu.

## - METALES PESADOS EN LA MATERIA VEGETAL

Es importante conseguir que la concentración de metales pesados en los alimentos sea lo más baja posible, debido a la extrema peligrosidad de algunos de estos metales, como se ha dicho anteriormente.

El principal problema que ocasionan los metales pesados en el organismo, además de la elevada toxicidad de algunos de ellos, es su bioacumulación en el organismo, por lo que no se pueden eliminar.

Una muestra de la peligrosidad de los alimentos contaminados por metales pesados, es la enfermedad de Minamata, ocasionada por la contaminación por mercurio del pescado y el marisco en esta ciudad de Japón. Las consecuencias de esta contaminación fue la muerte de centenares de personas y miles de afectados.

**Tabla 4.3.1.11.** Metales pesados en la materia vegetal en el cultivo de la lechuga

MUESTRAS	METALES PESADOS MATERIA VEGETAL LECHUGA							
	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Ni (ppm)
LAN	81	240	0	106	50	0	0	0
CLAN D1	82	250	0	88	87	0	0	0
CLAN D2	85	256	0	73	49	0	0	0
CONTROL	62	222	0	24	57	0	0	0
MDS +/-	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

*La concentración de metales pesados en la materia vegetal en el cultivo del melón no era detectable. Mientras, la concentración de metales pesados en la materia vegetal en el cultivo de la lechuga, como muestra la **Tabla 4.3.12** se encuentra dentro de los límites permitidos por la reglamentación.*

*El hecho de que en el cultivo del melón, la concentración de metales pesados en el fruto no fuera detectable, vuelve a demostrar el poder depurativo del suelo, ya que inicialmente se llevó a cabo el cultivo de la lechuga y posteriormente el del melón.*

### 4.3.2. NITRÓGENO

El nitrógeno es el elemento fundamental para conseguir el adecuado desarrollo de cualquier cultivo, pudiendo ser absorbido por la planta bajo la forma nítrica o amónica, siendo predominante en el suelo la primera de ellas. Las formas típicamente orgánicas tienen que mineralizarse para ponerlo en forma asimilable por los vegetales.

La capacidad de cualquier enmendante orgánico para suministrar nitrógeno no sólo está condicionada por la cantidad de nitrógeno total y su tasa de mineralización, sino también por las pérdidas de este elemento por volatilización, desnitrificación, lixiviación y diversos procesos de inmovilización que pueden darse en el medio (*Hutchings, 1985*). Los lodos debido a su carácter proteico se caracterizan por su alto contenido en nitrógeno frente a otros residuos orgánicos, estando este nitrógeno fundamentalmente en forma orgánica (*Moreno, 1985*).

**Tabla 4.3.2.1.** Nitrógeno total al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	NITRÓGENO TOTAL SUELO INICIO LECHUGA (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.014	0.084	0.084	<b>0.061</b>	<b>0.040</b>
CLAN-D1	0.280	0.140	0.114	<b>0.178</b>	<b>0.089</b>
CLAN-D2	0.070	0.110	0.110	<b>0.097</b>	<b>0.023</b>
CONTROL	0.240	0.230	0.270	<b>0.247</b>	<b>0.021</b>

**Tabla 4.3.2.2.** Nitrógeno amónico al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	NITRÓGENO AMÓNICO SUELO INICIO LECHUGA (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.004	0.007	0.004	<b>0.005</b>	<b>0.002</b>
CLAN-D1	0.004	0,004	0.007	<b>0,005</b>	<b>0.002</b>
CLAN-D2	0.004	0.004	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.000</b>
CONTROL	0.007	0.007	0.007	<b>0.007</b>	<b>0.000</b>

Tabla 4.3.2.3. Nitrógeno nítrico al inicio del cultivo de la lechuga

MUESTRAS	NITRÓGENO NÍTRICO SUELO INICIO LECHUGA (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.072	0.072	0.072	<b>0.072</b>	<b>0.000</b>
CLAN-D1	0.263	0.092	0.094	<b>0.150</b>	<b>0.098</b>
CLAN-D2	0.101	0.089	0.086	<b>0.092</b>	<b>0.008</b>
CONTROL	0.058	0.053	0.057	<b>0.056</b>	<b>0.003</b>

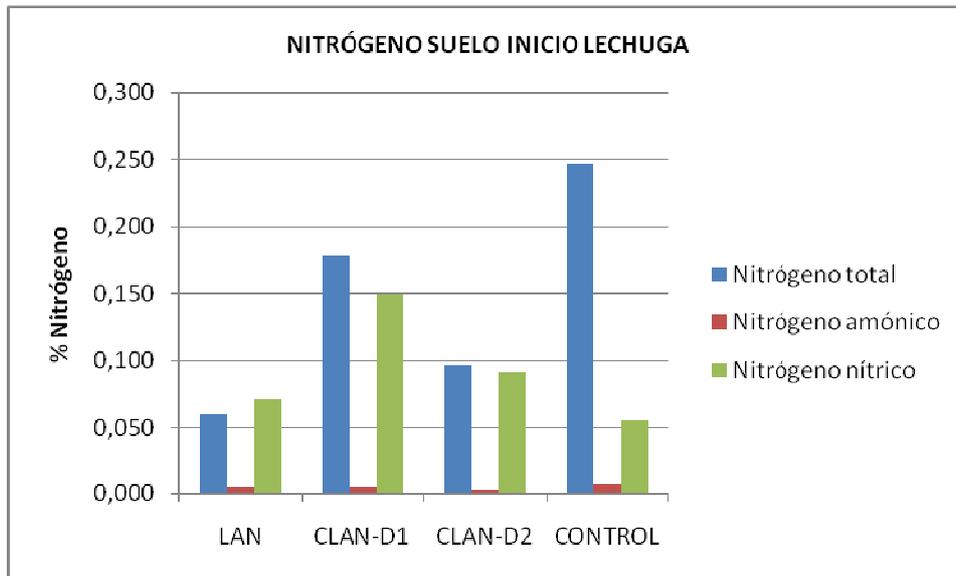


Figura 4.3.2.1. Nitrógeno en el suelo al inicio del cultivo de la lechuga

Tabla 4.3.2.4. Nitrógeno total suelo inicio melón sin renovación de abono

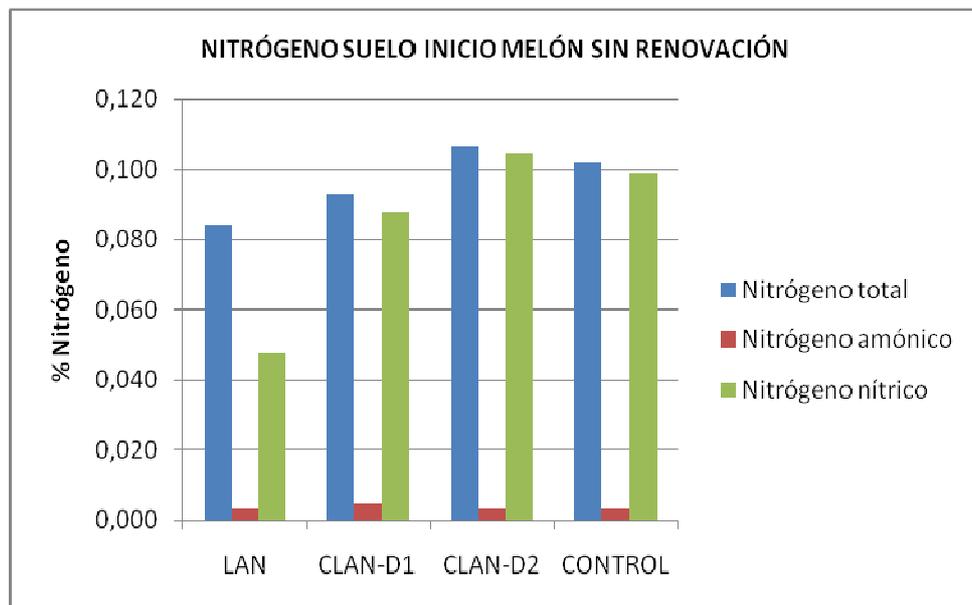
MUESTRAS	NITRÓGENO TOTAL SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.114	0.056	0.083	<b>0.084</b>	<b>0.029</b>
CLAN-D1	0.098	0.084	0.097	<b>0.093</b>	<b>0.008</b>
CLAN-D2	0.125	0.084	0.111	<b>0.107</b>	<b>0.021</b>
CONTROL	0.097	0.111	0.098	<b>0.102</b>	<b>0.008</b>

**Tabla 4.3.2.5.** Nitrógeno amónico suelo inicio melón sin renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO AMÓNICO SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.002	0.004	0.004	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
CLAN-D1	0.007	0.004	0.004	<b>0.005</b>	<b>0.002</b>
CLAN-D2	0.004	0.002	0.004	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
CONTROL	0.002	0.004	0.004	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>

**Tabla 4.3.2.6.** Nitrógeno nítrico suelo inicio melón sin renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO NÍTRICO SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.012	0.052	0.079	<b>0.048</b>	<b>0.034</b>
CLAN-D1	0.090	0.080	0.093	<b>0.088</b>	<b>0.007</b>
CLAN-D2	0.122	0.081	0.111	<b>0.105</b>	<b>0.021</b>
CONTROL	0.095	0.108	0.094	<b>0.099</b>	<b>0.008</b>



**Figura 4.3.2.2.** Nitrógeno suelo inicio melón sin renovación

Tabla 4.3.2.7. Nitrógeno total suelo final melón sin renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO TOTAL SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.153	0.126	0.126	<b>0.135</b>	<b>0.016</b>
CLAN-D1	0.112	0.112	0.091	<b>0.105</b>	<b>0.012</b>
CLAN-D2	0.139	0.126	0.140	<b>0.135</b>	<b>0.008</b>
CONTROL	0.126	0.125	0.097	<b>0.116</b>	<b>0.016</b>

Tabla 4.3.2.8. Nitrógeno amónico suelo final melón sin renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO AMÓNICO SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.004	0.004	0.002	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
CLAN-D1	0.004	0.002	0.004	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
CLAN-D2	0.004	0.004	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.000</b>
CONTROL	0.004	0.004	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.000</b>

Tabla 4.3.2.9. Nitrógeno nítrico suelo final melón sin renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO NÍTRICO SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.150	0.122	0.124	<b>0.132</b>	<b>0.016</b>
CLAN-D1	0.107	0.110	0.086	<b>0.101</b>	<b>0.013</b>
CLAN-D2	0.136	0.122	0.136	<b>0.131</b>	<b>0.008</b>
CONTROL	0.122	0.121	0.093	<b>0.112</b>	<b>0.016</b>

