



*Miguel Hernández*

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

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



## CARACTERÍSTICAS Y VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ORIGEN URBANO



JAVIER RICO BARRACHINA

2015



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



# **CARACTERÍSTICAS Y VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ORIGEN URBANO**

**Vº Bº DIRECTOR**

María de los Ángeles Bustamante Muñoz

**ALUMNO**

Javier Rico Barrachina



## UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D. Javier Rico Barrachina**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Características y valorización de los residuos de origen urbano”, bajo la dirección de D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup> Angeles Bustamante Muñoz, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 4 de septiembre de 2015

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

  
Fdo.: Concepción Paredes Gil  
  
Miguel Hernández  
ELCHE  
CAMPUS DE ORIHUELA  
DEPARTAMENTO DE  
AGROQUÍMICA Y  
MEDIO AMBIENTE

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

## **REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER**

### **IDENTIFICACIONES:**

**Autor:** Javier Rico Barrachina

**Título:** Características y valorización de los residuos de origen urbano.

**Title:** Characteristics and valorisation of wastes with urban origin.

**Director/es del TFM:** María de los Ángeles Bustamante Muñoz

**Año:** 2015

**Titulación:** Licenciado en Ciencias Ambientales (Universidad Miguel Hernández).

**Tipo de trabajo:** Trabajo final de máster.

**Palabras clave:** Lodo de depuradora, gestión, residuo sólido urbano, compostaje, valorización energética.

**Keywords:** sewage sludge, management, municipal solid waste, composting, anaerobic digestion, energetic valorization.

**Nº citas bibliográficas:** 78

**Nº de tablas:** 12

**Nº de gráficos:** 5

**Nº de figuras:** 13

### **Resumen:**

Uno de los principales problemas que tienen que afrontar actualmente los diferentes países es la producción incontrolada de residuos. En este trabajo se hace un repaso de la totalidad de residuos que se producen en la sociedad actual, así como de las formas más extendidas de gestión, tratamiento y valorización que pueden ser aplicadas para los residuos orgánicos de origen urbano. Además se lleva a cabo una revisión bibliométrica para revisar las últimas investigaciones relacionadas con el tratamiento y valorización de residuos municipales.

### **Abstract:**

Nowadays, one of the main problems that the different countries have to deal with is the uncontrolled production of waste. This study presents an overview of the totality of waste produced in today's society and the most widespread ways of management, treatment and recovery that can be applied to the urban organic wastes. Also, a bibliometric study has been carried out to review the recent research related to the treatment and recovery of municipal waste.

## **Agradecimientos**

Ante todo quiero dar las gracias a mi directora María de los Ángeles Bustamante por su apoyo y atención en todo momento ya que sin su ayuda no habría podido terminar este trabajo.



## ÍNDICE

<b>1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
2.1. Residuos orgánicos.....	5
2.1.1. Revisión terminológica y clasificación de los residuos orgánicos.....	5
2.1.2. Gestión de los residuos orgánicos .....	8
2.1.3. Impactos ambientales de los procesos de tratamiento de residuos.....	13
2.1.4. Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a la gestión de residuos orgánicos .....	16
<b>3. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) .....</b>	<b>19</b>
3.1. Caracterización y descripción general .....	19
3.2. Producción y destino.....	25
3.3. Factores ambientales y sociales asociados a los RSU .....	33
3.4. Gestión de los residuos sólidos urbanos.....	38
3.4.1. Sistemas de tratamiento de los RSU.....	44
3.4.2. Aplicación agrícola: ventajas y riesgos derivados.....	51
<b>4. LODOS DE DEPURADORA .....</b>	<b>55</b>
4.1. Caracterización y descripción general .....	55
4.2. Producción y destino.....	60
4.3. Gestión de los lodos de depuradora .....	63
4.3.1. Sistemas de tratamiento de los lodos de depuradora .....	63
4.3.2. Aplicación agrícola: ventajas y riesgos derivados.....	70
<b>5. ÚLTIMAS INVESTIGACIONES SOBRE RESIDUOS URBANOS: ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO .....</b>	<b>81</b>

**6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO ..... 93**

**7. BIBLIOGRAFÍA ..... 95**

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1:** Emisiones de gases durante el compostaje de la fracción orgánica de residuos sólidos urbano ..... 18

**Tabla 2:** Porcentaje de los componentes de RU en España ..... 21

**Tabla 3:** Distribución por comunidades autónomas de residuos urbanos (2004) ..... 26

**Tabla 4:** Generación total de residuos municipales en la UE-27 ..... 28

**Tabla 5:** Destino de los residuos municipales generados en España ..... 29

**Tabla 6:** Generación y tratamiento de los residuos en España ..... 30

**Tabla 7:** Tasas de reciclado y valorización de residuos de envases..... 31

**Tabla 8:** Modelos de separación de residuos en origen en España ..... 41

**Tabla 9:** Bacterias presentes en los fangos y posibles enfermedades ..... 59

**Tabla 10:** Organismos presentes en los fangos y posibles enfermedades ..... 59

**Tabla 11:** Composición de los lodos de depuradora del sudeste español ..... 60

**Tabla 12:** Valores límite de metales pesados en el suelo ..... 73

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

**Gráfico 1:** Producción de residuos municipales en España y la Unión Europea ..... 27

**Gráfico 2:** Tratamiento de residuos municipales en España y la Unión Europea..... 29

**Gráfico 3:** Tasa global de reciclado y valorización de residuos de envases..... 30

**Gráfico 4:** Producción de lodos (2000-2009) ..... 61

**Gráfico 5:** Evolución de los destinos de lodos en el periodo 1997-2009 ..... 62

**ÍNDICE DE FIGURAS:**

<b>Figura 1:</b> Jerarquía europea de residuos .....	40
<b>Figura 2:</b> Esquema de generación y tratamientos de lodos.....	57
<b>Figura 3:</b> Esquema general de la gestión de fangos de EDAR.....	65
<b>Figura 4:</b> Número de publicaciones por año.....	82
<b>Figura 5:</b> Número de publicaciones por fuentes bibliográficas .....	83
<b>Figura 6:</b> Número de investigaciones por país.....	83
<b>Figura 7:</b> Número de investigaciones por área de investigación.....	84
<b>Figura 8:</b> Aportaciones científicas en forma de publicaciones .....	84
<b>Figura 9:</b> Número de publicaciones por año.....	85
<b>Figura 10:</b> Número de publicaciones por fuentes bibliográficas .....	86
<b>Figura 11:</b> Número de investigaciones por país .....	86
<b>Figura 12:</b> Número de investigaciones por área de investigación.....	87
<b>Figura 13:</b> Aportaciones científicas en forma de publicaciones .....	88



## 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Los residuos existen desde que lo hacen los seres vivos, es decir, los deshechos de plantas y animales han servido para formar una gran cantidad de sistemas ecológicos, cerrando los ciclos de materia y energía de la naturaleza. Antiguamente, en las sociedades más rurales y primitivas los pocos residuos que se pudieran generar se incorporaban a los ciclos biológicos, ya que se trataban de residuos totalmente primarios, como heces o restos de plantas, que eran completamente biodegradables y perfectamente asumibles por el medio. Posteriormente, en las sociedades más tradicionales (pudiéndose encontrar aún en comunidades rurales), el volumen de residuos que se pudiera generar en estas zonas sería mínimo, y casi en su totalidad estaría compuesto por materia orgánica. Por lo que la totalidad de residuos, tanto orgánicos como inorgánicos, producidos en los hogares se les encontraba salida como alimento para los animales o abono para los cultivos.

Con el paso del tiempo, la sociedad fue evolucionando y junto con el desarrollo tecnológico, el nivel de vida de los ciudadanos iba en aumento, con lo que las personas tenían más acceso a bienes materiales. La mejora en el nivel de vida de las personas vino acompañado de un aumento importante de la población mundial, lo que se traduce directamente en una mayor producción de residuos. Todo esto ha desembocado en la formación de las sociedades desarrolladas actuales, las cuales se caracterizan por la generación y acumulación de toneladas de desperdicios. Son comunidades que se rigen constantemente en aumentar los niveles de consumo, primándose socialmente la adquisición de bienes y servicios sobre las actividades de reutilización y reciclaje. Las sociedades desarrolladas se han gestionado de una manera en que sus habitantes han adquirido un estilo de vida donde se ven atraídos por lo novedoso, lo que asegura un reemplazo constante de los productos de consumo en los que basamos nuestras actividades. Conceptos como durabilidad, eficiencia, y aprovechamiento no son vistos de la misma manera.

Nuestros modelos de producción y consumo conllevan una generación y acumulación de residuos que lleva consigo graves y numerosos problemas ambientales. Ya avanzada la segunda mitad del siglo XX, las administraciones de los países económicamente más desarrollados empiezan a tomar conciencia de la magnitud de estos problemas ambientales y, entre otras medidas, se empieza a desarrollar legislación al respecto. Con el paso del tiempo, se mejorarían las normativas y se harían más duras para los infractores que no respetasen la normativa a aplicar.

A nivel europeo, el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente solicitaba la revisión de la legislación sobre residuos, a la distinción clara de residuos y no residuos, y al desarrollo de medidas relativas a la prevención y gestión de residuos, incluido el establecimiento de objetivos. Todo esto llevó a la sustitución del anterior régimen jurídico comunitario de residuos (2006/12/CE; DOCE, 2006) y a la promulgación de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del consejo, de 10 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas, integrándolas en una única norma "Directiva marco de residuos" en la que se establece el marco jurídico de la unión Europea para la gestión de los residuos. Dicha Directiva proporciona los instrumentos que permiten disociar la relación existente entre crecimiento económico y producción de residuos, haciendo especial hincapié en la prevención, entendida como el conjunto de medidas adoptadas antes de que un producto se convierta en residuo, para reducir tanto la cantidad y contenido en sustancias peligrosas como los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente de los residuos generados. Además, establece un principio de jerarquía en la producción y gestión de residuos que ha de centrarse en la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclaje u otras formas de valorización, incluida la valorización energética y aspira a transforma la Unión Europea en una "sociedad del reciclado" y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

En los últimos años, la Unión Europea ha lanzado el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020, en el cual se recogen obligaciones específicas de esta materia para los Estados miembros, que deberán elaborar programas de prevención de residuos, con el

objetivo de desvincular el crecimiento económico de un país con el incremento en la generación de residuos. El Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020, desarrolla la política de prevención de residuos, conforme a la normativa vigente para avanzar en el cumplimiento del objetivo de reducción de los residuos generados en 2020 en un 10 % respecto del peso de los residuos generados en 2010. Este programa se configura en torno a cuatro líneas estratégicas destinadas a incidir en los elementos clave de la prevención de residuos:

- reducción de la cantidad de residuos.
- reutilización y alargamiento de la vida útil de los productos.
- reducción del contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.
- reducción de los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente, de los residuos generados.

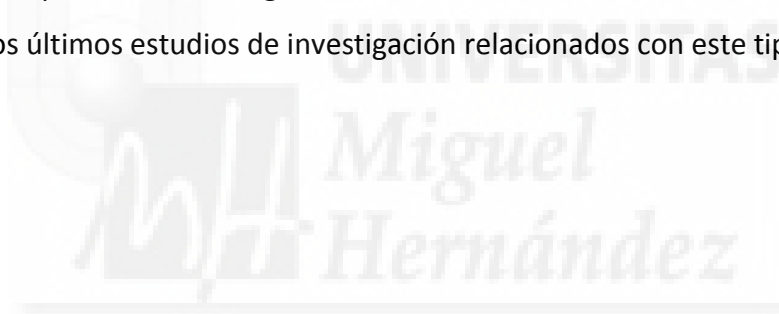
Actualmente en España, existe el Plan Nacional Integrado de residuos (PNIR) donde se incluyen la gran mayoría de residuos que se producen en diferentes actividades, desde residuos domésticos hasta residuos industriales y suelos contaminados. En el plan se incluye la Estrategia de Reducción de Vertido de Residuos Biodegradables, que cumpliendo con una obligación legal, contribuye a alargar la vida de los vertederos, a disminuir su impacto sobre el entorno y de forma especial a la reducción de los gases de efecto invernadero. Como objetivos generales del PNIR podemos destacar:

- Modificar la tendencia actual del crecimiento de la generación de residuos.
- Erradicar el vertido ilegal.
- Disminuir el vertido y fomentar de forma eficaz: la prevención y la reutilización, el reciclado de la fracción reciclable, así como otras formas de valorización de la fracción de residuos no reciclable.
- Completar las infraestructuras de tratamiento y mejorar el funcionamiento de las instalaciones existentes.
- Evaluar los Instrumentos económicos y en particular los fiscales que se han puesto en práctica para promover cambios en los sistemas de gestión existentes. Identificar la

conveniencia de su implantación de forma armonizada en todas las Comunidades Autónomas.

- Consolidación de los programas de I+D+I aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Reducir la contribución de los residuos al Cambio Climático fomentando la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción.

Los principales objetivos de este trabajo son el estudio de las características, producción, formas de gestión, tratamiento y destino de los residuos generados en el entorno urbano, principalmente los residuos sólido urbanos (RSU) y los lodos resultantes de los procesos de depuración de las aguas residuales urbanas, así como la normativa asociada, incidiendo en los últimos estudios de investigación relacionados con este tipo de residuos.



## **2. INTRODUCCIÓN**

### **2.1. Residuos orgánicos**

#### **2.1.1. Revisión terminológica y clasificación de los residuos orgánicos**

En primer lugar, es importante establecer el concepto de residuo y se define como cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar (Art. 3, Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados). El término “residuo orgánico” es muy amplio y engloba a todos aquellos que son biodegradables. Más específicamente, el Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre (BOE nº 25 de 29/1/2002) define como residuos biodegradables todos los residuos que, en condiciones de vertido, pueden descomponerse de forma aerobia y anaerobia, tales como residuos de alimentos y de jardín, el papel o el cartón. Con esta definición pueden englobarse una gran variedad de residuos tales como los de la agricultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca, los procedentes de la preparación y elaboración de alimentos, los de plantas de tratamientos de aguas residuales o los municipales.

A nivel europeo, tienen consideración de residuos aquellos que figuran en el Catálogo Europeo de Residuos (BOE, 2002) y los que se recogen en el Anexo I de la Directiva 2006/12/CE. En cierto modo, la clasificación de los residuos es compleja, debido a las múltiples y diversas formas en que se generan y el impacto potencial que pueden llegar a producir sobre el medio ambiente y los seres humanos. Por esta razón, en la Decisión 2000/532/CE modificada (transpuesta a la legislación estatal por la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero), se publica la lista europea de residuos (LER).

Con la elaboración de esta lista de residuos se separan en diferentes tipos, dependiendo del proceso en que se generaron e indicándose en cada caso, cuales son peligrosos o no peligrosos. La Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados clasifica los residuos en:

-**Residuos domésticos:** aquellos residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. También se consideran residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias. Dentro de esta categoría se incluyen los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles, así como residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria. Tienen la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, animales domésticos muertos y los vehículos abandonados.

-**Residuos comerciales:** residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicio.

-**Residuos industriales:** residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones atmosféricas (reguladas en la Ley 34/2007).

-**Residuos peligrosos:** residuos que presentan una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III, y aquél que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido.

Adicionalmente, la nueva Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, define como bioresiduo: residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de venta al por menor; así como, residuos comparables procedentes de planta de procesado de alimentos. Esta ley ha sido modificada por la Ley 5/2013 de 11 de junio en su apartado 8 del artículo 27 correspondiente a la autorización de las operaciones de tratamiento de residuos, de forma que las instalaciones industriales otorgadas mediante la antigua Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, le sean aplicados las modificaciones incluidas en la nueva Ley 5/2013.

Sin embargo, la clasificación de los residuos es compleja, por ello, existen otras clasificaciones alternativas a la normativa. A lo largo de los últimos años, los residuos se han clasificado en función de su origen en los distintos sectores de producción: primarios o de producción de materias primas, como los residuos agrícolas y ganaderos, secundarios o industriales, como los residuos agroindustriales y terciarios o de servicios, como residuos sólidos urbanos y los lodos de depuradora.

Se pueden considerar como residuos agrícolas, todos los procedentes de actividades agrícolas. Este concepto embarca todo material de naturaleza orgánica originado en los sistemas agrícolas o forestales que puede ser tratado o no y devuelto al suelo con objeto de mejorar el desarrollo de los cultivos y aumentar o mantener la calidad del suelo en vistas a un desarrollo sostenible. España posee una gran diversidad productiva, consecuencia de la gran variedad de condiciones climáticas y edáficas que se encuentran a lo largo de la península. La producción hortofrutícola supone aproximadamente la mitad de la producción agrícola española, con una gran variedad de productos (hortícolas, cítricos, frutas de hueso, etc.), muchos de los cuales se exportan al exterior. En general se ha estimado que los 1,6 billones de toneladas de materia orgánica exógena que se producen cada año en la Unión Europea, 415 millones corresponden a residuos agrícolas. (Van-Camp y Col., 2001). También podrán denominarse subproductos con “alto valor añadido” los residuos de cosechas que se mantienen sin otro tratamiento en el suelo del cultivo, para mantener la concentración de materia orgánica y la estructura del suelo, para retener el agua y para evitar la erosión.

Por otra parte, se pueden considerar como residuos ganaderos, todos los residuos sólidos procedentes de la crianza de animales. La evolución de la ganadería en Europa no ha variado significativamente desde 1995, con ligeros aumentos en las aves a partir del 2000, descendiendo el número de animales del bovino (FAOSTAT). En España más del 65% del estiércol se produce en forma de purín, procedente del sector porcino. Así, las deyecciones ganaderas pueden considerarse subproductos en amplias zonas del país donde tienen una valorización inmediata como fertilizante. En general, las deyecciones ganaderas no deben

considerarse residuos, según sentencia del tribunal de Justicia de la Comunidad Europea en Luxemburgo de 8 de septiembre de 2005 (Bigeriego, 2006).

El sector agroindustrial genera una gran cantidad y variedad de residuos orgánicos, tanto sólidos como líquidos, que se pueden clasificar en dos grandes grupos. Por una parte, los residuos agroindustriales de origen vegetal más comunes son los procedentes de procesos de elaboración del vino, cerveza y del aceite. En Europa la agroindustria es uno de los sectores más grandes y por tanto los residuos que se generan suponen un grave problema medio ambiental a dicho nivel. La cantidad total de residuos se estima en unos 222 millones de toneladas anuales en la Unión Europea, la mayor parte son orgánicos considerados como bioresiduos (EUROSTAT, 2005). Por otra parte, los residuos agroindustriales de origen animal más comunes son los procedentes de la industria del procesado de la carne y el pescado. En España, la producción de carne de porcino representa casi el 60% del total de carnes producidas en nuestro país (Anuario de Estadística, 2008). En cuanto a la industria del pescado, España es el primer país de la Unión Europea en producción pesquera, por captura y acuicultura (FAOSTAT-Pesca, 2009). La producción española de transformados de la pesca y acuicultura en año 2008 fue de unas  $818 \times 10^3$  toneladas.

Y finalmente, dentro del sector terciario o de servicios destacan los residuos sólidos urbanos y los lodos resultantes del proceso de depuración de aguas residuales urbanas, en los que cuales se profundizará en los siguientes apartados.

### **2.1.2. Gestión de los residuos orgánicos**

Los residuos y subproductos orgánicos de los diferentes procesos de producción y consumo son un recurso valioso, como fuente de energía renovable, como fuente de materia orgánica para el suelo, como fuente de nutrientes y como materia prima para la producción de sustratos orgánicos. En general, son la tipología de residuos que se produce en mayor cantidad en cualquier país industrial, y su gestión inadecuada presenta graves



problemas de contaminación, desde contaminación de aguas continentales hasta emisiones de gases de efecto invernadero. Su transformación viene determinada mediante las estrategias de tratamiento apropiadas a las características de cada residuo, a los objetivos a cumplir (características del producto a recuperar o producir) y a las ventajas económicas y ambientales. La gestión y tratamiento de los residuos orgánicos es de importancia estratégica en cualquier país, y su reciclaje y valorización supone un importante aprovechamiento de recursos. Todas las tendencias legislativas en el ámbito de la gestión de residuos se basan en la gestión integral de estos. La gestión ambiental implica abordar el ciclo en su totalidad, desde la minimización en origen, tanto de caudales como de componentes indeseables, hasta el uso final de los productos obtenidos. Las tecnologías de tratamiento se encuentran “en medio” del proceso de actuación y han de dar respuesta a la pregunta “qué hacer para obtener un producto con una calidad que cumpla unas especificaciones a partir de una materia prima de una calidad determinada”, a un coste económico asumible, con garantías para una operación adecuada y con mínimo impacto ambiental y social. A menudo la calidad de las materias primas no permite obtener productos susceptibles de ser introducidos en el mercado, con la tecnología disponible. En este caso pueden adoptarse dos vías de actuación: 1) modificar los procesos que afectan a la materia prima para posibilitar posteriores estrategias de reciclaje o 2) adoptar tecnologías con el objetivo de transformar los residuos en materiales inocuos, sin uso posterior y con el mínimo impacto ambiental.

La gestión integral e integrada de residuos orgánicos por áreas geográficas conlleva dificultades extremas, debido a la multitud de variables que afectan a la toma de decisiones. El desarrollo y uso de modelos que permitan el análisis de escenarios futuros es una línea de trabajo necesaria (Huang, 2005). La estrategia de tratamiento a adoptar ha de dar respuesta a los objetivos a perseguir y a las condiciones de contorno a considerar, y no ser un imperativo de cabecera.

Los subproductos que se generan en mayor cantidad para España son los ganaderos, con una estimación de unos 91 millones de toneladas en el año 2003. Algunas estimaciones

al respecto superan los 140 millones de toneladas (WGOM&B, 2004). El criterio básico para su gestión en España se basa en la actualidad en la dosis de nitrógeno aplicado a los cultivos, siguiendo los códigos de buenas prácticas agrarias elaboradas por la Comunidad Autónoma (Fertiberia, 2006) y las normativas derivadas de la Directiva 91/676/CE sobre prevención de la contaminación de las aguas por nitrato.

Por otra parte, con una producción tan elevada de residuos es de vital importancia realizar una gestión adecuada para que no causen problemas en el medioambiente ni en la salud de las personas. Asimismo, la conservación de los recursos no renovables hace cada vez más necesario la adopción de medidas que favorezcan el desarrollo sostenible, lo que obliga a elaborar planes de gestión de residuos con la adecuada jerarquización de opciones: prevención, reutilización, reciclado, valorización energética y finalmente la eliminación definitiva (Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre de 2008«Directiva marco de residuos»). La Ley 22/2011 define estos conceptos:

-Prevención: conjunto de medidas adoptadas en la fase de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo de una sustancia, material o producto, para reducir:

1. La cantidad de residuo, incluso mediante la reutilización de los productos o el alargamiento de la vida útil de los productos.
2. Los impactos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana de los residuos generados, incluyendo el ahorro en el uso de materiales o energía.
3. El contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.

-Reutilización: cualquier operación mediante la cual productos o componentes de productos que no sean residuos se utilizan de nuevo con la misma finalidad para la que fueron concebidos.

-Reciclado: toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del

material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

-Valorización: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

Un plan adecuado de gestión de residuos orgánicos debe tener como objetivo fundamental, convertir los residuos en recursos. Para ello, se debe realizar acciones en tres ámbitos:

- Reducción del residuo en origen.
- Aplicación de tratamientos con el fin de conseguir un nivel de calidad acorde con el destino final.
- Planificación y control del destino y uso del producto.

Estos planes de gestión deben establecerse, siempre que sea posible, con la finalidad de obtener un producto de calidad que pueda ser aplicado al suelo como enmienda o abono orgánico, o que sea adecuado para la formulación de sustratos de cultivo con lo que se consigue una valorización agronómica. Cuando esta valorización no sea posible, se planificará la viabilidad de su valorización energética (combustión / gasificación). Si ninguna de las anteriores alternativas resulta viable se procederá a programar su ubicación final en vertederos controlados.

La creciente producción de residuos orgánicos hace que su correcta gestión sea de vital importancia para que no se produzcan incidencias negativas para el medio ambiente en general y para el sistema suelo-planta en particular. Es importante considerar que sin un adecuado control y optimización de su uso en función de criterios científicos, estos residuos pueden constituir un vector de contaminación y degradación de los sistemas agrícolas, así como de otros compartimentos medioambientales. En general, la contaminación no puede considerarse como un proceso degradativo aislado de un compartimento biogeoquímico en

particular, pues todos ellos están conectados entre sí: biosfera (biomasa terrestre, biomasa marina y hombre), litosfera (corteza, suelo y sedimentos), hidrosfera (agua dulce, agua de mar) y la atmósfera. Esta interrelación puede minimizar el efecto de la contaminación, ser origen de ella, e incluso, ser un medio eficaz de propagación. El suelo como compartimento donde se incorpora el residuo, es un sistema abierto y dinámico que tiende a permanecer en condiciones de equilibrio. Además puede considerarse como un sistema amortiguador y/o depurador al ser capaz de minimizar alteraciones de algunas de sus propiedades, así como degradar o inmovilizar contaminantes.

A pesar de que las directivas y reglamentos europeos posibilitan una evolución pareja en Europa, en la implantación de tecnologías de transformación de residuos orgánicos, las diferentes condiciones de contorno imperantes en cada país explican diferencias sustanciales en el grado de implantación. Estas condiciones comprenden los costes y precios de la energía, la intensidad y densidad de producción de residuos (que afecta a los costes de transporte), la demanda de fertilizantes o enmiendas, la posibilidad de tratamiento colectivo o co-tratamiento y la aceptación por parte de la población (EEA, 2002).

En la actualidad, se da mucha importancia a la minimización de materia orgánica biodegradable que entra a vertedero, siendo éste el primer punto a cumplir dentro de la gestión de residuos. La Directiva 1999/31/CE (DOCE, 1999) relativa al vertido de residuos es muy explícita en este sentido y programa la reducción gradual y obligatoria de residuos biodegradables que entra en vertederos, con valores de reducción del 75% a los 5 años, 50% a los 8 años y 35% a los 15 años a partir de la transposición de la Directiva a las legislaciones estatales (en España, mediante el Real Decreto 1481/2001 (BOE, 2002)) y respecto a los residuos biodegradables generados en el año 1995. Para hacer posibles estos objetivos son posibles 3 grupos de estrategias genéricas: 1) transformación para mejorar la calidad y reciclaje en sistemas agrarios (digestión anaerobia y compostaje); 2) transformación para reducir materia orgánica y aislamiento en vertedero (tratamiento mecánico-biológico); 3) incineración y aislamiento de cenizas. Los costes económicos dependen de un equilibrio entre el diseño tecnológico y los aspectos de la gestión y recogida. Los procesos con la

finalidad de reducir la materia orgánica biodegradable en cualquier tipología de residuo orgánico, de forma genérica son (European Commission, 2000; 2001):

- Compostaje.
- Digestión anaerobia (mesofílica o termofílica).
- Combinación de digestión anaerobia y compostaje del digerido.
- Digestión aerobia.
- Desnitrificación.

