

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

Compostaje de Lodos de EDAR en Presencia de  
Zeolitas Sintetizadas a partir de Cenizas Volantes

Autor: Santiago López Camacho

Tutores: Constantino Fernández Pereira

Emilia Otal Salaverri

Dep. Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

# **Compostaje de Lodos de EDAR en Presencia de Zeolitas Sintetizadas a partir de Cenizas Volantes**

Autor:  
Santiago López Camacho

Tutores:  
Constantino Fernández Pereira  
Catedrático  
Emilia Otal Salaverri  
Profesora titular

Dep. Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado: Compostaje de Lodos de EDAR en Presencia de Zeolitas Sintetizadas a partir de Cenizas Volantes

Autor: Santiago Lopez Camacho

Tutores: Constantino Fernández Pereira  
Emilia Ota Salaverri

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis profesores*







# Resumen

---

En este proyecto se estudia principalmente la influencia de la adición de zeolitas sintetizadas a partir de Cenizas volantes de la combustión de carbón (CV-Z), en un proceso de compostaje de lodos de EDAR con poda de ciprés como material estructurante, llevado a cabo en reactores cerrados y aislados. Además, se analiza también como influye la adición de cáscara de naranja en distintas proporciones.

Los lodos de depuradora, generalmente, suelen contener altos niveles de metales pesados, con sus consiguientes problemas medioambientales, y la CV-Z presenta las características necesarias para retener estos metales, por lo que será el principal punto de estudio.

El hecho de añadir cáscara de naranja, está basado en probar su influencia sobre en pH de la masa compostada, debido al carácter ácido de esta.

A parte de ello, se determina la evolución del resto de parámetros de interés en un proceso de compostaje, como pueden ser: Aireación, Temperatura, Humedad, Conductividad Eléctrica, Materia Orgánica Total y relación C/N.



# Abstract

---

This project mainly studies the influence of the addition of zeolite synthesized from fly ash from coal combustion (CV-Z) in composting of sewage sludge with pruning cypress as a structural material held in sealed and insulated reactors. In addition, it was analyzed, how orange peel addition in different proportions, influences the process.

Sewage sludge, generally, contains high levels of heavy metals, with its attendant environmental problems, and the CV-Z has the necessary characteristic to retain these metals, so it will be the main point of the study.

The addition of orange peel is based on the influence on pH on composted mass, due to the acidic nature of this component.

Besides, the evolution of other parameters of interest in a composting process was determined by the analysis of different parameters such as: Aeration, temperature, humidity, electrical conductivity, total organic matter and C / N ratio.



# ÍNDICE

---

<b>Resumen .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Tablas.....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 El proceso de compostaje.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Materias primas.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Zeolitas .....	9
1.2.2 Lodos de depuradora .....	11
<b>1.3 Control de parámetros.....</b>	<b>12</b>
1.3.1 Aireación .....	12
1.3.2 Humedad.....	13
1.3.3 Temperatura.....	13
1.3.4 pH .....	13
1.3.5 Conductividad Eléctrica (CE) .....	14
1.3.6 Materia orgánica .....	14
1.3.7 Relación C/N.....	14
1.3.8 Metales pesados .....	15
<b>1.4 Instalaciones de compostaje .....</b>	<b>15</b>
1.4.1 Pilas volteadas.....	16
1.4.2 Pilas estáticas aireadas.....	17
1.4.3 Tambores rotatorios.....	19
1.4.4 Túneles dinámicos.....	19
1.4.5 Reactores circulares de lecho agitado.....	21
1.4.6 Contenedores.....	22
1.4.7 Silos .....	22
1.4.8 Células o Biocells .....	23
1.4.9 Semiabiertos.....	23

1.5	Aplicaciones del compost .....	24
1.6	Criterios de calidad .....	24
2	Objetivos y Alcance .....	29
3	Materiales y Métodos .....	31
3.1	Proceso de compostaje .....	31
3.1.1	Materias primas.....	31
3.1.2	Reactores.....	34
3.1.3	Matriz de ensayos .....	36
3.1.4	Acondicionamiento de materias primas .....	36
3.1.5	Puesta en marcha de la instalación de compostaje.....	37
3.2	Análisis y control de parámetros .....	39
3.2.1	Reactivos .....	39
3.2.2	Instrumentación, material y equipos.....	40
3.2.3	Métodos analíticos.....	53
4	Resultados y discusión .....	59
4.1.	Caracterización de las materias primas .....	59
4.2.	Control de la evolución del proceso de compostaje.....	60
4.2.1	Temperatura, humedad y aireación.....	61
4.2.2.	pH y Conductividad Eléctrica (CE) .....	64
4.2.3.	Materia Orgánica Total (MOT) .....	67
4.2.4.	Carbono total y nitrógeno total .....	68
4.2.5.	Metales pesados .....	69
4.2.6.	Aspecto físico .....	71
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	73
6.	Bibliografía .....	75

# Índice de Tablas

---

Tabla 1.1: Microorganismos en el proceso de compostaje.....	4
Tabla 1.2: Valores límites de metales pesados en lodos .....	12
Tabla 1.3: Tipos de sistemas de compostaje.....	15
Tabla 1.4: Cuadro comparativo entre los sistemas de compostaje .....	16
Tabla 1.5 : Valores de los parámetros principales de un compost según RD 506/2013	25
Tabla 1.6: Valores de los parámetros principales de un compost según FdR .....	26
Tabla 1.7: Valores límites en metales pesados .....	27
Tabla 3.1: Parámetros agrónómicos principales de los lodos generados en España .....	32
Tabla 3.2: Condiciones durante la reacción.....	33
Tabla 3.3: Condiciones durante la filtración .....	33
Tabla 3.4: Condiciones de lavado.....	33
Tabla 3.5: Características del aislante térmico .....	35
Tabla 3.6: Matriz de ensayo .....	36
Tabla 3.7: Características de la balanza de precisión .....	37
Tabla 3.8: Características de la estufa de secado.....	41
Tabla 3.9: Características del conductivímetro .....	42
Tabla 3.10: Características del pH-metro .....	43
Tabla 3.11: Características de la balanza analítica .....	44
Tabla 3.12: Característica de la placa calefactora .....	44
Tabla 3.13: Características de la bomba de vacío .....	45
Tabla 3.14: Características del recirculador de refrigeración.....	46
Tabla 3.15: Características del ICP-OES AGILENT 5100 .....	50
Tabla 3.16: Características de la mufla NABERTHERM L9/12/S27 .....	51
Tabla 4.1: Caracterización de los distintos componentes del compost .....	59
Tabla 4.2: Metales pesados en las materias primas .....	60
Tabla 4.3: Tomas de muestras y aireación .....	60
Tabla 4.4: MOT en los reactores .....	67
Tabla 4.5: Relación C/N inicial en los reactores .....	68
Tabla 4.6: Concentración de metales pesados en los reactores .....	70





# Índice de Figuras

---

Figura 1.1: Proceso de compostaje .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.2: Proceso de respiración en la oxidación de la materia orgánica .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.3: Reacción de hidrólisis de la ATP .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.4: Evolución de la temperatura y el pH durante el compostaje.....	5
Figura 1.5: Diferentes estructuras de zeolitas.....	9
Figura 1.6: Estructura iónica de la zeolita .....	10
Figura 1.5: Volteadora.....	17
Figura 1.6: Sistema de compostaje aireado forzosamente .....	18
Figura 1.7: Sistema cubierto móvil GORE.....	18
Figura 1.8: Tambor rotatorio .....	19
Figura 1.9: Funcionamiento del túnel dinámico.....	20
Figura 1.10: Instalación con túnel dinámico .....	20
Figura 1.11: Reactor circular de lecho agitado.....	21
Figura 1.12: Instalación de túneles estáticos .....	22
Figura 1.13: Volteadora en sistema de canales.....	23
Figura 1.14: Compostaje en canales .....	24
Figura 3.1: Vista interior de un reactor.....	34
Figura 3.2: Vista exterior de un reactor .....	34
Figura 3.3: Aislante térmico .....	35
Figura 3.4: Reactor con aislamiento .....	38
Figura 3.5: Instalación de compostaje .....	38
Figura 3.6: Tamiz .....	41
Figura 3.7: Bomba de vacío.....	45
Figura 3.8: Vista frontal del Recirculador.....	47
Figura 3.9: Vista lateral del recirculador .....	47
Figura 3.10: Analizador LECO CHN-60F0 .....	47
Figura 3.11: Tubo en U de combustión .....	48
Figura 3.12: Diagrama parcial del analizador .....	48
Figura 3.13: Antorcha de plasma.....	49

Figura 3.14: Sistema óptico .....	49
Figura 3.15: Foto-multiplicador .....	49
Figura 3.16: Tecnología dual view vertical síncrona .....	50
Figura 3.17: ICP-OES .....	51
Figura 3.18: Mufla.....	52
Figura 3.19: Muestras antes de la calcinación.....	57
Figura 3.20: Muestras después de la calcinación .....	54
Figura 3.21: Calentamiento a reflujo de las muestras .....	56
Figura 3.22: Sistema de filtración a vacío .....	56
Figura 3.23: Muestras digeridas y filtradas .....	57
Figura 4.1: (a)Perfil de temperatura de los reactores C1 a C4; (b) Variación de la humedad de los reactores C1 a C4; (c)Perfil de temperatura de los reactores C5 a C8; (d) Variación de la humedad de los reactores C5 a C8; (e)Perfil de temperatura de los reactores.....	63
Figura 4.2: Perfiles de temperatura en el estudio de Eljaiek, y col., 2013. ....	64
Figura 4.3: pH en los reactores C1 a C4.....	65
Figura 4.4: pH en los reactores C5 a C8.....	65
Figura 4.5: pH en los reactores C9 a C12.....	65
Figura 4.6: CE en los reactores C1 a C4 .....	66
Figura 4.7: CE en los reactores C5 a C8 .....	66
Figura 4.8: CE en los reactores C9 a C12 .....	67
Figura 4.9: Aspecto del reactor C1 al principio y al final del proceso .....	71
Figura 4.10: Aspecto del reactor C8 al principio y al final del proceso .....	71
Figura 4.11: Aspecto del reactor C11 al principio y al final del proceso .....	72





# 1 INTRODUCCIÓN

---

*<<Mucha gente pequeña, en muchos lugares  
pequeños, cultivarán pequeños huertos que  
alimentarán el mundo>>*

*- Proverbio africano -*

La necesidad del hombre por aprovechar los nutrientes que contienen residuos orgánicos es muy antigua, y a pesar de su escasa cantidad y de que los sistemas de recogida eran simples, se conocía bien como almacenarlos y tratarlos para conservar los nutrientes. Sin embargo no fue hasta principios del siglo IX, cuando Sir Albert Howard, botánico inglés considerado como pionero del compostaje moderno, describió el primer proceso de procesamiento de la materia orgánica denominado “Proceso Indore” por el que producía humus (compost) a partir de restos vegetales y animales.

El compost es un producto estable y sanitariamente seguro, obtenido de la descomposición de las sustancias orgánicas provenientes de residuos sólidos urbanos (RSU) y de residuos biodegradables de industrias agroalimentarias, sin metales pesados, piezas de vidrio, plástico y materiales celulósicos con un valor de pH próximo a 8 y sujeto a fermentaciones parciales. Las características del compost dependen fundamentalmente de las materias primas empleadas y de los factores que afectan al proceso de compostaje (1).