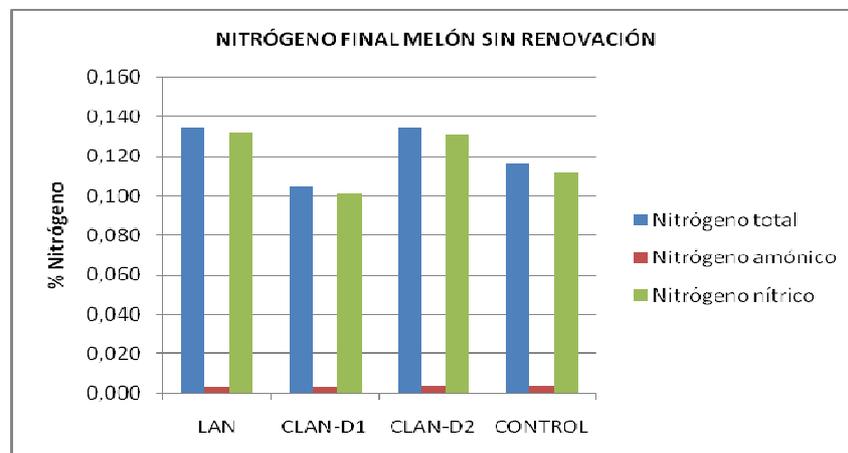


Figura 4.3.2.3. Nitrógeno suelo final melón sin renovación de abono

**Tabla 4.3.2.10.** Nitrógeno total suelo inicio melón con renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO TOTAL SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.098	0.125	0.085	<b>0.103</b>	<b>0.020</b>
CLAN-D1	0.112	0.112	0.112	<b>0.112</b>	<b>0.000</b>
CLAN-D2	0.157	0.118	0.154	<b>0.143</b>	<b>0.022</b>
CONTROL	0.070	0.098	0.098	<b>0.089</b>	<b>0.016</b>

**Tabla 4.3.2.11.** Nitrógeno amónico suelo inicio melón con renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO AMÓNICO SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.004	0.004	0.001	<b>0.003</b>	<b>0.002</b>
CLAN-D1	0.002	0.007	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>
CLAN-D2	0.004	0.007	0.002	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>
CONTROL	0.002	0.004	0.004	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>

**Tabla 4.3.2.12.** Nitrógeno nítrico suelo inicio melón con renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO NÍTRICO SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.088	0.083	0.073	<b>0.081</b>	<b>0.008</b>
CLAN-D1	0.089	0.098	0.098	<b>0.095</b>	<b>0.005</b>
CLAN-D2	0.090	0.110	0.084	<b>0.095</b>	<b>0.014</b>
CONTROL	0.058	0.052	0.051	<b>0.054</b>	<b>0.004</b>

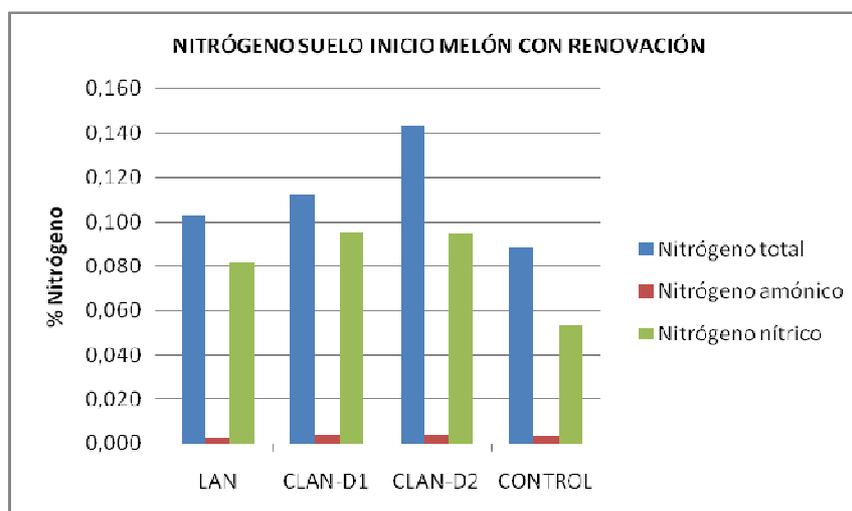
**Figura 4.3.2.4.** Nitrógeno suelo inicio melón con renovación de abono

Tabla 4.3.2.13. Nitrógeno total suelo final melón con renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO TOTAL SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.097	0.125	0.112	<b>0.111</b>	<b>0.014</b>
CLAN-D1	0.112	0.111	0.111	<b>0.111</b>	<b>0.001</b>
CLAN-D2	0.111	0.153	0.084	<b>0.116</b>	<b>0.035</b>
CONTROL	0.126	0.125	0.097	<b>0.116</b>	<b>0.016</b>

Tabla 4.3.2.14. Nitrógeno amónico suelo final melón con renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO AMÓNICO SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.004	0.004	0.002	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
CLAN-D1	0.007	0.002	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>
CLAN-D2	0.004	0.004	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.000</b>
CONTROL	0.004	0.004	0.004	<b>0.004</b>	<b>0.000</b>

Tabla 4.3.2.15. Nitrógeno nítrico suelo final melón con renovación de abono

MUESTRAS	NITRÓGENO NÍTRICO SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	0.094	0.121	0.110	<b>0.108</b>	<b>0.014</b>
CLAN-D1	0.105	0.109	0.108	<b>0.107</b>	<b>0.002</b>
CLAN-D2	0.108	0.150	0.080	<b>0.113</b>	<b>0.035</b>
CONTROL	0.122	0.121	0.094	<b>0.112</b>	<b>0.016</b>

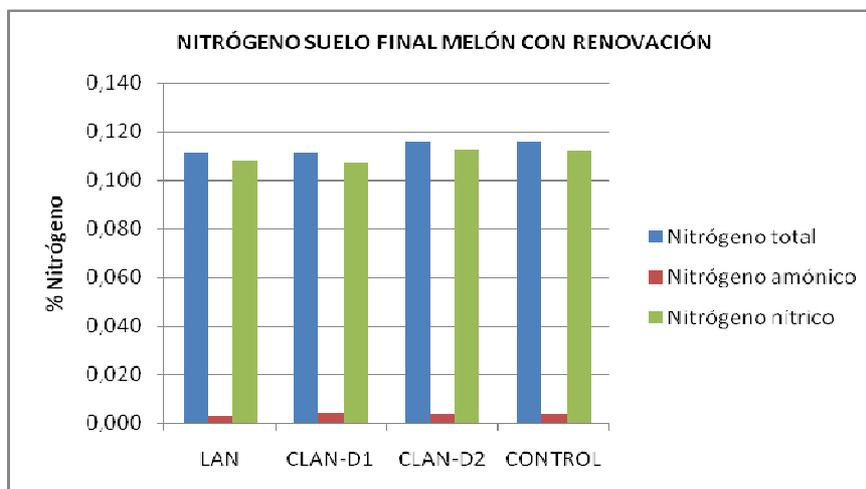


Figura 4.3.2.5. Nitrógeno suelo final melón con renovación de abono

*Analizando los datos anteriores se puede concluir que el contenido en nitrógeno de los enmendantes orgánicos empleados es correcto para el desarrollo de los cultivos vegetales, ya que las pérdidas de nitrógeno por volatilización, desnitrificación o lixiviación no se producen de manera destacada. Es más, la tendencia del contenido en nitrógeno en el suelo es a aumentar a lo largo del cultivo. Este aumento del contenido en nitrógeno durante los cultivos se debe a las bajas pérdidas de nitrógeno inorgánico (Contreras et al., 2004), y biodegradación de la materia orgánica contenida en los enmendantes que conlleva una pérdida de peso y una concentración de los materiales (Kapetanios et al., 1993). Otro aspecto importante que refuerza la hipótesis de que las pérdidas por volatilización del nitrógeno son muy bajas, es que las parcelas que parecen presentar un menor contenido en nitrógeno total son las abonadas con los lodos sin compostar, mientras que en los lodos compostados el contenido en nitrógeno es mayor. Esto demuestra que durante el compostaje y durante la aplicación de los enmendantes al suelo se produce una concentración del nitrógeno ocasionada por la biodegradación de la materia orgánica.*

*El mayor contenido en nitrógeno total suele aparecer en las parcelas abonadas con el compost anaerobio en la dosis más alta 4 kg/m<sup>2</sup>, si bien las diferencias con el resto de materiales no suele superar el 0.01-0.02 % de diferencia. Esto demuestra que no es necesario emplear una dosis tan elevada de compost para satisfacer los requerimientos nutricionales de las plantas ensayadas, ya que con la mitad de dosis se consiguen resultados muy parecidos.*

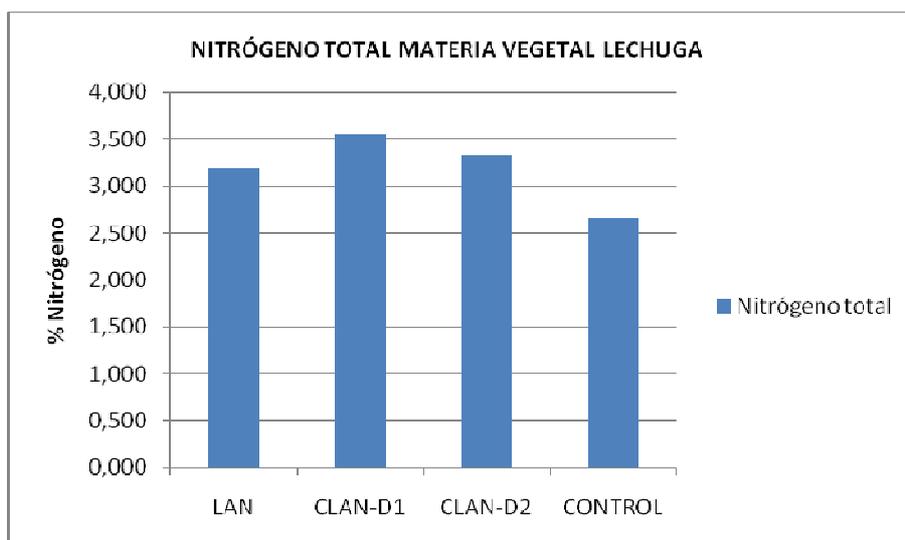
*El efecto de renovar el abono no parece traducirse en un mayor contenido en nitrógeno en el suelo al final del cultivo, ya que los resultados obtenidos al renovar el abono y cuando no se renueva el abono son muy parecidos.*

*Otra conclusión importante la podemos extraer al observar los resultados obtenidos en las parcelas abonadas con el fertilizante inorgánico y las abonadas con los enmendantes orgánicos. Al comparar los datos, se ve como los resultados obtenidos con los enmendantes orgánicos son muy parecidos a los conseguidos con el fertilizante*

inorgánico. Esto demuestra que el poder nutricional de los enmendantes orgánicos es comparable con el conseguido al utilizar un fertilizante inorgánico.