El reciclaje está priorizado por encima de la valorización energética y las prácticas de eliminación o aislamiento, según la Directiva 2008/98/CE (DOUE, 2008b), relativa a residuos, y cuya transposición a la normativa española deberá de realizarse antes del 12 de Diciembre del 2010. En este sentido, se debe priorizar la obtención de productos con la calidad necesaria para poder sustituir materias primas y reciclarse en las cadenas productivas o en proyectos de mejora ambiental.

### **2.1.3. Impactos ambientales de los procesos de tratamiento de residuos**

Dos de los aspectos a tener en cuenta en la realización de un estudio de las cargas ambientales asociadas a la gestión de residuos son:

- Emisiones a la atmósfera durante el proceso de tratamiento.
- Consumo de recursos durante el proceso de tratamiento: agua y energía.

#### a) Emisiones a la atmósfera durante el tratamiento biológico

Uno de los campos de mayor interés en el estudio de los impactos de los procesos de tratamientos de residuos se centra en las emisiones que se generan a lo largo del proceso. Principalmente se han estudiado las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ). En referencia al amoníaco, éste es el compuesto nitrogenado que se emite en mayor proporción. Entendiendo que el objetivo del tratamiento es producir un material estabilizado que pueda ser utilizado como enmienda

agrícola, las emisiones de amoníaco durante el proceso de tratamiento de residuos orgánicos presentan dos desventajas. Por un lado, el evidente efecto del amoníaco sobre el gas emitido en cuanto a generación de olor, aunque su límite de detección es algo elevado (17ppm), además el amoníaco favorece la formación de lluvia ácida. Por otro lado, la reducción de la concentración de nitrógeno en el sólido debido a las emisiones de amoníaco, que supone una reducción del valor fertilizante del producto final.

Las emisiones de  $N_2O$  y  $CH_4$  se relacionan con la presencia de zonas anóxicas o anaerobias en el residuo a lo largo de su tratamiento. Evidentemente, en instalaciones en las que se incluye la digestión anaerobia, el  $CH_4$  producido es considerado un producto valorizable, del cual se obtendrá energía en forma de calor o electricidad. El problema se presenta en procesos como el compostaje, en los que la compactación, la aireación insuficiente o la falta de volteos pueden favorecer la formación de zonas anaerobias y por lo tanto la emisión de estos gases con especial efecto sobre el calentamiento global. El  $N_2O$  puede producirse durante el proceso de compostaje debido a la oxidación incompleta del amoníaco o como producto de procesos de desnitrificación. La emisión del  $N_2O$  depende de la temperatura, produciendo las mayores emisiones a temperaturas inferiores a los  $45^{\circ}C$ . El  $CH_4$  se genera en zonas en las que existan condiciones de anaerobiosis a partir de la degradación de lípidos, carbohidratos o proteínas. Por lo tanto, la emisión de metano en instalaciones de tratamiento de residuos basadas en compostaje indicará una mala operación del proceso.

Los compuestos orgánicos volátiles representan otro grupo mayoritario de compuestos que se emiten durante el tratamiento de residuos orgánicos. Los COV representan un amplio grupo de compuestos orgánicos caracterizados por una presión de vapor mínima de 0,01kPa a  $20^{\circ}C$ . Además presentan una baja solubilidad en agua. Los COV se generan en distintos puntos de las instalaciones de residuos, evidentemente durante la degradación biológica, pero también en las etapas de pretratamiento y recepción del residuo. En el campo de las emisiones a la atmósfera se presta especial atención a la emisión de olores. De hecho este es un factor determinante al escoger la tecnología de compostaje a

utilizar (túneles, pilas...) y la configuración de la planta (abierta o cerrada) con la finalidad de minimizar las molestias a los vecinos, ya sean empresas o residencias. La reducción de las emisiones olorosas supone uno de los aspectos a los que actualmente se presta mayor atención durante el diseño de una instalación de tratamiento de residuos, sobre todo si esta se implantara cerca de áreas residenciales. De hecho, la reducción en las emisiones de olores es perfectamente viable, mediante un adecuado diseño, pero también tiene gran influencia el modo de operación de la instalación.

b) Consumo de recursos durante el proceso de tratamiento: agua y energía

Otro aspecto importante a tener en cuenta será el consumo de agua y energía. Debe suponerse que las distintas tecnologías aplicadas al tratamiento de residuos orgánicos presentaran consumos diferentes de agua y energía. Por ejemplo, las tecnologías no intensivas deberían presentar menor consumo de recursos, mientras que las tecnologías intensivas, con mayor tecnificación, deberían presentar un mayor consumo. De todas formas solo un correcto análisis de ambos tipos de tecnologías mediante un correcto inventario de cargas ambientales permitiría detectar ese factor.

En el caso de la energía, deberán tenerse en cuenta sus distintos orígenes, generalmente electricidad y combustible gasoil, ya que el impacto generado por cada uno de ellos será distinto. Del mismo modo, y en aquellos casos en los que exista, deberá tenerse en cuenta la generación de energía, en el caso del tratamiento de residuos orgánicos procedente del biogás generado en el proceso de digestión anaerobia. Dicha energía podrá contabilizarse como energía evitada.

Los procesos de tratamiento de residuos orgánicos son generalmente procesos que conllevan un cierto consumo de agua. Aun así, durante el proceso se producen lixiviados que son utilizados en la fase de descomposición del proceso de compostaje para humedecer el material. Los lixiviados no pueden utilizarse durante la fase de maduración con la finalidad de evitar la contaminación por patógenos de un material que ya se ha higienizado.

### **2.1.3. Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a la gestión de residuos orgánicos**

Podemos definir el análisis de ciclo de vida (ACV) como un proceso objetivo cuya finalidad es la evaluación de la carga medioambiental asociada a un producto, proceso o actividad. Su base es la identificación y cuantificación de energía, las materias primas, los residuos, emisiones y efluentes asociados al proceso, producto o actividad estudiado valorando en impacto en el medio ambiente que causan los usos y los residuos mencionados y proponiendo, finalmente, mejoras a introducir para disminuir ese impacto. Actualmente, la utilización de la herramienta ACV está ampliamente extendida y reconocida como herramienta para la evaluación de procesos, hasta el punto que, por ejemplo, la nueva Directiva Marco Residuos (Directiva 2008/98/CE) impulsa el estudio del ciclo de vida como herramienta para calcular el impacto ambiental de las diferentes opciones de tratamiento.

El ACV es pues una herramienta de gestión que permite la toma de decisiones, fundamentalmente desde el punto de vista ambiental. El objetivo del ACV es la reducción de los impactos asociados al producto, proceso o actividad que se está estudiando. Al mismo tiempo, mediante la aplicación de procesos dirigidos a mejorar el sistema estudiado, se consigue reducir los consumos de materias primas, energía y emisiones al medio.

El proceso, producto o actividad se analiza desde su concepción hasta su eliminación “de la cuna a la tumba”. Así pues, cuando el análisis de ciclo de vida se aplica a un producto éste incluye su ciclo completo de vida: desde la extracción de las materias primas necesarias para su fabricación hasta el depósito final del residuo generado en su consumo, pasando por las etapas de fabricación, transporte, distribución, uso y posible reutilización y reciclado. En algunos casos se excluyen del estudio de las etapas de distribución, consumo y post-consumo pues son las que más variabilidad presentan.

#### **a) Metodología del ACV**

El proceso para la realización de un ACV se divide en cuatro etapas, claramente diferenciadas pero relacionadas entre ellas:



- **Definición de objetivos y alcance:** define el objetivo sobre el que se fundamentará el análisis.
- **Fase de inventario:** determinación de las cargas ambientales asociadas al proceso, producto o servicio estudiado. Constituye el fundamento del ACV.
- **Fase de evaluación de impactos:** determinación de los impactos que consumos y emisiones pueden provocar sobre el medio ambiente.
- **Fase de interpretación y evaluación de mejoras:** es la etapa más importante, la que justifica todo el proceso del ACV.

#### b) ACV y gestión de residuos

La gestión de residuos, incluyendo su tratamiento, como proceso industrial no se escapa de generar un cierto impacto sobre el medio ambiente. Es evidente que este impacto debería ser menor que el impacto evitado en caso de no realizarse la correcta gestión de los residuos. En este sentido, Favoino y col. (2008) destaca algunos de los efectos positivos del compostaje indicando: 1) la aplicación de compost reduce el uso de fertilizantes y por lo tanto la generación de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de energía necesario para su producción 2) la aplicación de compost permite reducir las necesidades de riego ya que el compost incrementa la capacidad de retención de agua del suelo 3) se produce un retorno de carbono al suelo.

Una de las claves para realizar un ACV realista es disponer de un buen inventario. Para ello debe disponerse de datos reales sobre el sistema analizar. Debe evitarse en lo posible la utilización de datos calculados a partir de referencias bibliográficas o bases de datos, ya que pueden proceder de sistemas muy distintos al que es objeto de estudio. La utilización del ACV en la gestión y tratamientos de residuos orgánicos es de vital importancia para definir qué tecnologías generan menor impacto ambiental, en este sentido administraciones y empresas del sector podrían utilizar esta herramienta para mejorar los sistemas actuales de gestión y tratamientos de residuos y aplicarlo al diseño de nuevas tecnologías en este

campo. En la Tabla 1 se indican las principales emisiones de gases durante el proceso de compostaje.

**Tabla 1.** Emisiones de gases durante el compostaje de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

	Valor	Unidades	referencia
<b>NH<sub>3</sub></b>	0.17	kg/t FORSU	Pagans (2006) <sup>1</sup>
	0.38	kg/t FORSU	Baky and Erikson (2003) <sup>1</sup>
	0.02 a 0.05	kg/t FORSU	Clemens and Culhs (2003) <sup>3</sup>
	0.38	kg/t FORSU	Díaz (2005) <sup>2</sup>
<b>COV</b>	2.30	kg/t FORSU	Muñoz and Rieradevall (2002) <sup>2</sup>
	0.15	kg/t FORSU	Smet (1999) <sup>1</sup>
	1.70	kg/t FORSU	Baky and Erikson (2003) <sup>1</sup>
	1.69	kg/t FORSU	Díaz (2005) <sup>2</sup>
	4.30	kg/t FORSU	Diggelman (2003) <sup>2</sup>
	0.59	kg/t FORSU	Smet (1999) <sup>1</sup>
	0.59	kg/t FORSU	Muñoz and Rieradevall (2002) <sup>2</sup>
<b>CH<sub>4</sub></b>	1.54E-04	kg/t FORSU	Díaz (2005) <sup>2</sup>
	1.2E-02	kg/t FORSU	Clemens and Culhs (2003) <sup>3</sup>
	3E-02 a 8	kg/t FORSU	Beck-Friis y col. (2001) <sup>1</sup>
	5.8E-08	kg/t FORSU	Diggelman (2003) <sup>2</sup>
<b>N<sub>2</sub>O</b>	6E-02 a 6E-02	kg/t FORSU	Hellebrand (1998) <sup>1</sup>
<sup>1</sup> Datos obtenidos en estudios a escala laboratorio <sup>2</sup> Datos bibliográficos <sup>3</sup> Datos obtenidos en instalaciones industriales reales			

### **3. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

#### **3.1. Caracterización y descripción general**

La Comunidad Europea en su Directiva 1975/442 (DOCE, 1975), define residuo como “Cualquier sustancia u objeto del cual se desprenda su poseedor o tenga la obligación de desprenderse en virtud de las disposiciones nacionales en vigor”. En España la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, (BOE, 1998) define los residuos como “Cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de dicha ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse. En todo caso, tendrán esta consideración los que figuren en el Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado por las Instituciones Comunitarias”.

Hay que tener en cuenta que existe una gran variedad de objetos susceptibles de ser convertidos en residuos en el momento en que el usuario así lo decide, por ello existe una gran variedad de residuos. Los residuos se pueden clasificar según multitud de criterios, así tenemos:

- Clasificación según su estado físico (sólido, líquido o gaseoso)
- Clasificación según su uso original (envases, residuos de comida...)
- Clasificación según los materiales que contiene (plástico, vidrio...)
- Clasificación según sus propiedades físicas (combustible, compostable, reciclable...)
- Clasificación según su origen (doméstico, comercial, agrícola, industrial...)
- Clasificación según su peligrosidad (peligroso, no peligroso...)

Atendiendo a su origen, y según la Comisión Europea (Eurostat, 2008), el residuo comercial y doméstico y normalmente llamado Residuo Municipal (RM) representa un 8.5 % del total de residuos generados por nuestra sociedad, tratándose de un residuo que es difícil de gestionar debido a que está formado por diversos materiales, todos ellos mezclados, y su composición varía en el tiempo (estaciones), así como geográficamente (zona rural/urbana, de un país a otro). Por el contrario los residuos industriales, agrícolas, mineros o

procedentes de la construcción o producción de energía son mucho más homogéneos y por tanto más fáciles de gestionar.

Respecto a la conservación de los recursos, es necesario recordar que la Tierra es un sistema abierto desde el punto de vista energético, pero esencialmente cerrado al considerar los materiales. Así, los recursos de donde extraemos las materias primas y auxiliares para nuestra actividad doméstica e industrial, se pueden agotar debido a que la cantidad total de cada elemento presente en la Tierra permanece constante (exceptuando los radioactivos). La cuestión sobre el inminente o no inminente agotamiento de dichos recursos es objeto de controversia.

En la actual ley de residuos y suelos contaminados se indica que antes del 2020, la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, bioresiduos u otras fracciones reciclables deberán alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso. Esta ley también promueve la implantación de medidas de prevención, la reutilización y el reciclado de los residuos, y conforme a lo que establece la Directiva marco permite calificar como operación de valorización la incineración de residuos domésticos mezclados sólo cuando ésta se produce con un determinado nivel de eficiencia energética; el nivel de eficiencia energética debe ajustarse a los niveles fijados en el anexo II de esta Ley. Para poder aprovechar los recursos contenidos en los residuos urbanos resulta imprescindible conocer su composición, y por eso se plantea la necesidad de agrupar los distintos componentes en categorías de cierta homogeneidad:

- **Inertes:** metales, vidrios, restos de reparaciones domésticas, tierra, escoria y cenizas.
- **Fermentables:** sustancias orgánicas putrescibles como pan, pescado, restos de hortalizas y frutas.
- **Combustibles:** papel, cartón, plásticos, gomas, cueros, textiles, y otros.

El análisis comparativo de los datos de producción en nuestro país en los últimos años refleja un aumento importante de los componentes combustibles y una disminución en

el contenido de materia orgánica, mientras que la cantidad de vidrio se ha mantenido debido al aumento en el sistema de la recogida selectiva que se está desarrollando de forma progresiva en la mayoría de nuestras Comunidades Autónomas. En la siguiente Tabla se indica la composición de los residuos urbanos en España y otros países.

**Tabla 2.** Porcentaje de los componentes de RU.

Componente	España	España	España	<b>España</b>	Alemania	Francia	Portugal	EEUU
	1986 a	1990b	2000c	<b>2004d</b>	1985a	1985a	1985a	1990#
Mat. Org.	52	49,2	48,9	<b>44</b>	40,8	37	53,3	28,4
Papel	15	20	18,5	<b>21</b>	17,9	27,5	19	34,2
Plástico	6	7	11,7	<b>10,6</b>	5,4	4,5	3	9,2
Vidrio	6	7,8	7,6	<b>7</b>	9,2	7,5	3	7,1
Metal	2,5	4	4,1	<b>4,1</b>	3,2	6,5	3,5	8,1
Otros	18,5	12	9,2	<b>13,3</b>	23,5	17	18,2	13

a:Otero(1992); b:MOPT(1991); c:MMA(2000); #:Parr& Hornic(1993); d:Plan Nacional de Residuos Urbanos (2008-2015)

El Plan Piloto de Caracterización de residuos de origen doméstico realizado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011) ha determinado la composición de los distintos flujos que componen los residuos domésticos (fracción orgánica, envases ligeros, vidrio, papel y resto) y a partir de esta información se ha estimado la composición de la bolsa tipo de los residuos generados en los hogares, el papel/cartón el 18,7%, los envases ligeros el 14%, el vidrio el 6,9% y el resto el 17,6% que incluiría residuos de muebles, aparatos eléctricos y electrónicos, pilas, textiles, etc.

Es necesario conocer algunas de las propiedades de los residuos para prever y organizar los sistemas de prerrecogida, recogida y tratamientos finales de recuperación o eliminación, y para decidir sistemas de segregación en el caso de los residuos que generen riesgos especiales para el medio ambiente.

- **Humedad:** Está presente en los residuos urbanos, y oscila alrededor del 40% en peso, con un margen que puede situarse entre el 25 y el 60%. La máxima aportación la proporcionan las fracciones orgánicas, y la mínima, los productos sintéticos. Esta característica debe tenerse en cuenta por su importancia en los procesos de compresión de residuos, producción de lixiviados, transporte, procesos de transformación, tratamientos de incineración y recuperación energética y procesos de separación de residuos en planta de reciclaje. En los residuos urbanos, la humedad tiende a unificarse y unos productos ceden humedad a otros. Esta es una de las causas de degradación de ciertos productos como el papel, que absorbe humedad de los residuos orgánicos y pierde características y valor en los procesos mecánicos de reciclaje sobre el reciclado en origen, que evita este contacto.
- **Densidad:** Varía en función de la zona de producción (en áreas comerciales y de oficina es más baja que en las residenciales debido al porcentaje alto de papel y cartón) y de la estación del año (en verano es menor que en invierno debido a la diferencia de alimentos que se consumen). Este parámetro es muy importante en el diseño de los medios de recogida y transporte, así como para el cálculo de un vertedero controlado.
- **Peso específico:** La densidad de los residuos urbanos es un valor fundamental para dimensionar los recipientes de prerrecogida tanto de los hogares como de la vía pública. Igualmente, es un factor básico que marca los volúmenes de los equipos de recogida y transporte, tolvas de recepción, cintas, capacidad de vertederos, etc. Este valor soporta grandes variaciones según el grado de compactación a que están sometidos los residuos. La reducción de volumen tiene lugar en todas las fases de la gestión de los residuos y se utiliza para optimizar la operación, ya que el gran espacio que ocupan es uno de los problemas fundamentales en estas operaciones. Primero, en el hogar al introducirlos en una bolsa, después, dentro del contenedor al estar sometidos al peso de otras bolsas, más tarde en los vehículos recolectores compactadores, y por último en los tratamientos finales.
- **Poder calorífico:** Las propiedades calorimétricas de los residuos urbanos son los parámetros sobre los que se diseñan las instalaciones de incineración y de

recuperación energética. Su valoración, fruto de la propia variabilidad de la composición, viene marcada por el poder calorífico de cada producto. En términos generales, puede indicarse que el poder calorífico de la totalidad de los residuos sólidos urbanos está entre 1.500 y 2.200 kcal/kg.

- **Granulometría:** El grado de segregación de los materiales y el tamaño físico de los componentes elementales de los residuos urbanos, constituyen un valor imprescindible para el dimensionado de los procesos mecánicos de separación y, en concreto, para definir cribas, trómeles y elementos similares que basan su separación exclusivamente en el tamaño. Estos valores también deben tomarse con cautela, ya que las operaciones de recogida afectan al tamaño por efecto de la compresión o de mecanismos trituradores. En cada caso concreto es preciso efectuar los análisis pertinentes para adecuar la realidad de cada circunstancia al objetivo propuesto.
- **Composición química.** Como consecuencia de la enorme variabilidad que experimenta la composición de los residuos sólidos urbanos, la composición química resultante de su conjunto también es muy variable.
- **Relación C/N:** Este parámetro es uno de los que permite evaluar el posible tratamiento hacia el compostaje para su posterior utilización agrícola. Debe estar comprendido entre 20 y 35 para que se pueda realizar la transformación biológica (Costa et al., 1991). En países desarrollados con porcentaje alto de papel y cartón, el valor de esta relación se incrementa por encima de 35.

Por otra parte, dada la gran variedad de actividades que producen residuos urbanos, estos están compuestos por un conjunto de materiales muy heterogéneo. Por lo que hay diversos factores que inciden en su composición (Otero del Peral, 1992) y que podrían resumirse en:

- El nivel económico y modo de vida de los habitantes, en función de lo que consumen y utilizan como productos. En general, cuanto mayor es el nivel de vida, menor porcentaje de materia orgánica y más de papel, plástico, metales o vidrio;

incluso así, la materia orgánica suele significar aproximadamente entre el 40% y el 50% del total.

- El clima de la zona y la época del año, por ejemplo los residuos de verano son más ricos en restos vegetales, en invierno y en las zonas de menores temperaturas aumenten las escorias y cenizas procedentes de chimeneas...
- Características de la población, según se trate de zonas rurales o núcleos urbanos, zonas presidenciales o de servicios..., las actividades económicas predominantes serán diferentes, y por tanto lo serán los residuos urbanos producidos.
- Las variaciones de población que experimente el municipio, es decir, los desplazamientos diarios entre ciudades y entre zonas de una misma ciudad, o movimientos en vacaciones y fines de semana, o la población visitante.

Además de los factores antes indicados, y ya refiriéndonos a un ámbito geográfico concreto, podemos citar otros motivos que también inciden en la generación de residuos, como son el tipo de hábitat, la existencia o no de espacios de residencias secundarias, la proporción de zonas verdes urbanas, tanto públicas como privadas, el nivel económico de vida de sus habitantes así como sus costumbres y hábitos en los distintos días de la semana y épocas del año, por supuesto el número de habitantes, tanto fijos como estacionales, e incluso los movimientos pendulares o población flotante de una ciudad, sus actividades económicas predominantes (actividades industriales o manufactureras, tipo de comercio, etc.), su proyección exterior o nivel de atracción de población foránea, el calendario de eventos y celebraciones..., y otros muchos factores que harán variar los volúmenes de residuos urbanos producidos. Es importante señalar que la composición de los residuos urbanos generados determinará su modo de gestión y tratamiento. Por ello, para poder gestionar de manera adecuada los residuos urbanos producidos en un municipio resulta fundamental conocer su composición que puede ser diferente de un municipio a otro e incluso entre las zonas de un mismo municipio.

La caracterización de los residuos domésticos es un método que permite, a partir de una serie de operaciones (recogida de muestras, clasificación, tratamientos de datos, etc.)



conocer el contenido de yacimientos de residuos desde un punto de vista cualitativo, es decir, según el tipo de residuo. Resulta en todo caso fundamental conocer qué contiene nuestra “basura” y en qué proporción, si queremos llevar a cabo con eficacia el tratamiento de los residuos.

Ciertos estudios elaborados en distintos municipios con motivo de la implantación de la recogida selectiva de envases ligeros, indican una tendencia a que el porcentaje de materia orgánica se reduzca en beneficio de los de plástico, papel, cartón y vidrio, pero el porcentaje de la fracción orgánica son superiores al 40%. Esto demuestra que la mayor parte de los residuos que se generan en los municipios, aproximadamente la mitad, son materia orgánica (restos de alimento sobre todo, pero también desechos de podas y demás trabajos de jardinería de los espacios verdes de las distintas ciudades).

### **3.2. Producción y destino**

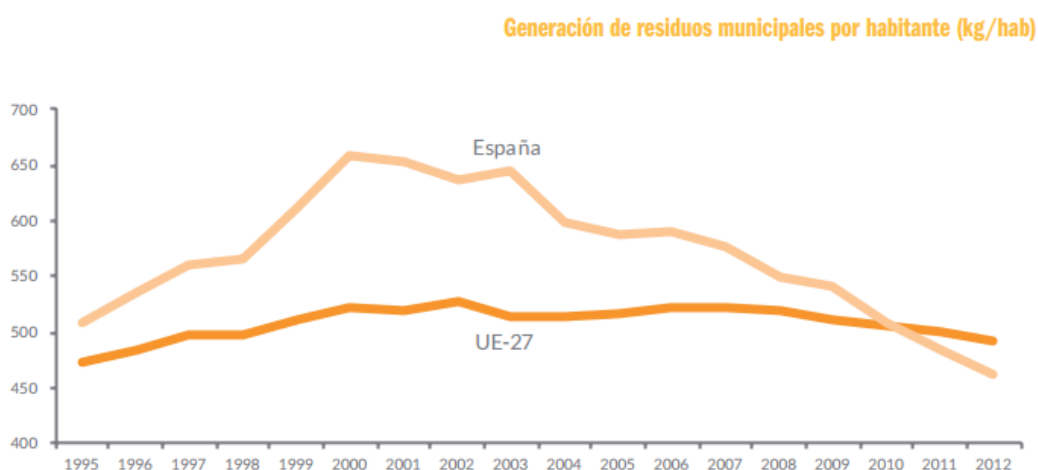
De forma general se puede estimar que la cantidad de residuos urbanos generados oscila entre 0,35 kg/persona/día en los países menos desarrollados hasta 1,3 en los muy desarrollados. En España, las comunidades con mayor producción global de residuos urbanos son Andalucía y Cataluña, mientras que las comunidades que alcanzaron mayor producción por habitante y día fueron Baleares y Canarias, probablemente debido al impacto turístico. Por otra parte, Galicia fue la comunidad con menor tasa de generación de residuos por habitante y año (Tabla 3).

**Tabla 3.** Distribución por comunidades autónomas de residuos urbanos (2004).

	<b>Kg/hab/día</b>	<b>Población</b>	<b>t/año</b>	<b>%</b>
Andalucía	1,780	7.687.518	4.308.022	18,9
Aragón	1,200	1.249.584	547.318	2,41
Asturias	1,260	1.072.761	533.015	2,35
Baleares	2,020	955.045	704.155	3,11
Canarias	2,010	1.915.540	1.405.336	6,2
Cantabria	1,610	554.784	316.019	1,39
Castilla-La Mancha	1,130	1.848.881	762.571	3,36
Castilla y León	1,118	2.493.918	1.017.693	4,49
Cataluña	1,600	6.813.319	3.978.978	17,55
Valencia	1,215	1.075.286	476.863	2,1
Extremadura	1,215	1.075.286	476.863	2,1
Galicia	0,910	2.750.985	913.740	4,03
Madrid	1,567	5.804.829	3.320.101	14,64
Murcia	1,200	5.804.829	567.076	2,5
Navarra	1,280	584.734	273.188	1,2
País Vasco	1,396	2.115.279	1.077.819	4,75
La Rioja	1,398	293.553	149.791	0,66
Ceuta	1,549	74.654	42.208	0,19
Melilla	1,711	68.016	42.477	0,19
ESPAÑA	1,447	43.197.684	22.807.748	100

Fuente: Plan Nacional de Residuos Urbanos (2008-2015).