En cuanto a la tecnología, se han desarrollado procesos de compostaje tanto en condiciones aerobias como anaerobias, ambas tecnologías se basan en el fenómeno natural de descomposición de la materia orgánica (en ausencia de oxígeno en condiciones anaeróbicas, mientras que en presencia de oxígeno en condiciones aeróbicas).

En el *RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*, el compostaje está definido como: “proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a los tipos de abonos o enmiendas orgánicas, cuyas características se detallan en los grupos 2 y 6 del anexo I”. En la que el grupo 2 se refiere a los abonos orgánicos, y el grupo 6 a las enmienda orgánicas (2).

Actualmente, el interés por el compostaje está creciendo debido a varios factores como pueden ser el aumento en la generación de residuos y la problemática medioambiental y de salud que generan. Como consecuencia de dichos problemas, se están desarrollando una gran variedad de políticas globales y nacionales para corregirlos a escala mundial. De esta forma, nos

encontramos con una legislación cada vez más restrictiva que regula la reducción de materia orgánica que llega a los vertederos, la correcta gestión de los residuos y la protección del suelo. En relación con este último factor se ha de comentar que en la actualidad, la obtención de un compost de calidad para mantener la fertilidad de los suelos y evitar problemas de erosión y desertización, no toma la misma importancia, como los anteriores en nuestro país. Por ello, el compost obtenido en muchas de las plantas de tratamiento biológico no cumple los estándares de calidad llegándose a cuestionar los beneficios ambientales y económicos del compostaje. Esto puede deberse en parte al desconocimiento de los numerosos usos y ventajas que se le puede atribuir a un producto bien fabricado (3).

La calidad de un compost se puede relacionar con diferentes factores como la estabilidad, la madurez, el pH o la conductividad eléctrica entre otros. Por ejemplo, una salinidad elevada puede suponer dificultades para que un compost sea utilizado como enmienda en un suelo agrícola, y esta salinidad está demostrado que aumenta con la degradación de la materia orgánica (4). Además de la salinidad, la presencia de metales pesados en distintos componentes de un compost, puede suponer también un peligro.

En este estudio, se mostrará la influencia de la adición de zeolitas sintetizadas (CV-Z), sintetizada a partir de cenizas volantes y de residuos de cítricos en las propiedades del compostaje de fangos de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) Tablada de Sevilla.

## **1.1 El proceso de compostaje**

El proceso de compostaje consiste en la oxidación y biodegradación de la materia orgánica, con la consecuente reducción de otros compuestos (orgánicos o inorgánicos), llevada a cabo por varios microorganismos, para dar como resultado una materia orgánica estabilizada (compost) y los subproductos típicos de una degradación orgánica como pueden ser el  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$  o  $SO_4$  (Figura 1.1) (5). Se trata de un proceso de respiración fundamentalmente aerobio, en el que el aceptor final de electrones es el  $O_2$ . En la oxidación de la materia orgánica, los electrones son transferidos al compuesto Nicotinamida dinucleótido oxidado (NAD), transformándose en el compuesto reducido (NADH). A continuación el NADH se oxida, mientras que el oxígeno se reduce (Figura 1.2). En este proceso los organismos obtienen energía en forma de un compuesto denominado Adenosíntrifosfato (ATP).



Figura 1.1: Proceso de compostaje

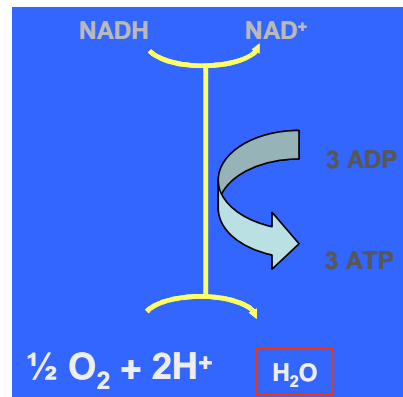
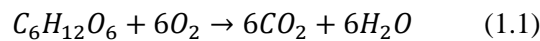


Figura 1.2: Proceso de respiración en la oxidación de la materia orgánica

En la ecuación 1.1 se presenta la reacción global de la oxidación aerobia de la glucosa, mientras que en la eq. 1.2 se presenta su balance energético:



$$\Delta G = 2870 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (1.2)$$

La reacción de hidrólisis del ATP produce mucha energía, de manera que se puede acoplar dicha reacción a reacciones que no sean termodinámicamente espontáneas (Figura 1.3).

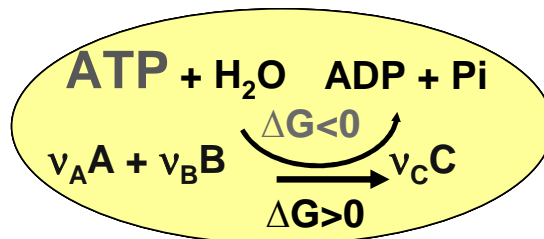


Figura 1.3: Reacción de hidrólisis de ATP

Entre los microorganismos más comunes en este proceso (Tabla 1.1) podemos encontrar:

- Hongos: Los hongos participan en la degradación aeróbica de la materia orgánica debido a su alta capacidad lignocelulolítica.
- Actinomicetos: Tienen la capacidad enzimática para degradar compuestos orgánicos complejos (celulosa, lignina, etc.). Asimismo, muchas de las especies son tolerantes a las temperaturas que alcanza el compost.
- Bacterias: Son las más numerosas en el proceso de compostaje y constituyen entre el 80% y el 90% de los microorganismos existentes en el compost. Se trata de un grupo de gran diversidad metabólica, que utilizan un amplio rango de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de compuestos orgánicos (6).



Tabla 1.1: Microorganismos en el proceso de compostaje

		FAMILIAS	GÉNEROS
BACTERIAS	Pseudomonadales		<i>Pseudomonas</i> , <i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i> , <i>Thiobacillus</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Acetobacter</i>
	Hipomicrobiales		<i>Hypomicrobium</i> (en lodos)
	Eubacteriales	Azotobacteriáceas	<i>Azotobacter</i> , <i>Beijerinckia</i>
		Rhizobacteriáceas	<i>Rhizobium</i>
		Acromobateriáceas	<i>Acromobácter</i> , <i>Flavobacterium</i>
		Enterobacteriáceas	<i>Escherichia</i> , <i>Proteus</i> , <i>Aerobacter</i> <i>Serratia</i>
		Lactobaciláceas	<i>Streptococcus</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Stafilococcus</i>
		Corinebacteriáceas	<i>Corinebacterium</i> , <i>Arthrobácter</i>
Baciláceas	<i>Bacillus</i> , <i>Clostridium</i>		
ACTINOMICETOS	Micobacteriáceas	<i>Micobacterium</i> ( <i>M. Tuberculosis</i> )	
	Actinomicetáceas	<i>Nocardia</i> , <i>Pseudocardia</i>	
	Streptomycetáceas	<i>Streptomices</i> , <i>Micromonospora</i> , <i>Termonospora</i> , <i>Termopoliispora</i> , <i>Termoactinomices</i>	
HONGOS	SIFOMICETOS	<i>Mixococcus</i>	
	Mixomicetos		
	Mixomicetales		
	Acrasiales		
	EUMICETOS		
	Zigomicetos		
	Mucorales		
	Entomoftorales	<i>Parásitos de insectos y vegetales</i>	
	Ascomicetos (≈ 30.000 especies)		
	Protoascomicetos	<i>Lipomices</i> , <i>Candida</i> , <i>Torula</i> , <i>Rodotorula</i>	
	Euascomicetos	<i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i>	
	Basidiomicetos	<i>Coprinus</i>	

Estos microorganismos actuarán en distintas fases según las condiciones ambientales:

- **Fase mesofílica (de latencia y crecimiento):** Esta fase es el periodo de aclimatación de los microorganismos, que empezarán a multiplicarse y a colonizar. En un proceso de compostaje bien llevado dura entre 12 y 24 horas. Se da la degradación de los elementos más biodegradables, por parte de bacterias (*Bacillus* sp.; *Azotobacter* sp.; *Pseudomonas* sp), produciéndose una bajada eventual de pH por la liberación de ácidos orgánicos. Esta degradación también hace aumentar la temperatura, alcanzándose temperaturas de unos 45°C a partir de la cual comienza la siguiente fase.
- **Fase termofílica:** Según el material a compostar puede durar entre una semana y dos meses.

La intensa actividad de las bacterias, provoca un aumento de la temperatura y la aparición

de nuevos microorganismos como los hongos o los actinomicetos termofílicos. Se alcanzan temperaturas entre 60°C y 70°C, produciéndose una rápida degradación. Además estas relativas altas temperaturas favorecen la higienización del medio.

El pH aumenta en esta fase, debido a la liberación de los ácidos orgánicos y a la generación de amoníaco por la descomposición de las proteínas.

- **Maduración o curado:** En la maduración, disminuye la actividad de las bacterias, predominando la de los actinomicetos. Puede llegar a durar uno 3 meses.

Se da un descenso paulatino de la degradación, y la temperatura. Algunos autores denominan a este periodo de descenso como fase mesófila final, hasta que se alcanza de nuevo la temperatura inicial.

El pH sufre una neutralización debido a la formación de ácidos húmicos, que tienen propiedades tampón (5) (6) (7).

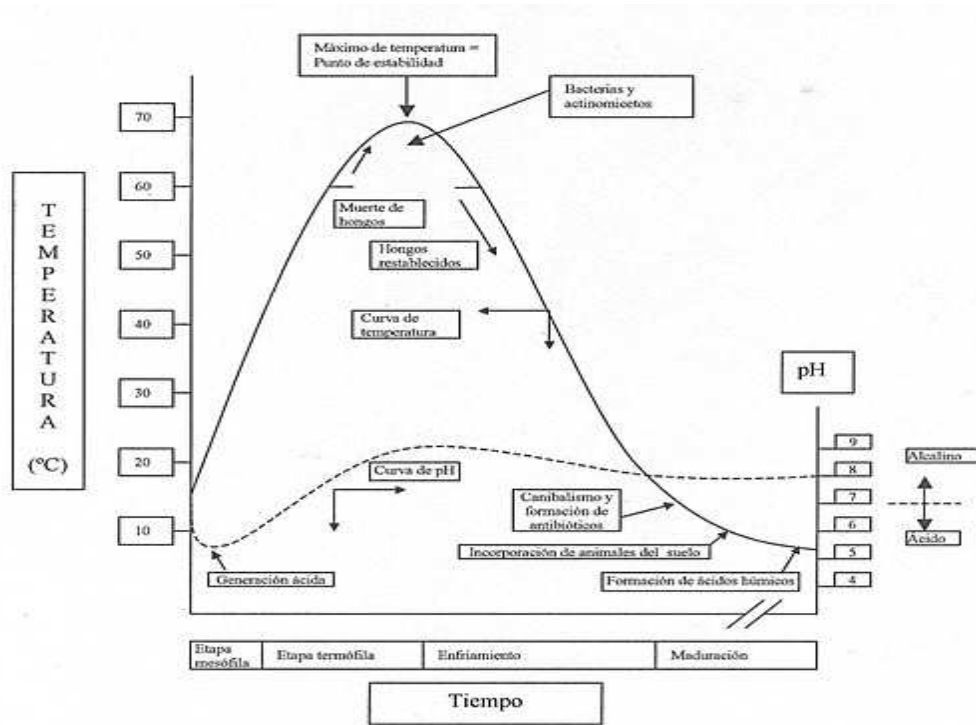


Figura 1.4: Evolución de la temperatura y el pH durante el compostaje

A éstas se le puede añadir una fase de preparación previa en el que se ajustarán aspectos como la granulometría o la humedad entre otros, y otra de acondicionamiento posterior para venta en el mercado, en el que tendremos que realizar análisis de control de calidad, envasado, etiquetado, etc.