**Tabla 4.3.2.16.** Nitrógeno total materia vegetal lechuga

MUESTRAS	NITRÓGENO TOTAL MATERIA VEGETAL LECHUGA (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media nitrógeno	MDS +/-
LAN	3.550	3.090	2.940	<b>3.193</b>	<b>0.318</b>
CLAN-D1	3.600	3.560	3.510	<b>3.557</b>	<b>0.045</b>
CLAN-D2	3.060	3.540	3.350	<b>3.317</b>	<b>0.242</b>
CONTROL	2.950	2.640	2.370	<b>2.653</b>	<b>0.290</b>



**Figura 4.3.2.6.** Nitrógeno total materia vegetal lechuga

En cuanto al contenido en nitrógeno en la materia vegetal de la lechuga, los valores obtenidos se sitúan entre un 3.3-3.5 %, valores que son notablemente superiores a los obtenidos en los análisis de las parcelas. Esto demuestra la absorción del nitrógeno contenido en el suelo por parte de los vegetales para su utilización como nutriente. Un aspecto muy interesante que se aprecia al analizar la gráfica es que el contenido en nitrógeno en las lechugas es mayor en aquellas cultivadas en parcelas abonadas con los enmendantes orgánicos que aquellas abonadas con el fertilizante

*inorgánico. Esto puede demostrar que las lechugas absorben mejor el nitrógeno contenido en los enmendantes orgánicos que en el fertilizante inorgánico.*

#### **4.3.3. FÓSFORO TOTAL**

El fósforo desempeña un papel fundamental en los procesos de multiplicación celular y contribuye de manera insustituible a la formación de los tejidos vegetales. La forma en la que es absorbido por las plantas, es fundamentalmente como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y en menor proporción como  $\text{HPO}_4^{2-}$ , por ello, es necesaria la mineralización de las formas orgánicas de fósforo a otras asimilables por las plantas (*Moreno, 1995*).

En el caso del fosforo, además de las pequeñas pérdidas por lixiviación y de las cantidades extraídas por las cosechas, una parte notable de este elemento se pierde también por fenómenos de erosión. En estos fenómenos de erosión pueden ser arrastradas las fracciones más ricas en fósforo, como son las arcillas, y la materia orgánica. Para un adecuado manejo agrícola de los lodos como bioenmendantes del suelo, es importante conocer el fósforo contenido para evitar la contaminación por este elemento de las aguas superficiales.

La adición de los lodos a los suelos incrementa el contenido total de fosforo en las capas superiores de estos, pero dada la cinética de este elemento en el medio agrícola, interesa más bien conocer su asimilabilidad que su cantidad total. Tal asimilabilidad viene determinada, además de por características propias del suelo como su pH, por los procedimientos a que los lodos fueron sometidos durante su obtención.

## - FÓSFORO EN EL SUELO

**Tabla 4.3.3.1.** Fósforo en el suelo al inicio del cultivo de la lechuga

<b>FÓSFORO SUELO INICIO LECHUGA</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	6.79	<b>5.60</b>	<b>1.03</b>
	5.00		
	5.01		
<b>CLAN D1</b>	3.82	<b>4.26</b>	<b>0.66</b>
	5.02		
	3.94		
<b>CLAN D2</b>	3.93	<b>4.43</b>	<b>0.46</b>
	4.85		
	4.50		
<b>CONTROL</b>	4.16	<b>4.46</b>	<b>0.28</b>
	4.50		
	4.72		

**Tabla 4.3.3.2.** Fósforo en el suelo al inicio del cultivo del melón (sin renovación de abono)

<b>FÓSFORO SUELO INICIO MELÓN (SIN RENOVACIÓN DE ABONO)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	5.96	<b>5.19</b>	<b>0.71</b>
	4.57		
	5.03		
<b>CLAN D1</b>	5.14	<b>5.57</b>	<b>0.61</b>
	6.26		
	5.30		
<b>CLAN D2</b>	4.89	<b>5.73</b>	<b>0.91</b>
	6.70		
	5.60		
<b>CONTROL</b>	5.54	<b>5.61</b>	<b>0.65</b>
	4.99		
	6.29		

**Tabla 4.3.3.3.** Fósforo en el suelo al final del cultivo del melón (sin renovación de abono)

<b>FÓSFORO SUELO FINAL MELÓN (SIN RENOVACIÓN DE ABONO)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	2.25	<b>2.27</b>	<b>0.11</b>
	2.18		
	2.39		
<b>CLAN D1</b>	2.43	<b>2.40</b>	<b>0.09</b>
	2.48		
	2.30		
<b>CLAN D2</b>	1.88	<b>2.47</b>	<b>0.95</b>
	1.96		
	3.56		
<b>CONTROL</b>	1.38	<b>0.73</b>	<b>0.57</b>
	0.42		
	0.38		

**Tabla 4.3.3.4.** Fósforo en el suelo al inicio del cultivo del melón (con renovación de abono)

<b>FÓSFORO SUELO INICIO MELÓN (CON RENOVACIÓN DE ABONO)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	4.78	<b>5.46</b>	<b>0.69</b>
	6.15		
	5.44		
<b>CLAN D1</b>	5.92	<b>5.82</b>	<b>0.47</b>
	5.30		
	6.23		
<b>CLAN D2</b>	6.01	<b>5.98</b>	<b>0.48</b>
	5.48		
	6.44		
<b>CONTROL</b>	5.60	<b>5.54</b>	<b>0.49</b>
	5.02		
	5.99		

**Tabla 4.3.3.5.** Fósforo en el suelo al final del cultivo del melón (con renovación de abono)

<b>FÓSFORO SUELO FINAL MELÓN (CON RENOVACIÓN DE ABONO)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	1.57	<b>1.69</b>	<b>0.23</b>
	1.96		
	1.55		
<b>CLAN D1</b>	0.84	<b>1.06</b>	<b>1.09</b>
	0.10		
	2.25		
<b>CLAN D2</b>	0.84	<b>1.40</b>	<b>0.51</b>
	1.85		
	1.51		
<b>CONTROL</b>	1.15	<b>1.15</b>	<b>0.03</b>
	1.12		
	1.18		

*Tal y como se puede apreciar, al inicio de los cultivos el porcentaje de fósforo en el suelo es superior con respecto al final. Esto se debe a que el fósforo es un nutriente utilizado por los vegetales para su crecimiento, por lo que va disminuyendo su concentración con el tiempo. En el caso de la lechuga, el contenido en fósforo al principio ronda el 4.5 %. Mientras, durante el cultivo del melón, el porcentaje de fósforo en el suelo comienza siendo del 6 % aproximadamente.*

*Una cuestión importante es que el contenido en fósforo al final de los cultivos tiende a ser mayor en las parcelas abonadas con los lodos, tanto compostados como sin compostar. Esto permite una mayor disponibilidad de este nutriente a los organismos vegetales en comparación a la ofrecida con el fertilizante inorgánico. Además, el hecho de utilizar la dosis de compost más elevada permite un mayor contenido en fósforo al final del cultivo, si bien las diferencias no son demasiado importantes. Sin embargo, el hecho de renovar el abono durante el cultivo no parece traducirse en un mayor contenido en fósforo en el suelo tras la cosecha.*

## - FÓSFORO EN LA MATERIA VEGETAL

**Tabla 4.3.3.6.** Fósforo en la materia vegetal en el cultivo de la lechuga

<b>FÓSFORO MATERIA VEGETAL LECHUGA</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	23.58	<b>22.46</b>	<b>2.30</b>
	19.82		
	23.98		
<b>CLAN D1</b>	18.73	<b>18.34</b>	<b>1.66</b>
	19.77		
	16.52		
<b>CLAN D2</b>	21.39	<b>19.56</b>	<b>1.92</b>
	19.73		
	17.56		
<b>CONTROL</b>	22.75	<b>18.98</b>	<b>3.48</b>
	15.89		
	18.31		

**Tabla 4.3.3.7.** Fósforo en la materia vegetal en el cultivo del melón (sin renovación de abono)

<b>FÓSFORO MATERIA VEGETAL MELÓN (SIN RENOVACIÓN)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	0	<b>0.78</b>	<b>0.70</b>
	0.99		
	1.36		
<b>CLAN D1</b>	1.91	<b>1.24</b>	<b>1.07</b>
	0		
	1.80		
<b>CLAN D2</b>	0.70	<b>0.90</b>	<b>0.19</b>
	1.08		
	0.92		
<b>CONTROL</b>	2.80	<b>2.88</b>	<b>0.24</b>
	2.70		
	3.15		

**Tabla 4.3.3.8.** Fósforo en la materia vegetal en el cultivo del melón (con renovación de abono)

<b>FÓSFORO MATERIA VEGETAL MELÓN (CON RENOVACIÓN)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>% Fósforo/parcela (w/w)</b>	<b>Media % Fósforo (w/w)</b>	<b>MDS +/-</b>
<b>LAN</b>	0	<b>0.73</b>	<b>0.66</b>
	1.30		
	0.88		
<b>CLAN D1</b>	0.58	<b>0.75</b>	<b>0.85</b>
	0		
	1.68		
<b>CLAN D2</b>	2.73	<b>2.95</b>	<b>0.88</b>
	2.20		
	3.91		
<b>CONTROL</b>	3.12	<b>3.02</b>	<b>0.19</b>
	2.80		
	3.15		

#### **4.3.4. POTASIO TOTAL**

El potasio también es un elemento esencial para las plantas e interviene en numerosos procesos biológicos. En los compost la mayor parte de este elemento se encuentra en forma asimilable, principalmente como cloruros y sulfatos. El contenido de este elemento en los lodos no suele ser suficiente para la correcta nutrición de las plantas, por lo que normalmente es necesario un suministro adicional de potasio a través de fertilizaciones inorgánicas (*Moral et al., 1993*), cuando se utilizan con fines agrícolas.