En el gráfico 1 se muestra la generación de residuos urbanos por habitante en España y Europa, obtenido del Perfil Ambiental de España 2013, elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.



**Gráfico 1.** Producción de residuos municipales por habitante en España y la Unión Europea. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Perfil Ambiental de España 2013.

En el año 2000, con 656 kg, se registró la cifra de mayor generación de residuos por habitante de los últimos años, iniciándose, a partir de ese año, un descenso continuado que ha llegado a ser del 29,5% en 2012. Los sólo 464 kg/habitante generados en ese año colocaron a España en el decimo quinto país en generación de residuos municipales dentro del entorno europeo, ofreciendo desde 2011, un valor inferior al de la medida de la Unión Europea (situado en torno a los 492 kg/habitante). El descenso en la generación de residuos urbanos por habitante en España se ha producido a un ritmo superior al experimentado por la UE, como se puede apreciar al comparar la pendiente del gráfico 1.

Respecto a la cantidad total de residuos generados, España contribuyó en 2012 con el 8,8% de todos los residuos de la UE-27. Se trata de la menor contribución de los últimos años, y destaca frente al 10,5% que supusieron los residuos de nuestro país en la UE-27 en el año 2000. Referido a la UE-28 (incluyendo Croacia), la contribución de España fue del 8,7% de los residuos de toda la UE. En la Tabla 4 se indica la generación total de residuos municipales en España y en la UE-27.

**Tabla 4.** Generación total de residuos municipales en la UE-27 y en España (1000 t). Fuente:

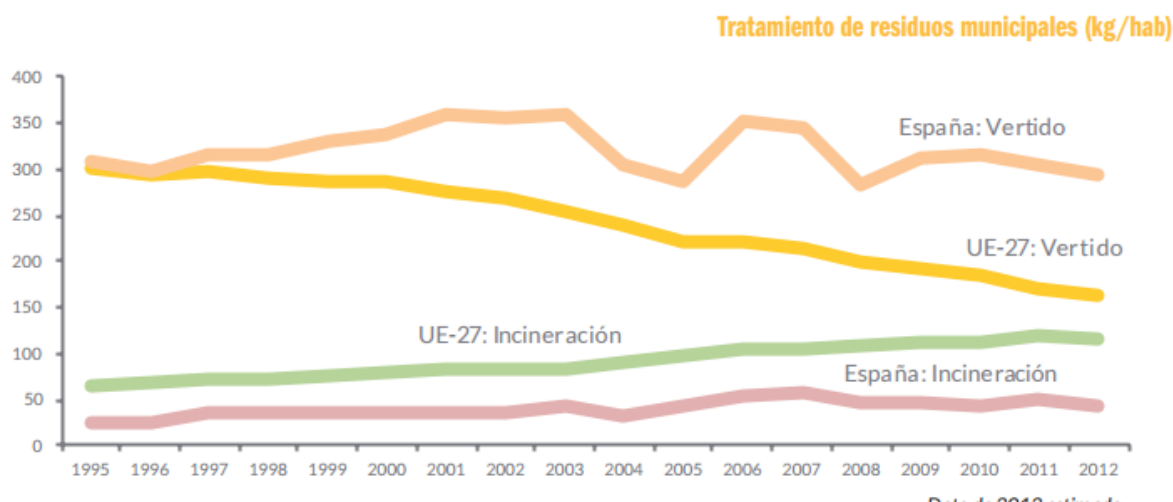
Eurostat

	1995	2000	2005	2010	2011	2012
UE-27	226.162	252.643	254.024	253.592	251.307	246.632
España	20.076	26.505	25.683	23.774	22.672	21.678
% España respecto UE-27	8.9	10.5	10.1	9.4	9.0	8.8

Fuente: Eurostat

En el año 2010 la cantidad total estimada de residuos urbanos recogida en España fue de unos 21,9 millones de toneladas, de los que el 16% fueron recogidos de forma selectiva mediante contenedores situados en la vía pública y puntos limpios. En la UE-28 se generaron cerca 248,3 millones toneladas de residuos municipales en 2012. De ellos, el 9% (21,7 millones de toneladas) tuvieron origen en España. Desde el año 2006 la totalidad de los residuos domésticos generados en España, se gestionaron de manera controlada. La UE se acerca también a ese valor, que se situó en el 98% en 2012.

Por habitante, el descenso en la generación de estos residuos ha venido acompañado de una disminución en el depósito en vertedero de los mismos que, entre 1995 y 2012, se redujo un 4,5%, alcanzando los 294 kg/habitante en este último año. Cabe destacar que, en el año 2001, el depósito en vertedero fue el destino de 261 kg/habitante (67 kg más por habitante que en 2012) (gráfico 2). Por su parte, la incineración con recuperación de energía fue el destino de sólo el 9,5% de este tipo de residuos en 2012. En España representa una alternativa que, aunque casi ha duplicado su uso entre 1995 y 2012, ha tenido un desarrollo limitado en los últimos años. De hecho, en 2012 se ha reducido ostensiblemente, calculándose en 44 kg/habitante, frente a los 50 kg/habitante que se incineraron en 2011.



**Gráfico 2.** Tratamiento de residuos municipales en España y la Unión Europea. Fuente: Eurostat

En la Tabla 5 podemos observar la distribución del destino de los residuos municipales generados en España por habitante y año (2012).

**Tabla 5.** Destino de los residuos municipales generados en España por habitante y año (2012).

Depósito en vertedero	Incineración con recuperación de energía	Reciclado	Compostaje
63.4	9.5	17.0	10.1

Fuente: Eurostat

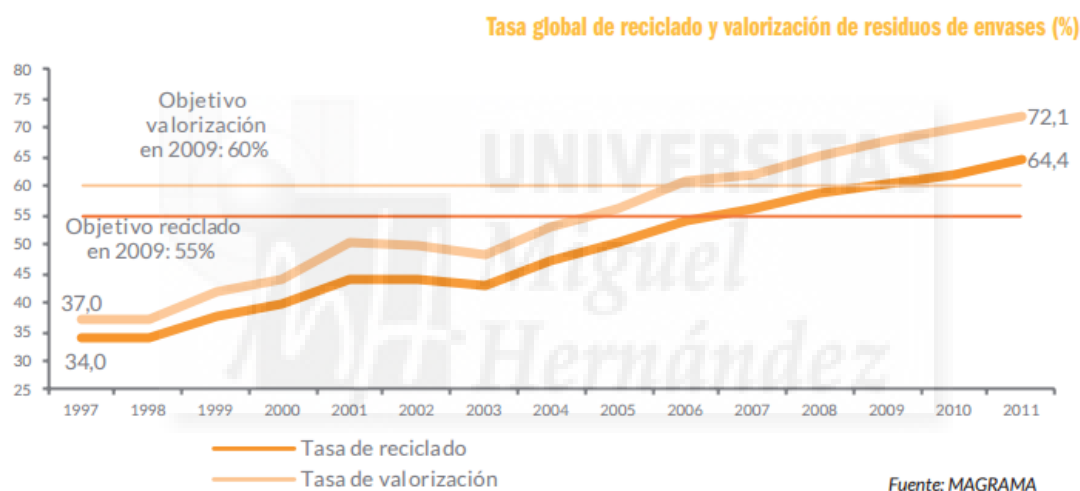
Respecto a los residuos municipales destinados a reciclado, en el año 2002 ofreció el máximo valor, con 92 kg/habitante, que se redujeron a 79 kg/habitante en 2012. El compostaje tuvo 2008 como el año de máximo destino, con 134 kg/habitante fecha a partir de la cual comenzó una reducción progresiva hasta descender a los 47 kg/habitante calculados en 2012. Puede deducirse que el descenso experimentado en el vertido de residuos obedece más a una reducción en la propia generación que al uso de las otras opciones de gestión y tratamiento. La Tabla 6 hace referencia a la generación y tratamiento de los residuos en España kg/habitante.

**Tabla 6.** Generación y tratamiento de los residuos en España.

	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Residuos generados	510	658	588	510	485	464
Residuos gestionados	368	494	517	510	485	464
Depósito en vertedero	308	337	288	318	305	294
Incineración	24	36	44	44	50	44
Reciclaje	36	44	84	90	81	79
Compostaje y digestión	0	77	100	59	49	47
% Tratamiento/generación	72	75	88	100	100	100

Fuente: Eurostat.

En el gráfico 3 observamos la tasa global de reciclado y valorización de residuos de envases



**Gráfico 3.** Tasa global de reciclado y valorización de residuos de envases. Fuente: MAGRAMA

El programa Estatal de Prevención de Residuos (PEPR) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (noviembre de 2013) establece que la cantidad total de residuos de envases generados en España se ha incrementado de forma continuada hasta el año 2007, fecha a partir de la cual comienza a disminuir. En 2011 la cantidad generada fue inferior a la contabilizada en el año 2003.

El reciclaje de envases constituye una de las principales áreas prioritarias del PERP y forma parte de tres de las cuatro líneas estratégicas del mismo: la reducción de la cantidad

de residuos generados, el impulso a su reutilización y la prolongación de su vida útil y la minimización de los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente. En este sentido, la “cantidad total de residuos de envases/año”, es uno de los indicadores seleccionados para realizar, con carácter bienal y con inicio en 2014, la evaluación de resultados del programa de prevención de residuos. El crecimiento de las tasas globales de reciclado y valorización de residuos de envases en una constante en el territorio español, lo que demuestra el grado de implicación de la sociedad y de los sectores económicos en su adecuada gestión. Desde el año 2004, se aprecia un incremento continuo de las mismas y, ya en 2006, se superó el objetivo global de valorización del 60% y, en 2007, el del 55% establecido para la tasa de reciclado, ambos fijados para ser alcanzados el 31 de diciembre de 2008.

Para cada tipo de material existen también unos objetivos fijados, siendo las tasas alcanzadas en 2011 (Tabla 7) para cada uno de ellos:

**Tabla 7.** Tasas de reciclado y valorización de residuos de envases.

	Vidrio	Plástico	Papel y cartón	Metales	Madera	Otros	Global envases
Tasa de reciclado	66.6	32.4	76.6	75.2	53.2	0.0	64.4
Tasa de valorización	66.6	55.5	82.2	75.2	62.6	2.5	72.1

Fuente: MAGRAMA

El Plan Piloto de Caracterización de Residuos de Origen Doméstico realizado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en 2011, estableció que en la composición de una bolsa-tipo de residuos, el papel y el cartón representaban el 18,7%, los envases ligeros el 14,0% y el vidrio el 6,9%. Además de la fracción orgánica, que es la más relevante cuantitativamente con el 42,7% existe una fracción resto que representa el 17,6% y que incluiría residuos de muebles, aparatos eléctricos y electrónicos, pilas y restos textiles.

España ocupó en 2011 la décima posición de la UE-27 en tasa de reciclado de residuos de envases, con un valor del 64,4%, cifra superior, por primera vez, a la de la media europea que fue del 63,6%. Entre los años 2005 y 2011, la tasa de reciclado se vio incrementada en 14 puntos porcentuales. Se trata del cuarto mayor incremento experimentado de entre los diez países de mayor tasa de reciclado en 2011, habiendo sido superada solamente por Bulgaria (34,3 puntos), Eslovenia (18,3 puntos) e Irlanda (15,3 puntos porcentuales).

Respecto a las bolsas comerciales de un solo uso, la adopción de medidas por parte del sector de la distribución (fundamentalmente con el establecimiento de un precio para la bolsa), de las administraciones y los ciudadanos (fundamentalmente mediante de bolsas reutilizables y otros medios de transporte), en cumplimiento de los objetivos establecidos en el PNIR, ha originado un descenso de su consumo y, por tanto, de su transformación en residuo. Así, mientras que en 2007 se produjeron en España alrededor de 13.500 millones de bolsas de plástico y unos 2.080 millones de papel/cartón, que generaron cifras de aproximadamente 98.800 y 41.600 toneladas de residuos anuales, respectivamente, en 2011 la generación de residuos de bolsas de un solo uso de plástico no biodegradable de redujo a 70.000 toneladas (reducción del 30%).

La memoria anual de Ecoembes correspondiente a 2012 cifra en 2,7 millones las toneladas gestionadas en un año, y en 12.051 las empresas adheridas al Sistema Integrado de gestión. Los efectos de la crisis económica global han tenido como consecuencia indirecta una ligera reducción de estas variables, al compararlas con los valores de 2011 (3,9% en las toneladas gestionadas y 37 empresas menos adheridas). No obstante, el año 2012 se cerró con 528.606 contenedores instalados, de los que 344.562 fueron amarillos (de envases ligeros) y 184.044 azules de papel/cartón, consiguiendo que se reciclara el 70,3% de los envases domésticos (1,2 millones de toneladas de envases reciclados). Por habitante, en España cada ciudadano depositó, de media, 11 kg de envases en el contenedor amarillo y 15,76 kg de papel/cartón en el contenedor azul.



### 3.3. Factores ambientales y sociales asociados a los RSU

Los residuos urbanos constituyen hoy un problema debido a una serie de factores coincidentes e irreversibles y motivados principalmente por el crecimiento de la población y su agrupación en núcleos urbanos, favorecida por los enormes adelantos en materia de transportes y recursos energéticos, lo que significó el paso de una economía de base agrícola a una industrial-urbana, enormes incrementos en la producción industrial, el empleo creciente de materiales de embalaje y paralelamente un mayor nivel de vida, lo que nos lleva a un desinterés por recuperar o reutilizar determinados materiales porque preferimos deshacernos de ellos y adquirir nuevos. En general pueden señalarse estas cinco causas principales en el alarmante incremento del problema de los residuos:

- El rápido incremento demográfico.
- La concentración de la población en los centros urbanos.
- Los enormes incrementos en la producción industrial (de bienes materiales de rápido envejecimiento).
- El empleo creciente de materiales de embalaje.
- El desarrollo de la llamada sociedad de consumo.

Algunos de los problemas ambientales derivados de la producción y acumulación de residuos son:

- Agotamiento de los recursos naturales empleados para la fabricación de nuevos productos.
- Pérdida de recursos contenidos en los residuos.
- Ocupación de grandes extensiones de territorio para gestionar los elevados niveles de residuos producidos. Imposibilidad de destinarlos a otros usos.
- Contaminación de suelos, agua y aire por lixiviados procedentes de la descomposición de la materia orgánica en ellos contenida.

- Contaminación atmosférica por algunas técnicas de tratamientos de residuos por incineración, así como por las combustiones espontáneas que tienen lugar en los vertederos.
- Contaminación visual de nuestros paisajes por acumulación de residuos.
- Contaminación atmosférica por los gases generados en la descomposición de la materia orgánica que contienen los residuos.

Los residuos son inherentes a las actividades humanas. Como se ha comentado en apartados anteriores, ya se ha apuntado que los residuos urbanos constituyen hoy un problema debido a una serie de factores coincidentes e irreversibles y motivados principalmente por el crecimiento de la población y su agrupación en núcleos urbanos, favorecida por los enormes adelantos en los medios de transporte.

La necesidad de incrementar el ritmo y nivel de consumo de la población lleva a producir bienes materiales de rápido envejecimiento (que serán reemplazados por nuevos bienes). El desarrollo de la llamada sociedad de consumo implica la producción ingente de todo tipo de residuos como consecuencia del disfrute de los bienes y servicios. El consumidor no se siente responsable de cualquier otra acción que no sea comprar y desprenderse del producto (y sus envases) una vez que ya no le sea útil. Por ello no es habitual que en la decisión de compra influyan factores como:

- Las condiciones y los procesos de su producción.
- La cantidad, procedencia y renovabilidad de los recursos empleados en su producción.
- La facilidad de reciclado de los materiales que lo componen.
- El volumen y tipo de residuos que generan nuestro producto.
- Las posibilidades que ofrecen productos alternativos.

Lamentablemente, y pese a que se está haciendo algunos esfuerzos en este campo, los productos menos generadores de residuos en su producción y consumo no siempre son

fácilmente accesibles, ni tampoco más económicos que otros ambientalmente más perjudiciales. Así pues, actualmente todavía población y residuos aparecen como binomio inseparable. La evolución de la producción de residuos aumenta en función del crecimiento demográfico y el nivel y estructura de la actividad económica productiva. Ya que existe el nivel tecnológico suficiente como para reinsertar de nuevo al ciclo productivo un porcentaje bastante elevado de los residuos que se generan, pasando la solución por un cambio de valores que sustente en la población comportamientos que incidan en una menor producción de residuos.

Sin embargo, aunque población y residuos están asociados inevitablemente, existe el contrapunto, es decir, el rechazo social a las instalaciones de tratamientos de residuos, también conocido como el síndrome NIMBY. El concepto NIMBY (que es el acrónimo de “not in my back yard”, en castellano “no en mi patio trasero”) nació en Estados Unidos para describir las actitudes de los vecinos que rechazaban proyectos potencialmente peligrosos en los distintos barrios. Son grupos vecinales que se organizan y ejercen presiones ante diferentes problemas socioambientales en sus localidades, tanto desde el punto de vista legal, como con acciones ante la opinión pública y protestas. Aunque para muchas empresas y autoridades gubernamentales el NIMBY es una pesadilla que bloquea proyectos millonarios, llegando a acusar a los ciudadanos de estar en contra del desarrollo económico, desde el punto de vista de los grupos ciudadanos, en cambio, esas protestas constituyen esfuerzos exitosos para conservar la salud y el medio ambiente.

A medida que crece la preocupación ambiental, se hacen más comunes los comportamientos NIMBY. Por un lado, es un hecho muy positivo que los ciudadanos se organicen y reaccionen contra la contaminación, que aspiren a una alta calidad de vida. Pero por otro lado el NIMBY supone un problema: en muchos casos los vecinos se conforman con que se retire el proyecto o instalación de su barrio o localidad, y una vez que es trasladado a otro sitio, la efervescencia social se desvanece, su perspectiva es eminentemente personal, es decir, no quieren basura en “su” vecindad, no quieren que alteren “sus” vidas. Es cierto que también existen quienes se dan cuenta de este hecho, y dan un paso más allá de la

mirada NIMBY, extienden su reflexión y análisis sobre la esencia de los problemas ambientales y sociales, independientemente de si los sufren directamente o no, solidarizándose con otros grupos que padecen esos impactos, y llegando a consolidar un movimiento ecologista más o menos estable, lo que nació como grupo social de rechazo a una acción determinada.

A este nivel, resulta interesante el concepto de LULU (acrónimo de “locally unacceptable land use”, que hace referencia a los usos inaceptables del suelo), puesto que definiendo de manera clara los usos inaceptables del suelo, independientemente de su ubicación, (incluso allí donde no exista nadie para reaccionar ante los impactos ambientales), se escapa a las limitaciones de la actitud local del NIMBY.

La solución que se dé a estos problemas de rechazo social dependerá mucho de las características de la instalación o actividad que los motive, ya que estas serán las que determinen si es posible o no optar por la supresión definitiva del proyecto y, en caso de necesidad obligada de instalación, la amplitud del radio territorial de elección (otro paraje, otro municipio, otra comarca, otra Comunidad Autónoma, otro país, etc.). De todas formas, podemos agrupar las decisiones que se toman en alguno de los siguientes grupos mayoritarios:

- Trasladar el proyecto a otra zona. A menudo el problema aquí es que los proyectos negativos/impactantes/contaminantes terminan siendo ubicados unas veces en sitios apartados y deshabitados, y en muchos otros casos en los barrios o zonas más pobres, donde las propias condiciones de marginalidad y empobrecimiento no desencadenan un debate sobre la calidad ambiental, o cuando eso sucede, las organizaciones locales no alcanzan el poder político para defenderse.
- Ofrecer compensaciones a los municipios que albergan estos proyectos. Desde la administración ya se está siguiendo esta política de compensar por su “solidaridad” a los municipios que accedan a albergar en sus términos municipales instalaciones

no deseadas de uso supramunicipal. Estas compensaciones pueden ser tanto económicas como de mejora de otras infraestructuras.

Esta política de compensaciones es, por ejemplo, la que se está siguiendo desde el gobierno valenciano a raíz de las dificultades que han encontrado entre las poblaciones de los municipios afectados para poder ubicar instalaciones de gestión previstas en los Planes Zonales PIR. Los numerosos problemas de rechazo social encontrados para poder ubicar algunas de las instalaciones de tratamiento de los Planes Zonales PIR, ha llevado a que en los Documentos de Ordenación de Planes zonales del PIR, uno de los puntos incluidos sea las *Medidas de Compensación a favor de aquellos municipios en cuyo término municipal se ubiquen las instalaciones de eliminación y valorización de residuos*. Estas medidas deben presentarse en los Proyectos de Gestión de las instalaciones, y serán como mínimo las siguientes:

- *Medias económicas*: Compensaciones directas a reducir por tonelada a tratar en la planta de valorización y/o instalación de eliminación; y una cantidad anual destinada a realizar un control ambiental de las instalaciones por un agente externo e independiente destinado por el Consorcio.
- *Medidas ambientales*: Financiación de acciones y medidas ambientales, centradas en la implantación de la Agenda 21 Local y otra directamente relacionadas con la mejora de la calidad ambiental en el municipio.

En cualquier caso, es necesario aclarar que estos movimientos de repulsa social no son provocados tan sólo por actividades molestas o contaminantes, sino también por instalaciones socialmente rechazadas (establecimiento penitenciarios, sanitarios, de rehabilitación o inserción social, etc.), y que además los temores sociales que provocan no siempre tienen fundamento. En este sentido, existen determinadas acciones que es importante llevar a cabo durante el proceso de aprobación de una instalación o actividad susceptible de generar rechazo social para minimizar el NIMBY:

- Dar razones claras y lógicas de la necesidad de la instalación o actividad y de los beneficios que comporta. En suma, debemos democratizar la gestión pública.
- Estudios de impacto ambiental independientes y fiables.
- Información de transparencia y participación ciudadana en todo el proceso y toma de decisiones de la implantación. En definitiva, democratización de la gestión pública.

### 3.4. Gestión de los residuos sólidos urbanos

La gestión de los residuos la realizan generalmente los ayuntamientos mediante empresas contratadas y consiste en “el conjunto de operaciones encaminadas a dar a los residuos producidos en una zona, el destino global más adecuado desde el punto de vista ambiental y especialmente en la vertiente sanitaria, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costes de tratamiento, posibilidades de reutilización, comercialización y directrices administrativas en este campo”. Comprende tres fases:

- Recogida
- Transporte
- Tratamiento

Desde el punto de su utilización la más importante es la última que se define como el conjunto de operaciones encaminadas a su eliminación o al aprovechamiento de sus recursos. La gestión de los residuos difiere de una zona a otra por diversos motivos, dependiendo del tipo de materia prima, de la cantidad de residuo producido, del sistema de recogida existente, de los sistemas de transporte y distancia a los centros de tratamiento, de los tipos de sistema tratamiento existentes.

Un modelo de gestión se conforma a partir de las distintas fracciones de residuos recogidas de forma separada, de la combinación de los sistemas de recogida y de los tratamientos posteriores, que han de ser a acordes estas fracciones garantizando la

aplicación del principio de jerarquía. Previamente se deben priorizar, siguiendo esta jerarquía de gestión, las actividades de prevención que también formarán parte del ciclo de gestión del producto-residuo (MAGRAMA, 2013<sup>a</sup>).

En la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados se define el término “gestión de residuos” como la recogida, el transporte y tratamiento de residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente. También se definen los términos “agente” toda persona física jurídica que organiza la valoración o la eliminación de residuos por encargo de terceros, incluidos los agentes que no tomen posesión física de los residuos y “gestor de residuos” como la persona o entidad, pública o privada, registrada mediante autorización o comunicación que realice cualquiera de las operaciones que componen la gestión de los residuos, sea o no el productor de los mismos. La Directiva marco permite calificar como operación de valorización la incineración de residuos domésticos mezclados solo cuando ésta se produce con un determinado nivel de eficiencia energética; asimismo, aspira aumentar la transparencia y la eficiencia ambiental y económica de las actividades de gestión de residuos. Para conseguir el mejor resultado ambiental global, las administraciones competentes, en el desarrollo de las políticas y de la legislación en materia de prevención y gestión de los residuos, aplicarán la jerarquía de residuos por el siguiente orden de prioridad (Fig. 3):

1. Prevención
2. Preparación para la reutilización
3. Reciclado
4. Otro tipo de valorización (incluida la valorización energética)
5. Eliminación



**Figura 1.** Jerarquía europea de residuos. Fuente: (MAGRAMA, 2013b).

El objetivo de la aplicación de la jerarquía de residuos, es desplazar la mayor parte de las actuaciones de gestión de los residuos hacia los escalones superiores de la jerarquía, tal y como puede verse en la figura, siendo la prevención de los residuos la primera prioridad en la medida en que es la opción ambiental (y económicamente) más sostenible. En el marco de la estrategia 2020 “la hoja de ruta hacia una Europa Eficiente en el uso de los recursos” recoge los objetivos y los medios para transformar la economía actual, basada en el uso intensivo de los recursos, en un nuevo modelo de crecimiento basado en el uso eficiente de los recursos. Dicha transformación debe ir acompañada de cambios muy importantes radicales en los ámbitos de energía, la industria, la agricultura, la pesca, el transporte, y en el comportamiento de los productores y los consumidores.

La hoja de ruta citada establece como objetivos intermedios para los residuos que en el 2020: se haya reducido la generación *per cápita* de los residuos, que el reciclado y la reutilización sean opciones económicamente atractivas para los operadores, que se hayan desarrollado mercados funcionales para las materias primas secundarias, que esté garantizado el reciclado de alta calidad, que la recuperación de energía se limite a los materiales no reciclables, que se hayan eliminado prácticamente el depósito de residuos en vertederos y que la legislación sobre residuos se aplique en su totalidad. En la Tabla 8



encontramos los diferentes modelos de separación de residuos urbanos generados en España.

**Tabla 8.** Modelos de separación de residuos en origen en España.

Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6
<b>5 fracciones</b>	<b>Húmedo-seco</b>	<b>Multiproducto</b>	<b>Fracciones+ poda</b>	<b>4 fracciones</b>	<b>3 fracciones</b>
Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio
Papel-cartón	Papel-cartón	Papel-cartón+ envases ligeros	Papel-cartón	Papel-cartón	Papel-cartón
Envases ligeros	Envases ligeros+ Restos	Resto	-	Envases ligeros	-
Restos			-	Restos (influye FO)	Resto (influye FO)
Fracción orgánica	Fracción orgánica	Fracción orgánica	Residuos de jardinería	Restos de jardinería	-

Fuente. (MAGRAMA, 2013a)

Los más habituales son el tipo 1 esencialmente en Cataluña, tipo 4 y tipo 5. El modelo húmedo/seco (tipo 2) realiza la separación de la fracción orgánica e inorgánica (incluye los residuos de envases). El tipo 6 es un modelo poco común que no contempla la separación de envases ligeros. El tipo 3, multiproducto, también es poco común y recoge conjuntamente el papel/cartón y los envases ligeros.