## 1.2 Materias primas

Las principales materias primas son:

- Estiércol
- Restos vegetales o su fracción orgánica.
- Cortezas
- Lodos
- Restos municipales o su fracción orgánica.

Sin embargo, haciendo referencia a la lista de materiales biodegradables del anexo IV del el RD 506/2013, las materias primas son muy numerosas:

- Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca:
  - Lodos de lavado y limpieza
  - Residuos de tejidos animales (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009)
  - Residuos de tejidos vegetales
  - Deyecciones de animales, estiércoles y efluentes recogidos selectivamente y tratados fuera del lugar donde se generan
  - Residuos de la silvicultura
- Residuos de la preparación y elaboración de carne, pescado y otros alimentos de origen animal (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009):
  - Lodos de lavado y limpieza
  - Residuos de tejidos de animales
  - Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración
  - Lodos del tratamiento “in situ” de efluentes
- Residuos de la preparación y elaboración de frutas, hortalizas, cereales, aceites comestibles, cacao, café, té y tabaco; producción de conservas; producción de levadura y extracto de levadura, preparación y fermentación de melazas:
  - Lodos de lavado, limpieza, pelado, centrifugado y separación
  - Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración
  - Lodos de tratamiento “in situ” de efluentes
- Residuos de la elaboración de azúcar :
  - Lodos de tratamiento “in situ” de efluentes

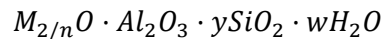
- Residuos de la industria de productos lácteos:
  - Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración
  - Lodos de tratamiento “in situ” de efluentes
- Residuos de la industria de panadería y pastelería :
  - Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración
  - Lodos de tratamiento “in situ” de efluentes
- Residuos de la producción de bebidas alcohólicas y no alcohólicas (excepto café, té y cacao):
  - Residuos de lavado, limpieza y separación mecánica de materias primas
  - Residuos de la destilación de alcoholes
  - Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración
  - Lodos de tratamiento “in situ” de efluentes
- Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles:
  - Residuos de corteza y corcho
  - Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas que no contienen sustancias peligrosas.
- Residuos de la producción y transformación de pasta de papel, papel y cartón:
  - Residuos de corteza y madera
  - Lodos de lejías verdes (procedentes de la recuperación de lejías de cocción)
  - Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado
  - Desechos de fibras y lodos de fibras, de materiales de carga y de estucado, obtenidos por separación mecánica
  - Lodos del tratamiento "in situ" de efluentes, distintos de los especificados en el punto anterior
- Residuos de las industrias del cuero y de la piel:
  - Carnazas y serrajes del encalado
  - Lodos, en particular los procedentes del tratamiento in situ de efluentes, que no contienen cromo
  - Residuos no especificados en otra categoría: residuos del curtido vegetal de piel (virutas) que no contienen cromo

- Residuos de la industria textil:
  - Materia orgánica de productos naturales (por ejemplo grasa, cera)
  - Lodos de tratamiento in situ de efluentes que no contienen sustancias peligrosas
  - Residuos de fibras textiles no procesadas
  
- Residuos del tratamiento aeróbico de residuos sólidos Residuos de la industria textil:
  - Fracción no compostada de residuos municipales y asimilados
  - Fracción no compostada de residuos de procedencia animal (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009) o vegetal
  
- Residuos del tratamiento anaeróbico de residuos:
  - Licores (“digestato”) del tratamiento anaeróbico de residuos municipales
  - Materiales de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos municipales
  - Licores (“digestato”) del tratamiento anaeróbico de residuos animales (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009) y vegetales
  - Materiales de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos animales (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009) y vegetales
  
- Residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales no especificadas en otra categoría:
  - Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas, con contenidos en metales pesados inferiores a los establecidos en el real decreto 1310/1990.
  - Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales, que no contienen sustancias peligrosas
  - Lodos procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales, que no contienen sustancias peligrosas
  
- Residuos municipales (Fracciones recogidas selectivamente):
  - Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes
  - Aceites y grasas comestibles
  - Madera que no contiene sustancias peligrosas
  
- Residuos de parques y jardines:
  - Residuos biodegradables

- Otros residuos municipales:
  - Residuos de mercados de origen vegetal y animal
  - Lodos de fosas sépticas

### 1.2.1 Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos de elementos como Na, K, Mg, Ca, Sr y Ba (8). Se representan mediante la fórmula:



Donde, M es el ión intercambiable, n su estado de oxidación, y es 2 o mayor y w representa el agua contenida en los orificios.

La unidad básica de la estructura de una zeolita son los tetraedros de  $[SiO_4]^{4-}$  y  $[AlO_4]^{5-}$  que se unen compartiendo sus oxígenos. A su vez estos se combinan para dar lugar a piezas básicas de la estructura zeolítica(9) (Figura 1.5):

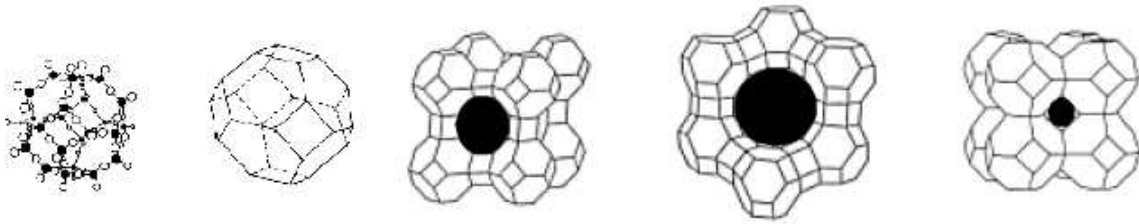


Figura 1.1: Diferentes estructuras de zeolitas

Esta estructura característica le va a conferir algunas de sus propiedades:

- Tamices moleculares: Las zeolitas pueden actuar como tamices moleculares debido a su capacidad para absorber otras moléculas. Éstas pueden retener y perder agua con facilidad dejando espacios libres para albergar otras moléculas en sus micro-poros. Esta característica de adsorción permite que se usen las zeolitas en procesos de depuración de gases: purificación de CO<sub>2</sub> eliminando CO y retención de compuestos azufrados (H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>) o nitrogenados (NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub>) (10).
- Intercambio de cationes: Otra propiedad interesante es la capacidad para intercambiar cationes. Debido a la presencia de iones aluminio trivalentes en lugar del silicio tetravalente, la estructura tetraédrica tiene un exceso de cargas negativas dando lugar a un desequilibrio y este desequilibrio será compensado con la incorporación de cationes como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>, que pueden ser fácilmente intercambiados por otros (8) (11) (12).

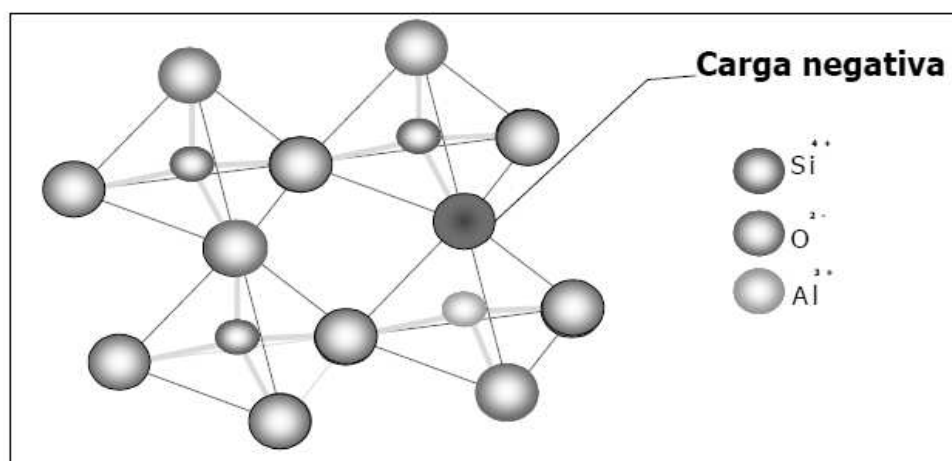


Figura 1.2: Estructura iónica de la zeolita

Esta propiedad le permite tener aplicaciones en la fabricación de tintas intercambiándose en este caso por cationes orgánicos (13). Otra es su aplicación como detergentes para disminuir la dureza de aguas y como tensoactivos.

La aplicación más interesante desde nuestro punto de vista es como soporte de fertilizantes, ya que las zeolitas favorecen la nutrición mineral y la retención de humedad (14) (15) (16) (17).

- Catalizadores: La presencia de sitios ácidos en la estructura y la posibilidad de introducir otros nuevos convierte a las zeolitas en buenos catalizadores (8) (11) (18).

Esto le confiere aplicaciones en la industria petroquímica y farmacéutica, catalizando el craqueo, la alquilación, la isomeración, hidrogenación o la conversión de gasolina en otras (19) (20) (21).

Las zeolitas pueden ser naturales o sintéticas. Las naturales se forman en ambientes geológicos sobre materiales silíceos al reaccionar con soluciones alcalinas. Algunas de estas pueden ser la mordemita, clinoptilolita, chabazita, phillipsita, erionita y analcima. Las sintéticas son obtenidas por la mano del hombre imitando las condiciones naturales de activación alcalina. Son varios los procesos por los que se puede obtener como por ejemplo los procesos hidrogel o los de conversión de arcillas, pero en este caso nos vamos a centrar en el proceso de síntesis a partir de cenizas volantes, ya que es el proceso por el que se ha obtenido la usada en este proceso de compostaje (8) (22) (23).

Fue a principios de los años 80 cuando Höller y Whishing (24) empezaron a investigar en la síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes, debido al parecido de estos residuos con algunos materiales volcánicos. A partir de este momento, se han propuesto numerosos métodos para

sintetizar zeolitas a partir de cenizas volantes, mayormente basándose en la activación hidrotermal alcalina (principalmente mediante soluciones de NaOH o KOH) de la ceniza volante. Sin embargo, las zeolitas sintetizadas hasta ahora por este método tienen una baja capacidad de intercambio iónico y un tamaño de poro pequeño.

Según el tipo de zeolitas que se desee sintetizar, podremos variar parámetros en el proceso de formación como la concentración de los reactivos alcalinos entre 1 y 5 M, la relación líquido/sólido entre 2 y 18 L/kg, la temperatura entre 25 y 200 °C, el tiempo de reacción entre 3 y 48 horas, y la presión. De este modo el contenido en zeolita del producto variara entre el 20 y el 65% según las condiciones dadas y las propiedades de la ceniza volante. Otros componentes que contiene el producto, debido a la conversión incompleta, pueden ser cuarzo, mullita, (aluminatos y silicatos no activados), magnetita, hematita, calcita, cal y elementos como B, Mo, As, V, Ar o Se, estos últimos que pueden afectar su calidad, limitando su us. (25) (26) (27) (28) (29) (30).

Es por este motivo por el que actualmente se está investigando en la síntesis de zeolitas pura, por un procedimiento en dos etapas, a partir de extractos de sílice obtenidos de cenizas volantes por tratamiento alcalino y una posterior combinación con otras soluciones portadoras de aluminato sódico.

Las zeolitas que se obtienen a partir de los procesos mencionados son del tipo NaP1, A, X, philipsita, (hidroxi-) sodalita, (hidroxi-) cancrinita, nefelina, analclina, chabazita, herschelita, tobermorita, linde y faujasita (8).