Cuando los suelos tienen un alto contenido en arcillas, no es probable que la adición de lodos o compost de lodos produzca deficiencias de potasio, especialmente si estos se añaden en estado líquido. Por otra parte hay que tener en cuenta que un exceso de potasio reduce la asimilación de magnesio por las plantas.

**Tabla 4.3.4.1.** Potasio total en el suelo al inicio de la lechuga

MUESTRAS	POTASIO TOTAL SUELO INICIO LECHUGA (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media potasio	MDS +/-
LAN	623.7	618.7	646.8	<b>629.7</b>	<b>15.0</b>
CLAN-D1	542.7	506.3	568.4	<b>539.1</b>	<b>31.2</b>
CLAN-D2	653.9	645.8	661.5	<b>653.7</b>	<b>7.9</b>
CONTROL	567.8	567.8	567.8	<b>567.8</b>	<b>0.0</b>

**Tabla 4.3.4.2.** Potasio en el suelo al final de la lechuga

MUESTRAS	POTASIO TOTAL SUELO FINAL LECHUGA (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media potasio	MDS +/-
LAN	470.9	402.7	541.5	<b>471.7</b>	<b>69.4</b>
CLAN-D1	548.6	470.5	483.5	<b>500.9</b>	<b>41.8</b>
CLAN-D2	541.2	474.2	415.8	<b>477.1</b>	<b>62.7</b>
CONTROL	442.3	467.7	494.8	<b>468.3</b>	<b>26.3</b>

**Tabla 4.3.4.3.** Potasio total suelo inicio del melón (sin renovación)

MUESTRAS	POTASIO TOTAL SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media potasio	MDS +/-
LAN	447.1	551.5	544.6	<b>514.4</b>	<b>58.4</b>
CLAN-D1	536.5	523.6	621.4	<b>560.5</b>	<b>53.1</b>
CLAN-D2	533.7	518.5	600.7	<b>551.0</b>	<b>43.7</b>
CONTROL	592.9	556.3	516.5	<b>555.2</b>	<b>38.2</b>

**Tabla 4.3.4.4.** Potasio total suelo final del melón (sin renovación)

MUESTRAS	POTASIO TOTAL SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media potasio	MDS +/-
LAN	593.4	655.3	643.4	<b>630.7</b>	<b>32.8</b>
CLAN-D1	414.0	451.6	546.3	<b>470.6</b>	<b>68.2</b>
CLAN-D2	525.2	667.1	459.4	<b>550.6</b>	<b>106.1</b>
CONTROL	592.9	556.3	516.5	<b>555.2</b>	<b>38.2</b>

**Tabla 4.3.4.5.** Potasio total suelo inicio del melón (con renovación)

MUESTRAS	POTASIO TOTAL SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media potasio	MDS +/-
LAN	576.1	650.8	705.5	<b>644.1</b>	<b>65.0</b>
CLAN-D1	547.8	532.7	528.9	<b>536.5</b>	<b>10.0</b>
CLAN-D2	575.9	586.6	488.2	<b>550.2</b>	<b>54.0</b>
CONTROL	533.6	475.4	573.3	<b>527.4</b>	<b>49.2</b>

**Tabla 4.3.4.6.** Potasio total suelo final del melón (con renovación)

MUESTRAS	POTASIO TOTAL SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media potasio	MDS +/-
LAN	421.3	517.6	620.7	<b>519.9</b>	<b>99.7</b>
CLAN-D1	496.3	597.3	582.0	<b>558.5</b>	<b>54.4</b>
CLAN-D2	551.1	629.7	562.8	<b>581.2</b>	<b>42.4</b>
CONTROL	533.6	475.4	573.3	<b>527.4</b>	<b>49.2</b>

*En definitiva, durante el cultivo de la lechuga se observa como los valores de potasio total en el suelo son menores al final del cultivo que al principio. Esto demuestra la absorción de este nutriente por parte de la planta. Se observa que las parcelas abonadas con el lodo sin compostar y con el compost en dosis alta presentan un mayor contenido en potasio al inicio del cultivo, además de presentar una mayor reducción del contenido en potasio al final del cultivo. Esto puede deberse a que las plantas absorben una mayor cantidad de este nutriente cuando su disposición es más elevada. En general, parece observarse que el material que presenta un mayor contenido en potasio es el lodo sin compostar.*

*Se podría decir que los compost analizados tienen “un cierto carácter fertilizante”, con la ventaja frente a los fertilizantes inorgánicos que, al estar incorporados en su materia orgánica, la liberación de dichos nutrientes es lenta*

(Ayuso *et al.*, 1996). Este factor hay que considerarlo positivo a la hora de evaluar la eficacia de estas enmiendas para favorecer la fertilidad del suelo al que se adicionan.

#### 4.4. CONTENIDO EN CARBONO ORGÁNICO TOTAL EN EL SUELO DURANTE LOS CULTIVOS

Uno de los aspectos de mayor interés cuando se estudia la aplicación en el suelo de materiales orgánicos, como en este caso son los lodos de depuradora, son las fracciones de carbono, ya que no hay que olvidar que es precisamente el contenido en materia orgánica lo que permite considerar a estos productos como enmiendantes orgánicos de los suelos.

Las fracciones lábiles son aquellas que los microorganismos pueden emplear como inmediatas fuentes de energía. La presencia de estas fracciones de carbono modifica las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas del suelo.

El carbono orgánico total (COT) comprende todos aquellos compuestos orgánicos susceptibles de ser oxidados, tales como la celulosa, lignina, hemicelulosa, proteínas, ácidos orgánicos, etc., los cuales han sido agrupados como sustancias orgánicas descomponibles. Las enmiendas orgánicas inducen lógicamente, en el suelo un aumento significativo de COT.

**Tabla 4.4.1.** COT en el suelo al inicio de la lechuga

MUESTRAS	COT SUELO INICIO LECHUGA (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media COT	MDS +/-
LAN	2.25	2.25	2.25	2.25	0.00
CLAN-D1	2.70	2.70	2.86	2.76	0.09
CLAN-D2	2.04	1.84	1.94	1.94	0.10
CONTROL	1.21	1.21	1.21	1.21	0.00

**Tabla 4.4.2.** COT en el suelo al final de la lechuga

MUESTRAS	COT SUELO FINAL LECHUGA (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media COT	MDS +/-
LAN	1.29	1.04	1.39	<b>1.24</b>	<b>0.18</b>
CLAN-D1	1.19	1.29	1.29	<b>1.25</b>	<b>0.06</b>
CLAN-D2	1.58	1.49	1.58	<b>1.55</b>	<b>0.06</b>
CONTROL	1.29	1.68	1.29	<b>1.42</b>	<b>0.23</b>

**Tabla 4.4.3.** COT en el suelo al inicio del melón (sin renovación)

MUESTRAS	COT SUELO INICIO MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media COT	MDS +/-
LAN	1.68	1.73	1.48	<b>1.63</b>	<b>0.13</b>
CLAN-D1	1.24	1.29	1.39	<b>1.30</b>	<b>0.08</b>
CLAN-D2	1.48	1.19	1.68	<b>1.45</b>	<b>0.25</b>
CONTROL	2.45	2.45	2.25	<b>2.38</b>	<b>0.12</b>

**Tabla 4.4.4.** COT en el suelo al final del melón (sin renovación)

MUESTRAS	COT SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media COT	MDS +/-
LAN	1.74	2.76	2.25	<b>2.25</b>	<b>0.51</b>
CLAN-D1	1.68	2.04	1.94	<b>1.89</b>	<b>0.18</b>
CLAN-D2	2.09	1.99	2.35	<b>2.14</b>	<b>0.18</b>
CONTROL	2.45	2.45	2.25	<b>2.38</b>	<b>0.12</b>

**Tabla 4.4.5.** COT en el suelo al inicio del melón (con renovación)

MUESTRAS	COT SUELO INICIO MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media COT	MDS +/-
LAN	1.58	1.68	1.44	<b>1.57</b>	<b>0.12</b>
CLAN-D1	1.68	1.39	1.68	<b>1.58</b>	<b>0.17</b>
CLAN-D2	1.93	1.58	2.03	<b>1.85</b>	<b>0.23</b>
CONTROL	1.58	1.58	1.39	<b>1.52</b>	<b>0.11</b>

**Tabla 4.4.6.** COT en el suelo al final del melón (con renovación)

MUESTRAS	COT SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (%)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media COT	MDS +/-
LAN	2.35	2.35	2.35	<b>2.35</b>	<b>0.00</b>
CLAN-D1	2.19	2.45	2.45	<b>2.36</b>	<b>0.15</b>
CLAN-D2	2.60	2.45	2.50	<b>2.52</b>	<b>0.08</b>
CONTROL	1.58	1.58	1.39	<b>1.52</b>	<b>0.11</b>

Como muestran los resultados, el COT presente en el suelo al inicio de los cultivos es superior al valor que tienen en el momento de la recolección. Esto se debe a la biodegradación que ha ido experimentando la materia orgánica presente a lo largo del cultivo. Un aspecto destacable es el hecho de que el COT presente en el suelo al inicio del cultivo de la lechuga es superior al obtenido al inicio del cultivo del melón. Esta observación nos vuelve a confirmar la teoría de que el suelo al inicio del cultivo del melón se encuentra con un cierto grado de biodegradación, la cual se ha ido produciendo a lo largo del cultivo de la lechuga realizado previamente.

El hecho de renovar el abono durante los cultivos se traduce en un aumento en el contenido en COT del suelo con respecto al principio. Además, al emplear una dosis más alta de compost se consigue un mayor contenido en COT al final del cultivo, tal y como era de esperar.

En cualquier caso, el contenido en COT de las parcelas se encuentra siempre por encima del 1.2-1.3 %, valores que son adecuados para cultivos agrícolas teniendo en cuenta las características de nuestros suelos y nuestra climatología. Esto demuestra la capacidad que tienen los enmendantes orgánicos de aumentar los niveles de materia orgánica de nuestros suelos, hasta conseguir niveles adecuados para la realización de cultivos agrícolas.

#### 4.5. ESTUDIO DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

Las sustancias húmicas son parte constituyente de los suelos y están ampliamente distribuidas sobre la superficie de la tierra, tanto en medios terrestres como acuáticos. Aproximadamente entre el 60 – 70% del carbono total del suelo se encuentra en los materiales húmicos (*Griffith et al., 1975*) y por tanto la función que estos desempeñan en el ciclo del carbono, como reserva de este elemento y como fuente principal de CO<sub>2</sub>, es importantísima.