### Recogida de residuos urbanos

Existen diversos modelos de recogida de residuos: puerta a puerta en el punto de generación o depósito en un lugar de aportación más o menos cercano.

#### *a) Recogida domiciliaria o puerta a puerta*

Mediante cubos especiales dispuestos en las entradas de las viviendas donde de forma periódica se recogen con camiones. También de forma similar se recogen residuos procedentes de mercados, cuarteles y otras empresas del sector servicio o de industria asimilables a residuos urbanos.

- **No selectiva:** van todos los residuos en la misma bolsa. Este tipo de recogida era la tradicional y hoy sustituida por la recogida selectiva.

- **Selectiva:** se separa los residuos en la casa en diversas bolsas. Puede variar según la zona:

**1. Sin separación selectiva de materia orgánica:** La separación es mediante dos bolsas, una amarilla donde se incluyen los envases de plásticos, latas de metal y briks, donde se incluyen el resto de residuos con la excepción de cristal y papel que se separa por recogida selectiva por bidones dispuestos en la calle. Este tipo es el más extendido en España.

**2. Con separación selectiva de materia orgánica:** La separación se realiza mediante tres bolsas. Es similar a la anterior con la variante que la materia orgánica proveniente de los restos de comida se separen aparte. Este tipo de recogida va encaminada para la obtención de un compost de calidad. Está poco extendida y en fase de pruebas en algunos municipios.

El segundo método más extendido de recogida de residuos domésticos es mediante el método de “recogida neumática”. Se trata de una red de tuberías subterráneas y depósitos enterrados dispuestos en zonas estratégicas de la acera, de tal forma que los ciudadanos disponen en los depósitos las bolsas de basura previamente separada por clases, y a determinada hora se abre una trampilla donde los residuos caen a una red de tuberías donde son impulsados mediante un sistema de aire forzado hasta un centro de almacenamiento. Este sistema posee un coste mayor al de la recogida tradicional e implica unas obras de instalación siendo más factible su instalación en zonas de nueva urbanización. Tienen la ventaja de ahorrarse los cubos de basura, la recogida por camiones y las molestias y ruidos que ello implica.

#### *b) Recogida selectiva mediante depósitos situados en la calle*

Esta recogida se realiza mediante contenedores instalados en la vía pública, en áreas de aportación y con sistemas de recogida puerta a puerta. Mediante este tipo de recogida se

separa el vidrio, papel/cartón, envases ligeros, fracción orgánica y en algunos municipios prendas textiles (ropa).

*c) Otros tipos de recogida*

- **Ecoparques o puntos limpios:** Zonas situadas en puntos estratégicos donde se recogen residuos de origen municipal de muy diversas características, ya que además de recogerse fracciones de papel/cartón, vidrio, madera y plásticos, se recogen algunos residuos peligrosos (pilas o fluorescentes) residuos voluminosos y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) o incluso escombros de obras menores, estos tres últimos suponen un elevado porcentaje de las toneladas totales de residuos recogidos en puntos limpios.
- **Residuos de la limpieza varia:** Incluye los residuos de papeleras y limpieza de las calles.
- **Voluminosos:** Los ayuntamientos ofrecen este servicio a los ciudadanos unos días al mes donde pueden deshacerse de muebles y de otros enseres de gran tamaño. El destino de estos dependerá de su composición.
- **Escombros:** Los residuos de la construcción poseen un alto contenido de inertes y madera. Debido a su gran cantidad y concentración puntual, la administración se ha visto forzada a disponer de una recogida especial mediante contenedores de gran tamaño dispuestos en la vía pública, a pie de obra. Estos residuos se regulan a parte de los residuos domésticos y la tendencia actual es disponerlos en vertederos de inertes específicos para este tipo de residuos.
- **Animales muertos:** Por motivos sanitarios, la administración ofrece este servicio a los ciudadanos y por la aparición de cadáveres de animales en las vías públicas.
- **Residuos de hospitales:** Los hospitales generan residuos distintos, unos asimilables a urbanos como resto de comidas, envases, etc, que no esté, contaminados. Y por otra parte residuos no asimilables como residuos de riesgo microbiológico, residuos con restos de curas, medicamentos y residuos radiactivos. Todos ellos seguirán sistemas de recogida distintos a los residuos urbanos. Por un lado se gestionarán los residuos de riesgo microbiológico, y por otro los contaminados por residuos radiactivos.

El sistema de transporte de los diferentes residuos puede ser mediante:

- **Directamente hasta su destino final:** Mediante camiones se transporta los residuos recogidos en la ciudad a los centros de tratamientos.
- **Centro de transferencia:** Los residuos pueden almacenados de forma temporal en los Centros de Transferencia, donde será compactado y almacenados en contenedores de mayor tamaño, los cuales se transportarán a su destino final. Se aconseja este sistema para municipios pequeños que están diseminados en una zona geográfica grande, y que distan varios kilómetros del centro de tratamiento, por motivos de logística, es decir, ahorrar en transporte y dar un servicio periódico de recogida. Estos centros descargan camiones de basura grandes y pequeños en un foso especial que carga un contenedor compactador que reduce el volumen de la basura, y estos son cargados en camiones de gran tamaño que los transporta hasta el centro de tratamiento.

### **3.4.1. Sistemas de tratamiento y destino final de los RSU**

#### a) Preparación para la reutilización

La preparación para la reutilización constituye la segunda etapa en la jerarquía de gestión, aunque está íntimamente ligada a las estrategias de reducción de residuos. Está incluida dentro de las operaciones de valorización consistentes en la comprobación, limpieza o reparación, mediante las cuales productos o componentes de productos que se hayan convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa.

#### Tratamiento mecánico

En estas instalaciones se separan y clasifican los materiales de entrantes mediante una combinación de procesos de separación mecánicos o automatizados y procesos manuales con el fin de recuperar las fracciones valorizables y prepararlas para su posterior comercialización.

Este tipo de tratamiento se aplica especialmente para la clasificación de los residuos de envases ligeros recogidos separadamente, aunque también se utiliza para la selección de estos materiales contenidos en la fracción resto en las instalaciones TMB. Los residuos se reciben en una playa o foso, cargados mediante palas se introducen en el abrebolsas que es uno de los principales equipos de este tipo de plantas, se debe asegurar la apertura de un alto porcentaje de bolsas (95-98%) de todo tipo y tamaño para extraer su contenido, y garantizar que los procesos de selección posteriores se realicen con una mayor eficacia.

A continuación los residuos pasan a una etapa de preselección mecánica en una criba rotatoria o trómel, cuya función básica es distribuir los residuos por tamaño, con el fin de que la selección manual posterior se realice de una manera más eficaz. Los tamaños de la malla del trómel dependen de las características de los residuos que se tratarán. Es habitual que el primer paso de malla del trómel tenga un tamaño de 40-60 mm para separar tierras, pequeños trozos de vidrio, materia orgánica, etc., es decir, aquellas fracciones que puedan considerarse no calificables o rechazo, de tal manera que no lleguen a los clasificadores manuales.

Otros equipos y procesos utilizados suelen ser: recuperación mediante separadores magnéticos (metales férreos), separadores de Foucauld (metales no férreos), separadores automáticos por infrarrojos (plásticos y cartón para bebidas) y captación con aspiración automática (plástico flim).

### Tratamientos biológicos para la materia orgánica

Los tratamientos biológicos se utilizan para estabilizar mediante biodegradación la materia orgánica tanto la recogida de forma separada (FORS) como la contenida en la fracción resto donde no existe recogida separada previo tratamiento mecánico complementario.

### 1. Compostaje

El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado, durante el cual se produce la descomposición biológica aerobia de la materia orgánica, como consecuencia de las actividades metabólicas combinadas de una amplia gama de microorganismos, en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, seguida por una estabilización y maduración del producto. (Iglesias Jimenez y Perez García, 1991). Como producto de los procesos de degradación se obtiene CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, minerales, y un producto final llamado compost, con una materia orgánica estabilizada, libre de compuestos fitotóxicos y patógenos, con ciertas características húmedas (Haug, 1993). El compostaje es un método adecuado para la eliminación de fitopatógenos presente en los residuos iniciales (Elorriota y col, 2003).

La FORS se caracteriza por su elevada humedad, materia orgánica fermentable y nitrógeno, por ello para desarrollar un buen proceso de compostaje necesita ser mezclada con otro tipo de residuos (Soliva et al, 1993; Pérez et al, 1995 y 1999; López et al, 2010a y b), como restos vegetales (poda), que incrementan la porosidad, equilibran los contenidos aire/agua, y permiten adecuar la proporción en biopolímeros y la relación C/N. Las mezclas acostumbran a realizarse con una proporción en volumen de restos vegetales que pueda estar entre el 25 y el 60%, dependiendo del tipo de FORS y el sistema de compostaje utilizado en las distintas instalaciones.

### 2. Biometanización o digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia también llamado biometanización, es un proceso que consiste en la oxidación biológica de la materia orgánica mediante microorganismos específicos en ausencia de oxígeno (Karagiannidis y Perkoulidis, 2009). La materia orgánica biodegradable se descompone dando como resultado dos productos principales: biogás y sustrato digerido. El biogás es un gas susceptible de aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible. Contiene una alta proporción de metano y una potencia calorífica inferior, del

orden de 5.500 Kcal/m<sup>3</sup> (Jain, 2004), su composición puede variar según el sustrato y el tipo de tecnología utilizada, pudiendo contener:

- Entre 50-70% de metano (CH<sub>4</sub>).
- Entre 30-50% de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).
- < 5% de hidrógeno (H<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y otros gases.

La digestión anaerobia se desarrolla en múltiples etapas, donde las fases principales son una primera hidrolítica fermentativa y una final metanogénica. En esta última, se transforman los productos finales de la misma en metano y dióxido de carbono, mediante las bacterias metanogénicas que son anaerobias estrictas. El tipo de sustrato a digerir influye en gran medida en el rendimiento y en la composición del biogás obtenido. Para una producción máxima es preferible utilizar sustratos ricos en grasas, proteínas e hidratos de carbono ya que su degradación conlleva la formación de cantidades importantes de ácidos grasos volátiles, precursores del metano. Por ello, es aconsejable que se trate la materia orgánica procedente de recogida separada para evitar muchos de los problemas producidos por la acumulación de impropios o evitar colmataciones de ciertas partes del circuito de digestión. Y es necesario además optimizar la mezcla de materiales a digerir para aumentar el rendimiento del metano. Si el material orgánico a tratar no procede de recogida separada en origen, o la calidad del material separado no es adecuada por su alto contenido en materiales no solicitados (impropios), las instalaciones de biometanización se encuentran con graves problemas y con rendimientos que no justifican su coste ni su instalación (Huerta et al, 2010).

En instalaciones de tratamiento de residuos de competencia municipal de mayor capacidad se combinan tratamientos anaerobios con los aerobios con la finalidad de aprovechar las ventajas energéticas del biogás generado en la fase anaerobia y facilitar que al tratamiento aerobio (compostaje) llegue un material que haya reducido tanto la masa como la problemática y pueda ser estabilizado con mayor facilidad.

### 3. Incineración

La incineración de RSU es una de las formas de tratamiento de residuos, entendiendo por tratamiento la operación o conjunto de operaciones que transforman las características físicas, químicas y biológicas de un residuo para reducir o neutralizar las sustancias peligrosas que contiene, recuperar materias o sustancias valorizables y facilitar su uso como una fuente de energía. La incineración de residuos sólidos es un proceso de combustión a altas temperaturas (próximo a 850 °C) con exceso de oxígeno. En este proceso de incineración controlada, se transforma la fracción combustible de los residuos en un producto gaseoso y en un residuo sólido de menor peso y volumen que el material original (Lee y Huffman, 1989).

El rango de variabilidad de los metales pesados, así como el resto de características de los residuos sólidos incinerados dependen de cinco factores principales:

**-Procedencia de los RSU:** Se ha visto que la composición química de las corrientes residuales están claramente afectadas por la proporción de residuos quemados según su procedencia sea doméstica, industrial o comercial. Por lo que se ha de hacer un estudio comparativo de las diferentes instalaciones y la composición de los residuos previa incineración.

**-Pretratamiento de los RSU:** El pretratamiento de la corriente de RSU que alimenta la planta puede afectar la composición y las características físicas de los residuos. Por ejemplo la separación de los metales y las pilas, conduce a una disminución de los niveles de cadmio, mercurio, plomo y otros metales.

**-Condiciones de operación:** La composición de las corrientes residuales sólidas producidas, varían según los parámetros de operación y eficiencia en el modo de explotación de la planta, tipo de horno, cantidad de inquemados, tiempo de permanencia en el horno (de 15 minutos a 3 horas), temperatura de combustión en las diferentes zonas de la planta.

**-Factores postincineración:** estos son principalmente la extracción de la fracción férrica (con tecnología simple como el uso de electroimán), esto beneficia el reciclaje de este



material y ayuda a mejorar la calidad de la escoria resultante. El tratamiento posterior, se realiza en una instalación independiente de la planta de incineración y por lo general bajo la dirección de otra empresa.

**-Características del equipamiento de los sistemas de depuración de los gases:** Los diferentes sistemas de depuración de los gases de combustión dan lugar a variaciones en la composición química. El uso de catalizadores o absorbentes, como puede ser la cal, afectan significativamente a la lixiviación de diferentes componentes de las cenizas.

En general se considera un volumen mínimo para la rentabilidad del proceso de 100t/día de residuos con un poder calorífico mínimo de 1000 Kcal/kg.

En el horno debe haber dispositivos para la recogida y evacuación de cenizas, que son depositadas en el propio recinto de la planta incineradora o llevadas a vertedero de inertes. En el enfriamiento de los humos tiene lugar el aprovechamiento energético normalmente en forma de vapor de agua, que alimenta a un tubo turbo alternador. Los humos generados en la incineración deberán ser depurados en función del impacto sobre el medio ambiente. Los malos olores que pueden emanar los humos son normalmente destruidos al nivel térmico alcanzado en la cámara de combustión. Los principales contaminantes son CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> y HCl. Tiene especial interés el ácido clorhídrico, procedente de la combustión de PCVs así como de la reacción del NaCl procedentes de los restos domiciliarios. El control de emisiones de este gas exige, a partir de un cierto porcentaje de PVC en las basuras, la depuración de los gases mediante lavado en agua.

La directiva 2000/76/CE del parlamento europeo y del Consejo del 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos (DO L 332 de 28.12.2000) con el objeto de evitar riesgos para la salud humana derivados de la incineración y coincineración de residuos, establece valores límite de emisión para las instalaciones de incineración y coincineración de residuos. Regula la emisión de contaminantes a la atmósfera, limitando el contenido de partículas totales, de sustancias orgánicas en estado gaseoso, de HCl, de HF de SO<sub>2</sub>, de NO,

NO<sub>2</sub>, de determinados metales y sus compuestos (Cd, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu Mn, Ni y V), así como de dioxinas y furanos. También se establecen valores límite de emisiones de determinados componentes que habrán de aplicarse al vertido de aguas residuales procedentes de la depuración de los gases de escape de las instalaciones de incineración y co-incineración, y se establecen exigencias en cuanto a mediciones y control, tanto si el vertido se realiza en aguas continentales como a las marinas. En estos vertidos se limita el contenido el sólidos en suspensión, determinados metales y sus compuestos (Cd, Hg, Ta, As, Pb, Cr, Co, Cu, Ni y Zn), así como de dioxinas y furanos. La directiva se incorporó al ordenamiento interno español en el RD 653/2003 de 30 de mayo sobre incineración de residuos.

Existen otros tratamientos térmicos distintos de la incineración que son la gasificación y la pirolisis. Se trata de métodos poco convencionales y consiste en la combustión de los residuos en atmósfera pobres en oxígeno, con la obtención de unos productos que pueden variar según a la temperatura que se realice proceso.

#### 4. Depósito en vertedero controlado

El depósito en vertedero controlado supone el destino del 57,84% de los residuos urbanos (MAGRAMA 2012) y es un sistema de eliminación definitivo que presenta un costo bajo de inversión inicial y de mantenimiento. Es preciso buscar zonas alejadas de la población que presenten características topográficas adecuadas y en donde no se pueda producir contaminación por lixiviados. Es una solución aconsejable para pequeños núcleos urbanos y ciudades grandes que dispongan de terrenos idóneos en sus cercanías y no se aprovechen. Los vertederos, terminada su vida útil, pasarán a un estado de clausura definitiva, donde la administración competente junto con la entidad explotadora tendrán que ser responsable de su estado y evolución por un periodo no inferior de 30 años. El Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre y sus posteriores modificaciones (Orden AAA/661/2013 de 18 de abril), regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, impulsada por la adopción de la normativa comunitaria 1999/31/CE.

### 3.4.2. Aplicación agrícola: ventajas y riesgos derivados

Los residuos constituyen parte del flujo de materia en el que se basa nuestra economía, pero no están en primer plano de los intereses económicos, pese a que tienen un valor energético que no debemos olvidar, por lo que debe considerarse al residuo como recurso. Los residuos, en un principio, puede parecer que carecen de valor económico para las personas que se deshicieron de ellos, pero eso no significa que no contengan recursos materiales y energéticos que, gestionados de manera adecuada, deben ser reinsertados en los procesos de producción.

Una de las principales formas de reutilización de los RSU es tras ser sometidos al proceso de compostaje, es la aplicación agrícola. La utilización de compost procedente de residuos urbanos es una práctica que pretende ser un destino alternativo a los diferentes residuos orgánicos. Con dicha práctica se busca el aprovechamiento de todos los nutrientes que contiene la enmienda orgánica, como complemento o no de la fertilización mineral de los suelos, y sobre todo aprovechar sus altos contenidos en materia orgánica para el mantenimiento o para conseguir aumentar su nivel en el suelo. Se busca con ello, en principio una práctica económica que disminuya los gastos del manejo de los suelos para mantenerlos como medios fértiles, evitando la contaminación del suelo y de los cultivos.

Aunque por sus características los residuos sólidos urbanos no presentan grandes problemas para su compostaje, es imprescindible que presenten un adecuado nivel de calidad en cuanto a su contenido en contaminantes y que el proceso se realice adecuadamente para garantizar la perfecta higiene y madurez del producto, así como las menores molestias para la población. Las características habituales del compostaje de RSU son:

- La gran variedad de residuos que se encuentran en el material hace que no suelen existir carencias de ningún nutriente especial. El equilibrio entre las cantidades de carbono y de nitrógeno suele ser bueno, aunque en algunas ocasiones existan grandes variaciones, sobre todo locales o estacionales.

- El contenido de humedad suele ser adecuado, aunque la formación de lixiviados durante la primera mitad del proceso está garantizada.
- La granulometría del material es buena y los materiales de mayor tamaño se van troceando debido a la descomposición y a los volteos.

Como problemas más habituales en el compostaje de RSU podemos destacar:

- Las enormes cantidades que deben ser procesadas cada día hace que sea la superficie disponible en las instalaciones la principal variable a la hora de diseñar el sistema a utilizar: tamaño y altura de las pilas, número y forma de los volteos, duración del proceso, etc. Esto hace que en muchas ocasiones la forma en que se lleva a cabo el proceso, esté alejado del óptimo funcionamiento y en muchas ocasiones lo que se busca es procesar el material lo más rápidamente posible, sin buscar la máxima calidad.
- La composición de los residuos sólidos urbanos es extraordinariamente heterogénea y variable, lo que puede dar lugar a problemas, especialmente si la metodología de compostaje seguida es demasiado rígida.
- El gran problema del compostaje de los residuos sólidos urbanos es la generación de malos olores, que puede afectar a zonas de gran extensión. Es algo que no siempre se debe al proceso en sí mismo, puesto que los residuos llegan a él ya oliendo, pero que intenta ser controlado mediante muchas estrategias, como por ejemplo filtrando los gases extraídos por la aireación.

El compost procedente de residuos sólidos urbanos es una fuente muy valiosa de microelementos o elementos traza, tales como el hierro, cobre, zinc, manganeso, boro, etc, por lo que se les considera como un buen corrector o agente preventivo para las deficiencias de éstos en el suelo. El origen de los residuos condiciona su riqueza en microelementos siendo más ricos, a veces demasiado, aquéllos provenientes de áreas urbanas o cercanas a complejos industriales. Cuando el compost es aplicado al suelo, los micronutrientes que contiene pueden quedar retenidos en los coloides de arcilla o humus, formar complejos orgánicos solubles, quedar inmovilizados como sales insolubles, perderse por lavado o ser

tomados por las plantas. Como el compost altera distintos parámetros del suelo como su pH, potencial redox o actividad microbiana, no sólo es fuente de estos elementos, sino que altera o puede alterar su disponibilidad.

Además del aporte de nutrientes o materia orgánica, los efectos del compost de residuos sólidos urbanos sobre el suelo se manifiesta como una mejora de las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y microbiológicas del suelo, basada en toda una serie de acciones individuales interrelacionadas, entre las que se pueden destacar:

- Reducción de la densidad aparente, e incremento de la densidad de los poros, lo que facilita la emergencia de semillas y la penetración radicular.
- Aumento de la estabilidad estructural de los agregados del suelo, dando lugar a una mayor resistencia a la erosión.
- Aumento de la porosidad, con la mejora subsiguiente de la aireación y del drenaje, junto al incremento de la capacidad de retención de agua, reduciéndose de este modo los peligros de las sequías.
- Aumento de la temperatura del suelo favoreciendo la actividad microbiana.
- Mejora en la capacidad de intercambio de cationes del suelo, debida al incremento de la cantidad de humus. Se previene así el lavado de nutrientes, consiguiendo un mejor aprovechamiento de la fertilización y evitando la contaminación de las aguas subterráneas.
- Incremento del pH del suelo, lo que produce un aumento de las cargas negativas en las sustancias orgánicas y en la sílice, donde se fijan iones positivos, tales como nutrientes o elementos traza.
- Mejora de la microbiología del suelo, ya que ejerce una acción favorable sobre la microflora y la microfauna, promoviendo la coexistencia de diversas especies frente al desarrollo unilateral, hasta el nivel de plaga, que facilitan los abonos químicos.

Sin embargo, el uso agrícola de compost de RSU también puede implicar una serie de riesgos. Es importante destacar que cualquier peligro o problema que aparezca se deberá a una mala calidad del compost o a un mal uso, ya que no hay ningún riesgo intrínseco a este tipo de materiales en conjunto. Los principales defectos que pueden presentar los compost, junto a sus efectos perjudiciales son:

- Inmovilización del nitrógeno del suelo, debido a la falta de madurez del producto o a tener una relación C/N demasiado alta.
- Falta de higienización por no alcanzarse temperaturas suficientemente elevadas durante el compostaje; pueden encontrarse así semillas indeseables que pueden germinar posteriormente, o gérmenes patógenos que suponen un peligro potencial para el cultivo o el consumidor.
- Exceso de salinidad, debido a las deficientes características de los materiales de origen. Los compost presentan cantidades variables de compuestos inorgánicos solubles que pueden dar lugar a problemas en cultivos sensibles a la salinidad en los suelos de regiones áridas y semiáridas. Se deben ajustar las dosis con el fin de evitar estos problemas. No obstante, las aplicaciones de compost mejoran las propiedades físicas del suelo y en algunas ocasiones pueden reducir la salinidad del suelo al favorecer el lavado de las sales. Su efecto es así doble: aumenta la salinidad por aporte de sales y la reduce por facilitar el lavado. El efecto final observado dependerá de cuál de estos dos efectos predomine.
- Exceso de materiales inertes (plásticos, trozos de metal, vidrios, etc), que ensucian el suelo de cultivo y dificultan el laboreo. Este es un problema típico del compost de residuos sólidos urbanos y que contribuyó en buena medida a la mala fama de éste entre los agricultores.
- Presencia de oligoelementos o metales pesados (Cd, Hg, Ni, Cr, Pb, Co, Cu, Zn, etc.), en concentraciones superiores a las tolerables.

## **4. LODOS DE DEPURADORA**

### **4.1. Caracterización y descripción general**

Debido a la gran importancia del agua y a las cada vez más exigentes disposiciones legales en cuanto a la depuración de aguas residuales, la construcción de estaciones depuradoras de aguas residuales se ha incrementado notablemente en los últimos años en un gran número de países, y lo continuará haciendo en el futuro. Como consecuencia, grandes cantidades de residuos sólidos orgánicos o lodos son generados cada año como subproducto de estas plantas de tratamiento, para las cuales se aplican diferentes alternativas de aprovechamiento y eliminación. Hasta hace poco tiempo, el destino principal de este residuo era el vertido al mar (Hope, 1986), aunque en la actualidad esta opción suele descartarse, la vía más empleada son la aplicación en suelos para su conservación y usos agrícolas, y la combustión con recuperación de energía. Sin embargo, existen ciertos riesgos para el medio ambiente relacionados con la presencia de metales pesados y contaminantes orgánicos, que deben tenerse muy en cuenta a la hora de emplear cualquier técnica de aprovechamiento del lodo, y que requieren de los oportunos estudios.

Se puede definir lodo como “residuo semisólido procedente de cualquier sistema de tratamiento de aguas,” aunque tiene además ciertas aceptaciones. En concreto, el lodo de depuradora, también denominado fango o biosólido, se define como “aquel lodo, tratado o no, procedente de una estación depuradora de aguas residuales urbanas EDAR”, siendo estas aguas de origen doméstico o mezclas de aguas residuales domésticas con aguas residuales industriales y/o agua de escorrentía pluvial (91/271/CE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas). Las aguas residuales domésticas son aguas procedentes de aguas de vivienda y servicios, y principalmente tienen su origen en el metabolismo humano y en actividades propias de una vivienda.