### **1.2.2 Lodos de depuradora**

Los lodos de EDAR se presentan como un valioso e recurso en la agricultura, debido a su composición en materia orgánica y nitrógeno. Pero tienen el inconveniente de su alto contenido en metales pesados, cuyos límites son establecidos por el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario (Tabla 1.2) (31).



Tabla 1.2: Valores límites de metales pesados en lodos

Parámetros	Valores límites	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
<b>Cadmio</b>	20	40
<b>Cobre</b>	1000	1750
<b>Níquel</b>	300	400
<b>Plomo</b>	750	1200
<b>Zinc</b>	2500	4000
<b>Mercurio</b>	16	25
<b>Cromo</b>	1000	1500

Así mismo, esta normativa especifica que los lodos han de ser tratados antes de poder ser usados en suelos y se definen los *lodos tratados* como los que son tratados por una vía biológica, química o térmica, mediante el almacenamiento a largo plazo o por cualquier procedimiento apropiado, de manera que se reduzca de manera significativa su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización. Y entre las distintas alternativas de tratamiento, los más extendidos son la digestión anaerobia y el compostaje. (32)

### 1.3 Control de parámetros

Son muchos los parámetros que se han de tener en cuenta para la optimización del proceso, entre algunos de los que cobran mas importancia están: Aireación, humedad, temperatura, pH, materia orgánica, relación C/N, conductividad eléctrica y metales pesados.

#### 1.3.1 Aireación

Debido a que el compostaje es un proceso mayoritariamente aeróbico, la aireación es un factor fundamental, ya que debe asegurar la presencia de oxígeno y la eliminación de los gases generados como el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>.

En este aspecto es de vital importancia el espacio libre que dependerá del tipo de residuo, la trituración, el mezclado y la humedad. De este modo, la concentración óptima de oxígeno deberá estar comprendida entre el 5 y el 15%. La ventilación se podrá realizar por volteos periódicos, por aireación natural o aireación forzada (33).

Por otro lado, se debe tener en cuenta que este aporte de aire tiene una gran influencia sobre la temperatura y la humedad de la masa compostada, por lo que su control será fundamental para no afectar de manera negativa a estos parámetros.

### **1.3.2 Humedad**

Los microorganismos necesitan agua como medio de transporte de distintos elementos a través de la membrana celular, por lo que la descomposición de la materia orgánica dependerá de la humedad.

Ésta deberá situarse entre el 40 y el 60%, ya que a valores inferiores se puede inhibir la actividad microbiana y a valores superiores se puede producir una disminución del nivel de O<sub>2</sub>, que podría dar lugar a una actividad anaerobia.

Se ha de tener en cuenta que a lo largo del compostaje e dan distintas fases con temperaturas diferentes, alguna de ellas elevadas que pueden provocar pérdidas de agua, por lo que habrá que proceder a la incorporación de esta (33) (7).

### **1.3.3 Temperatura**

El control de la temperatura es un aspecto fundamental, ya que el compostaje es un proceso muy exotérmico, debido a la degradación anaerobia de la materia orgánica, por lo que habrá que evitar que este calor se pierda en algunos casos o favorecer el descenso de temperatura en otros, con volteos o aireación. Esto es necesario debido a que cada microorganismo tiene un rango óptimo de actuación (34), y es lo que dará lugar a que las tres fases del compostaje: (mesofílica, termofílica y maduración) se den correctamente.

Por otra parte, también es necesario evitar gradientes de temperaturas en la masa de compost, para que no se dé la convivencia de diferentes microorganismos en ella y se vea afectada la calidad del producto final. Esto se puede controlar mediante los volteos.

### **1.3.4 pH**

Como ocurre con la temperatura, para cada microorganismo existe un nivel de pH donde aumenta su actividad, ya que este tiene influencia sobre la disponibilidad de los nutrientes. Para la mayoría de las bacterias, el pH óptimo varía entre 6 y 7,5 para las bacterias, y entre 5,5 y 8 para el caso de los hongos.

El pH inicial dependerá del tipo y las proporciones de los residuos. Posteriormente, el pH de la mezcla de compostaje puede experimentar una bajada al inicio del proceso por la formación de ácidos orgánicos. Seguidamente, el pH aumentará debido a la degradación de compuestos de naturaleza ácida y a la mineralización de compuestos nitrogenados hasta formarse amoníaco (33) (4).

### **1.3.5 Conductividad Eléctrica (CE)**

La CE de un compost viene determinada en su mayor parte por la concentración de sales de los residuos de partida. Durante el proceso, ésta tiende a aumentar debido a la mineralización de la materia orgánica, aunque una humedad elevada, podría producir una lixiviación que la hiciera descender.

Este parámetro se ha de tener en cuenta ya que la cantidad de compost que se puede añadir a un suelo debe ser proporcional a la CE (4) (7).

### **1.3.6 Materia orgánica**

Conocer la cantidad de materia orgánica de un compost es fundamental para la determinación de su calidad agronómica (35). Durante el proceso las pérdidas de materia orgánica pueden alcanzar hasta un 20% de la masa compostada (36). Esta materia se pierde en forma de sustancias volátiles ricas en carbono.

El descenso de la materia orgánica se suele dar en dos fases, una donde las cadenas carbonatadas se descomponen en otras más simples, pudiendo éstas reagruparse y dar lugar a ácidos húmicos y una segunda donde se degradan más lentamente los compuestos más resistentes como las ligninas (37) (38).

### **1.3.7 Relación C/N**

El carbono y el nitrógeno son los constituyentes básicos de la materia orgánica. Los microorganismos necesitan el carbono como fuente de energía, y el nitrógeno para la síntesis de proteínas. Estos utilizan normalmente 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno. Por lo que un rango de C/N considerado óptimo para el compostaje es 25-35. Una relación mayor, nos dará lugar a mayores tiempos de fermentación, mientras que una relación menor, da lugar a grandes pérdidas de nitrógeno (39).

Para un compost maduro una relación  $C/N < 20$  se considera suficiente, aunque la relación ideal estaría entrono a 10 (7).

### 1.3.8 Metales pesados

La presencia de metales pesados en el compost es un serio problema debido a las consecuencias adversas para el medio ambiente. La alta y excesiva acumulación de metales pesados en el suelo puede contaminar eventualmente la cadena alimenticia de los seres vivos. Es por ello, por lo que existen normas que establecen unos límites. El RD 506/2013 establece estos límites de concentración y a su vez elabora una clasificación que deberá ir incluida en sus características.

## 1.4 Instalaciones de compostaje

La gran variedad de sistemas de compostaje existentes actualmente se pueden clasificar en tres grupos (Tabla 1.3):

- Sistemas abiertos: Los sustratos se suelen colocar en pilas o montones al aire libre o protegidos de los factores meteorológicos bajo techo. Los sistemas abiertos comportan un menor coste y tienen un manejo e instalación más sencilla.
- Sistemas cerrados: Se llevan a cabo en recintos totalmente sellados, con un exhaustivo control de parámetros y con una extracción de gases para ser tratados. Estos sistemas conllevan una infraestructura más complicada y costosa. La fase de maduración normalmente se suele realizar en sistemas abiertos.
- Sistemas semiabiertos: Generalmente se llevan a cabo en un sistema en canal en el que el material a tratar es colocado entre dos paredes, además suelen contar con sistemas de succión y tratamiento de gasas.

Tabla 1.3: Tipos de sistemas de compostaje

<b>SISTEMAS</b>	<b>Dinámicos</b>	<b>Estáticos</b>
<b>Abiertos</b>	Pilas o mesetas volteadas	Pilas o mesetas aireadas
<b>Cerrados</b>	Tambores Túneles dinámicos Reactores circulares	Túneles estáticos Contenedores y silos Biocélulas
<b>Semiabiertos</b>	Trincheras Pilas o mesetas en nave cerrada	Pilas con cubierta semipermeable

Además de esta clasificación, según si la masa a compostar reciba volteos o algún movimiento que homogenice el material, o no, se habla de sistemas dinámicos o estáticos.

Cada sistema tiene sus ventajas e inconvenientes (Tabla 1.4) y que usemos un sistema u otro dependerá de factores como el clima del lugar donde se realice el proceso, el tipo de residuo a tratar, la disponibilidad de terreno, la necesidad de abreviar el proceso, etc.

Tabla 1.4: Cuadro comparativo entre los sistemas de compostaje (40)

ELEMENTO DE COMPARACION	TAMAÑO EN SISTEMAS ABIERTOS	TAMAÑO EN SISTEMAS CERRADOS
Superficie	Grande	Reducida
Clima	Temperaturas no extremas	Variable y frío
Sustrato	Todos, pero con agentes estructurantes	Principalmente aquellos con elevada humedad
Tecnología	Relativamente sencilla. Sistemas de aireación 2 opciones: aireación forzada y volteo	Relativamente sofisticada Sistemas de aireación: múltiples opciones
Sistema	Discontinuo a semi-continuo	Semicontinuo a continuo
Inversiones	De baja a moderada	De elevadas a muy elevadas
Costes de explotación	Variable. Elevada en el caso de utilización de agentes estructurantes	Elevado
Consumo energético	Bajo a medio	Medio a elevado
Mano de obra	Variable, según la instalación: mano de obra no especializada+formación+ 1 técnico	Obrero especializado + técnico
Duración	Fermentación: semanas Maduración: meses	Fermentación: 3 a 15 días Maduración: meses
Tamaño	Todos: pequeñas producciones: <12 TMS/día ≥300 TMS/día	Limitado: -70 TMS/día -73 TMS/día
Olores	Problema si: -no hay suficiente aireación -volteos alargados en el tiempo	Se puede controlar según el sistema de aireación

### 1.4.1 Pilas volteadas

Es el sistema más generalizado. El material se dispone en pilas, agrupando los residuos en montones generalmente de forma trapezoidal, con una altura ideal de 2 metros y una anchura de entre 3-4 metros.

Los materiales a compostar se han de apilar sin que se compriman excesivamente, para dejar espacios aireados. Si es necesario se puede añadir algún material estructurante.

La aireación se llevará a cabo por convección natural ayudada por volteos periódicos, con el objetivo de controlar humedad, temperatura, y nivel de oxígeno, además de otros factores como el olor o los insectos.

La principal desventaja de estos sistemas es la dificultad de mantener un nivel de oxígeno constante, ya que sufre fuertes oscilaciones según la frecuencia de los volteos. La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que deseamos realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 6 - 10 días.

Es usual que los volteos se realicen por una pala cargadora, que recoja y vuelva a soltar el material, pero también existe maquinaria específica que consigue una mayor eficiencia en el mezclado.

Este método es el más económico en cuanto a consumo de energía (41) (32) (42).



Figura 1.3: Volteadora

#### 1.4.2 Pilas estáticas aireadas

El material se apila de igual forma que en el sistema anterior pero una vez formada la pila de compostaje éste no se moverá del sitio. Los residuos se colocan sobre tubos perforados o sobre una solera porosa y la aireación del sistema se realiza bien suministrando aire a presión o mediante succión del mismo. Se recomienda situar una capa de material de alta porosidad (de unos 20-30 cm) que permita la transferencia de aire hacia la masa y absorba el exceso de humedad. Con este sistema se asegura una buena concentración de oxígeno por toda la masa, desplazando los gases resultantes de la fermentación y el vapor de agua.