Por otra parte, las sustancias húmicas tienen capacidad de formar complejos, solubles e insolubles en agua, con los iones metálicos e hidróxidos, interaccionando con la fracción mineral y los compuestos orgánicos tales como alcanos, ácidos grasos, dialquilftalatos, pesticidas, etc.

Por tanto, aunque son bien conocidas la importancia y muchas de las propiedades del humus, también puede decirse que falta bastante por conocer acerca de sus orígenes, síntesis, estructura química, reacciones y funciones en, medios acuáticos y terrestres.

De ahí que se considere importante el estudio de los ácidos húmicos de lodos y compost de lodos para obtener una mayor información sobre el comportamiento de estos materiales cuando se incorporan al suelo, y en consiguiente efecto que pueden producir sobre las plantas.

**Tabla 4.5.1.** Sustancias húmicas en suelo al inicio de la lechuga

MUESTRAS	SUSTANCIAS HÚMICAS SUELO INICIO LECHUGA (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media sust. húmicas	MDS +/-
LAN	2754.0	2968.0	3300.0	<b>3007.3</b>	<b>275.1</b>
CLAN-D1	3126.0	3264.0	3144.0	<b>3178.0</b>	<b>75.0</b>
CLAN-D2	2782.0	3030.0	2956.0	<b>2922.7</b>	<b>127.3</b>
CONTROL	2694.0	2382.0	2720.0	<b>2598.7</b>	<b>188.1</b>

**Tabla 4.5.2.** Sustancias húmicas en el suelo final melón (sin renovación)

MUESTRAS	SUSTANCIAS HÚMICAS SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media sust. húmicas	MDS +/-
LAN	3406.0	3006.0	3058.0	<b>3156.7</b>	<b>217.5</b>
CLAN-D1	3732.0	3696.0	2862.0	<b>3430.0</b>	<b>492.2</b>
CLAN-D2	3420.0	2668.0	3586.0	<b>3224.7</b>	<b>489.2</b>
CONTROL	2770.0	2372.0	2738.0	<b>2626.7</b>	<b>221.1</b>

**Tabla 4.5.3.** Sustancias húmicas suelo final melón (con renovación)

MUESTRAS	SUSTANCIAS HÚMICAS SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media sust. húmicas	MDS +/-
LAN	3484.0	2830.0	-	<b>3157.0</b>	<b>462.4</b>
CLAN-D1	2688.0	3358.0	3218.0	<b>3088.0</b>	<b>353.4</b>
CLAN-D2	2732.0	3070.0	3240.0	<b>3014.0</b>	<b>258.6</b>
CONTROL	2770.0	2372.0	2738.0	<b>2626.7</b>	<b>221.1</b>

*Las sustancias húmicas siguen el mismo patrón de comportamiento que el COT, es decir aumentan considerablemente en los suelos donde se aplican enmiendas orgánicas. Sin embargo no se observan diferencias significativas entre las parcelas a las que se le aplica una dosis baja de compost respecto a las que se le aplica una dosis más elevada.*

*Al final de los cultivos, el contenido en sustancias húmicas disminuye ligeramente, aunque en menor proporción que en el caso del COT. Este hecho podría ser debido a que predominan los procesos de mineralización frente a los de humificación.*

#### 4.6. ESTUDIO DEL CARBONO DE BIOMASA MICROBIANA

A pesar de representar un pequeño porcentaje dentro del “pool” de la materia orgánica, los microorganismos son los componentes más activos del mismo. Por definición, son parte del carbono orgánico y del conjunto de nutrientes, se les denomina biomasa microbiana e incluye microorganismos muy diferentes (bacterias, hongos, levaduras, algas, protozoos, etc.).

Según *Paul y Voroney (1989)*, la importancia de la determinación del carbono de biomasa microbiana es debida al papel principal que juegan los microorganismos del suelo en la retención y liberación de nutrientes y energía del sistema. Este parámetro ha sido empleado como bioindicador de los cambios que experimenta la materia orgánica ya que es un índice más sensible que el carbono orgánico total, debido a que en el contenido de éste existe un elevado porcentaje de fracciones muy estables que pueden llegar a enmascarar las alteraciones de aquellas otras más susceptibles de cambio (*Powlson y Jenkinson, 1981*).

La biomasa microbiana responde con gran rapidez a las alteraciones y condiciones stress causadas en el suelo por las actividades antropomórficas, y es por tanto un indicador ecológico muy útil (*Wardle, 1992*).

**Tabla 4.6.1.** Carbono en biomasa en el suelo inicio lechuga

MUESTRAS	CARBONO EN BIOMASA SUELO INICIO LECHUGA (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media carbono	MDS +/-
LAN	7002.7	6994.0	6517.4	<b>6838.0</b>	<b>277.7</b>
CLAN-D1	5317.8	7437.9	5911.1	<b>6222.3</b>	<b>1093.8</b>
CLAN-D2	5011.3	5430.1	5758.4	<b>5399.9</b>	<b>374.5</b>
CONTROL	4658.0	4859.7	5795.5	<b>5104.4</b>	<b>606.9</b>

**Tabla 4.6.2.** Carbono en biomasa en el suelo final melón (sin renovación)

MUESTRAS	CARBONO EN BIOMASA SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media carbono	MDS +/-
LAN	2482.2	2486.6	2901.0	<b>2623.3</b>	<b>240.5</b>
CLAN-D1	7030.1	6478.2	6462.9	<b>6657.0</b>	<b>323.1</b>
CLAN-D2	7325.6	6970.0	6929.7	<b>7075.1</b>	<b>217.8</b>
CONTROL	2396.1	2492.0	1459.3	<b>2115.8</b>	<b>570.6</b>

**Tabla 4.6.3.** Carbono en biomasa en el suelo final melón (con renovación)

MUESTRAS	CARBONO EN BIOMASA SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (ppm)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media carbono	MDS +/-
LAN	6248.1	6212.1	6797.7	<b>6419.3</b>	<b>328.2</b>
CLAN-D1	2368.8	2637.1	3341.6	<b>2782.5</b>	<b>502.4</b>
CLAN-D2	6221.9	6866.4	6485.8	<b>6524.7</b>	<b>324.0</b>
CONTROL	2396.1	2492.0	2459.3	<b>2449.1</b>	<b>48.8</b>

En la **Tabla 4.6.1** se muestran los valores carbono en biomasa obtenidos en los suelos de las diferentes parcelas al inicio del cultivo de lechuga, inmediatamente después de la adición de la enmienda. Como puede observarse, a pesar de que en las parcelas con fertilización inorgánica el aporte de nutrientes directamente utilizables por los microorganismos debe favorecer el desarrollo de la poblaciones microbianas existentes en el suelo, estos suelos muestran al inicio del cultivo menores valores de biomasa microbiana que los suelos tratados con lodos o compost de lodos. Esto es debido a que la enmienda orgánica efectuada aporta al suelo una gran cantidad de microorganismos, al tiempo que favorece el desarrollo de las poblaciones microbianas autóctonas del suelo.

Las parcelas tratadas con lodo fresco, son las que muestran los mayores valores de carbono de biomasa microbiana, lo cual es explicable por el mayor contenido en nutrientes fácilmente utilizables por los microorganismos de estos materiales, que

promoverá un mayor desarrollo de las poblaciones microbianas, tanto de las autóctonas del suelo como de las incorporadas al suelo con el lodo.

Estas diferencias entre los suelos con compost y los que han recibido fertilización inorgánica es aún más patente después del segundo cultivo (melón), mostrando los suelos tratados con lodo o compost de lodo un desarrollo microbiano muy superior al del suelo con fertilización mineral (**Tabla 4.6.2**). Esto pone de relieve que las enmiendas orgánicas estimulan el desarrollo de las poblaciones microbianas mejorando las características microbiológicas del suelo, y que este efecto no es sólo puntual sino que se mantiene durante un cierto tiempo en el suelo.

Es de destacar, como se aprecia en la **Tabla 4.6.3** que la realización de una nueva adición de enmienda, no reporta beneficio alguno en cuanto al incremento de las poblaciones microbianas ya desarrolladas con la primera enmienda, siendo el efecto residual de la primera enmienda suficiente para mantener un alto nivel de desarrollo microbiano tras dos cultivos sucesivos de plantas hortícolas.

Esto es posiblemente debido a que si bien durante el tiempo transcurrido desde la primera enmienda, parte de la materia orgánica añadida se habrá degradado, los exudados radiculares, procedentes del cultivo desarrollado, contribuirán a suministrar energía a las poblaciones microbianas existentes, manteniéndose el tamaño de las mismas.

#### **4.7. ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD DESHIDROGENASA**

La actividad deshidrogenasa es un parámetro que ha sido utilizado como indicador de la actividad metabólica global de los microorganismos.

Se considera que la actividad deshidrogenasa se produce de manera intracelular y que está asociada a procesos respiratorios de los microorganismos. Por ello, se estima que la deshidrogenasa es más dependiente del estado metabólico y de la actividad

biológica en general que cualquiera de las demás enzimas presentes en el suelo. La actividad deshidrogenasa ha sido utilizada como índice de fertilidad (*Skujins, 1976*) y como indicador de la actividad microbiana de los suelos (*Trevors, 1984*), aunque algunos investigadores han criticado esta hipótesis (*Nannipieri et al., 1990; Beyer et al., 1992*). Dada la relación directa existente entre la actividad deshidrogenasa y la actividad microbiana asociada a la degradación inicial de la materia orgánica (*Bolton et al., 1985*), su medida podrá informar de la evolución de la actividad metabólica del suelo al incorporar fracciones orgánicas lábiles con los residuos orgánicos.