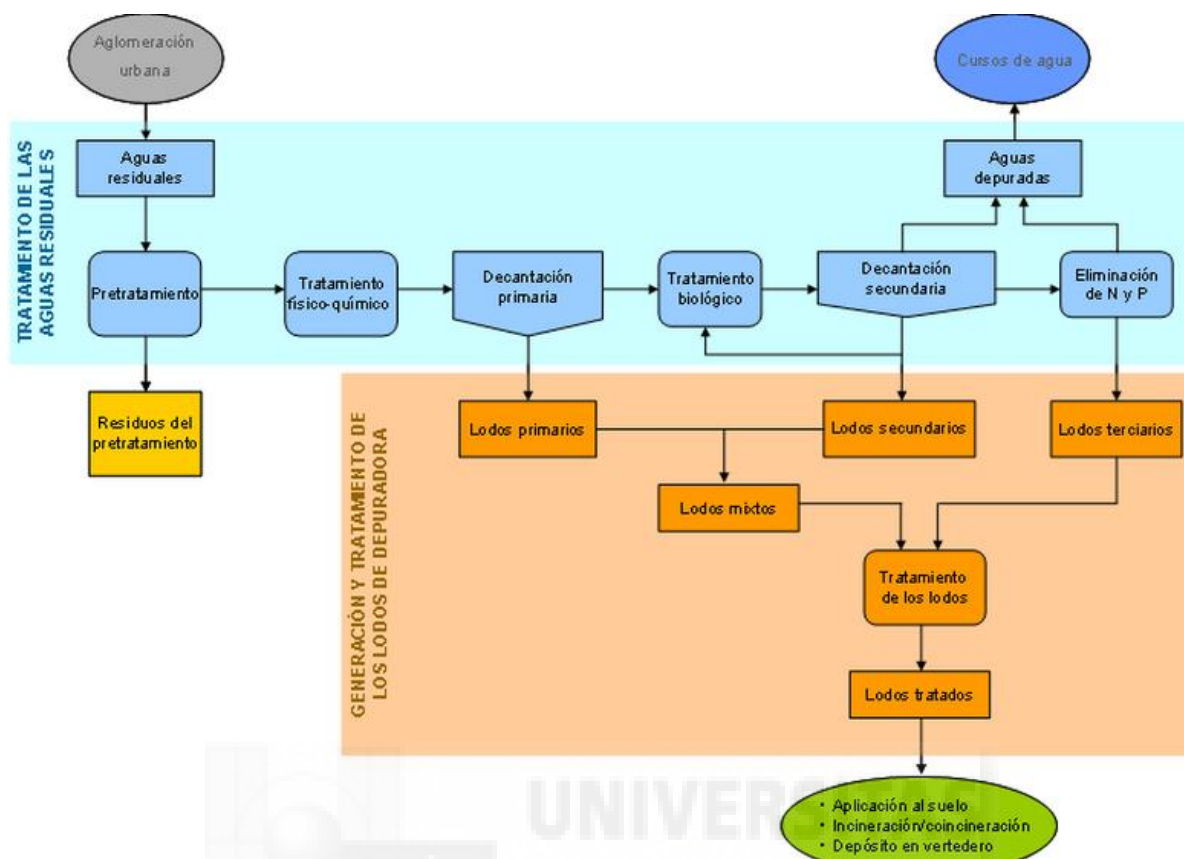
En los procesos de depuración de aguas residuales, las aguas se ven desprovistas de materia generando lodos, en dos etapas. En la primera etapa (tratamiento primario) se

produce por fenómenos meramente físicos una separación de parte de los sólidos en suspensión debido a su densidad por parte de un decantador. En la segunda etapa (tratamiento secundario) una parte de materia orgánica solubilizada es metabolizada a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, y la otra transformada en materia viva a través del desarrollo de un cultivo microbiano (el proceso más utilizado para ello es el denominado fangos activos). En los decantadores secundarios, mediante el efecto de floculación se permite la separación por sedimentación de los flóculos o estructuras que forman los microorganismos (en realidad contienen microorganismos, materia orgánica y algo de materia inorgánica). En ocasiones, el exceso de sólidos decantados es recirculado al decantador primario. La contaminación de las aguas queda contenida en los fangos o lodos, que son los sólidos extraídos de los decantadores primarios y secundarios, debido a que los flóculos absorben parcialmente los contaminantes. En la mayoría de los casos es necesario un tratamiento posterior de los fangos, normalmente digestión, tanto para su estabilización antes de su aprovechamiento como para su eliminación parcial.

Los lodos generados en los procesos de tratamiento del agua residual son olorosos y ricos en patógenos por lo que deben ser tratados y estabilizados. Por otra parte, para reducir los costes de tratamiento, transporte y almacenamiento debe reducirse su volumen mediante la eliminación parcial de agua. El espesamiento, acondicionamiento, deshidratación y secado del lodo pueden disminuir el contenido de agua y aumentar el porcentaje de sólidos del 5 al 10%, reduciendo el volumen de lodo a la mitad. Con el acondicionamiento se prepara el lodo para su deshidratación, rompiendo la afinidad del agua con el resto de la materia que contiene. Se realiza por vía química, mediante la adición de polielectrolito. Por último, se realiza una deshidratación para reducir su volumen y el coste de su transporte. Generalmente, se utilizan filtros banda, filtros prensa o centrífugas. El agua extraída vuelve a la cabecera de línea de agua.

Los fangos obtenidos, convenientemente caracterizados, se envían a su destino definitivo (aplicación al suelo, compostaje o vertedero, etc.). En ocasiones, puede ser conveniente someter los fangos a un proceso de secado térmico, previo a su destino final.





**Figura 2.** Esquema de generación y tratamientos de lodos. Fuente. MAGRAMA

Los fangos procedentes de decantación primaria son generalmente de consistencia limosa y color de marrón a gris, volviéndose sépticos y dando mal olor con gran facilidad. Los fangos que proceden del tratamiento secundario, en el caso de los fangos activados, son de color marrón, relativamente ligeros, y por estar bien aireados en el caso general, no suelen producir olor con tanta rapidez como los fangos primarios. El lodo digerido tiene color entre marrón oscuro y negro, y contiene cantidades relativamente elevadas de gas (Hernández y col, 2004). Un lodo digerido es menos putrescible que un lodo no digerido.

La composición de los lodos es muy heterogénea y varía en función de la composición de las aguas residuales y las condiciones ambientales, así como con la procedencia del lodo. Los lodos están compuestos fundamentalmente por materia orgánica diversa, entre las que cabe destacar grasa, proteínas y carbohidratos, siendo el contenido en proteínas mayor en lodos secundarios, y en la mezcla de primarios más secundarios digeridos por la introducción

del cultivo microbiano en el tratamiento secundario. La mayor parte del nitrógeno de los lodos se encuentra en formas orgánicas, aunque también existe en formas minerales como amonio y, en menor medida, nitratos. También la mayor parte del fósforo presente está en formas orgánicas, si bien una pequeña fracción del mismo puede encontrarse como ortofosfato. Los fangos suelen contener pequeñas cantidades de potasio (alrededor de un 1%). Nitrógeno, fósforo y potasio son elementos de los lodos que se pueden aprovechar como nutrientes para las plantas. Para aplicar una adecuada gestión medioambiental de los lodos, es necesario conocer algunas de sus características físicas y químicas, como:

- **Materia orgánica:** poseen niveles relativamente altos, presentando la mayoría de los lodos contenidos superiores al 50% sobre materia seca. Este hecho, permite valorizar lodos como abono orgánico, aunque debe tenerse en cuenta la diferente estabilidad de esta materia orgánica, según su origen.
- **pH:** representa la acidez o basicidad del lodo en una suspensión lodo-agua. La naturaleza de los lodos varía entre ligeramente ácido y ligeramente básico.
- **Salinidad:** el contenido es muy variable de unos lodos a otros, pudiendo encontrar niveles de conductividad eléctrica entre 1-9 dS/m, dependiendo de la cantidad de sales que presente el agua residual y del tratamiento a que se ha sometido el lodo. El riesgo potencial de salinización de suelos derivado de la aplicación agrícola de los lodos residuales adquiere mayor importancia cuando estos residuos han sido tratados con productos floculantes como tricloruro de hierro, cloruro de calcio, etc., ya que en tales casos pueden presentarse problemas de toxicidad en cultivos sensibles al cloruro.
- **Nutrientes:** los contenidos en nitrógeno y fósforo, les confiere un importante valor fertilizante. Además, constituyen una fuente importante de otros elementos esenciales para las plantas como calcio, magnesio, potasio y micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, zinc y boro).
- **Metales pesados:** el contenido en metales pesados de los lodos constituye la principal limitación de sus aplicaciones agrícolas por los riesgos de toxicidad para las plantas, animales y personas.

En las Tablas 9 y 10 se muestran los diferentes organismos que pueden aparecer en los fangos de depuradora con las posibles enfermedades que ocasionan.

**Tabla 9.** Bacterias presentes en los fangos y posibles enfermedades. Fuente: Rodríguez Morales, J.A. (2010).

<b>Bacterias</b>	<b>Enfermedad</b>
<i>Campylobacter yeyuni</i>	Gastroenteritis, diarrea, vómitos
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	Gastroenteritis
<i>Legionella</i>	Neumonía
<i>Lepstospira spp.</i>	Leptospirosis
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella paratyphi</i>	Fiebre paratifoidea
Otras <i>salmonellas</i>	Salmonelosis, botulismo
<i>Shigella</i>	Shigelosis
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
Otros vibrios	Diarreas
<i>Yernisia enterocoítica</i>	

**Tabla 10.** Organismos presentes en los fangos y posibles enfermedades. . Fuente: Rodríguez Morales, J.A. (2010) .

<b>Protozoo</b>	<b>Enfermedad</b>
<i>Entamoeba histolytica</i>	Ulceración colónica, disentería anémica, Absceso hepático.
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrea, mala absorción
Virus	Enfermedad
Enterovirus (poliovirus)	Poliomelitis, meningitis, rinofaringitis, y alteraciones digestivas
Enterobirus (Echo virus)	Meningitis, gastroenteritis, infecciones respiratorias
Enterovirus (Coxackie Virus A)	Meningitis, manifestaciones respiratorias, oculares, digestivas y mucosas
Enterovirus (Coxackie Virus B)	Meningitis, cardiopatías, manifestaciones cardiovasculares y catáneas.
Enterovirus (Hepatitis A)	Hepatitis
Reovirus	Sintomatología no específicas
Rotavirus	Gastroenteritis
Adenovirus	Infecciones respiratorias, querato-conjuntivitis y gastroenteritis
<b>Helmintos</b>	<b>Enfermedad (síntomas)</b>
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
<i>Ancylostomas duodenale</i>	Anquilostomiasis
<i>Ancylostoma spp.</i>	Larva migrans cutánea
<i>Taenia spp.</i>	Teniasis

En la siguiente Tabla se muestra la composición de los lodos de depuradora del sudeste español en el año 2008.

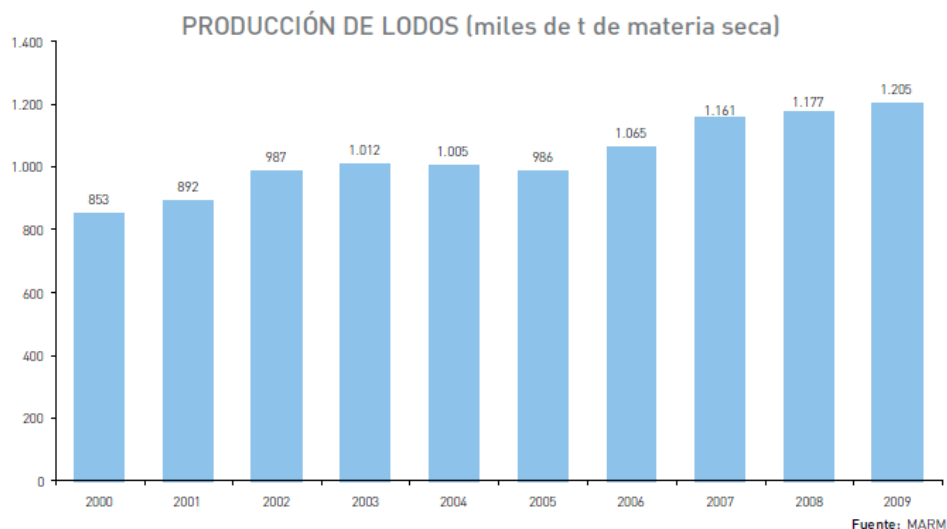
**Tabla 11:** Composición de los lodos de depuradora del sudeste español (valores sobre materia seca) (Pérez-Murcia y Moreno-Caselles, 2008).

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

## 4.2. Producción y destino

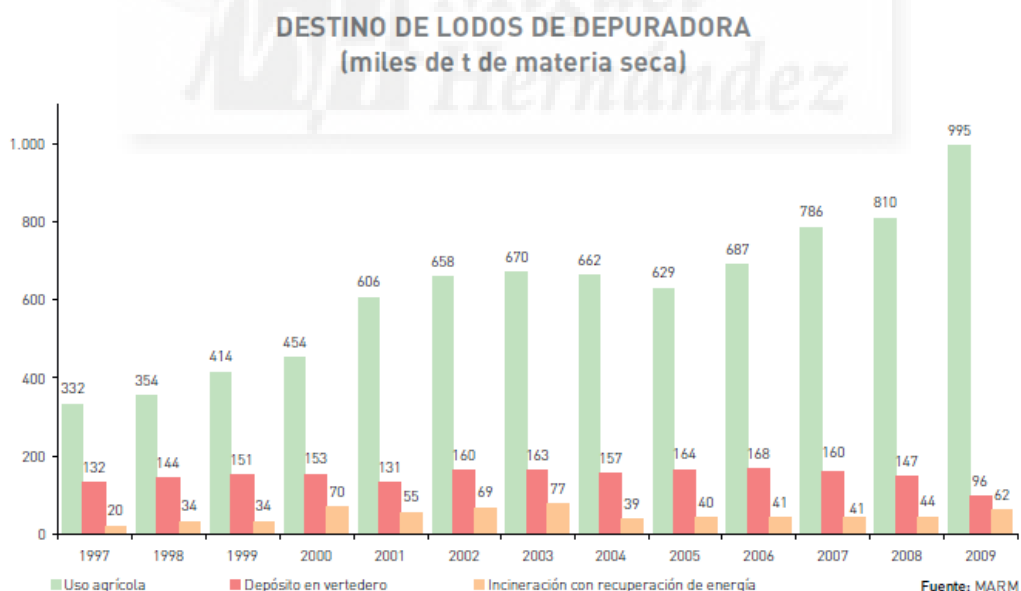
La gran cantidad de lodos generados actualmente está comenzando a causar problemas acerca de cómo deshacerse de estos residuos en muchos países industrializados. La Directiva 91/271/CE, sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, que requería la instalación de sistemas de tratamiento en todas las zonas urbanas, con más de 2000 habitantes antes de finalizar el año 2005, ha contribuido en gran medida al incremento en la producción de lodos en los últimos años.

No es fácil obtener datos fiables respecto a la generación de lodos de depuradora. En el año 2009 se generaron en España 1.205.124 toneladas de lodos procedentes de instalaciones de depuración, un 2,4% más que en el año 2008. De ellos, el 82,6% se empleó como fertilizante en la agricultura, el 8,0% se depositó en vertedero y el 5,1% fue incinerado con recuperación de energía. En el periodo 2000-2009 (gráfico 4) la generación de lodos se incrementó un 41,3%, siendo la utilización agrícola el único destino que aumentó (19,2%). El resto de los destinos han experimentado descensos. Así, el depósito en vertedero se ha reducido en dicho periodo un 37,3% y la incineración con recuperación de energía lo ha hecho un 11,4%. Con relación al año 2008, el uso agrícola se ha visto incrementado un 22,8%, el depósito en vertedero ha disminuido un 34,7% y la incineración ha aumentado un 40,9%.



**Gráfico 4.** Producción de lodos (2000-2009). Fuente: MARM

Los destinos más habituales para los lodos de depuradora son el vertido controlado, la incineración, el reciclado y el compostaje (gráfico 5).



**Gráfico 5.** Evolución de los destinos de lodos en el periodo 1997-2009. (Perfil Ambiental de España, 2010).

Algunos de los principales destinos para los lodos de depuradora han sido y/o son los siguientes:

#### *Vertido al mar*

La Directiva 91/271/CE sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas prohíbe desde el 31 de diciembre de 1998 la evacuación de los lodos de depuradora a aguas de superficie. Dicha directiva está traspuesta mediante el RD Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas (BOE, 1995).

#### *Depósito en vertedero*

El vertido de residuos está regulado de forma genérica por la Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que incorpora a nuestro derecho interno de Directiva Comunitaria 1008/98/CE. Esta ley pretende la protección del medio ambiente coordinando la política de residuos con la política económica, industrial y territorial. No obstante, también es de aplicación el RD 1481/2001, de 27 de diciembre, que incorpora al derecho interno la Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos; en éste se fija un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertedero y se establecen tres categorías de vertederos en función de los tipos de residuos admisibles: vertederos de residuos peligrosos, vertederos de residuos no peligrosos y vertedero de inertes, conforme a lo que establece la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002, sobre admisibilidad de residuos.

### **4.3. Gestión de los lodos de depuradora**

#### **4.3.1. Sistemas de tratamiento de los lodos de depuradora**

En España, en los últimos años, se han establecido varios planes nacionales de lodos de depuradora de aguas residuales. Con el primer Plan Nacional de Lodos de Depuradora (2001-2006), se realizó un gran esfuerzo en la prevención y reducción de la contaminación

en origen, proporcionando información a ayuntamientos y CCAA sobre el tipo de contaminantes originados en las actividades industriales, facilitando su identificación y puesta en marcha de posibles medidas. En el II Plan Nacional de lodos (2008-2015), de depuradora se establecen como objetivos ecológicos de obligado cumplimiento:

- Asegurar la correcta gestión de los lodos.
- Promover la valorización agrícola de los lodos cuando se den ciertas condiciones ecológicas y tecnológicas.

Otros objetivos para el 2015 son:

- Aplicación en suelos agrícolas del 67%.
- Valorización en otros suelos u otros tipos de valorización del 18%.
- Incineración del 3%.
- Depósito en vertedero del 12%.
- Correcta gestión ambiental del 100% de las cenizas de incineración.

Según el Plan Nacional Integrado de Residuos para el periodo 2007-2015, los tratamientos a los cuales pueden ser sometidos los lodos de depuradora son:

- Digestión anaerobia mesófila con o sin aprovechamiento energético
- Digestión anaerobia mesófila con o sin aprovechamiento energético del metano seguida en algunos casos de compostaje y en otros de secado térmico, que puede ser seguido a veces por la incineración.
- Deshidratación y compostaje.
- Deshidratación y secado térmico.
- Deshidratación, secado térmico y compostaje.
- Estabilización aerobia con o sin compostaje posterior.
- Estabilización química.
- Secado térmico e incineración.
- Secado térmico y co-incineración en cementeras.



Teniendo en cuenta todo esto, los principales aspectos de la gestión de los lodos de depuradora son:

- **Minimización:** la generación de fangos seguirá aumentando ya que las aguas residuales deben depurarse por imperativo legal. Lo que sí sería interesante de estudiar es la forma y estructura del fango que abandona la EDAR, para adecuar los tratamientos.
- **Valorización:** si el fango no está contaminado puede valorizarse su fracción orgánica mediante aplicación al suelo o compostaje, si el fango está contaminado puede valorizarse utilizándose para la fabricación de cerámica (fabricación de ladrillos o de áridos expandidos) o bien para recuperar energía (incineración, fermentación anaerobia, pirolisis, gasificación, etc.).
- **Tratamiento para vertido:** el depósito en vertedero es la última opción y la menos satisfactoria.

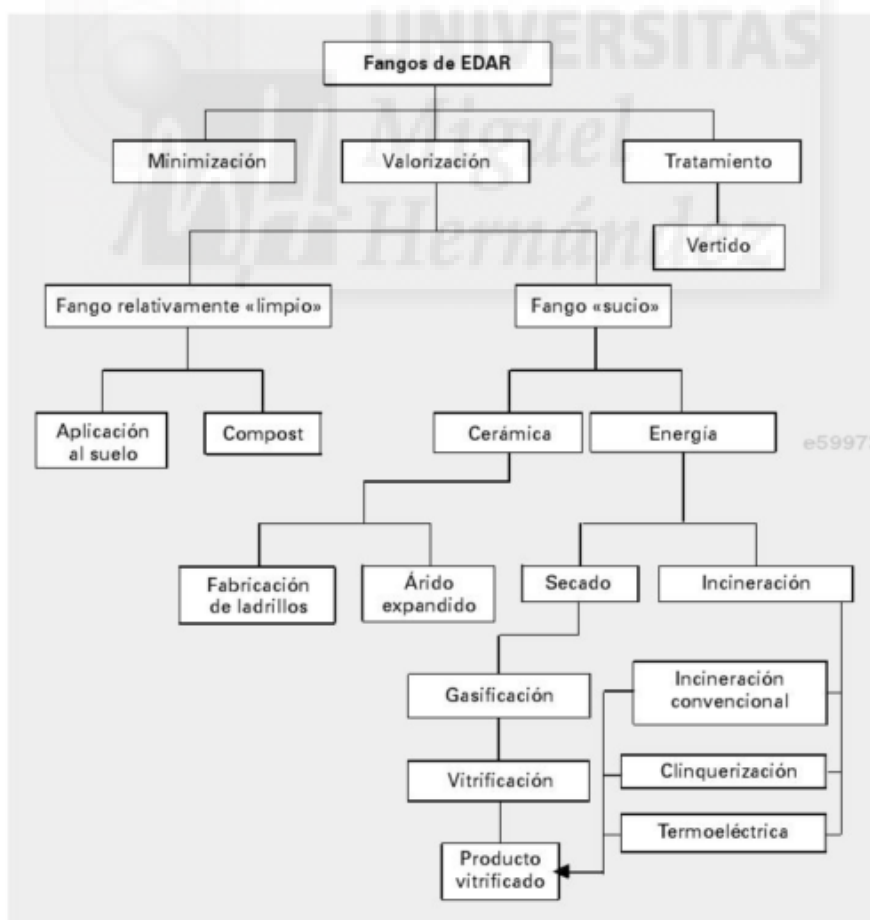


Figura 3. Esquema general de la gestión de fangos de EDAR. (Xavier Elías, 2012).

La gestión de lodos de depuradora tiene, con respecto a otros tipos de residuos, la peculiaridad de que ciertos usos están regulados por normas específicas, algunas de carácter agronómico, al existir la posibilidad de utilizarlos como abonos y enmiendas orgánicas de suelos. Es importante señalar, que la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y que regula de un modo genérico la gestión de los residuos, contempla dentro de la definición de residuo a todos aquellos que figuran en el antiguo Catálogo de Residuos Europeo (C.E.R.) que actualmente constituye la Lista Europea de Residuos (L.E.R.) en función de la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. En el caso concreto de los lodos de EDAR, se encuentran contemplados en dicha lista e incluidos en diferentes subapartados del código 19, bajo la denominación general de residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano o agua para uso industrial. En concreto, los lodos de depuradora procedentes de las estaciones de depuración de aguas residuales se corresponden con el código "190805" definido como "lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas". Algunos de los principales tratamientos aplicados a los lodos de depuradora son los siguientes:

*a) Valorización energética*

La valorización energética es el proceso de recuperar el calor sensible contenido en los gases. Es obvio que la tecnología de valorización y/o combustión será diferente, y su rendimiento también, según el proceso de valorización empleado. Con la aprobación de la Directiva 2000/76/CE, relativa a la incineración de residuos, se ha fijado en el ámbito de la Unión Europea los requerimientos aplicables a este tipo de gestión de residuos. El objetivo de la Directiva es limitar los efectos negativos sobre el medio ambiente, especialmente la contaminación causada por las emisiones a la atmósfera, el suelo y las aguas superficiales y subterráneas, así como los riesgos para la salud humana derivados de la incineración y coincineración de los residuos.

El RD 653/2003 de 30 de mayo sobre incineración constituye la trasposición de la Directiva 2000/76/CE a derecho interno. Los valores han sido actualizados en la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales.

La incineración es, en realidad, un conjunto de tecnologías entre las que cabe destacar la combustión, puesto que es la que afecta más directamente a la fracción orgánica de la materia que se pretende tratar. En la incineración, el fango al estar compuesto por una fracción orgánica, otra inorgánica y agua, la valorización energética deberá partir de las siguientes premisas:

- Que el fango sea autocombustible. La parte orgánica de los fangos de EDAR no digeridos tienen un PCI (poder calorífico inferior) próximos a los 5.500 Kcal/kg (23,012 KJ/kg). Si, aproximadamente el 50% es materia orgánica el PCI real será de 2.750 Kcal/kg (hay que hacer constar que el 50% de la parte inorgánica no computa a efectos del PCI). Con estos valores los fangos son perfectamente autocombustibles.
- El parámetro que si puede afectar a la combustión de los fangos es la humedad. El PCI de un combustible siempre se refiere a la fracción seca del mismo. No obstante, la humedad presente obliga a gastar tal cantidad de energía en la evaporación del agua que podría darse el caso de que un fango húmedo no mantuviese la autocombustión. Para una óptima utilización de la energía, la humedad del fango entrante en el proceso debe estar entre ciertos límites.

La combustión de sólidos y líquidos deben pasar por una fase previa de gasificación para que se desprendan los volátiles. Las reacciones de combustión siempre tienen lugar en fase gaseosa (reacciones homogéneas). Existen reacciones heterogéneas (sólido-gas) que tienen una cinética más complicada y desde el punto de vista ambiental, son mucho más conflictivas. Estas conversiones se llevan a cabo en la práctica por medio de una serie de procesos elementales entre los que cabe citar:

- **El secado:** donde se evapora el agua contenida en el combustible.
- **La destilación:** proceso en el que se escapan los primeros COVs, que se transforman en los primeros gases combustibles.
- **La gasificación y la pirólisis:** que obviamente aparecen ya que zonas del combustible se hallan al calor con un aire inferior al estequiométrico (gasificación) o simplemente sin aire (pirólisis).
- **La oxidación de los gases resultantes,** para dar finalmente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

La problemática de la incineración de fangos de EDAR estriba en que estos poseen una cantidad importante de cenizas fusibles entre 1110 y 1300°C, sin embargo, entre ellas hay cantidades importantes de componentes, como NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> o Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, con puntos de descomposición entre 750 y 850°C. En estas circunstancias el peligro consiste en alcanzar la temperatura de descomposición de sales de sodio, potasio y alcalinotérreos antes que la descomposición de la materia orgánica. La razón se encuentra en que la presencia de óxidos fundentes, como los alcalinos, a temperaturas de 950°C van hacer fundir el resto de cenizas y parte de la estructura metálica del propio horno. Por esto, en algunos hornos, junto al fango de EDAR se añade alúmina y cuarzo.

Desde el punto de vista de la valorización energética, la gran ventaja de la incineración es que, al generar energía, el coste de los tratamientos de los fangos de EDAR se reduce. Pese al pobre rendimiento de la conversión energética, ésta parece que es la vía preferida por los países centroeuropeos y cuando se dispone de una completa línea de tratamientos de gases, no implica ningún riesgo ambiental. Con la co-incineración se trata de sacar el máximo provecho a un combustible relativamente pobre, como es el caso de los fangos de EDAR, al mezclarlo con otro de mayores posibilidades energéticas, es decir, de los denominados convencionales y/o fósiles.