- Aireación forzada por succión: Conocido como sistema Belstville. El sistema de distribución está conectado a una bomba de succión y unido a este sistema se instala una pila como biofiltro para controlar el olor. Ésta pila puede componerse de compost maduro o cualquier otro material como tierra vegetal o poda.

Al final del proceso se puede proceder al volteo y desplazamiento de la pila para dejarlo madurar.

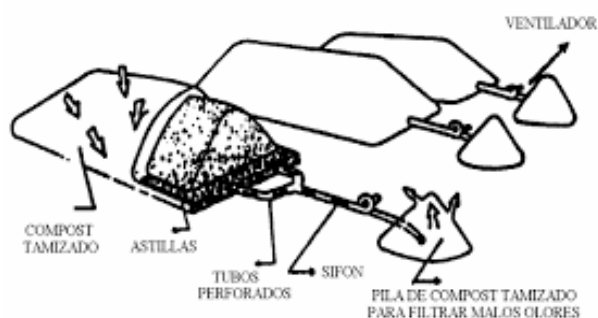


Figura 1.4: Sistema de compostaje aireado forzado (43)

- Aireación forzada por insuflación: Conocido como sistema Rutgers. En este caso, se expulsa aire a través de las tuberías, por lo que se hace complicado controlar los olores. Aunque este sistema ha cobrado importancia recientemente debido a los sistemas cubiertos móviles, que permiten cubrir las pilas permitiendo la permeabilidad del CO<sub>2</sub> y la humedad, siendo impermeables a los agentes externos (Sistema semiabierto)

Los sistemas Rutgers suelen disponer de mecanismos automáticos para el control de la temperatura, como puede ser un sistema de termopares con una temperatura límite fijada, que en el momento en el que se rebasen insuflan aire y provoquen un enfriamiento de la masa.

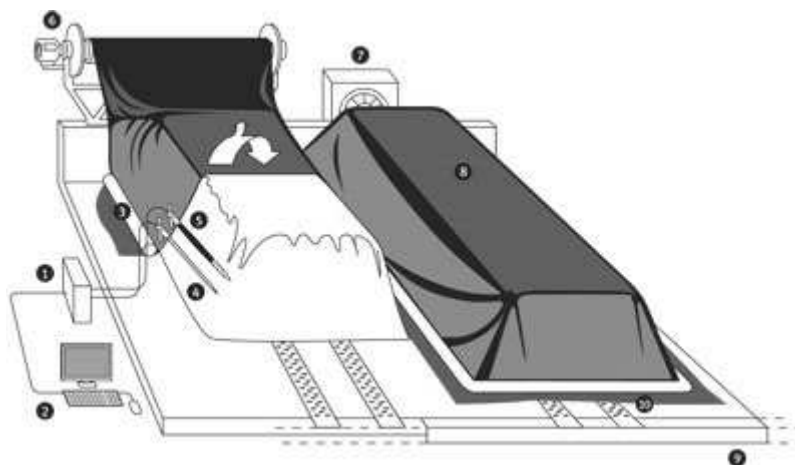


Figura 1.5: Sistema cubierto móvil GORE (44)

Las principales ventajas de estos sistemas suelen ser el mayor control de temperaturas y oxígeno, y un menor requerimiento de personal, aunque los costes de inversión y mantenimiento serán mayores que en el sistema anterior. Otras desventajas pueden ser los problemas de compactación del sistema, al ser estático, o la posibilidad de que se den cortocircuitos en el sistema de aireación (42) (45) (32).

### 1.4.3 Tambores rotatorios

Este reactor se construye con cilindros de entre 1-4 metros de diámetro y de 3-40 metros de longitud. En el interior, los materiales se mezclan ya que este va girando (se puede variar velocidad) lentamente sobre su eje principal. Además, pueden disponer de álabes que mejoren la agitación, favorezcan la aireación y desplacen el material hacia la salida. Este último hecho también se ve ayudado por una ligera inclinación que se le confiere a los tambores.

La alimentación se realiza por un extremo y se recoge por el extremo inferior opuesto, pasando en el interior por una etapa de mezcla, degradación, maduración y cribado. Aunque también suelen necesitar una maduración extra en el exterior. El tiempo de composta en el interior puede estar entre los 3 y 7 días según los materiales a compostar.

Las ventajas de este sistema es que tienen un elevado control y flexibilidad del proceso, unas menores necesidades de agua y oxígeno, ya que es muy eficiente en la transferencia de oxígeno, y tiene un bajo grado de apelmazamiento de partículas. Además, tiene una menor influencia del tipo de residuo, ya que la separación de la materia orgánica de los materiales inertes se da más fácil y tiene un elevado rendimiento en la fase de afino. La mayor desventaja es el coste de inversión, explotación y mantenimiento (32) (42).



Figura 1.6: Tambor rotatorio

### 1.4.4 Túneles dinámicos

Son un sistema de contenedores que son cargados por un extremo y descargados por el otro automáticamente. El material se apoya en una serie de bandejas perforadas de acero inoxidable por donde avanza el compost hidráulicamente. En el interior disponen también de una serie de



rodillos trituradores cuya función es remover y airear la masa. El tiempo de residencia suele ser de unas 2 semanas con una carga de unas 30 toneladas al día.

Constan de controladores para la aireación, temperatura y humedad, y drenaje de líquidos y gases con recirculación

Permiten el uso de cualquier tipo de residuo.

La fase de maduración se realiza normalmente en el exterior en pilas volteadas.

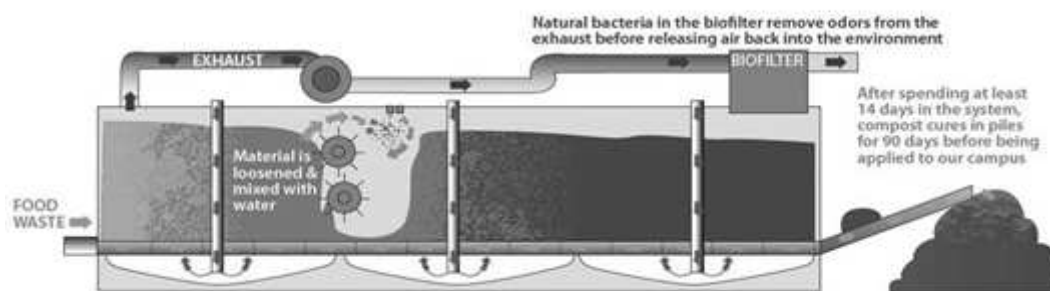


Figura 1.7: Funcionamiento del túnel dinámico (46)



Figura 1.8: Instalación con túnel dinámico

### 1.4.5 Reactores circulares de lecho agitado

Son reactores con un diámetro entre 6 y 36 m y una altura de 2 a 3 m. El material a compostar se introduce por la parte superior en un punto fijo, y se voltea por medio de un brazo giratorio. El material ya procesado se retira por un transportador de tornillo por el centro de la base. El oxígeno se puede aportar por convección natural o forzada, y los gases de fermentación se pueden llevar a un sistema de tratamiento. El tiempo de retención es de unos 10 días, después de los cuales el producto pasara a su maduración.

Utilizados normalmente para lodos de EDAR y fracción orgánica de los RSU, aunque su uso no es muy común (47).

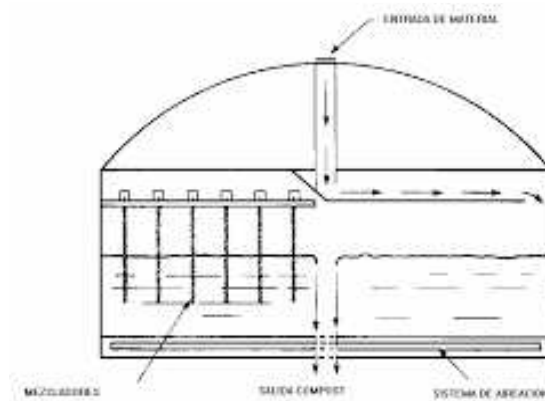


Figura 1.9: Reactor circular de lecho agitado (48)

#### 1.4.5.1 Túneles estáticos

Los túneles tienen una configuración rectangular, cerrados y generalmente construidos de hormigón. Con unos dimensiones de unos 3m de alto, 4-5m de ancho y 20-30m de largo. Constan de un sistema de aireación forzada que introduce aire por el suelo por losa perforada, canales o baldosas desmontables. Esta ventilación se puede producir con aire fresco, recirculado o una mezcla de ambos, según las necesidades. También disponen de sistemas de control de temperatura, humedad u oxígeno, y sistemas de riego y recogida de gases y lixiviados. De todos estos sistemas es el del aire el más importante ya que permite que el residuo no entre en anoxia. Todo ello esta asistido mediante un controlador lógico programable (PLC) con un interfaz de supervisión, control y adquisición (SCADA) (49).

La alimentación se puede realizar por cintas transportadoras o por palas cargadoras hasta unos 2/3 de la altura del túnel. El tiempo de residencia suele ser de 2 semanas, aunque se puede llegar hasta 6 semanas. El producto que sale, se mantendrá en maduración durante 2-3 meses, con los volteos y riegos necesarios.

Entre las ventajas cabe destacar que permite mantener valores constantes de los parámetros más importantes, recoger los gases y lixiviados producidos para ser tratados y posteriormente reutilizados. Otro aspecto a tener en cuenta es que al permanecer el lugar hermético los microorganismos no se difunden por el ambiente.

Por todo esto, es el sistema más implantado en Europa en los últimos años (32).

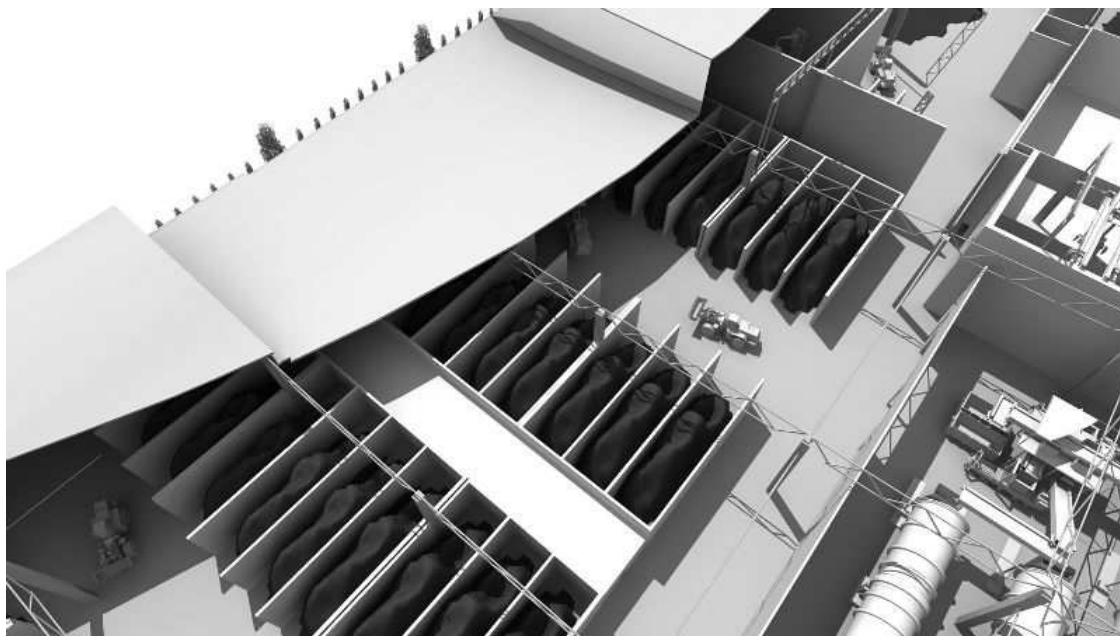


Figura 1.10: Instalación de túneles estáticos

#### 1.4.6 Contenedores

Suelen ser más pequeños que los túneles, con una capacidad de unos 30 m<sup>3</sup>. Se instalan en módulos. El material se carga por cintas transportadoras por la parte superior, retirando la cubierta. El tiempo de residencia está entre 8 y 15 días. El recipiente se inclina, acoplado a un camión de recogida y el contenido se descarga por la parte posterior.