**Tabla 4.7.1.** Actividad deshidrogenasa en suelo inicio lechuga

MUESTRAS	ACTIVIDAD DESHIDROGENASA SUELO INICIO LECHUGA (mg INTF/g·h)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media actividad	MDS +/-
LAN	2.900	2.671	3.018	<b>2.863</b>	<b>0.176</b>
CLAN-D1	3.521	3.321	3.259	<b>3.367</b>	<b>0.137</b>
CLAN-D2	2.865	2.911	2.800	<b>2.859</b>	<b>0.056</b>
CONTROL	1.414	1.414	1.238	<b>1.355</b>	<b>0.102</b>

**Tabla 4.7.2.** Actividad deshidrogenasa en suelo final melón (sin renovación)

MUESTRAS	ACTIVIDAD DESHIDROGENASA SUELO FINAL MELÓN SIN RENOVACIÓN (mg INTF/g·h)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media actividad	MDS +/-
LAN	2.149	3.220	3.889	<b>3.086</b>	<b>0.878</b>
CLAN-D1	2.298	3.009	2.570	<b>2.626</b>	<b>0.359</b>
CLAN-D2	3.856	2.997	3.581	<b>3.478</b>	<b>0.439</b>
CONTROL	1.195	1.195	1.537	<b>1.309</b>	<b>0.197</b>

**Tabla 4.7.3.** Actividad deshidrogenasa en suelo final melón (con renovación)

MUESTRAS	ACTIVIDAD DESHIDROGENASA SUELO FINAL MELÓN CON RENOVACIÓN (mg INTF/g·h)				
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Media actividad	MDS +/-
LAN	2.387	3.326	3.362	<b>3.025</b>	<b>0.553</b>
CLAN-D1	2.180	2.957	4.509	<b>3.215</b>	<b>1.186</b>
CLAN-D2	1.628	4.685	3.804	<b>3.372</b>	<b>1.574</b>
CONTROL	1.530	1.530	1.290	<b>1.450</b>	<b>0.139</b>

*Los resultados obtenidos al analizar la actividad deshidrogenasa nos confirman las conclusiones formuladas en los análisis del carbono presente en la biomasa microbiana. Es decir, aunque el fertilizante inorgánico pueda suministrar a los microorganismos una mayor cantidad de nutrientes, la incorporación de estos nutrientes se ralentiza por la pobreza en microorganismos de estos abonos. Esto vuelve a poner de manifiesto que la calidad microbiológica del suelo se ve favorecida con la incorporación de enmiendas orgánicas. De este modo, la actividad deshidrogenasa en las parcelas abonadas con el fertilizante inorgánico es mucho menor que la conseguida en las parcelas abonadas con las enmiendas orgánicas.*

*Además, la incorporación de una dosis más elevada de compost no parece traducirse en un aumento notable de la actividad deshidrogenasa.*



## **5. CONCLUSIONES**



Del presente estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Tanto los lodos frescos, como los compost obtenidos a partir de ellos, pueden ser utilizados como sustitutivos de la fertilización orgánica empleada habitualmente para el cultivo de lechugas y melones sin necesidad de aportar fertilización mineral complementaria, obteniéndose con los materiales orgánicos rendimientos durante los cultivos muy similares a los conseguidos con la fertilización orgánica tradicional. Esto demuestra que el empleo alternativo de enmiendas orgánicas en el suelo puede suponer una considerable reducción de los costes de producción, y al mismo tiempo representa una ventaja medioambiental, pues se consigue dar salida a los lodos obtenidos en la depuración de aguas residuales. Otra ventaja de los materiales orgánicos frente al fertilizante inorgánico es que los nutrientes, al estar incorporados en su materia orgánica, tienen una liberación más lenta, lo que disminuye las pérdidas de los nutrientes y favorece su disponibilidad a lo largo del cultivo.
- El nivel de humedad en el suelo al final de los cultivos suele ser superior en las parcelas abonadas con las enmiendas orgánicas en comparación con las abonadas con el fertilizante inorgánico, especialmente si se emplea la dosis alta de compost y el lodo sin compostar. Esto demuestra que con los enmiendantes orgánicos no sólo se consiguen buenos rendimientos en las cosechas, sino que su adición al suelo mejora las características del mismo, incrementando su capacidad de retención hídrica y el desarrollo y actividad de las poblaciones microbianas.
- Los valores de pH obtenidos al añadir las enmiendas orgánicas y el fertilizante inorgánico sobre el suelo, se encuentran rondando el intervalo 7.5-8.0, valores que quedan dentro del rango permitido indicado por la bibliografía para este tipo de materiales (*Portal, 1986; Pérez et al., 1986; García, 1992; Mena, 2001; El-Housseini et al., 2002*).

- Los valores de conductividad eléctrica se encuentran ligeramente por encima a los valores deseados en todos los casos, si bien no se aprecian efectos fitotóxicos ocasionados por la concentración salina en el suelo. La aportación de compost al suelo en la dosis más (40 t/ha) alta tiende a proporcionar una mayor conductividad eléctrica al suelo en relación a los abonados con la dosis de 20 t/ha.
- El efecto fertilizante de las enmiendas orgánicas utilizadas persiste en el suelo después de un primer cultivo agrícola, quedando el suelo con un buen nivel de nutrientes utilizable por un segundo cultivo. Si bien, lógicamente con el paso del tiempo se va produciendo una progresiva reducción de nutrientes y humedad. Sin embargo, la progresiva biodegradación del suelo que se va produciendo a lo largo de los cultivos, y después de ellos, no obliga a utilizar la dosis más elevada de compost, ni a renovar el compost de manera progresiva durante los cultivos.
- El empleo de lodos no compostados ha dado buenos resultados, si bien su mayor contenido en microorganismos patógenos (*E. Coli* y *Estreptococos fecales*) en relación al compost, desaconseja su utilización por suponer un riesgo para el manipulador.
- El empleo de la dosis más elevada de compost (40 t/ha) supone que al final de los cultivos se consiga una mayor humedad, contenido en nitrógeno total, fósforo y potasio, si bien las diferencias no son lo suficientemente significativas como para obligar a utilizar esta dosis de compost.
- Los niveles de metales pesados presentes en los materiales orgánicos se encuentran dentro de los límites exigidos por la legislación. Durante los cultivos el nivel de metales pesados en el suelo tiende a disminuir, si bien esta disminución es menos acusada cuando se renueva el abono y cuando se emplea una dosis alta de compost. Además, el serrín presente en el compost actúa como diluyente, de ahí que el nivel de metales pesados en el compost sea menor al de los lodos sin compostar.



**ANEXOS**



## D) UTILIZACIÓN DE LODOS EN LA AGRICULTURA

La utilización de los lodos de depuración en el sector agrario está regulada por el **Real Decreto 1310/1990**, de 29 de octubre, que traspone la Directiva del Consejo **86/278/CCE** de 12 de junio de 1986, sobre protección del medio ambiente y, en especial de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura, donde se establecen entre otros los siguientes requisitos:

- *Nivel de tratamiento de los lodos.*
- *Frecuencia de controles de calidad de los lodos y suelos.*
- *Contenido máximo de metales pesados en los lodos.*
- *Contenido máximo de metales pesados en suelos.*
- *Cantidades máximas de lodos aplicables al suelo por hectárea y año en función del contenido en metales pesados de los lodos.*
- *Plazos de aplicación de lodos en distintos cultivos y aprovechamiento.*

Según el Real Decreto citado, en las **Tablas I.I, I.II y I.III**, quedan reflejados los valores límites de concentración de metales pesados en suelos, en los lodos destinados a su utilización agraria, así como los valores límites para cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años. Como complemento a dicha información, se añaden en dichas tablas los valores límites de metales pesados reflejados en el borrador de la Unión Europea, el cual está pendiente de aprobación.

En el Real Decreto **1310/1990** de 29 de octubre se establecen una serie de controles por parte de las Comunidades Autónomas para el seguimiento de la utilización de los lodos de depuradora en la actividad agraria y se crea el Registro Nacional de Lodos adscrito al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Para el desarrollo y cumplimiento de lo establecido en dicho Real Decreto el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación dicta la **Orden de 26 de octubre de 1993** sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. De esta forma se normaliza la información y se establecen los cauces para su recopilación final, de modo que pueda cumplirse con el mandato de la Comisión (**Directiva 89/278/CCE**, artículo 17º) de elaborar un informe

de síntesis sobre el empleo de los lodos en agricultura, precisando las cantidades utilizadas, los criterios seguidos y las dificultades encontradas.

**Real Decreto 1310/1990 de 29 de octubre, donde se regula la normativa actualmente vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo:**

**Tabla I.I.** Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos.

Elemento	Valores límite: <i>Real Decreto 1310/1990</i>		Valores límite: <i>Borrador Unión Europea</i>		
	Suelos con pH<7	Suelos con pH>7	5≥pH>6	6≥pH>7	pH≥7
<b>Cadmio</b>	1	3	0.5	1	1.5
<b>Cobre</b>	50	210	20	50	100
<b>Níquel</b>	30	112	15	50	70
<b>Plomo</b>	50	300	70	70	100
<b>Zinc</b>	150	450	60	150	200
<b>Mercurio</b>	1	1.5	0.1	0.5	1
<b>Cromo</b>	100	150	30	60	100

**Tabla I.II.** Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (mg/kg de materia seca)

Elementos	Valores límite: <i>Real Decreto 1310/1990</i>		Valores límite: <i>Borrador Unión Europea</i>	
	Suelos con pH<7	Suelos con pH>7	0<pH<14	0<pH<14 (mg/kg P)
Cadmio	20	40	10	250
Cobre	1000	1750	1000	25000
Níquel	300	400	300	7500
Plomo	750	1200	750	18750
Zinc	2500	4000	2500	62500
Mercurio	16	25	10	250
Cromo	1000	1500	1000	25000

**Tabla I.III.** Valores límites para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de 10 años (kg/Ha/año).

<b>Elementos</b>	<b>Valores límite: <i>Real Decreto 1310/1990</i></b>	<b>Valores límite: <i>Borrador Unión Europea</i></b>
Cadmio	0.15	0.03
Cobre	12	3
Níquel	3	0.9
Plomo	15	2.25
Zinc	30	7.5
Mercurio	0.10	0.03
Cromo	3	3

En el artículo 5° de la **Orden Ministerial del 26/10/93**, queda adscrito el Registro Nacional de Lodos a la Dirección General de Producciones y Mercados Agrícolas (Subdirección General de Medios de Producción Agrícola) y se establece la información que contendrá del citado registro, que será la siguiente:

- *Censo nacional de plantas depuradoras de aguas residuales, especificando la cantidad anual de lodos producidos, su tratamiento y el destino de los mismos (Anexo I de la Orden de 26 de octubre de 1993).*
- *Entidades dedicadas a la explotación agrícola de lodos incluyendo la cantidad de lodos utilizados en el sector agrario, tratamiento de los mismos, su composición analítica y zonas de aplicación (Anexo II de la Orden de 26 de octubre de 1993).*

En el caso de que el lodo de depuradora se utilice compostado como enmendante de suelos, su uso debe regirse por la legislación española de fertilizantes y afines (**Orden de 28 de mayo de 1998 sobre fertilizantes y afines**). Por otra parte, la **Directiva 91/676/CEE** relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura condicionará la utilización de los lodos en el sector agrario, básicamente en función del contenido de nitrógeno en los lodos y

de la vulnerabilidad del territorio frente a la contaminación por nitratos. Se establece que en zonas vulnerables no se podrán adicionar al suelo con enmiendas orgánicas más de 170 Kg de N/ha.