#### *b) Digestión anaerobia*

La producción de energía a partir de la digestión anaeróbica de los fangos de depuradora ha estado en uso en todo el mundo por más de 30 años. Su viabilidad y

rentabilidad depende no sólo de las cantidades producidas de biogás, la tecnología disponible y la eficiencia de la operación de tratamiento de aguas residuales sino también en la unidad de parámetros externos, como el costo de producción local de la energía y los recursos energéticos disponibles. Aparte de las ventajas económicas, el biogás ha reportado beneficios para el medio ambiente.

La degradación o digestión anaeróbica es un proceso biológico donde se produce una estabilización de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los principales productos de este proceso son el dióxido de carbono y el metano, pero en menores cantidades se generan también el nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno (por lo general, menos del 1% del total de volumen de gas). La mezcla de productos gaseosos, se denomina biogás y al proceso de degradación anaeróbica con frecuencia también se denomina el proceso de biogás. El interés en el proceso se debe principalmente a las siguientes dos razones:

- Un alto grado de reducción de la materia orgánica se logra con un pequeño aumento, en comparación con los procesos aerobios, en la biomasa bacteriana.
- La producción de biogás, que puede ser utilizada para generar diversas formas de energía (calor y electricidad), o para ser procesado como combustible para automotores.

El biogás obtenido a partir de las aguas residuales por lo general contiene de 55% a 65% de metano, del 35% al 45% de dióxido de carbono y < 1% de nitrógeno. El biogás obtenido a partir de residuos orgánicos generalmente contiene de 60% a 70% de metano, de 30% a 40% de dióxido de carbono y < 1% de nitrógeno, mientras que el metano en los vertederos tiene usualmente un contenido del 45% al 55%, dióxido de carbono, del 30% al 40% y del nitrógeno del 5% al 15% (63,73).

### *c) Compostaje*

Tal como ya ha indicado en el apartado de RSU, el compostaje es un tratamiento biológico al que se pueden someter los residuos, consistente en un proceso bio-oxidativo controlado sobre un sustrato orgánico, sólido y heterogéneo, que evoluciona a través de una

fase termófila y temporal, liberando fitotoxinas, y es descompuesto por la acción de los microorganismos, obteniéndose como productos  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , minerales y materia estabilizada, libre de compuestos fitotóxicos y patógenos (Soliva y col, 2008). El resultado del proceso de compostaje es la formación de un producto llamado compost, relativamente estable como el humus, conservando los nutrientes químicos del residuo fresco, a la vez que intensifica su asimilabilidad para las plantas y destruye los microorganismos patógenos, las malas hierbas y las larvas de insectos. La biodiversidad de la fauna edáfica aumenta con la incorporación del compost al suelo. Sin embargo, este aumento de biodiversidad microbiana estará en función del grado de estabilización de la materia orgánica.

El compostaje se plantea como una de las alternativas de tratamiento para los lodos, ya sean frescos o digeridos, consiguiéndose estabilizar la materia orgánica y su higienización. El elevado contenido de N que contienen los lodos permite obtener un compost con gran valor agronómico. Existen numerosas experiencias del compostaje de lodos con otros materiales como la fracción orgánica de los residuos municipales u otros materiales. Debido a la baja relación C/N que presentan los lodos la elección del material complementario y la optimización de las mezclas es esencial para prevenir las emisiones de amoníaco.

El principal problema relativo al compostaje de lodos se asocia con su elevado contenido en humedad (70-80%) y en consecuencia su bajo potencial energético. Esto se pone de manifiesto especialmente en el caso de lodos digeridos. Si la humedad es excesiva y la biodegradabilidad moderada, puede darse el caso que el calor producido biológicamente en el proceso de compostaje sea insuficiente para las dos funciones principales, a saber: evaporar agua (la del substrato y la generada en el proceso) y calentar la masa a temperaturas termófilas para higienizar el material (Haug, 1993).

#### **4.3.2. Aplicación agrícola: ventajas y riesgos derivados**

Una de las soluciones escogidas para lograr una gestión respetuosa con el medio ambiente es la utilización de los lodos como abono agrícola. La composición de los lodos,

aunque variable, les convierte en una fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes para su utilización en la actividad agraria, que resulta ser la vía más adecuada para su eliminación, al permitir su incorporación a los ciclos naturales de la materia y la energía. Se produce así un doble beneficio, ambiental y agrario, consecuencia por una parte de su eliminación sin alteración relevante del equilibrio ecológico, y por otra, del efecto que se deriva de su aplicación en los suelos, que aumenta su contenido en materia orgánica y nutrientes.

Actualmente, existe una estrecha relación entre la pérdida de materia orgánica, el descenso del potencial agrícola y el avance de la erosión, en especial, cuando confluyen otros factores como la ausencia de vegetación, la pendiente del terreno y las condiciones climáticas (Stoate y col., 2001; Pedra y col., 2007). Hoy en día, el uso de enmiendas orgánicas para restaurar, mantener o aumentar los contenidos de materia orgánica del suelo y mejorar sus funciones físicas, químicas y biológicas es una de las prácticas más comunes, eficientes y baratas (Fernández y col., 2009a; Singh y Agrawal, 2010). Sin embargo, las enmiendas orgánicas usadas tradicionalmente, como los estiércoles o las turbas, en la actualidad no son suficientes para cubrir la demanda existente, lo que hace preciso buscar materiales alternativos provenientes de muy distintas fuentes (Saviozzi y col., 1999); dentro de esta lista de nuevas enmiendas orgánicas destacan por su abundancia y disponibilidad los lodos de depuradora (Soler, 1998; García-Gil, 2001; Antolín y col., 2005; Pascual y col., 2007; Tarrasón y col., 2008; Fernández y col., 2009a; Mosquera-Losada y col., 2010; Singh y Agrawal, 2010). Por tanto, una buena parte de los suelos agrícolas españoles se puede beneficiar de la aplicación de lodos siempre que ésta se realice conforme a la legislación vigente y se elaboren planes de fertilización adecuados que tengan en cuenta la composición de los lodos y las necesidades de los cultivos para el cálculo de la dosis a aplicar. La aplicación a los suelos agrícolas debe realizarse correctamente, prestando especial atención a la forma y al momento de aplicación en función de las características de cada caso (pendiente del terreno, distancia a los cursos de agua, previsión de lluvias, etc.). Así, se puede mejorar la estructura y contenido en nutrientes del suelo, protegiendo el medio ambiente y la salud humana. Los lodos de depuradoras, tienen la peculiaridad respecto a otros tipos de residuos,

de que su uso en el suelo está regulado por la Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente y en particular de los suelos en la utilización de los lodos con fines agrícolas. Esta directiva se incorporó a la legislación española mediante el RD 1310/1990 de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. En él se designa al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y a las autoridades responsables de las Comunidades Autónomas en esta misma materia como los competentes en materia de aplicación y control de la citada Directiva y se crea el Registro Nacional de Lodos (RNL). En las citadas legislaciones se establece distinción entre los siguientes términos:

- a) **Lodos de depuración:** los lodos residuales procedentes de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas, urbanas o de aguas residuales de composición similar a las anteriormente citadas, así como los procedentes de fosas sépticas y de otras instalaciones de depuración similares utilizadas para el tratamiento de aguas residuales.
- b) **Lodos tratados:** son los lodos de depuración tratados por una vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzca de forma significativa su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización.

Según la legislación vigente, RD 1310/1990, se permite la utilización en suelos agrícolas, de los lodos de depuración cuando la concentración de metales pesados de los lodos y de los suelos receptores no supere ciertos límites y además, se controle la acumulación de metales en las parcelas receptoras (Tabla 12). La Directiva prohíbe la aplicación de lodos de depuradora sin tratar y también prohíbe de manera explícita la aplicación de lodos tratados a determinados cultivos y establece plazos para su aplicación en los cultivos autorizados. También indica que la aplicación de lodos debe de hacerse teniendo en cuenta las necesidades de nutrientes de las plantas. Limita los contenidos de metales pesados y exige análisis periódicos de los suelos y lodos. Además, exige control estadístico de los lodos producidos, cantidades dedicadas a fines agronómicos, composición y



características de los lodos, tipos de tratamiento e identificación del destinatario y lugar de aplicación.

**Tabla 12.** Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990 de 29 de Octubre, donde se regula la normativa actualmente vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo.

Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos		Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria		Valor límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años	
Elemento	Valores límite (mg kg <sup>-1</sup> m.s.)		Valores límite (mg kg <sup>-1</sup> m.s.)		Valores límite (kg Ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
	pH<7	pH>7	pH<7	pH>7	
<b>Cadmio</b>	1	3,0	20	40	0,15
<b>Cobre</b>	50	210,0	1000	1750	12,00
<b>Níquel</b>	30	112,0	300	400	3,00
<b>Plomo</b>	50	300,0	750	1200	15,00
<b>Zinc</b>	150	450,0	2500	4000	30,00
<b>Mercurio</b>	1	1,5	16	25	0,10
<b>Cromo</b>	100	150,0	1000	1500	3,00

Con la finalidad de mejorar el sistema de información sobre la gestión de los lodos y mejorar el control de las aplicaciones agrícolas garantizando el uso adecuado de los lodos de depuración en el suelo, recientemente se ha derogado la Orden 26 de octubre de 1993, y se ha aprobado la Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. Con la citada orden se establece un nuevo régimen jurídico que promueve la transparencia en materia de producción y gestión de residuos y asegura su trazabilidad.

En su Anexo I, "información de la estación depuradora de aguas residuales", se regula la información que deben proporcionar los titulares de las depuradoras de aguas residuales al órgano competente de cada Comunidad Autónoma, referida a cada año natural. Entre

otros datos se requiere la carga contaminante media tratada, el caudal tratado, el tratamiento aplicado tanto en la línea de aguas como de lodos, la cantidad de lodos tratados, su porcentaje de materia seca y el destino de los lodos.

En el *Anexo II, “documento de identificación del lodo”*, se detalla la información que debe acompañar a toda partida de lodos de depuración destinada a la actividad agraria, desde las instalaciones de tratamiento hasta las explotaciones agrarias donde se aplique, y se actualiza la información que debe contener el Registro Nacional de Lodos. En este documento se requiere el origen y tratamiento del lodo, la cantidad transportada, su porcentaje en materia seca, su contenido en metales y diversos parámetros agronómicos y microbiológicos, así como la identificación del gestor y del transportista.

En el *Anexo III, “documento de aplicación de lodos”*, se recoge la información que los gestores deben cumplimentar con cada aplicación de lodos y guardar durante al menos tres años. En este documento se requieren datos de la instalación de tratamiento, del gestor, del usuario, de la parcela, de la cantidad y características del lodo, del cultivo, fecha de aplicación, etc.

En el *Anexo IV, “información anual de las aplicaciones de lodo”*, se recoge la información que los gestores deben remitir a la Comunidad Autónoma de forma anual. En este documento se recoge la identificación de la instalación de tratamiento del lodo, del gestor, información de las características del lodo, cantidad aplicada, parcela, superficie, cultivo, etc.

La Comisión Europea trabaja actualmente, en la revisión de la citada Directiva de Lodos a fin de adaptarla al progreso técnico y científico y a las exigencias de otras legislaciones más recientes como la Directiva relativa a los residuos (2006/12/CE) que establece la jerarquía en la gestión de residuos (prevención, reducción, reutilización, reciclado y recuperación energética) y con la Directiva sobre vertido (1999/31/CE) que limita la posibilidad de eliminación en vertederos de los residuos biodegradables y prohíbe el

vertido de residuos que no se hayan sometido a tratamiento. En la próxima Directiva sobre lodos se regularán probablemente, los tratamientos para la reducción de patógenos, la presencia de contaminantes orgánicos y la contaminación por metales pesados. Los plaguicidas, los disolventes industriales, los colorantes, los plastificantes, los agentes tensoactivos y muchas moléculas orgánicas complejas, generalmente de baja solubilidad en agua y elevada capacidad de absorción, tienden a acumularse en los fangos. En los documentos de trabajo de la UE está en estudio fijar un valor mínimo para la aplicación al suelo de alquilbenceno sulfonato lineal (LAS) y ciertos patógenos, como los huevos de nematodos.

España presenta una gran producción anual de lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales (Mosquera-Losada y col., 2010), por lo que el empleo de estos residuos como enmienda orgánica en suelos agrícolas resulta doblemente beneficioso. Por un lado, por el déficit de materia orgánica y el bajo contenido en metales pesados de nuestros suelos y por otro, por la reutilización de dichos residuos, lo cual supone una posible solución respecto a su almacenamiento en vertederos o a su incineración (Tejada y González, 2003; Plaza y col., 2006; Fernández y col., 2009a). El empleo de lodos de depuradora tiene principalmente dos tipos de aplicación en el ámbito agrícola:

*a) Uso como enmienda orgánica*

Los lodos de depuradora producidos en núcleos urbanos poco industrializados, caracterizados por su alto contenido en materia orgánica y nitrógeno, así como en otros elementos esenciales para las plantas y por tener bajos niveles de metales pesados, resultan idóneos para utilizarlos como enmendantes de suelos agrícolas o forestales, especialmente en suelos con bajos niveles nutricionales y pH ligeramente alcalino. Este tipo de suelo es frecuente en amplias zonas del sureste español. El empleo de lodos de depuradora como enmienda de suelos, presenta como aspectos beneficiosos, las mejoras asociadas a un aumento general de la materia orgánica y, más concretamente al aumento en su nivel de humus estable; estas mejoras son muy importantes en un gran número de propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas del suelo (Mezger y col., 1987; Clapp et al.,

1986; Bartoli y col., 1992) lo que se traduce en un incremento de su productividad. La productividad potencial de un suelo está relacionada con su contenido en materia orgánica y su tasa de renovación. En particular, el papel de los ácidos húmicos es muy importante, su adición a los suelos tiene un efecto positivo sobre el metabolismo de N y P (Figlioglia y col., 1990; Biondi y col., 1994) y sobre la asimilación de nutrientes por parte de las plantas. Los ácidos húmicos son responsables en gran medida de la agregación de las partículas del suelo (Piccolo y Mbagwn, 1990) y de su capacidad de cambio de cationes (De Nobili y Maggioni, 1993). En consecuencia, los suelos enmendados con lodos de depuradora tienden a tener mayores cantidades de materia orgánica, superiores concentraciones de macronutrientes, y más elevados contenidos en micronutrientes y elementos traza no esenciales, su pH puede verse incrementado o disminuido y la actividad de microorganismos del suelo puede ser diferente (Alloway y Jackson, 1991). Tsadillas y col. (1995) encontraron, que cuando el suelo presenta un pH inferior a 6,5, éste se incrementa significativamente con la aplicación de lodo, en cambio, cuando el suelo presenta un pH superior a 7,5, la tendencia es a disminuir el pH del suelo al aumentar la dosis de lodo aplicada. También encontraron aumentos significativos en la conductividad eléctrica, en el contenido de materia orgánica y en el fósforo asimilable (Olsen) al aumentar la tasa de aplicación de lodo. Similares observaciones respecto a pH, contenido de materia orgánica y de conductividad eléctrica han sido referenciadas por Harding y col. (1985), en un experimento de campo a lo largo de cuatro años. Ricote y col., (1998) en una experiencia desarrollada en Biar (Alicante), donde sobre un suelo de cultivo del olivo se aplica una mezcla de lodos procedentes de tres estaciones depuradoras de aguas residuales cercanas a la zona de aplicación, concluyen que la adición de lodo a los suelos resulta eficaz ya que mejora considerablemente sus niveles nutricionales, produciéndose un mejor desarrollo del cultivo y una disminución en los costes de fertilización, ya que la obtención del lodo de depuradora es más barata que la de fertilizantes comerciales.

El efecto de los lodos sobre el crecimiento y productividad de los cultivos hortícolas ha sido ampliamente estudiado. Los suelos enmendados con lodos residuales mejoran el crecimiento y producción de cultivos vegetales (Bryan y Lance, 1991; Harrison y Staud, 1986;

Sterrett y col., 1982, 1983) y de plantas ornamentales, (Fitzpatrick y Carter, 1983; Fitzpatrick y Farrell, 1984). En el caso de suelos degradados, la incorporación de lodo incrementa particularmente su fertilidad y mejora las propiedades físicas. La capacidad de retención de agua y el porcentaje de formación de agregados estables se incrementan proporcionalmente a la cantidad de lodo incorporada.

#### *b) Uso como sustrato*

La utilización de lodos de depuradora debidamente tratados como materia prima en la elaboración de sustratos de cultivo supone por una parte, la rentabilización de un material considerado como residuo, y por otra, la disponibilidad de una materia prima cada vez más abundante para la elaboración de dichos sustratos (Terés y col. 1997). La adición de acondicionadores que modifiquen la composición granulométrica y mejore las propiedades físicas del lodo de depuradora es interesante desde el punto de vista de su utilización como sustrato de cultivo. La adición de turba, corteza de pino o perlita al lodo de depuradora tiene como consecuencia un aumento del tamaño medio de poro (Terés y col. 1997).

Los lodos de depuradora, no pueden utilizarse directamente para la formulación de sustratos de cultivo, ya que poseen una baja capacidad de aireación, resultan muy asfixiantes, son ricos en N y relativamente pobre en C y presentan cantidades variables de metales pesados, de sustancias orgánicas tóxicas y de distintos tipos de microorganismos patógenos. Por ello, es imprescindible una adecuación de los lodos de depuradora para su utilización como sustrato de cultivo. El compostaje conjunto con otros materiales que actúen de agente de esponjamiento y fuente de carbono (cortezas de árboles, paja, restos de poda urbana o agrícola, restos de cosechas, restos vegetales de industrias agrarias, etc.) resulta un método de adecuación sencillo. Del proceso de compostaje resulta un material orgánico maduro y estabilizado denominado compost, de aspecto semejante al humus, el cual puede ser utilizado en horticultura sin efectos negativos para las plantas (Iglesias y Pérez-García, 1989). La calidad del compost obtenido, variará en función de las características del lodo, de las del material utilizado para la mezcla, la proporción de la mezcla y el método seguido en el proceso de compostaje. A partir de estos materiales, se pueden realizar mezclas con otros

ingredientes que permitan obtener sustratos con propiedades adecuadas para un determinado uso hortícola (Bragg y col., 1993, Nappi y Barberis, 1993). Cuevas y Walter (1995) estudiaron el efecto de un compost de lodo residual sobre la producción y calidad de bulbosas (*Iris profesor blaaw* y *Lilium*) para flor cortada, en invernadero sobre macetas, que contenían sustrato a base de turba y arena en la relación 1:1 más la dosis de lodo aplicada (0, 10 20 40 y 80 t ha<sup>-1</sup>) obteniendo resultados positivos para *Iris profesor blaaw*, siendo la dosis de 40 t ha<sup>-1</sup> la más adecuada y observándose para el caso de *Lilium* ligeros efectos negativos en los tratamientos con compost, tanto en la producción como en la calidad de la flor. Sánchez-Monedero y col. (1997) ensayaron tres especies hortícolas: brócoli, tomate y cebolla, utilizando como sustrato de cultivo turba mezclada con compost, elaborado a partir de mezcla de distintos residuos entre ellos el lodo de depuradora, concluyendo que cualquiera de los compost utilizados mezclados con turba, hasta una proporción del 66,7 % en volumen, es factible para la preparación de sustratos de semillero, y no tiene efectos negativos sobre el crecimiento. Algunos factores que dificultan el uso de los lodos no contaminados por metales pesados, como sustrato de cultivo, son: el mal olor que normalmente desprenden estos materiales (aunque en menor proporción sus mezclas), la variabilidad en su características, bajo control de calidad y falta de asesoramiento para su uso, el riesgo de salinización inicial de los cultivos, que puede llegar a ser muy elevada, y en determinados casos la inmovilización inicial del nitrógeno que conlleva su puesta en cultivo.

#### *Potenciales riesgos derivados*

Tal como ya se ha planteado, los lodos de depuradora, como residuos orgánicos, plantean también una serie de inconvenientes y restricciones cuando se aplican al suelo. Debido a su origen y composición heterogénea, pueden causar problemas muy diversos tales como la acumulación de metales pesados, la incorporación de microorganismos patógenos, contaminantes orgánicos, pesticidas, fármacos, etc. especialmente cuando proceden de vertidos industriales (Aparicio y col., 2007; Singh y Agrawal, 2008; Sánchez-Brunete y col., 2008; Singh y Agrawal, 2010). Pero además, como compuestos orgánicos, también deben ser tenidos en cuenta otros factores muy importantes como el grado de estabilidad y madurez del producto final o tasa de descomposición de la materia orgánica y

de las sustancias orgánicas fitotóxicas (Wu y col., 2000; Wang y col., 2004), ya que una enmienda sin estabilización biológica previa puede provocar efectos adversos para el suelo y los cultivos (Plaza y col., 2003; Pedra y col., 2007; Fernández y col., 2009a). Las características de los lodos que pueden actuar como factores limitantes de su aplicación en el sector agrícola son las siguientes (Costa y col., 1987):

*a) Salinidad*

Es un factor a tener muy en cuenta, puesto que la cantidad de aniones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , etc.) y cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , etc.) solubles en un suelo al que se le ha aplicado lodo va a ser muy importante, sobre todo en aquellos con una limitada capacidad de drenaje. Así, se puede producir una disminución en la germinación de las semillas y crecimiento de la planta, a la vez que la estructura del suelo puede verse seriamente alterada. Cabe destacar que el ión más perjudicial para la planta es el cloruro, y que la relación entre el contenido de cationes Na, Ca y Mg, es un parámetro muy adecuado para evaluar efectos negativos sobre el suelo.

*b) Contenido de nutrientes*

Un aporte demasiado elevado al suelo de nitrógeno y de fósforo, puede provocar una contaminación de las aguas subterráneas por la elevada concentración de nutrientes solubles. Esto es debido a que las fracciones inorgánicas de nitrógeno y fósforo, constituyen aproximadamente la mitad del aporte total de nutrientes al suelo por el lodo. Este efecto se puede ver agravado, si la aplicación al suelo se realiza fuera del período correspondiente a la mayor demanda fisiológica del cultivo o si el lodo no está suficientemente estabilizado, pudiendo crear problemas de nutrición para la planta, si el residuo no ha alcanzado la relación C/N óptima. El aporte de potasio no suele plantear problemas puesto que su contenido es bajo en los lodos.

En cuanto a un posible aumento del contenido en materia orgánica en los suelos, no resulta perjudicial, por la gran falta de ésta que presentan los suelos del sureste español. De

todos modos, una materia orgánica estabilizada no causará problemas para los cultivos, ni efectos contaminantes en suelos y acuíferos, siempre que se aporte en las dosis adecuadas.

*c) Microorganismos patógenos*

Desde el punto de vista agrícola es un factor importante a tener en cuenta, puesto que es interesante conocer la cantidad de microorganismos y su capacidad de supervivencia, con el fin de prever las posibles contaminaciones por ingestión de partes comestibles de plantas que hayan podido estar en contacto con los lodos. La supervivencia en suelo de patógenos es muy variable, puesto que va desde pocos días (quistes de protozoos) a varios años (huevos de *Áscaris lumbricoides*). Las cantidades de microorganismos presentes en un lodo varían según el grado de tratamiento del agua y el nivel alcanzado en las distintas fases de la línea de fangos. De todos modos, la supervivencia va a depender de distintos factores como son la humedad, cantidad de materia orgánica del suelo, luz, así como, del tipo de suelo.

*d) Contenido en metales pesados*

Los lodos, además de materia orgánica y nutrientes esenciales para las plantas, también contienen elementos potencialmente tóxicos no sólo para las plantas, sino también para los animales y el hombre, consumidores de dichas plantas. La concentración de metales pesados en los lodos va a ser variable según la naturaleza del agua residual, tratamiento realizado en la estación depuradora y el origen de los vertidos industriales. Además de ellos, cabe destacar la presencia de otros elementos no metálicos (metaloides) de efecto igual o incluso más perjudicial, tales como el arsénico, bromo, bismuto, selenio y yodo. La disponibilidad de metales pesados para la planta está influenciada por numerosos factores, uno de los más importantes es el pH del suelo (Shuman, 1986; Sims, 1986). Por esta razón el pH del suelo es uno de los factores limitantes en la aplicación de los lodos en los suelos agrícolas (USEPA, 1983). El problema de la incorporación de los metales pesados al suelo radica principalmente en que son bastantes persistentes, puesto que se encuentran fuertemente retenidos en las sedes de intercambio de cationes, de modo que aplicaciones repetidas de lodos en un mismo suelo, podrían provocar problemas de toxicidad en cultivos. Aplicaciones continuadas de lodos sobre las tierras de cultivo pueden producir una



acumulación de metales pesados a niveles tóxicos para las plantas (Chang y col., 1983; Hinesly y col., 1982; Mortved, 1987; Rehab y Wallace, 1978). La acumulación de metales pesados en los cultivos puede suponer un riesgo para la salud humana (Chaney, 1980; Yuran y Harrison, 1986). Este hecho ha llevado a imponer límites sobre la cantidad y frecuencia de la aplicación de los lodos sobre las tierras de cultivo. Es muy importante realizar una caracterización previa de los lodos de depuradora que se utilicen como enmendantes de los suelos, evitando así cualquier riesgo derivado de su uso, así como, realizar un seguimiento analítico de los suelos y cultivos de la zona donde se esté realizando la aplicación (Ricote, y col., 1998).

#### *e) Sustancias orgánicas tóxicas*

Aunque son numerosos los compuestos orgánicos, potencialmente tóxicos, identificados en los lodos, éstos se encuentran generalmente en pequeñas cantidades, siendo su persistencia, en determinados casos, bastante elevada. Los plaguicidas son los componentes más frecuentes. Muchos de ellos se metabolizan en mayor o menor grado a su paso por el proceso de depuración y es por ello que quedan muchas veces en los lodos. Por todo ello, antes de aplicar los lodos al suelo y con el fin de hacer un uso correcto y eficiente de los mismos en agricultura cumpliendo los requisitos sanitarios y medioambientales, es necesario un tratamiento previo y una posterior caracterización del producto final (Agrawal, 2010) lo que ayudará a establecer la dosis adecuada a los requerimientos de cada cultivo en el marco de una agricultura sostenible.