La aireación se realiza por una serie de boquillas, y la extracción se lleva a un biofiltro. Los lixiviados se recogen por la parte inferior.

Tienen una serie de automatismos que controlan las condiciones del compostaje (32).

#### 1.4.7 Silos

Tienen entre 3 y 9 m de altura y pueden ser continuos o discontinuos. Es un proceso donde es difícil mantener uniforme la proporción de oxígeno, ya que la parte inferior donde entra el aire queda más fría y la parte superior menos aireada (32).

#### 1.4.8 Células o Biocells

Están herméticamente cerradas, construidas in situ o prefabricadas, y aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor al exterior. Su capacidad suele estar entre 100 y 1000 m<sup>3</sup>, midiendo normalmente 6 m de ancho, 4 de alto y mas de 50 m de largo. Se ha de controlar la altura en el interior del reactor para impedir que el material se compacte y tenga una correcta aireación. Suelen disponer de los principales sistemas de control automático (32).

#### 1.4.9 Semiabiertos

Similares a las pilas volteadas pero el material se coloca entre dos paredes denominadas canales, calles o trincheras. Suelen medir entre 2-5 m de ancho, 1-3 m de de alto y hasta 50 m de longitud. El sustrato se mantiene aireado desde el suelo. Y además cuentan con dispositivos para que una maquina volteadora circule por encima, removiéndola, regándola si es necesario y haciendo avanzar la masa. Se puede trabaja por lotes o en continuo. La carga se hace mediante tornillos sin-fin o palas cargas. La fase activa puede durar unos 30 días, procediendo después a su maduración.

La instalación suele estar a presión negativa para evitar malos olores en los lugares cercanos. Por ello puede ocurrir que el aporte de oxígeno se realice por aireación negativa.

Este sistema permite una mejor medición de temperatura, humedad y aireación que estando a la intemperie y no requiere de mucha mano de obra (32).



Figura 1.11: Volteadora en sistema de canales



Figura 1.12: Compostaje en canales

## 1.5 Aplicaciones del compost

La más longeva y conocida aplicación del compost es su uso en los cultivos, sin embargo están apareciendo nuevos usos y son numerosos los que están en proceso de desarrollo.

Principales usos (32):

- Uso en cultivo de vegetales: aplicación sobre el suelo como acolchado o cubierta ('mulching') de especies arbóreas, la incorporación al suelo como enmienda de cultivo de diferentes especies (agrícola, hortícola, forestal o de jardinería) y el uso como componente de sustratos para cultivo de plantas en contenedor ( de carácter forestal, ornamental u hortícola)
- Usos en procesos de biofiltración de efluentes gaseosos y líquidos, donde suelen responder con la misma eficiencia que otros materiales ya consolidados, teniendo la ventaja de su bajo coste y su fácil mantenimiento.

## 1.6 Criterios de calidad

Actualmente el compost está sufriendo un importante desarrollo, y como se ha visto en el punto anterior son variadas sus aplicaciones. Por este motivo, es importante que se definan las características físicas, químicas y biológicas de estos sustratos y se establezcan normativas que garanticen su uso sin ningún tipo de riesgo.

Es importante tener en cuenta, que según el tipo de uso final que se le dé a un compost, requerirá una calidad mayor o menor. La calidad de un compost no debe ser menor a la que un determinado uso requiera, pues no se conseguirá el rendimiento esperado y, por el contrario, no debe sobrepasar demasiado la que otro tipo de uso demande, ya que una mayor calidad requiere mayor gasto económico y energético.

Los principales factores que influyen en la calidad del producto son la materia prima, las operaciones de separación, acondicionamiento (cribados, moliendas) y de recogida selectiva, previas y posteriores al compostaje, la tecnología y las operaciones del compostaje en sí (32).

Hoy en día, existen varias normas y directrices que regulan el uso del compost, como pueden ser el Real Decreto 506/2013 o la propuesta de la Comisión Europea sobre el uso del compost y digeridos, recogida en el informe final sobre el “Fin de la Condición de Residuo” (FdR) (50). Aunque esta directriz excluya los lodos de depuradoras urbanas que serán utilizados en este proyecto, sus requisitos de calidad del compost son de interés (Tabla 1.5 (a) y Tabla 1.6).

Tabla 1.5 : Valores de los parámetros principales de un compost según RD 506/2013

Parámetro	Valor			
	Compost	Compost vegetal	Compost de estiércol	Vermicompost
Mat. Orgánica total (%)	35	40	35	30
Humedad máxima (%)	40	40	40	40
C/N	<20	<15	<20	<20
N inorgánico máximo (%N total)	15	15	15	15
<b>Contaminantes orgánicos</b>				
Polifenoles (%p/p)	0,8	0,8	0,8	0,8
Furfural (%p/p)	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>Impurezas (%)</b>	No puede contener	No puede contener	No puede contener	No puede contener
<b>Gravas y piedras (%)</b>	No puede contener	No puede contener	No puede contener	No puede contener

Parámetro	Valor			
	Compost	Compost vegetal	Compost de estiércol	Vermicompost
Microorganismos				
Salmonella spp	Ausentes en 25 g de compost	Ausentes en 25 g de compost	Ausentes en 25 g de compost	Ausentes en 25 g de compost
E.coli	<1000 MPN/g	<1000 MPN/g	<1000 MPN/g	<1000 MPN/g
Semillas de malas hierbas	-	-	-	-
Partículas (%)	90 (25mm)	-	-	90 (25mm)

Tabla 1.6: Valores de los parámetros principales de un compost según FdR

Parámetro	Valor
Mat. Orgánica (%)	15 en materia seca
Estabilidad máxima (%)	Para compost 1 de los 2 métodos:  15 mmol O <sub>2</sub> /kg M.O./h o 16 mg CO <sub>2</sub> /gM.O./día según EN 16087-1  Rottegrade IV o V (<20°C test de autocalentamiento según EN 16087-2)
Microorganismos	
Salmonella spp	Ausentes en 25 g de compost
E.coli	<1000 UFC/g muestra fresca
Semillas de malas hierbas	2 semillas viables de malas hierbas/ litro de compost
Impurezas (%p/p materia seca)	0,5 para vidrios; metal y plástico >2mm

En cuanto al límite máximo de metales (Tabla 1.7), los productos de la clase C no podrán aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por

hectárea y año, mientras que los de clase A y B se aplicarán al suelo siguiendo los códigos de buenas prácticas agrarias.

Tabla 1.7: Valores límites en metales pesados

Metales	Límite de concentración (mg/kg m.s.)			
	RD 506/2013			FdR
	Clase A	Clase B	Clase C	
<b>Cadmio</b>	0,7	2	3	1,5
<b>Cobre</b>	70	300	400	200
<b>Níquel</b>	25	90	100	50
<b>Plomo</b>	45	150	200	120
<b>Zinc</b>	200	500	1000	600
<b>Mercurio</b>	0,4	1,5	2,5	1
<b>Cromo</b>	70	250	300	100
<b>Cromo(IV)</b>	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	-





## 2 OBJETIVOS Y ALCANCE

Cada vez generamos mas residuos, y los depósitos controlados tienen una capacidad de determinada, por ello en los últimos años está tomando fuerza el concepto de valorización de residuo, es decir, cualquier procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, siempre que estos procedimientos no tengan repercusiones negativas en la salud humana y en el medio ambiente. El compostaje entra dentro estos procesos, y el lodo de depuradoras y las cenizas volantes dentro de los residuos generados.

Hoy en día, las plantas de tratamientos de aguas residuales son más numerosas y modernas, por lo que está aumentando la cantidad de lodos generados y las normativas ambientales son más estrictas cada vez debido a los problemas en la eliminación de estos. Es aquí, donde entra el compostaje como vía de reutilización, sin embargo, surge a la vez una gran limitación en el uso de este compost de lodos debido a su alto contenido en metales pesados que pueden lixiviarse y pasar al ecosistema.

Las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón, por su parte, son un residuo muy importante que está siendo utilizado en la industria del cemento, aproximadamente un 50% de las producidas en Europa, siendo el resto enviadas a vertederos o utilizadas como material de relleno en minas de carbón, pudiendo generar en este último caso lixiviados que contaminen el medio. Un alto porcentaje desechado, junto al deseo de conseguir una gestión más sostenible, son las causas que justifican en interés en buscar nuevos procesos tecnológicos, como puede ser la conversión de estas en zeolitas. Zeolitas a las que le son atribuidas aplicaciones en retención de metales pesados sobre distintos medios como pueden ser los suelos y las aguas, entre otras.

Por tanto, el objetivo de este proyecto es investigar el posible uso de las CV-Zs como posible aditivo para reducir los peligros potenciales del compost y mejorar su aplicación en suelos. Para ello se plantean las siguientes metas:

- Probar que las CVZ-s están capacitadas para adsorber y retener en el material a compostar metales pesados como son el Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y Cr.
- Mostrar la influencia que tiene la adición de este tipo de zeolitas sobre el pH y la CE del compost.
- Mostrar la influencia de la adición de cáscaras de naranja, principalmente como agente neutralizador del pH.
- Realizar el control de otros parámetros principales en el proceso de producción del compost como pueden ser temperatura, humedad, aireación, materia orgánica y relación C/N.

Quedan fuera del alcance de este proyecto trabajos posteriores de acondicionamiento y estudios de calidad que serán necesarios para su puesta en el mercado, así como cualquier estudio de parámetros biológicos. Tampoco se han valorado las emisiones de gases y lixiviados generados durante el compostaje.

## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

---

A continuación, se van a describir los materiales utilizados en el proceso de compostaje, así como los ensayos previos necesarios para su puesta en marcha. Por otra parte se describirá de manera detallada los diferentes equipos, material de laboratorio y reactivos que han sido utilizados para el análisis de los parámetros más significativos, así como los métodos seguidos para estos análisis.

### 3.1 Proceso de compostaje

Previo al inicio del proceso es necesario llevar a cabo una fase de preparación en el que se elijan las materias primas a compostar, y se lleve a cabo su acondicionamiento y mezcla de manera adecuada para regular el contenido en agua, la granulometría, y ajustar pH.

#### 3.1.1 Materias primas

Los componentes que formarán parte del compostaje son los siguientes:

- Lodos de la EDAR de Tablada (Sevilla)
- Zeolitas sintetizadas a partir de cenizas volantes (CV-Z) de la central térmica de Narcea.
- Residuos de la poda de cipreses
- Cáscaras de naranja
- Compost maduro

Estos residuos han sido los elegidos y serán mezclados en distintas proporciones teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Los lodos de EDAR Tablada corresponden a fangos de la salida de la planta, es decir lodos primarios y secundarios tratados anaeróbicamente y, posteriormente desecados mediante filtro prensa. Estos fangos contienen un alto porcentaje de humedad, por lo que necesitarán un material complementario que absorba ese exceso de humedad (65% aproximadamente), como es el caso de la podad de ciprés.

El resto de parámetro de interés agronómico de éstos se exponen en la tabla 3.1.