En España actualmente no existe normativa y legislación referente a los sustratos hortícolas para ser utilizados como soporte de cultivo. Este vacío legal afecta a temas tan importantes como denominación, definición, especificaciones y métodos de análisis a utilizar para hacer cumplir esas Normas teniendo en cuenta las desviaciones permitidas, como ocurre con otro tipo de productos utilizados como medios de producción. Para establecer una legislación común para regular el mercado el CEN (Centro Europeo de Normalización) creó el Comité Técnico TC-223 “Soil improvers and growing media”. En 1991 se constituyó en AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) el Comité Técnico CT-142 para desarrollar actividades relacionadas con la normalización sobre “Fertilizantes y acondicionadores del suelo”.

La preocupación de las distintas partes relacionadas en el sector español movió al Ministerio de Agricultura a promover la creación de un Grupo de Trabajo en el CT-142 de AENOR, donde se integró el creado por la SECH (Sociedad Española de Ciencias Hortícolas) que desarrollasen Normas para sustratos, principalmente sobre definiciones, muestreos, métodos de análisis y seguridad. Además, la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) aprobó el proyecto AGF1698-E para la elaboración de un inventario de sustratos que se realizará en forma de base de datos ubicada en el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Mientras finaliza el periodo de discusión y de aprobación de unos métodos analíticos propios, se hace necesario recurrir a unas técnicas de caracterización desarrolladas en otros países, a través de una bibliografía amplia y dispersa.

## **II. ORDEN DE 28 DE MAYO DE 1998 SOBRE FERTILIZANTES Y AFINES**

El **Real Decreto 72/1998**, de 5 de febrero, sobre fertilizantes y afines, modificado por el **Real Decreto 877/1991**, de 31 de mayo, habilita al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, previo informe favorable de los Ministerios de

Sanidad y Consumo y de Industria y Energía, para establecer la lista de fertilizantes y afines que pueden ser destinados al consumo agrícola, así como los contenidos máximos y mínimos, las características de composición y, en su caso, las instrucciones específicas relativas al uso, almacenaje y manipulación del producto. El citado Real Decreto contempla, igualmente, el registro previo a la comercialización de determinados productos.

En virtud de lo anterior, se aprobó la **Orden de 14 de junio de 1991** sobre fertilizantes y afines, que fue modificada posteriormente por las de 11 de julio de 1994 y 29 de mayo de 1997, para trasponer el Derecho español de las **Directivas 76/116/CEE**, del Consejo, y posteriores modificaciones y ampliaciones para su adaptación al progreso técnico.

Asimismo, se hace necesario trasponer al Derecho interno la **Directiva 97/63/CE**, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 1997, por la que se modifican las **Directivas 76/116/CEE, 80/876/CEE, 89/284/CEE y 89/534/CEE**, del Consejo, y de la **Directiva 98/3/CE**, de la Comisión, de 15 de enero de 1998, relativas, todas ellas, a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los abonos.

Para proteger el medio ambiente, la presente Orden, en su artículo 9 introduce una serie de garantías que deberán reunir los productos, fijando unos niveles máximos en contenido en metales pesados que no podrán ser superados por el producto final.

Velando por la salud pública, se introducen unos niveles máximos en agentes patógenos que no podrán superar los productos en cuya composición intervengan materias primas de origen animal o vegetal, contribuyendo de esta forma a garantizar que los abonos con contenido en materia orgánica no produzcan efectos nocivos para la salud.

Por otro lado, el **Real Decreto 363/1995**, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento sobre envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, establece criterios de clasificación según sus propiedades tóxicas. El anejo VI de dicho Real Decreto define los criterios de corrosividad e irritabilidad, según el valor del pH de estas

sustancias y preparados, siendo dicha norma de obligado cumplimiento, por lo que se hace preciso recoger en esta Orden las medidas necesarias para su cumplimiento en el etiquetado de los productos.

Por otra parte, en los últimos años han ido apareciendo nuevos abonos, enmiendas y correctores para su aplicación en la agricultura, por lo que resulta necesario actualizar los Anejos que afectan a los productos que todavía siguen sin estar regulados por la normativa de la Unión Europea. En el proceso de esta norma han sido consultados las Comunidades Autónomas y los sectores afectados.

La presente disposición ha sido sometida al procedimiento de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas previstas en la **Directiva 83/188/CEE**, del Consejo, de 28 de marzo, y sus modificaciones, así como en el **Real decreto 1186/1995** de 7 de julio.

### **III. PLAN NACIONAL DE LODOS DE DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES-EDAR (PNLD)-(2001-2006)**

*Puntos Fundamentales del **Decreto 193/1998**, de 20 de noviembre, por el que se regula la utilización de lodos de depuradora en la Agricultura.*

#### **ANEXO I**

##### Análisis de los lodos

1. Los lodos tratados deberán analizarse por cada lote homogéneo, pudiendo entenderse por tal la producción mensual. Si surgen cambios en la calidad de las aguas tratadas, la frecuencia de tales análisis deberá aumentarse. Si los resultados de los análisis no varían de forma significativa a lo largo de un período de un año, los lodos deberán analizarse, al menos, cada seis meses.

2. Los lodos tratados deberán ser analizados cuando se considere acabado el proceso de tratamiento y los resultados obtenidos en el análisis de los parámetros que se indican en el punto 3 de este Anexo, junto con la especificación de los nombres y

estaciones de depuración y el de los titulares, constituirá la documentación que obligatoriamente acompañará a las partidas comercializadas para su control en destino.

3. Los parámetros que, como mínimo, deben ser analizados son:

- Materia seca.
- Materia orgánica.
- pH.
- Nitrógeno.
- Fósforo.
- Cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo.

Los métodos de análisis y muestreo a utilizar serán los oficialmente adoptados por la CEE o, en su defecto, por España, salvo para el caso de los metales pesados, para los que se seguirá la metodología indicada en el Anexo III.

## ANEXO II

### Análisis de los suelos

1. Antes de la puesta en práctica del sistema de control y seguimiento de los efectos de la aplicación de los lodos sobre los suelos con fines agrarios, es necesario evaluar el status de los mismos en lo que se refiere a los metales pesados, para lo cual las Comunidades Autónomas decidirán los análisis que haya que efectuar teniendo en cuenta los datos científicos disponibles sobre las características de los suelos y su homogeneidad.

2. Asimismo las Comunidades Autónomas decidirán la frecuencia de los análisis ulteriores teniendo en cuenta el contenido de metales pesados en los suelos, la cantidad y composición de los lodos utilizados y cualquier otro elemento pertinente.

3. Los parámetros que deberán analizarse son:

- pH.
- Cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo.

- Conductividad eléctrica.
- Textura.

### ANEXO III

#### Métodos de muestreo y de análisis

1. Muestreo de los suelos: Las muestras representativas de suelos sometidos a análisis se constituirán normalmente mediante la mezcla de 25 muestras tomadas en una superficie inferior o igual a 5 hectáreas explotada de forma homogénea.

Las tomas se efectuarán a una profundidad de 25 cm, salvo si la profundidad del horizonte de laboreo es inferior a ese valor, pero sin que en ese caso la profundidad de la toma de muestras sea inferior a 10 cm.

2. Muestreo de lodos: Los lodos serán objeto de un muestreo tras su tratamiento pero antes de la entrega al usuario y deberán ser representativos de los lodos producidos.

3. Métodos de análisis: El análisis de los metales pesados se efectuará tras una descomposición mediante un ácido fuerte. El método de referencia de análisis será la espectrometría de absorción atómica. El límite de detección para cada metal no deberá superar el 10 por 100 del valor límite correspondiente.

### ANEXO IV

Ficha de explotación agrícola de lodos tratados. Para más información ver Anexo original.

### ANEXO V

#### *Abonos orgánicos, organominerales y enmiendas orgánicas*

### Enmiendas orgánicas

COMPOST: Producto obtenido por fermentación aerobia de residuos orgánicos, el cual tiene que cumplir una serie de requisitos:

- Materia orgánica total: 25%
- Humedad máxima: 40%
- El 90 % de las partículas de materiales plásticos y otros inertes eventualmente presentes, no superaran los 10 mm.
- Se indicarán las materias primas de que procede el producto.
- Contenido máximo en metales pesados, expresados en mg/Kg de materia seca  
(Ver Tablas I.I, I.II, I.III)

Debe de seguir una serie de criterios:

- Nitrógeno total mayor del 1%
- Nitrógeno amoniacal mayor del 1%
- Materia orgánica total
- Humedad máxima
- Las materias primas usadas serán declaradas cuando alcancen el 20% del peso.  
Podrán declararse cuando alcancen el 5% en peso.
- Facultativamente:
  - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total mayor del 1%
  - K<sub>2</sub>O total mayor del 1%







- Adams y Kissel**, 1989. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. CSOSA 20:1-21-2.
- Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G., Revel, J.**, 2005. *Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge*. Chemosphere 59, 801–810.
- Anderson, J. L.** 1988. *Movement of nitrogen fertilizer to the groundwater*. Proc. of the International Interactive Workshop on Soil Resources: their Inventory, Analysis and Interpretation for Use in the 1990's, 194-201. Minneapolis (Esta dos Unidos de Norteamérica).
- Arens, P.L.** 1983. *La importancia actual del reciclaje de los residuos orgánicos para la agricultura*. En “*El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de America latina*”, 1-2. Ed. FAO, Roma (Italia).
- Arshad, M.A. y Coen, G.M.** 1992. *Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria*. American J. of Alternative Agriculture 7: 25-31.
- Astier, C.M., Mass-Moreno, M. y Etchevers, B.J.** 2002. *Derivación de indicadores de calidad de suelo en el contexto de la agricultura sustentable*. Agrociencia 36: 605-620.
- Ayuso, M., Hernández, T., Gracia, C.** 1996. *Effect of humic fraction from urban wastes and other more evolved organic material son seed germination*. J, Se, Food Agric. 72:461-468.
- Beck-Friis, B., Smars, S., Jönsson, H., Kirchmann, H.**, 2001. *Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes*. Journal of Agriculture Engineering Research 78, 423–430.