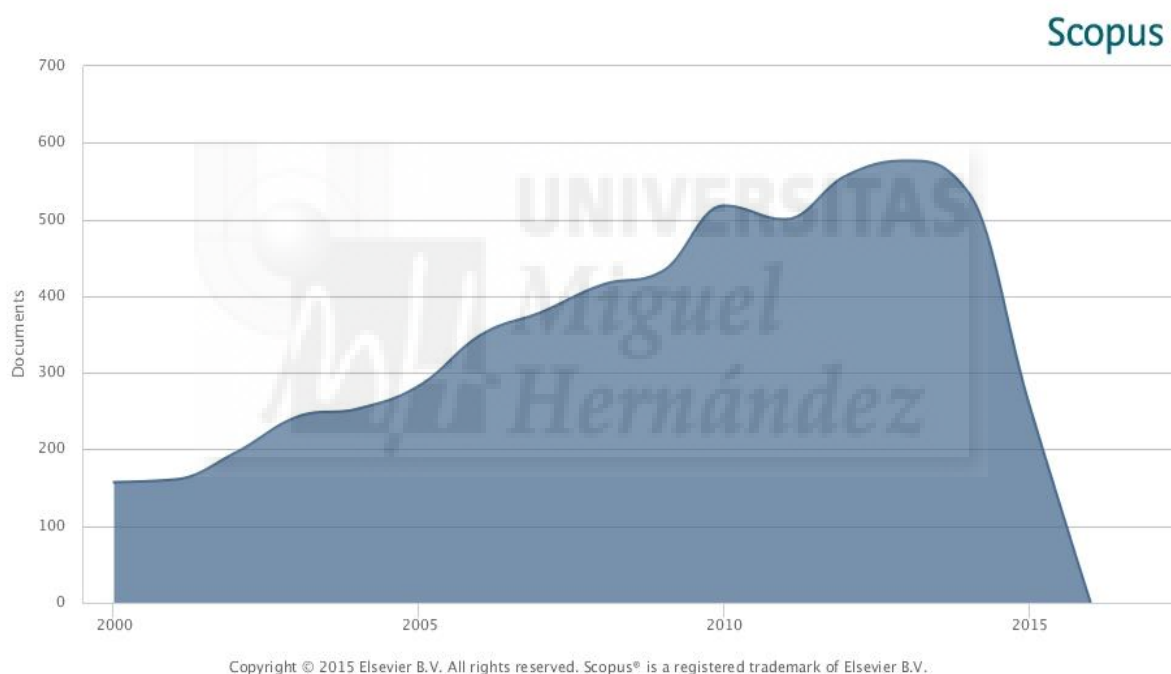
## **5. ÚLTIMAS INVESTIGACIONES SOBRE RESIDUOS URBANOS: ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO**

Con el fin de conocer las últimas investigaciones y estudios relacionados con los residuos generados en el entorno urbano, se ha llevado a cabo un completo estudio bibliométrico sobre el tratamiento de residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora.

Por una parte, el estudio se realiza usando las funciones del buscador SCOPUS y se centra sobre la búsqueda de la base de datos utilizando diversas palabras clave relacionadas con los residuos urbanos.

a) Búsqueda utilizando las palabras clave “municipal solid waste” and “management”

Los resultados utilizando estas palabras clave ha arrojado un total de 5818 publicaciones dentro del periodo 2000-2015. En las figuras 4, 5, 6 se presentan los resultados en forma del número de publicaciones por año, por fuente bibliográfica, por país y por área de investigación.



**Figura 4.** Número de publicaciones por año. Fuente: Scopus.

Como se observa en la figura 4, la evolución en prensa científica es ascendente, lo que demuestra cómo de importante se está volviendo el reciclaje y la valorización de residuos urbanos en la actualidad. Hoy en día son muchos los planes y programas que instan a mejorar la eficiencia en la reutilización y valorización de residuos sólidos urbanos. En este sentido la comunidad científica se hace eco de esta necesidad y aumenta la investigación en el área.

En las figura 5 y 6 se presenta el número de artículos para los autores más importantes en el área y su lugar de procedencia. Predominan los estudios ubicados en Estados Unidos, China e India.

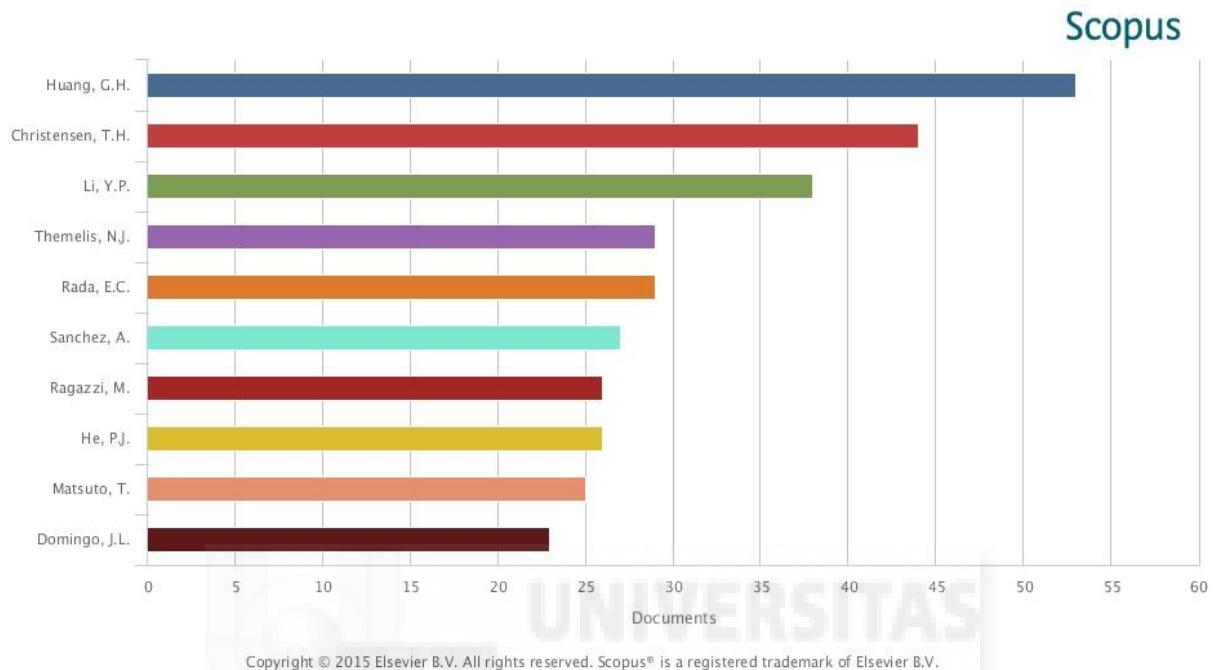


Figura 5. Número de publicaciones por fuentes bibliográficas. Fuente: Scopus

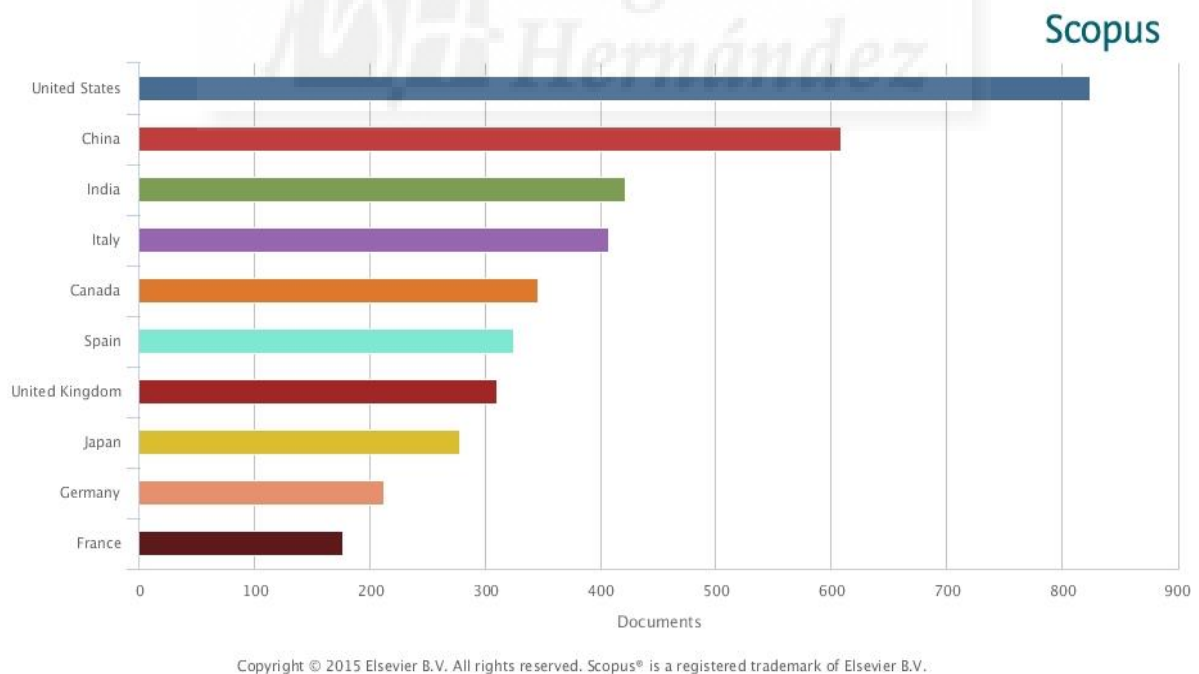


Figura 6. Número de investigaciones pos país. Fuente: Scopus

En la figura 7 se muestra la distribución por áreas de conocimiento de los artículos existentes en diversos temas. Una gran parte de los artículos están relacionados con las áreas temáticas del medio ambiente y la ingeniería.

Scopus

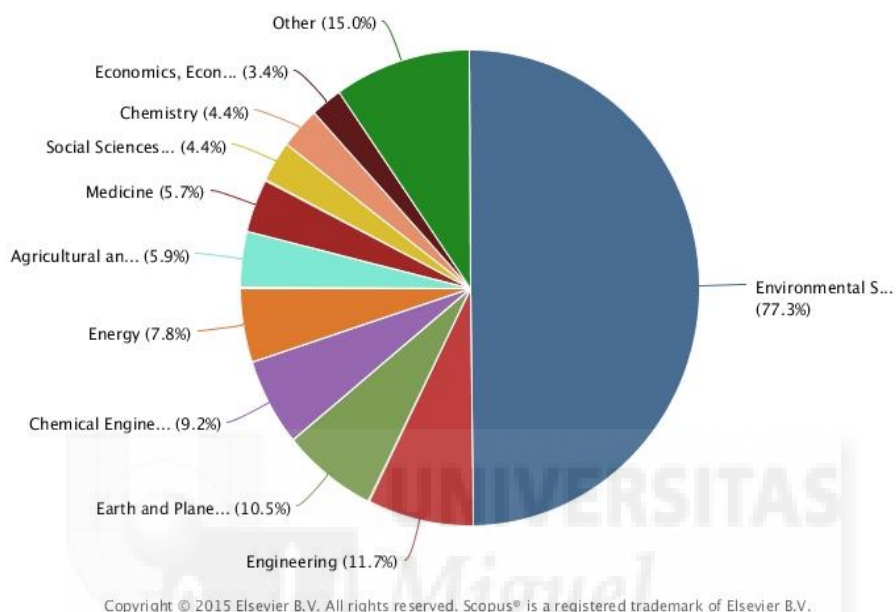


Figura 7. Número de investigaciones por área de investigación. Fuente: Scopus

Scopus

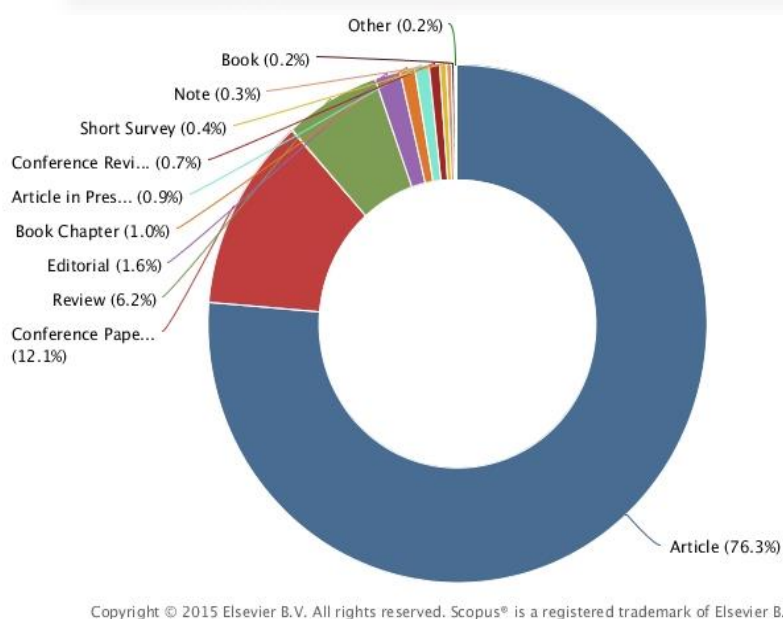
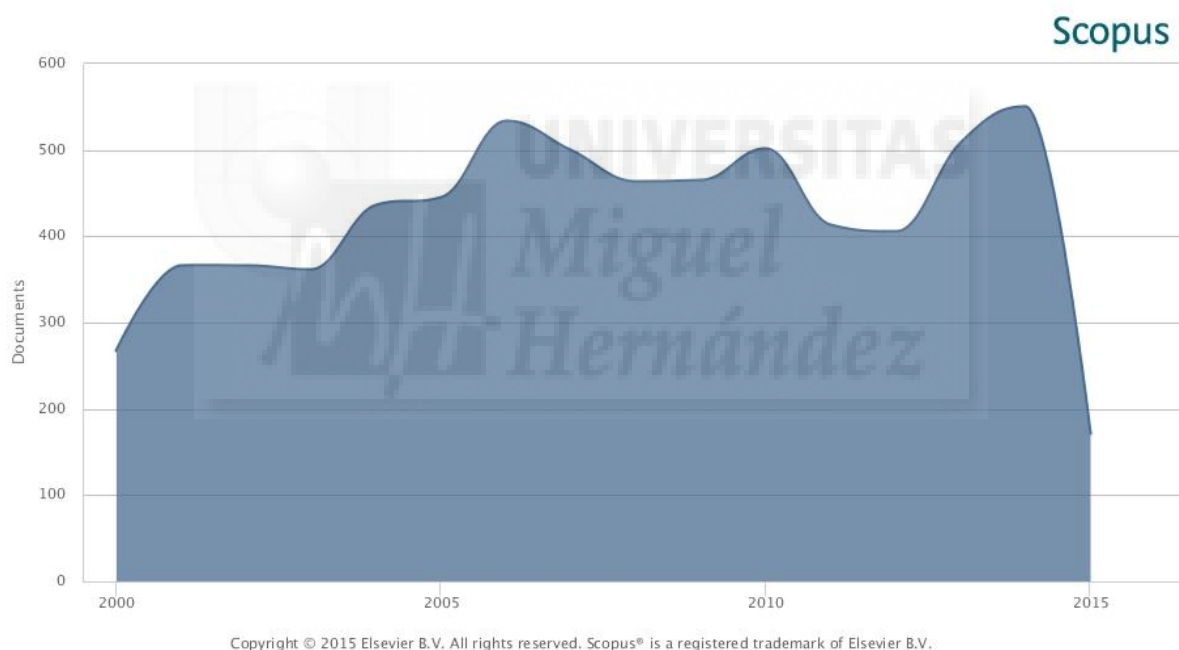


Figura 8. Aportaciones científicas en forma de publicaciones. Fuente: Scopus

En la figura 8, se muestra la cantidad de aportaciones científicas relacionadas con los residuos sólidos urbanos. La mayor parte de aportaciones se llevan a cabo en forma de artículos científicos.

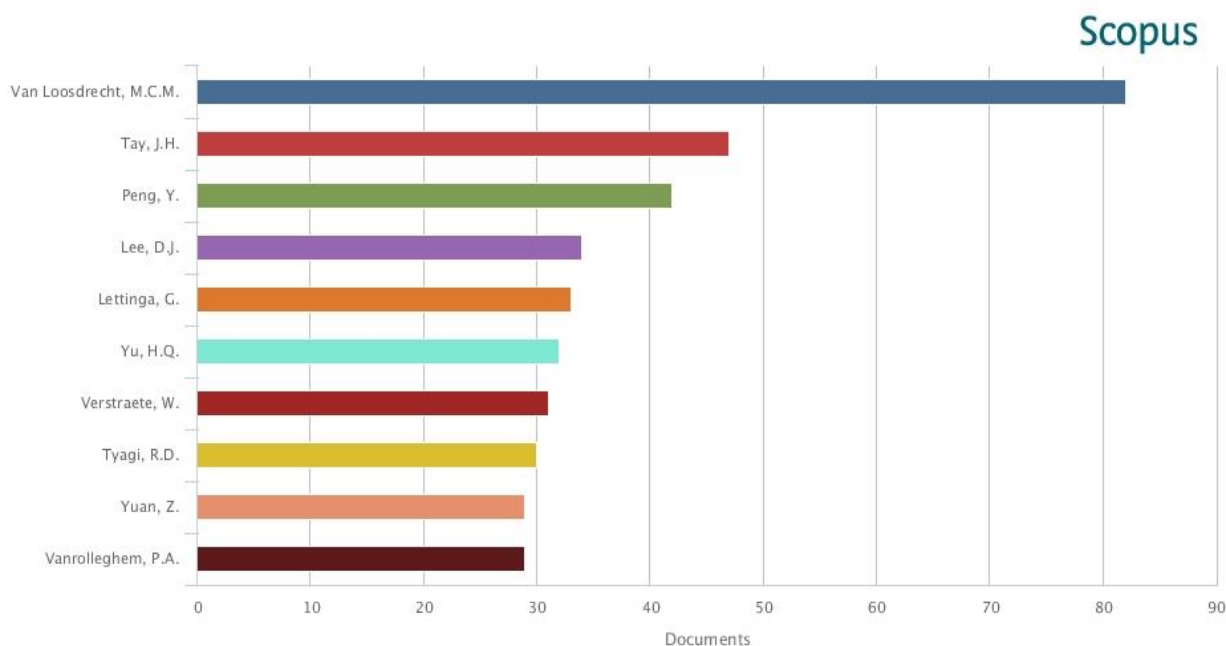
**b) Búsqueda utilizando las palabras clave “sewage sludge” and “management”**

Los resultados al utilizar en la búsqueda las palabras “sewage sludge” and “management”, han mostrado un total de 6759 publicaciones dentro del mismo periodo de tiempo (2000-2015). En las figuras 9, 10, 11 se presentan los resultados en forma del número de publicaciones por año, por fuente bibliográfica, por país y por área de investigación.



**Figura 9.** número de publicaciones por año. Fuente: Scopus.

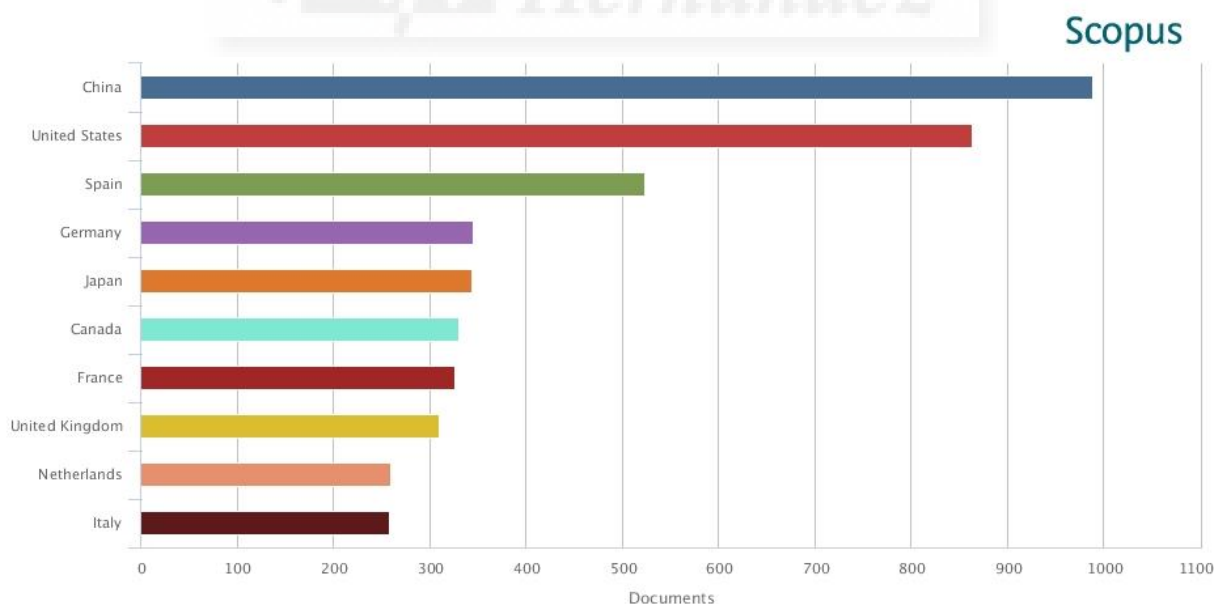
Como se observa en la figura 9, la evolución en prensa científica aumenta progresivamente a partir del año 2000, siendo el año 2015, el año de mayor aportación. Dada la importancia de valorizar la materia orgánica contenida en los lodos, es normal que el aporte de documentos científicos sea mayor conforme pasan los años.



Copyright © 2015 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

**Figura 10.** Número de publicaciones por fuentes bibliográficas. Fuente:Scopus

En las figura 10 y 11 se presenta el número de artículos para los autores más importantes en el área y su lugar de procedencia. En este caso, predominan los estudios ubicados en China, Estados Unidos y España.

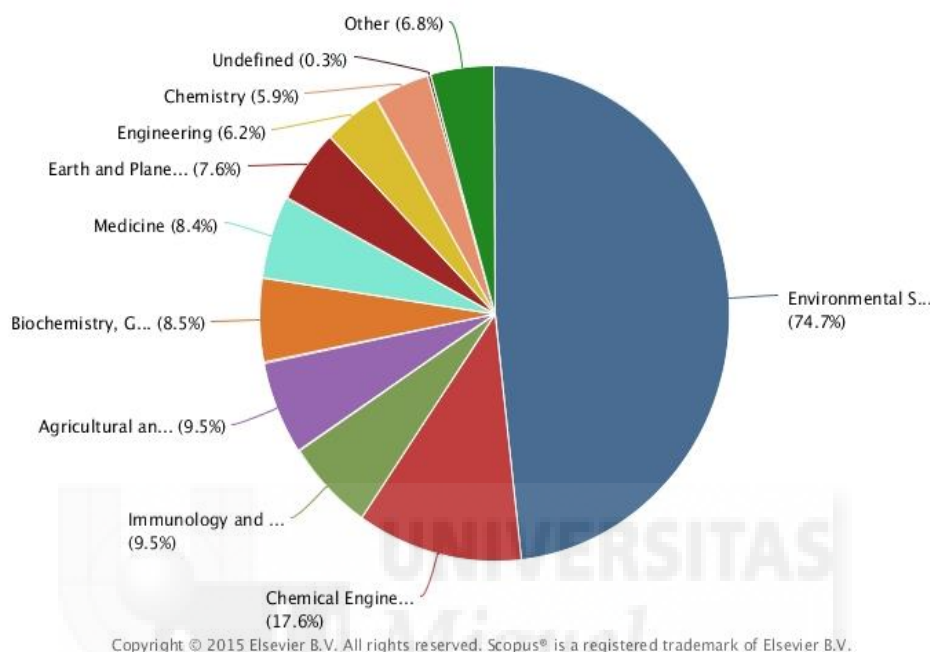


Copyright © 2015 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

**Figura 11.** Número de investigaciones pos país. Fuente: Scopus.

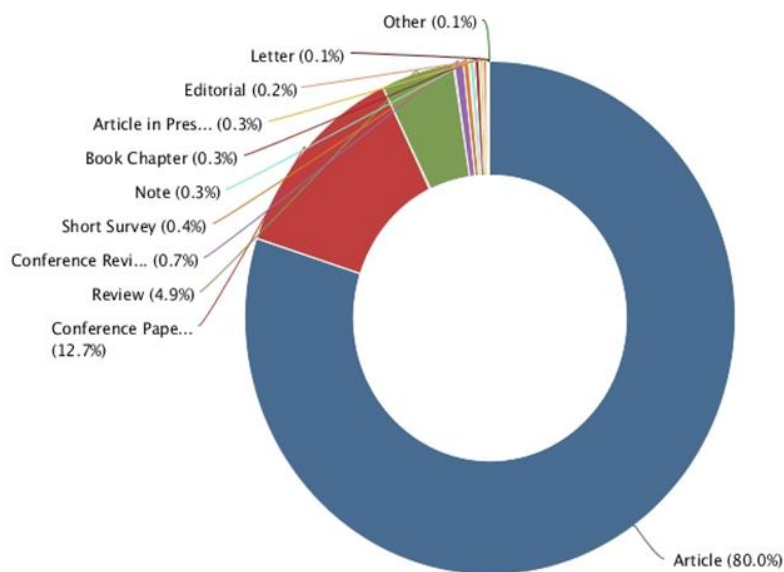
En la figura 12 se muestra la distribución por áreas de conocimiento de los artículos existentes en diversos temas. En este caso, una gran parte de los artículos están relacionados con el medio ambiente y la ingeniería.

Scopus



**Figura 12.** Numero de investigaciones por área de investigación. Fuente: Scopus

En la figura 13, se muestra la cantidad de aportaciones científicas relacionadas con los lodos de depuradora. Como en el caso anterior, la mayor parte de aportaciones se llevan a cabo en forma de artículos científicos.



**Figura 13.** Aportaciones científicas en forma de publicaciones. Fuente: Scopus

### Resumen de las principales publicaciones científicas relacionadas con los residuos urbanos

A modo de ejemplo, se ha realizado una selección de las principales (y de más actualidad) publicaciones científicas relacionadas con los residuos urbanos, y se ha realizado una síntesis de los aspectos más fundamentales de las mismas.

**Alexandros Kelessidis, Athanasios S. Stasinakis. (2011)**

***Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. Waste Management vol. 32, pp. 1186-1195***

El objetivo del presente estudio es describir la situación actual y discutir las perspectivas de futuro para el tratamiento y eliminación de los lodos de depuradora en los países miembros de la Unión europea. En este estudio se destaca que la legislación europea debe ser renovada con respecto a este tema y que la información aportada por los diferentes países a menudo es incompleta y poco homogénea. También considera la existencia de una gran cantidad de tecnologías para el tratamiento de los lodos, y que la digestión anaerobia y la aerobia son los métodos de estabilización más empleados. También



en cuanto al secado de fangos, la deshidratación mecánica es preferida con respecto al uso de lechos de secado. En cuanto a la disposición final de los lodos, la reutilización (incluyendo la aplicación agrícola directa y compostaje) parece ser que ha sido la opción más predominante para la gestión de los lodos en la UE-15, mientras que por incineración se quemaron un 21% de los lodos producidos. Por otra parte, el método de eliminación más común en la UE-12 fue la deposición en vertederos. Finalmente, muestra que la reutilización de lodos en la tierra y la incineración parecen ser las principales prácticas adoptadas en la UE-27. La aplicación de estos métodos ha dado lugar a una adopción de tratamientos de lodos con una avanzada tecnología con el fin de lograr una mayor eliminación de patógenos, control de olores, eliminación de productos tóxicos, asegurando la protección de la salud pública y el medio ambiente.