- La poda de ciprés actúa además como estructurante, favoreciendo la aireación. Es habitual la adición de este tipo de materiales en el compostaje de lodos debido a la tendencia a la compactación que tienen.
- Otro motivo más del uso de la podas es su alta relación C/N en comparación con la de los lodos.

Tabla 3.1: Parámetros agronómicos principales de los lodos generados en España (51)

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>pH</b>	6,74
<b>CE (<math>\mu\text{Sm/cm}</math>)</b>	5645,8
<b>Carbono total (%)</b>	34,91
<b>Carbono oxidable (%)</b>	17,71
<b>Materia orgánica oxidable (%)</b>	30,54
<b>Nitrógeno total Kjeldahl (%)</b>	4,01
<b>Relación C/N</b>	8,85
<b>P total (mg/kg m.s.)</b>	19237,95
<b>P asimilable (mg/kg m.s.)</b>	2603,22
<b>Ca total (mg/kg m.s.)</b>	51968,3
<b>Ca asimilable (mg/kg m.s.)</b>	7693,73
<b>Mg total (mg/kg m.s.)</b>	6410,95
<b>Mg asimilable (mg/kg m.s.)</b>	1888,35
<b>K total (mg/kg m.s.)</b>	3837,33
<b>K asimilable (mg/kg m.s.)</b>	1357,11
<b>Fe total (mg/kg m.s.)</b>	16821,75
<b>Fe asimilable (mg/kg m.s.)</b>	14,92
<b>Na asimilable (mg/kg m.s.)</b>	1305,5

- Las CV-Z son muy alcalinas, debido a la cantidad de cenizas volantes no convertidas en zeolita (35%). Por otro lado la conductividad eléctrica (CE) de las zeolitas es muy elevada. En este trabajo, la zeolita es del tipo NaP1 y ha sido sintetizada en un reactor R-410-A de acero inoxidable con capacidad de 10 m<sup>3</sup> en las condiciones que aparecen en la Tabla 3.2 (52).

Tabla 3.2: Condiciones durante la reacción

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Ceniza (kg)</b>	2200
<b>Agua osmotizada (kg)</b>	3696
<b>NaOH al 50% (kg)</b>	1056
<b>T (°C)</b>	125
<b>t (h)</b>	8
<b>P (atm)</b>	3,55

Posteriormente, se pasa a una etapa de filtración (Tabla 3.3) en un filtro prensa de propileno (F-406, 55 placas), con una bomba manual de extracción de 2 m<sup>3</sup> con membrana neumática (16 m<sup>3</sup>aire/h):

Tabla 3.3: Condiciones durante la filtración

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura (°C)	90
tiempo (h)	1

Finalmente, se lleva a cabo un lavado en la circunstancias de la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Condiciones de lavado

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura (°C)	85
tiempo (h)	40
Tiempo de drenaje de agua con aire (h)	12

- La cáscara de naranja es un residuo que se ha obtenido de naranjas utilizadas para zumo en el bar de la ETSI. Este residuo se caracteriza por tener un pH bajo y un a CE baja, lo que compensa los parámetros de los otros sustratos.
- El compost maduro que pueda actuar como inóculo ya que puede contener pequeños

insectos y microorganismos que ayuden en el arranque del proceso.

### 3.1.2 Reactores

Los reactores utilizados son unos contenedores con tapadera fabricados por TRILLA DENOX de 7 L de capacidad, una altura de 280 mm y un diámetro externo de 230 mm a los que se les ha realizado un orificio en tapa superior y 4 orificios en la parte inferior para la toma de temperatura, y facilitar la aireación y ventilación del compost (Figura 3.1 y 3.2).

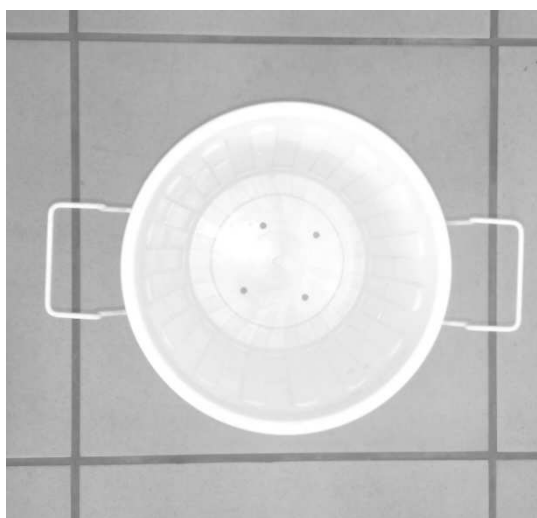


Figura 3.1: Vista interior de un reactor



Figura 3.2: Vista exterior de un reactor

Para el aislamiento se ha utilizado aislante térmico fabricado por Rockwool. Este aislante está constituido por un fieltro de lana de roca revestido por una de sus caras con papel de estraza que hace de barrera de vapor. Los productos de lana de roca no retienen en el agua, son químicamente

inertes y no favorecen el desarrollo bacteriano. La caracterización del material se presenta en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5: Características del aislante térmico

Característica	Valor	Norma
Densidad nominal	21 kg/m <sup>3</sup>	EN 1602
Conductividad térmica	0,040 W/(m·K)	EN 12667
Resistencia térmica	2 (m <sup>2</sup> ·K)/W	-
Estabilidad dimensional a una temperatura y humedad específicas	DS(70,90)	EN 1604
Reacción al fuego	F	EN 13501.1
Tolerancia de espesor	T1	EN 823
Largo x Ancho x Espesor (mm)	6000 x 1200 x 80	-
Absorción de agua a corto plazo	WS   Absorción de agua < 1,0 kg/m <sup>2</sup>	EN 1609
1609 Resistividad al flujo de aire	AFr5	EN29053

En la Figura 3.3 se muestra un corte del aislante térmico utilizado:



Figura 3.3: Aislante térmico



### 3.1.3 Matriz de ensayos

Se dispondrá de un sistema de 12 reactores en los que se variará el porcentaje en masa de ambos componente del 0% a 15%. El contenido en lodo será igual en todos los casos estudiados e igual al 50%, p/p. Así, el contenido de los diferentes reactores queda como se muestra en la tabla 3.6:

Tabla 3.6: Matriz de ensayo

<b>Reactor</b> <b>Componente</b>	<b>Lodos</b> <b>(%)</b>	<b>Poda de Ciprés</b> <b>(%)</b>	<b>Compost</b> <b>(%)</b>	<b>CV-Z</b> <b>(%)</b>	<b>Cáscara de naranja</b> <b>(%)</b>
<b>C1</b>	50	40	10	0	0
<b>C2</b>	50	35	10	5	0
<b>C3</b>	50	30	10	10	0
<b>C4</b>	50	25	10	15	0
<b>C5</b>	50	35	10	0	5
<b>C6</b>	50	30	10	5	5
<b>C7</b>	50	25	10	10	5
<b>C8</b>	50	20	10	15	5
<b>C9</b>	50	25	10	0	15
<b>C10</b>	50	20	10	5	15
<b>C11</b>	50	15	10	10	15
<b>C12</b>	50	10	10	15	15

### 3.1.4 Acondicionamiento de materias primas

Para el proceso de mezclado de los residuos se han usado los siguientes equipos e instrumentos:

- Cubeta de plástico de dimensiones alto x ancho x lado (mm): 195 x 320 x 470
- Palas de jardinería

- Tijeras de podar
- Tamiz de 40 mm de luz de malla
- Balanza de precisión RADWAG modelo WLC 2/A2 con las características de la tabla 3.7:

Tabla 3.7: Características de la balanza de precisión

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Capacidad máxima</b>	2 kg
<b>Rango de Tara</b>	-2 kg
<b>Legibilidad</b>	0,01g
<b>Repetitividad</b>	0,03 g
<b>Linearidad</b>	±0,03 g
<b>Tiempo de estabilización</b>	3 s
<b>Tamaño del plato</b>	195x195 mm
<b>Temperatura de trabajo</b>	15-30 °C
<b>IP rating</b>	IP 43
<b>Alimentación</b>	230 V AC 50 Hz/ 11 V AC, and accumulator
<b>Pantalla</b>	LCD(retroiluminada)
<b>Peso neto/bruto</b>	2,8/3,8 kg
<b>Tamaño de la caja</b>	440x280x190 mm

### 3.1.5 Puesta en marcha de la instalación de compostaje.

En primer lugar, se procedió al aislamiento térmico de los reactores para evitar pérdidas de calor al exterior, ya que estos presentan una alta relación Área Superficial: Volumen (AS: V), y como expuso en el apartado de introducción la temperatura es un parámetro muy importante en el proceso de compostaje. Se suelen aislar térmicamente los reactores a escala laboratorio que dispongan de sistemas de control de temperatura y su capacidad no exceda de los 100 L. (53)

Posteriormente, se procedió al troceado de las cáscaras de naranja, haciéndose pasar por el tamiz. Todos los componentes fueron mezclados en un cubeto, con objeto de obtener una masa más homogénea.

Cada reactor contiene un total de 3 kg de masa, cada uno de ellos con las proporciones especificadas anteriormente y un espacio libre de entre un 10-15 % del volumen total, para favorecer la aireación.

Los doce reactores se instalaron a la intemperie en la cara norte del edificio de laboratorios, donde no se han visto expuestos directamente al sol (Figura 3.4 y 3.5).



Figura 3.4: Reactor con aislamiento



Figura 3.5: Instalación de compostaje

## 3.2 Análisis y control de parámetros

En este apartado se describirán los reactivos, instrumentos, equipos y métodos utilizados para el análisis de temperatura, aireación, humedad, pH, CE, metales pesados, MOT, carbono total y nitrógeno total.

### 3.2.1 Reactivos

#### 3.2.1.1 Agua

Se utilizará agua de grado 2, según la norma EN ISO 3696:1996 (63). Este es un agua con muy pocos contaminantes orgánicos, inorgánicos o coloidales, apropiada para análisis delicados, incluyendo la espectrometría de absorción atómica (EAA) y la determinación de componentes en cantidades mínima. Está se prepara por desionización seguida de destilación.

#### 3.2.1.2 Disolución patrón conductividad 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C

Disolución patrón contrastada fabricada por CRISON. Esta disolución es necesaria para calibrar el conjunto conductímetro-célula para poder medir correctamente la conductividad. Tienen una tolerancia de  $\pm 12 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Es de color transparente, casi inodora y con una densidad aproximada de  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  Su composición es la siguiente:

Solución acuosa.

Potasio Cloruro [KCl] < 0.1%.

RN CAS [7447-40-7], EINECS [231-211-8].

#### 3.2.1.3 Disoluciones tampón pH 4.01, 7.00, 9.21 a 25°C

Disoluciones tampón fabricada por CRISON. Estas disoluciones son necesarias para calibrar el conjunto instrumento-electrodo para una correcta medida de pH. Tienen una tolerancia de  $\pm 0,02 \text{ pH}$ . Su capacidad tampón ( $\beta$ ) es de  $0,02 \text{ mol}/\text{L}$  por unidad tampón y su valor de dilución es de  $\Delta 1/2 \leq 0,052 \text{ pH}$ .

Es de color transparente, casi inodora y con una densidad aproximada de  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Tienen las siguientes composiciones:

- pH 4.01 : Solución acuosa.  
Potasio Hidrógeno Ftalato [ $\text{C}_6\text{H}_4\text{COOHCOOK}$ ] < 2%.  
RN CAS [877-24-7], EINECS [2112-889-4].  
Disolución germicida: Inferior a 0.005%.