- Beyer, L., Wackendorf, C., Balzen, F. M. y Balzer-Graf, V. R.** 1992. *The effect of soil texture and soil management on microbial biomass and soil enzyme activities in arable soils of Northwest Germany. Agrobiology Research.* 45:276-283.
- Bolton H.J., Elliot L.F., Papendick R.I. y Bezdicek, D.F.** 1985 *Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices.* Soil Biology and Biochemistry 17: 297-302.
- Brewer, L.J., Sullivan, D.M.,** 2003. *Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings.* Compost Science and Utilization 11, 96– 112.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J.** 1997. Concepts of soil quality and their significance. En *Soil quality for crop production and ecosystem health* (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Cegarra, J.; Hernández, M.T.; Lax, A. y Costa, F.** 1983. *Adición de residuos vegetales a suelos calizos. II. Influencia sobre la capacidad de retención hídrica y las propiedades de intercambio iónico.* An. Edafol. Agrobiol. 42 (1-2), 235 244.
- Chica, A., Mohedo, J.J., Martí'n, M.A., Martín, A.,** 2003. *Determination of the stability of MSW compost using a respirometric technique.* Compost Science and Utilization 11, 169–175.
- Ciba, J., Zolotjakin, M., Kluczka, J., Loska, K., Cebula, J.,** 2003. *Comparison of methods for leaching heavy metals from composts.* Waste Management 23, 879–905.
- Contreras-Ramos, S.M., Álvarez-Bernal, D., Trujillo-Tapia, N. & Dendooven, L.,** 2004. *Composting of tannery effluent with cow manure and wheat Straw.* Bioresource Technology.

- Coker, C.**, 2006. *Environmental remediation by composting*. BioCycle 47, 18–23.
- Cronje, A.L., Barker, A.J., Guy, S., Turner, C., Williams, A.G.**, 2002. *Ammonia emissions and pathogen inactivation during composting*. In: Michel, F.C., Rynk, R.F., Hoitink, H.A.J. (Eds.), *Proceedings of the 2002 International Symposium Composting and Compost Utilization*. JG Press, Emmaus, Pennsylvania, pp. 845–856.
- Davis, G., Bulson, H., Harrisson, D., Billet, E.**, 2005. *An evaluation of degradable polyethylene (PE) sacks in open windrows composting*. *Compost Science and Utilization* 13 (1), 50–59.
- Doran, J.W. y Parkin, B.T.** 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C.** 1998. *Indicators of land quality and sustainable land management*. The World Bank, Washington DC, USA.
- Elias, X.**, 2000. *Reciclaje de Residuos Industriales*. Ed. Díaz de Santos.
- Environmental Protection Service of Canada**, 1984. *Manual of land application of treated municipal wastewater and sludge*. Ed. Ministry of Supply and Services, Burlington (Canada).
- Francis, C.** 1990. *Soil erosion and organic matter losses on fallow land: a case study from south-east Spain*. 21, 331-338. Ed. John Wiley and Sons Ltd, Nueva York (Estados Unidos de Norteamérica).
- Gabriels, D. y Michiels, P.** 1991. *Soil organic matter and water erosion processes*. 141-152. Ed. The Royal Society of Chemistry, Cambridge (Reino Unido).

- García, C. & Hernandez, T.**, 1996. *Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciorthid soil*. Plant and Soil 178, 255-263.
- García, C., Hernández, T., Barahona, A. & Costa, F.**, 1996. *Organic matter features and nutrient content in eroded solids*. Environmental Management. 20: 133-141.
- García, F.** 1992. *Estudio sobre estabilidad de agregados en suelos, aspectos químicos y microbiológicos*. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad de Murcia. Murcia.
- Gatí, F.** 1983. *La materia orgánica del suelo, su importancia formas de mantenerla*. En "El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de America latina", 126-152. Ed. FAO, Roma (Italia).
- Grady, C.P.L., Daigger G.T.** 1998. *Biological Wastewater Treatment (Environmental Science & Pollution)*. 2ª ed. Marcel Dekker.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M. y Ellert, B.H.** 1994. *Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils*. Canadian J. of Soil Science 74: 367-386.
- Griffith, S.M., Schnitzer, M.**, 1975. *Analytical characteristics of humic and Fulvic acids extracted from tropical volcanic soils*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 861 – 867.
- Grunditz, C., Dalhammar, G.**, 2001. *Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of Nitrosomonas and Nitrobacter*. Water Research 35, 433–440.

- Harrod, T.R.; Carter, A.D. y Hollis, J.M.** 1991. *The role of soil organic matter in pesticide movement via run-off, soil erosion and leaching.* 127-138. Ed. The Royal Society of Chemistry, Cambridge (Reino Unido).
- Haug, R.T.**, 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering.* Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Homas, W.J., Fischer, K.**, 1992. *A composting plant as an odour source, compost as an odour killer.* *Acta Horticulturae* 302, 37–44.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S.** 1997. *Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales.* IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- Kapetanios, E., Loizidou, M., Valkanas, G.** 1993. *Compost production from domestic refuse.* *Bioresource Technology*, 44, 12-16.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E.** 1997. *Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation.* *Soil Science Society of America J.* 61: 4-10.
- Larney, F.J., Olson, A.F., Carcamo, A.A., Chang, C.**, 2000. *Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer.* *Bioresour. Technol.* 75, 139–148.
- Larson, W.E. y Pierce, F.J.** 1991. *Conservation and Enhancement of Soil Quality. In Evaluation for sustainable land management in the developing world.* En *Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai.* pp. 175-203. 15-21 Sept. 1991. Int. Board of Soil Res. and Manage., Bangkok, Thailand.

- Lindsay W.L., Norwell W.A.** 1978. *Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper*. Soil Science Society of America Journal. 42: 421-428.
- McLaughlin, M.J., Parker, D.R., Clarke, J.M.**, 1999. *Metals and nutrients-food safety issues*. Field Crops Research 60, 143–163.
- Mena, E.**, 2001. *Compostaje de lodos de depuración urbana: Una adecuada estrategia para su reciclado en el suelo*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Misra, V., Pandey, S.D.**, 2005. *Immobilization of heavy metals in contaminated soil using nonhumus-humus soil and hydroxyapatite*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 74, 725–731.
- Mohee, R., Mudhoo, A.**, 2005. *Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix*. Powder Technol. 155, 92–99.
- Mohee, R., Unmar, G.**, 2007. *Determining biodegradability of plastic materials under controlled and natural composting environments*. Waste Management 27, 1486–1493.
- Moreno J.I.**, 1985. *Lodos de depuradoras urbanas: caracterización y aplicación agrícola*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Nannipieri, P., Grego, S. and Ceccanti, B.** (1990). *Ecological significance of biological activity in soil*. In: Bollag, J.M., Stotzky, G. (Eds). Soil Biochemistry, vol 6, pp.293-355.
- Passino, Roberto.** *Biological & Artificial Membranes & Desalination of Water: Proceedings of Study Week of the Pontifical Academy of Science*. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam. (1980).

- Paul, E. A. y Voroney, R. A.** 1989. Field interpretation of microbial biomass activity and measurements. In: *M.J. Kleng and C.A. Reddy (Eds), Current Perspective in Microbial Ecology*. American Society for Microbiology, Washington D.C. USA.
- Powlson, D.S. y Jenkinson, D.** 1981. *A comparison of the organic matter, biomass, adenosin triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct- drilled soils*. *Journal of Agricultural Science* 97:713-721.
- Raviv, M., Tarre, S., Geler, Z., Shelef, G.,** 1987. *Changes in some physical and chemical-properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting*. *Biol. Waste* 19, 309–318.
- Raviv, M.,** 2005. *Production of high-quality composts for horticultural purposes: a mini-review*. *Hortic. Technol.* 15, 52–57.
- Romeela, M., Ackmez, M., Unmar, G.D.,** 2008. *Windrow co-composting of shredded office paper and broiler litter*. *Int. J. Environ. Waste Manage.* 2, 3–23.
- Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Pareded, C., Bernal, M.P.,** 2001b. *Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effect on pH, EC and maturity of the composting mixtures*. *Bioresource Technology* 78, 301–308.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. y Rogers, H.H.** 1997. Quantification of Soil Quality. En *Soil Process and the Carbon Cycle* (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A.), pp. 387-403, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Singer, M.J. y Ewing, S.** 2000. Soil Quality. *En Handbook of Soil Science. Chapter 11* (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Skujins, J.** 1976. *Extracellular enzymes in soil*. *Critical Review Microbiology* 4: 383-421.

- Sparling, G.P.** 1997. Soil Microbial Biomass, Activity and Nutrient Cycling, as Indicators of Soil Health. En *Biological Indicators of Soil Health* (eds. Pankhursts, C.E., Doube, B.M. y Gupta, V.S.R.), pp. 97-105, Cab International, Oxon, UK.
- SQI-Soil Quality Institute.** 1996. *Indicators for Soil Quality Evaluation*. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Stoffella, P.J., Kahn, B.A.,** 2001. *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*. Lewis Publishers, New York.
- Swift, R.S.** 1991. *Effects of humic substances and polysaccharides on soil aggregation*. 153-162. Ed. The Royal Society of Chemistry, Cambridge (Reino Unido).
- Tabak,** 1981. *Bloomhuff, RL Bunch Developments in Industrial Microbiology*.
- Trevors, J.T.** 1984. *Dehydrogenase activity in soil. A comparison between the INT and TTC assay*. Soil Biology and Biochemistry 16: 673-674.
- Vaidyanathan, L.V. y Eagle, D.J.** 1991. *The influence of organic matter and clay on adsorption of atrazine by top soils*. 381-391. Ed. The Royal Society of Chemistry, Cambridge (Reino Unido).
- Wardle, D.A.** 1992. *A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soils*. Biological Reviews 67, 321-358.
- Waters, A.G. y Oades, J.M.** 1991. *Organic matter in water stable aggregates*. 299- 314. Ed. The Royal Society of Chemistry, Cambridge (Reino Unido).

- Werther, J., Ogada, T.,** 1999. *Sewage sludge combustion*. Prog. Energ. Combust. Sci. 25, 55–116.
- White, R.E.** 1987. *Introduction to the principles and practice of soil science*. Ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford (Reino Unido).
- Wu, L., Ma, L.Q., Martinez, G.A.,** 2000. *Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost*. Journal of Environmental Quality 27, 424–429.
- Zmora-Nahum, S., Markovitch, O., Tarchitzky, J., Chen, Y.,** 2005. *Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity*. Soil Biology and Biochemistry 37, 2109–2116.