**Lucia Rigamonti, Irene Sterpi, Mario Grosso (2015)**

***Integrated municipal waste management systems: An indicator to assess their environmental and economic sustainability. Ecological indicators vol. 60, pp. 1-7.***

El estudio de este proyecto trata de la implantación de un indicador para la evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica de los sistemas integrados de gestión de residuos. Se intenta definir un indicador simple pero completo que pueda ser usado por los administradores locales y directivos del sistema de residuos y no sólo por los científicos o expertos. El indicador en cuestión está compuesto por tres indicadores individuales, dos de ellos evalúan la sostenibilidad ambiental del sistema mediante la cuantificación de los niveles de recuperación de materiales logrados y la energía empleada en el proceso. El tercero cuantifica los costes de las operaciones. El indicador permite comparar diferentes sistemas de gestión integrada de los RSU de una manera objetiva, y para supervisar el rendimiento de un sistema en el tiempo.

**Marta Herva, Enrique Roca (2012).**

***Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis. Ecological Indicators vol.25, pp.77-84.***

En este trabajo se clasifican una serie de alternativas al tratamiento de los RSU en base a su análisis mediante huella y multicriterio ecológico. En el estudio se tomaron cuatro opciones de tratamiento para los RSU y fueron clasificadas desde el punto de vista ambiental por dos métodos: la huella ecológica (EF) como único indicador compuesto y el análisis de criterios múltiples (MCA). La integración de la huella ecológica se realizó junto con otros indicadores relacionados como consumo de agua, emisiones a la atmósfera y el volumen ocupado de los vertederos. El objetivo del proyecto es doble, por un lado, la identificación de la alternativa más beneficiosa para el tratamiento de los residuos (incluyendo gasificación) desde una perspectiva medio ambiental y, por otro lado, la comparación de los resultados de los dos métodos propuestos. La clasificación obtenida (de mejor a peor) fue: gasificación por plasma térmico, tratamiento biológico de la fracción orgánica con recuperación de energía de los desperdicios derivados del combustible y la incineración con recuperación de energía.

***Bartłomiej Michał Cieslik, Jacek Namiesnik, Piotr Kniecicka (2014)***

***Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods.***

***Journal of Cleaner Production vol.90, pp.1-15***

Este artículo presenta los métodos más populares en la gestión de los lodos de depuradora, operaciones unitarias asociadas y procesos referidos a ellos. Los métodos que destaca son: recuperación y adecuación de tierras a necesidades específicas; el cultivo de plantas no destinadas al consumo o para la producción de alimentos; el uso en la agricultura; el uso en la construcción; recuperación de fósforo, metales o de grasas y el uso en la industria. El estudio destaca que el análisis químico puede ser muy útil para evaluar la seguridad ambiental del procesado y manejo de los lodos de depuradora. Es por eso que hay una cantidad significativa de técnicas analíticas usadas susceptibles de apoyar los procesos de diseño e implementación, con una nueva vista en el tema económico y ambiental, con formas razonables en la reutilización de los lodos de depuradora. Además, se describe el proceso de utilización de la tecnología de lodos de depuración llevada a cabo en la Planta de

Tratamiento de Aguas Residuales "Wschod" en Gdansk, donde recientemente se actualizó la línea tecnológica. Adicionalmente, se plantea la estrategia de desarrollo para la aplicación de un método de gestión pro-ecológico relacionado con la producción de materiales de construcción ligeros y recuperación de fósforo.

**M. Garrido.Baserba, M. Molinos-Senante, J.M. Abelleira-Pereira, L.A. Fdez-Güelfo, M. Poch, F. Hernández-Sancho (2014).**

***Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. Journal of Cleaner Production vol.xxx, pp.1-10.***

Este estudio sugiere que el tratamiento de los lodos en plantas de depuración requiere de nuevas dimensiones de análisis, ya que los criterios económicos combinados con los problemas ambientales derivados del tratamiento, están aumentando la complejidad en la gestión de los residuos. Se evalúan cinco tratamientos diferentes de lodos: digestión mesofílica y termofílica anaeróbica, además del compostaje, incineración, gasificación y oxidación en agua supercrítica (OASC). El potencial de calentamiento global (GWP) y el flujo anual de cada alternativa se utilizan para estimar un indicador compuesto, que además se integran en la evaluación del desarrollo de cinco escenarios priorizando aspectos económicos y ambientales. El estudio destaca que, si los aspectos económicos tienen prioridad sobre el medio ambiente, la digestión anaerobia termofílica seguida de compostaje resulta ser la opción más adecuada. El enfoque propuesto contribuye a la aplicación de las líneas de tratamiento de lodos de depuración más adecuados, ya que proporciona un indicador para cada alternativa que abarca cuestiones económicas y de GWP.

**Astrid Allesch, Paul H. Brunner (2014).**

***Assessment methods for solid wastemanagement: A literature review. Review article vol. 90, pp.1-15.***

El objetivo de este artículo de revisión es proporcionar una guía para la selección de métodos de evaluación adecuados para la gestión de los residuos sólidos. Para este propósito, los métodos de evaluación utilizados con frecuencia se revisan, clasifican y resumen. En total, 151 estudios se han considerado en vista de sus objetivos, metodologías, sistemas investigados, y los resultados con respecto a las cuestiones económicas, ambientales y sociales. Un objetivo compartido por todos los estudios es el apoyo de las partes interesadas. La mayoría de los estudios se basan en evaluaciones del ciclo de vida, multicriterios y toma de decisiones, análisis de costo-beneficio y la evaluación comparativa. La mayoría de los estudios se centran en los residuos sólidos urbanos y consideran una serie de cargas ambientales específicas. Los aspectos económicos son considerados por aproximadamente el 50% de los estudios, y sólo un pequeño número evalúa los aspectos sociales. La elección de los elementos del sistema y los límites varía significativamente entre los estudios; por lo tanto, los resultados de evaluación son a veces contradictorios. En base a los resultados de esta revisión, se recomienda las siguientes consideraciones al evaluar los sistemas de gestión de residuos: un enfoque de balance de masas basado en un análisis de consumo-producto rígido de todo el sistema, evaluación orientada de los resultados del balance de masas, que tiene en cuenta los objetivos de gestión de residuos previstos; y una presentación transparente y reproducible de la metodología, los datos y resultados.

## **6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO**

Es innegable que la producción de residuos urbanos sigue en aumento, debido a un consumo incontrolable y cada vez mayor de bienes y servicios, por lo que la opción de gestión más adecuada, actual y con vistas al futuro, desde el punto de vista económico y medioambiental, es la transformación de los residuos en recursos, mediante el reciclado, reutilización y valorización de las diferentes fracciones que lo componen. Por ello, el esfuerzo de las administraciones públicas, entidades locales y ciudadanos debe dirigirse a la práctica del reciclaje y la recogida selectiva de las diferentes fracciones. Se ha demostrado que la recogida selectiva de la fracción orgánica ha supuesto una mejora importante en la calidad del compost, lo que se traduce en conseguir un producto más eficiente con un menor contenido de inertes y metales pesados. Por otra parte, las exigencias legislativas son cada vez mayores garantizando el valor agronómico del compost.

Por otra parte, respecto a la cantidad de residuos municipales generados, el volumen total de residuos aumenta a lo largo del tiempo. Se podría pensar que el aumento en la generación absoluta podría ser debido al aumento progresivo de la población en el territorio, pero si observamos el Perfil Ambiental de España 2013 vemos que la generación de residuos municipales disminuye a partir del 2002, teniendo un ratio de generación de residuos inferior a la media europea a partir del 2011. Por lo que parece claro que el aumento que experimenta la generación absoluta de residuos municipales no es únicamente debido a factores demográficos, sino que habría que considerar otros aspectos como el social-económico para poder dar una explicación a dicha evolución.

Además, en España, el tratamiento que se aplica a los residuos urbanos, o a las fracciones de dichos residuos, depende de las decisiones tomadas por cada comunidad autónoma, decisiones que en muchos casos se limitan a la aplicación de tratamientos básicos sin tener en cuenta la reutilización y valorización de las diferentes fracciones que componen los residuos. En la actualidad, el deseo de conservar nuestros recursos debería centrar la gestión de los residuos en la prevención de su generación, la minimización y el

reciclaje de éstos. Al diseñar un modelo de gestión de residuos urbanos se debería tener presente que los aspectos ambientales son sólo uno de los aspectos a tener en cuenta, y que no hay que olvidar que aspectos como la viabilidad económica y técnica, el beneficio social y la opinión pública, y el comportamiento de la industria, son también aspectos decisivos a la hora de escoger o diseñar dicho modelo de gestión.

Como perspectiva de futuro, a finales de 2013 se publicó el VII Programa de Acción en materia de Medio Ambiente de la UE para el periodo 2014-2020. Uno de sus objetivos es “convertir la Unión Europea en un economía hipocarbónica, eficiente en el uso de los recursos, ecológica y competitiva”. Para ello, debe garantizarse que los residuos se gestionen de forma segura como recurso. Además, para prevenir a la salud y al medio ambiente, el volumen de generación de residuos (en términos absolutos y per cápita) debe descender, la opción de vertido debe limitarse a residuos no valorizados y la incineración con recuperación de energía debe ser una alternativa de gestión sólo para los residuos que no pueden ser valorizables materialmente. Por otra parte, en España, en noviembre de 2013 se aprobó el “Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020”. Se trata de una herramienta novedosa que, en el marco de la legislación actual, permitirá un acercamiento hacia el cumplimiento de los objetivos establecidos en el VII Programa de Acción en materia de Medio Ambiente. Se articula en torno a cuatro líneas estratégicas sobre prevención de residuos: la disminución de la cantidad generada de residuos, la reutilización y el alargamiento de su vida útil, la reducción del contenido de sustancias nocivas en materiales y productos, así como la reducción de sus impactos sobre la salud humana y el medio ambiente. Uno de sus objetivos persigue reducir la cantidad de residuos generados en 2020 en un 10%, respecto del peso de los residuos generados en 2010. Su desarrollo requiere de la participación de un amplio ámbito de trabajo, en el cual están implicados como agentes principales: los fabricantes, los sectores de la distribución y de los servicios, los consumidores y usuarios finales y las administraciones públicas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Allesch, A., Brunner, P.H. (2014). Assessment methods for solid wastemanagement: A literature review. Review article, 90:1-15.
- Alloway, B.J., Jackson, P. (1991). The behaviour of heavy metals in sewage sludge amended soils. *The Science of the Total Environment*, 100, 151-176. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam.
- Álvarez del Castillo, M.D. (2014). Análisis de la gestión de los residuos municipales generados en un entorno metropolitano utilizando un enfoque multicriterio. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Antolín M.C., Pascual I., García C., Polo A., Sánchez-Díaz M. (2005). Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 94, 224-237.
- Antolín M.C., Pascual I., García C., Polo A., Sánchez-Díaz M. (2005). Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 94, 224-237.
- Aparicio I., Santos J.L., Alonso E. (2007). Simultaneous sonication-assisted extraction, and determination by gas chromatography-mass spectrometry, of di-(2-hylhexyl)phthalate, nonylphenol, nonylphenol ethoxylates and polychlorinated biphenyls in sludge from wastewater treatment plants. *Analytica Chimica Acta* 584, 455-461.
- B.O.E. (1990). Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. B.O.E. núm. 262. pp 32339-32340.
- B.O.E. (1998). Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. BOE número 96 de 22 de abril de 1998.
- B.O.E. (2005). Real Decreto 824/2005, de 8 de julio sobre fertilizantes y afines. B.O.E. núm. 171, pp. 25592-25669.
- Baky, A., Eriksson, O., (2003). System analysis of organic waste management in Denmark. Environmental Project 822.

- Barrenas Gómez, R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Bartoli, F., Philipp, R., Burtin, G. (1992). Poorly ordered hydrous Fe oxides, colloidal dispersion and soil aggregation II. Modification of soil aggregation with Fe (III) polycations and model humic macromolecules. *J. Soil Sci.* 43: 59-75
- 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 Agricultural Engineering Research* 78, 423–430.
- Borrador Europeo sobre Tratamiento Biológico de Bioresiduos, 2nd (2001). Disponible en: [http://europa.eu.int/comm/environment/waste/facts\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/waste/facts_en.htm).
- Bryan, H.H., Lance, C.J. (1991). Compost trials on vegetables and tropical crops. *Biocycle* 27: 36-37.
- Castells, F., Elías, X. (2012). Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora. Libro Electrónico
- Chaney, R.L. (1980). Health risks associated with toxic metals in municipal sludge, p. 59-83. In: G. Bitton, B. Damron, G. Edds and J. Davidson (eds). *Sludge-Health risk of land application*. Ann Arbor Sci. Publ. Ann Arbor, Mich.
- Chang, A.C.; Page, A.L.; Warneke, J.E.; Resketo, M.R., Jones, T.E. (1983). Accumulation of cadmium and zinc in barley grown on sludge-treated soils: A long-term Field study. *J. Environ. Qual.* 12 (3): 391-397.
- Cieslik, B.M., Piotr Knieczka, J.N. (2014). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production* 90:1-15.
- Clapp, C.E.; Stark, S.A.; Clay, D.E., Larson, W.E. (1986). Sewage sludge organic matter and soil properties. In "the role of organic matter in modern agriculture". Edit. Y. Chen and Y. Avnimelech. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht. The Netherlands.
- Clemens, J., Cuhls, C. (2003): Greenhouse gas emissions from mechanical and biological waste treatment of municipal waste. *Environmental Technology*, 24, 745-754
- Costa, F.; García, C.; Hernández, T., Polo, A. (1991). *Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización*. Ed.: CSIC-CEBAS. Murcia.



- Cuevas González, G. Walter, J. (1995). Efecto de un compost de lodo residual sobre la producción y calidad de Bulbosas para flor cortada. Actas del III Congreso Internacional de Química de la ANQUE. "Residuos sólidos y líquidos: su mejor destino (II)". Volumen I. Puerto de la Cruz. Tenerife. ISBN. 84-88233-17-5. Pag 33-42.
- De Nobili, M., Maggioni, A. (1993). Regolazione delle proprietà chimiche del suolo da parte della sostanza organica. In: Ciclo della Sostanza Organica nel Suolo: Aspetti Agronomici Chimici, Ecologici e Selvicolturali, ed. Nannipieri P. Patrón Editore, Bologna, Italy.
- Diez Ros, R. (2006). Generación de residuos urbanos en la provincia de Alicante: La incidencia de la educación ambiental. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- DOCE (2006). Régimen jurídico comunitario de residuos (2006/12/CE) sustituido por la promulgación de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del consejo, de 10 de noviembre de 2008.
- DOUE-L (2000). Directiva 2000/76/CE del parlamento europeo y del Consejo del 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos.
- DOUE-L (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- EC (2000). Working document on sludge. 3rd draft D.G. Env, A.3/LM. Brussels.
- Elorriota, MA; Suarez-Estrella, F; Lopez, MJ; Vargas-Garcia, MC; Moreno, J. (2003). Survival of phytopathogenic bacteria during waste composting. *Agr. Ecosys. Environ.*, 96:141-146.
- Favonio, E; Hogg, D. (2008) The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste Manage. & Research*, 26:61-69.
- Fernández J.M., Plaza C., García-Gil J.C., Polo A. (2009a). Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge. *Applied Soil Ecology* 42, 18-24.
- Figliolia, A.; Benedetti, A.; Indiatì, R; Izza, C.; Nigro, C., Tombesi, L. (1990). Effect of humic acids on yield and certain aspects of crop metabolism. 14th Int Symp of Soil Sci. Biondi, F.A.; Figliolia, A.; Indiatì, R y Izza, C. 1994. Effects of fertilisation with humic acids on

- soil and plant metabolism: a multidisciplinary approach. Note III: Phosphorus dynamics and behaviour of some plant enzymatic activities. In: Humic Substances in the Global Environment and Implications of Human Health. Eds Senesi N & Miano, T.M. Elsevier. New York. USA.
- Fitzpatrick, G., Carter, N.S. (1983). Assessment of sewage sludge compost mixtures as container growing media. Proc. Fla. State Hort. Soc. 96: 257-259.
- Fitzpatrick, G., Farrel, W.R. (1984). Florida country puts end use first. Biocycle 24: 42-44.
- Flor Granda, M.V. (2006). Estudio experimental de las escorias de incineración de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- García Orenes, F. (1996). Utilización de lodos de depuradora como enmendantes de suelos degradados. Valoración de los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- García-Gil, J.C., Plaza, C., Soler-Rovira, P., Polo, A. (2000). Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 32: 1907-1913.
- García-Gil, J.C.; Plaza, C.; Soler-Rovira, P., Polo, A. (2000). Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 32: 1907-1913.
- Garrido, M., Baserba, M., Molinos-Senante, J.M., Abelleira-Pereira, L.A., Fdez-Güelfo, M., Poch, F., Hernández-Sancho, F. (2014). Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. Journal of Cleaner Production, 1-10.
- Gómez-Rico Núñez de Arenas, M.F. (2008). Estudio de contaminantes orgánicos en el aprovechamiento de lodos de depuradora de aguas residuales urbanas. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- Harding, S.A., Clapp, C.E., Larson, W.E. (1985). Nitrogen availability and uptake from field soils five years after addition of sewage sludge. J. Environ. Qual. 14 (1): 95-100.
- Harrison, H.C., Stand, J.E. (1986). Effects of sludge, bed and genotype on cucumber growth and elemental concentrations in fruit and peel. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111: 209-211.

- Haug R.T., 1993. The practical handbook of compost engineering. Lewis publishers, Boca Raton, Florida.
- Haug, R.T. (1993). The Practical Handbook of Composting Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida USA, p. 717.
- Hernández, T., Moral, R., Pérez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Pérez-Murcia, M.D., García, C. (2002). Nitrogen mineralisation potential in calcareous soils amended with sewage sludge. *Biores. Technol.*, 83: 213-219.
- Herva, M., Roca, E. (2012). Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*, 25: 77-84.
- Hinesly, T.D.; Alexander, D.E.; Redborg, H.E., Ziegler, E.L. (1982). Effect of soil cation exchange capacity on the uptake of cadmium by corn. *Agron. J.* 74: 469-474.
- Huerta O., 2010. Dinàmica dels metalls pesants i dels nutrients minerals en el compostatge de residus sòlids municipals . Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia.
- Huerta, O., López, M., Pijoan, J., Càceres, A., Soliva, M. (2006). Valoración agronómica de compost de distintas procedencias. *Infoenviro* 12, 55-58.
- Huerta, O., López, M., Soliva, M., Zaloña, M. (2008). Compostaje de residuos municipales: control del proceso, rendimiento y calidad del producto.
- Iglesias Jiménez, E., Pérez García, V. (1991). Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6: 45-60.
- Iglesias, E., Pérez-García, V. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biological Wastes* 27: 115-142.
- Karagiannidis, A., Perkoulidis, G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Biores. Technol.* 100:2355-2360.
- Kelessidis, A., Stasinakis, A.S. (2011). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, 32:1186-1195.
- Lee, C.C., Huffman, G.L. (1989). Incineration of solid waste. *Environ. Progress*, 8:143-151

- López M., Soliva M., Martínez-Farré F.X., Fernández M., Huerta-Pujol O. (2010). Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 222-228.
- López, M., Canet, R., Huerta, O., Gea, M.T., Pérez-Murcia, M.D., Martínez-Farré, X. (2014). Valorización de la fracción orgánica de residuos municipales: materia prima, proceso y producto. En: *De Residuo a Recurso, El Camino hacia la Sostenibilidad*. Ed. Moreno, J., Moral, R., García-Morales, J.L., Pascual, J.A., Bernal, M.P. Ed.Mundi-Prensa.
- Mandal A., Patra A.K., Singh D., Swarup A., Masto R.E. (2007). Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages. *Bioresource Technology* 98, 3585-3592.
- Mohedo Gatón, J.J. (2002). Estudio de la estabilidad durante el compostaje de residuos municipales. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.
- Montes Carmona, M.E. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo, Medio Ambiente E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos
- Mortvedt, J.J. (1987). Cadmium levels in soil and plants from some long-term soil fertility experiments in the United states of America. *J. Environ. Qual.* 16 (2): 137-148.
- Mosquera-Losada, M.R., Muñoz-Ferreiro, N., Rigueiro-Rodríguez, A. (2010). Agronomic characterization of different types of sewage sludge: Policy implications. *Waste Management* 30, 492-503. (II PNIR del 2008-2015) .
- Murcia Navarro, F.J. (2013). Lodos de depuradora: una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola. Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.
- Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

- Pagans, E., Font, X., Sanchez, A (2006). Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. *J. Hazardous Mater.* 131:179-186
- Pascual, I., Antolín, M.C., García, C., Polo, A., Sánchez-Díaz, M. 2007. Effect of water deficit on microbial characteristics in soil amended with sewage sludge or organic fertilizer under laboratory conditions. *Bioresource Technology* 98, 29-37.
- Pedra, F., Polo, A., Carranca, C., Ribeiro, A. B., Domingues, H. (2011). Kinetic models fitted to nitrogen mineralization potential in soils amended with municipal compost and urban sewage sludge. *Dynamic Soil, Dynamic Plant 5 (Special Issue 2):* 144-146, Short Communication, Global Science Books, ISSN: 1749-6500.
- Pérez-Murcia M.D., Moreno-Caselles J. (2008). Residuos urbanos. En: Moreno, J., Moral, R. (editores). *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. pp. 467-488.
- Piccolo, A., Mbagwu, J.S.C. (1990). Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. *Plant Soil* 123: 27-37.
- Plaza, C., Senesi, N., Polo, A., Brunetti, G., García-Gil, J.C., Dórazio, V. (2003). Soil fulvic acid properties as a means to assess the use of pig slurry amendment. *Soil and Tillage Research* 74, 179-190.
- Rehab, F.I., Wallace, A. (1978). Excess trace-metal effects on cotton: Copper, zinc, cobalt, and managanese in solution culture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 9:507-518.
- Ricote, M.; Martínez, J.L.; García, F.; Morenilla, J.J., Bernacer, I. (1998). Aplicación de biosólido como fertilizante orgánico. *Ingeniería Química*. 181-185.
- Rigamonti, L., Sterpi, I., Grosso, M. (2015). Integrated municipal waste management systems: An indicator to assess their environmental and economic sustainability. *Ecological Indicators*, 60:1-7.
- Rodríguez Morales, J.A. (2010). "Estudio comparativo de diferentes tecnologías de higienización de lodos de depuradora con fines para su reutilización". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

- Sánchez-Brunete C., Miguel E., Tadeo J.L. (2008). Determination of organochlorine pesticides in sewage sludge by matrix solid-phase dispersion and gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta* 74, 1211-1217.
- Sánchez-Monedero, M.A., Bernal, M.P., Antón, A., Noguera, P., Abad, A., Roig, A., Cegarra, J. (1997). Utilización del compost como sustratos para semilleros de plantas hortícolas en cepellón. I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación. Murcia.
- Saviozzi, A., Biasci, A., Riffaldi, R., Levi-Minzi, R. (1999). Long-term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics. *Biology and Fertility of Soils* 30, 100-106.
- Shuman, L.M. (1986). Effect of liming on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc among soil fractions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50:1236-1240.
- Sims, J.T. 1986. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper and zinc. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50: 367-373.
- Singh, R.P., Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge.
- Singh, R.P., Agrawal, M. (2010). Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 73, 632-641.
- Smet, E., Van Langenhevo, G., De Bo, I. (1999). The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. *Atmos. Environ.* 33:1295-1303.
- Soler, P. (1998). Evaluación del impacto ambiental y riesgo de contaminación producidos por la aplicación agrícola de lodos de depuradora. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- Soliva, M., López, M., Huerta, O. (2008). Antecedentes y fundamentos del proceso de compostaje. En: Moreno J, Moral R (Eds.). *Compostaje*, pp. 75-92. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Sterrett, S.B., Chaney, R.L., Reynolds, C.W., Schales, F.D., Douglas, L.W. (1983). Transplant quality, yield and heavy metal accumulation of tomato, muskmelon and cabbage

- grown in media containing sewage sludge compost. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108: 36-41.
- Sterrett, S.B., Chaney, R.L., Reynolds, C.W., Schales, F.D., Douglas, L.W. (1983). Transplant quality and metal concentration in vegetable transplants grown in media containing sewage sludge compost. *Hort. Science* 17: 920-922.
- Stoate, C., Boatman, N.D., Borralho, R.J., Rio Carvalho, C., de Snoo, G.R., Eden, P. (2001). Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management* 63:37-365.
- Tarrasón, D., Ojeda, G., Ortiz, O., Alcañiz, J.M. (2008). Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge. *Bioresource Technology* 99, 252-259.
- Tejada, M., González, J.L. (2003). Effects of the application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dryland conditions. *European Journal of Agronomy* 19, 357-368.
- Terés, V., Sainz de la Maza, E., Lezaun, M., Beunza, A., Artetxe, A., Zabala, A. (1997). Caracterización física de distintos sustratos en base a compost de lodo de depuradora. *Actas de horticultura* 19: 338-348.
- Tsadillas, C.D., Matiz, T., Barbayiannis, N., Dimoyiannis, D. (1995). Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, 26 (15-16): 2603-2619.
- Van-Camp, Lieve; Benilde Bujarrabal; Anna Rita Gentile; Robert J. A. Jones; Luca Montanarella, Claudia Olazabal; Senthil-Kumar Selvaradjou (eds.), 2004. Reports of the technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Volume I Introduction and Executive Summary.. EUR 21319 EN/1
- Wang, P., Chang C., Watson, M.E., Dick, W.A., Chen, Y., Hoitink, H.A.J. (2004). Maturity indices for composted dairy and pig manures. *Soil Biology and Biochemistry* 36: 767-776.
- Wu, L., Ma, L.Q., Martinez, G.A. (2000). Method comparison for evaluating biosolids compost. *Journal of Environmental Quality* 29: 424-429.

Yuran, G.T., Harrison H.C. (1986). Effects of genotype and sludge on cadmium concentration in lettuce leaf tissue. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111: 491-494.

### **PÁGINAS WEB CONSULTADAS**

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Caracterización de los lodos de depuradora generados en España: <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/lodos.aspx>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Perfil ambiental de España 2013: [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/perfil\\_ambiental\\_2013.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/perfil_ambiental_2013.aspx)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Manual de compostaje: [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/manual\\_de\\_compostaje\\_2011\\_paginas\\_1-24\\_tcm7-181450.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/manual_de_compostaje_2011_paginas_1-24_tcm7-181450.pdf)

R. Canet Castelló. Uso de materia orgánica en agricultura. Instituto valenciano de investigaciones agrarias: [http://www.ivia.es/rcanet/descargas/MO\\_en\\_Agricultura.pdf](http://www.ivia.es/rcanet/descargas/MO_en_Agricultura.pdf)