- pH 7.00 : Solución acuosa.  
Potasio di-Hidrógeno Fosfato,  $[\text{KH}_2\text{PO}_4]$  < 1%.  
RN CAS [7778-77-0], EINECS [231-913-4].  
Di-Sodio Hidrógeno Fosfato 12-hidrato,  $[\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$  < 1%.  
RN CAS [10039-32-4], EINECS [231-448-7].  
Disolución germicida: Inferior a 0.005%.
- pH 9.21 : Solución acuosa.  
Di-Sodio tetra-Borato 10-hidrato  $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$  < 2%.  
RN CAS [1303-96-4], EINECS [215-540-4].  
Disolución germicida: Inferior a 0.005%.

### **3.2.1.4 Ácido Clorhídrico 37 % para análisis, ACS, ISO**

Fabricado por PANREAC. Tiene una riqueza entre 36,5-38% y una densidad  $15/4 \geq 1,19$ .

### **3.2.1.5 Ácido Nítrico 69 % para análisis, ACS, ISO**

Fabricado por PANREAC. Tiene una riqueza entre 68-70% y una densidad  $20/4$  entre 1,410-1,420.

### **3.2.1.6 Ácido nítrico para lavado.**

Se fabrica diluyendo 35 mL del ácido nítrico anterior enrasando a 1 L con agua.

### **3.2.1.7 Patrones y gases para la determinación de C,H y N.**

- Patrón EDTA, AR con la siguiente composición: C=40,98±0,09 %; N=9,57±0,01 %; H=5,51±0,04.
- Helio.
- Oxígeno del 99,99 % de pureza.

## **3.2.2 Instrumentación, material y equipos.**

### **3.2.2.1 Estufa de secado**

También conocidas como horno de secado. Es un equipo que se utiliza para secar diverso material de laboratorio o material de vidrio en general.

En nuestro caso se utilizará una fabricada por SELECTA del modelo Contern. Este modelo trabaja a convección natural, dispone de un termostato regulador de temperatura regulable para temperaturas desde 40°C hasta 250°C. Además, tiene las características de la tabla 3.8:

Tabla 3.8: Características de la estufa de secado

Característica	Valor
Estabilidad a 150 °C (°C)	± 0,3
Homogeneidad a 150 °C (°C)	± 3,25
Capacidad (L)	36
Alto x Ancho x Fondo interior (cm)	40 x 30 x 30
Alto x Ancho x Fondo exterior (cm)	60 x 65 x 49
Nº de bandejas	7
Consumo (W)	950
Peso (kg)	35

### 3.2.2.2 Tamiz

Se han utilizado dos tamices fabricados por C.I.S.A con tela y bastidor de acero inoxidable recomendado por las normas ISO 3310.1 y ASTM E-11-95. Uno de ellos es de luz de malla de 2,00 mm y otro de 5,00 mm.



Figura 3.6: Tamiz

### 3.2.2.3 Conductivímetro

Se ha utilizado un conductivímetro CRISON del modelo microCM 2201 capaz de medir temperatura y conductividad específica de la muestra simultáneamente. Este tiene distintas escalas de medida de conductividad entre 0 y 199,9 mS/cm que se seleccionan automáticamente, cada una de ellas con una resolución distinta entre 0,01  $\mu$ S/cm y 0,1 mS/cm; y una precisión entre 0,1 % y 0,5 %. La escala de temperatura es de -10 a 110 °C con una resolución de 0,1 °C y una precisión de 0,1 °C.

Además, este equipo las especificaciones que se muestran en la tabla 3.10:

Tabla 3.9: Características del conductivímetro

Características	Valor
Compensación de temperatura	Automática con sonda Pt100 Manual por teclado
Pantalla	De cristal líquido, retroiluminada, 128 x 64 puntos
Entradas	Electrodo indicador o combinado, conector BNC (imp. >1012). Electrodo de referencia, conector banana. C.A.T. tipo Pt 1000, conector banana o telefónico
Salidas	Agitador magnético CRISON. PC o impresora. Teclado externo de PC o lector de código de barras.
Alimentación	220 V AC / 12 V DC 3,3 W
Dimensiones	325 x 155 x 98 mm

### 3.2.2.4 pH-metro

Se utilizo un pH-metro CRISON modelo GLP21+, que es un instrumento para medir pH y mV.

Su escala de medida de pH está entre -2 y 16, con una resolución que podemos elegir entre 0,1/0,01/0,001 y un error de medida  $\leq 0,005$ . Su escala de mV está entre -2000 y 2000, con una

resolución que podemos elegir entre 0,1/1 y un error de medida  $\leq 0,5$ . Y la de temperatura está entre -20 y 150°C, con una resolución de 0,1 y un error de medida  $\leq 0,2$ .

Además, presenta las especificaciones de la tabla 3.11:

Tabla 3.10: Características del pH-metro

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Compensación de temperatura</b>	Automática con sonda Pt100 Manual por teclado
<b>Pantalla</b>	LCD, 2líneas x 16 caracteres
<b>Deriva térmica</b>	Menor que 0,03 %/°C
<b>Entradas</b>	Célula de conductividad Compensación automática de temperatura
<b>Salidas</b>	RS 232 C (Opcional)
<b>Frecuencia</b>	3,8 KHz $\pm 10\%$
<b>Condiciones de trabajo</b>	0-50 °C 95 % máx. Humedad relativa
<b>Alimentación</b>	220 V $\pm 10\%$ AC 50/60 Hz 15 W
<b>Dimensiones</b>	303 x 85 x 330 mm
<b>Peso</b>	3,8 kg

### 3.2.2.5 Agitador

Se ha utilizado un agitador SELECTA modelo Unitronic 320 OR que además dispone de un baño con temperatura regulable. La agitación de vaivén de la cubeta móvil de este se puede regular de 10 a 100 oscilaciones por minuto, con una amplitud de recorrido seleccionable de 32 o 46 mm.



### 3.2.2.6 Balanza analítica

La balanza utilizada ha sido fabricada por SCALTEC del modelo SBA 31 con las características de la tabla 3.9:

Tabla 3.11: Características de la balanza analítica

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Capacidad máxima</b>	220 g
<b>Rango de Tara</b>	-220 g
<b>Legibilidad</b>	0,0001g
<b>Repetitividad</b>	$\leq \pm 0,0001$ g
<b>Linearidad</b>	$\leq \pm 0,0002$ g
<b>Tiempo de estabilización</b>	$\leq 2$ s
<b>Diámetro del plato</b>	80 mm
<b>Temperatura de trabajo</b>	10-30 °C
<b>Alimentación</b>	230 V AC 48-63 Hz
<b>Peso neto aprox.</b>	5,4 kg
<b>Altura de la caja</b>	225 mm

### 3.2.2.7 Placa calefactora

Se ha utilizado una placa SELECTA, que puede alcanzar una temperatura sobre la placa de 400 °C y posee un selector con regulador de potencia. Las características físicas aparecen en la Tabla 3.12:

Tabla 3.12: Característica de la placa calefactora

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Diámetro (cm)</b>	15
<b>Alto x Ancho x Fondo exterior (cm)</b>	8 x 22 x 22
<b>Consumo (W)</b>	1600
<b>Alimentación</b>	220 V 50/60 Hz

### 3.2.2.8 Bomba de vacío

Se utilizó una fabricada por TELSTAR del tipo Top-3. Esta es una bomba de vacío de paletas rotativas en baño de aceite de doble efecto y tiene las características de la tabla 3.14:

Tabla 3.13: Características de la bomba de vacío

Característica	Valor
Caudal 50/60 Hz (m <sup>3</sup> /h)	3/3,6
Etapas	2
Presión parcial límite (mbar)	<7·10 <sup>-4</sup>
Boca de aspiración	KF 16
Potencia (W)	1800
Voltaje 230 V 50/60 Hz (rpm)	2800/3360
Peso con aceite (kg)	7
Capacidad de aceite (L)	0,3
Nivel de ruido 50/60 Hz (dB)	65/70
Temperatura de arranque mínima (°C)	5
Temperatura de arranque máxima (°C)	40
Alto x Ancho x Fondo (mm)	240 x 125 x 280



Figura 3.7: Bomba de vacío

### 3.2.2.9 Recirculador de refrigeración

Este equipo hace recircular continuamente el agua a través de un circuito cerrado, enfriándola a una temperatura deseada.

El utilizado en nuestro laboratorio es un refrigerador EYELA del modelo CCA-1110 y tiene las características que aparecen en la Tabla 3.13:

Tabla 3.14: Características del recirculador de refrigeración

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Rango de temperatura (°C)</b>	-20 a 20
<b>Capacidad de enfriamiento(W)</b>	450 a 10 °C 350 a 0 °C 260 a -10°C
<b>Caudal máximo (bomba) (L/min)</b>	10
<b>Altura máxima (bomba) (m)</b>	5,6
<b>Potencia (bomba) (W)</b>	350
<b>Precisión (°C)</b>	± 2
<b>Pantalla</b>	LED digital
<b>Alimentación</b>	110/220 V 50/60 Hz
<b>Alto x Ancho x Fondo (mm)</b>	540 x 221 x 401
<b>Material interior</b>	Acero inoxidable SUS304



Figura 3.8: Vista frontal del Recirculador    Figura 3.9: Vista lateral del recirculador

### 3.2.2.10 Determinador de Carbono, Nitrógeno e Hidrógeno.

El funcionamiento de este equipo, según la norma UNE-EN 15104 : 2011 (64), se basa en quemar una masa conocida de muestra en presencia de oxígeno, o bien en una mezcla oxígeno gas portador, en condiciones tales que se convierte en cenizas y productos gaseosos de la combustión. Estos productos gaseosos consisten principalmente en dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno elemental. Luego, las fracciones másicas de estos gases en la corriente gaseosa se determinan cuantitativamente mediante los procedimientos instrumentales adecuados de análisis de gases.

En este proyecto se ha utilizado un analizador LECO CHN-600 que es un equipo utilizado para la determinación de carbono, nitrógeno e hidrógeno en muestras no homogéneas (por ejemplo petróleo, carbón, restos de plantas, sedimentos y otras sustancias orgánicas) de hasta unos 100 mg de masa.



Figura 3.10: Analizador LECO CHN-600

Este equipo utiliza helio como gas portador y oxígeno puro como combustible. Toda la muestra es quemada en un tubo con una doble zona de combustión (Figura 3.11), en la primera la muestra se quema y en la segunda son quemados las posibles partículas volátiles.

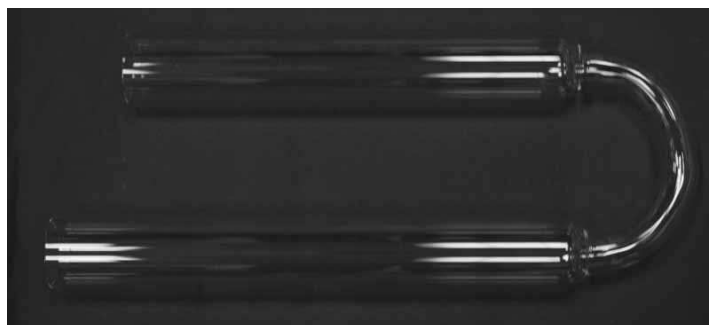


Figura 3.11: Tubo en U de combustión

Dos celdas independientes de infrarrojos son las encargadas de la determinación de carbono e hidrógeno, y una celda de conductividad térmica se encarga de la detección del nitrógeno.

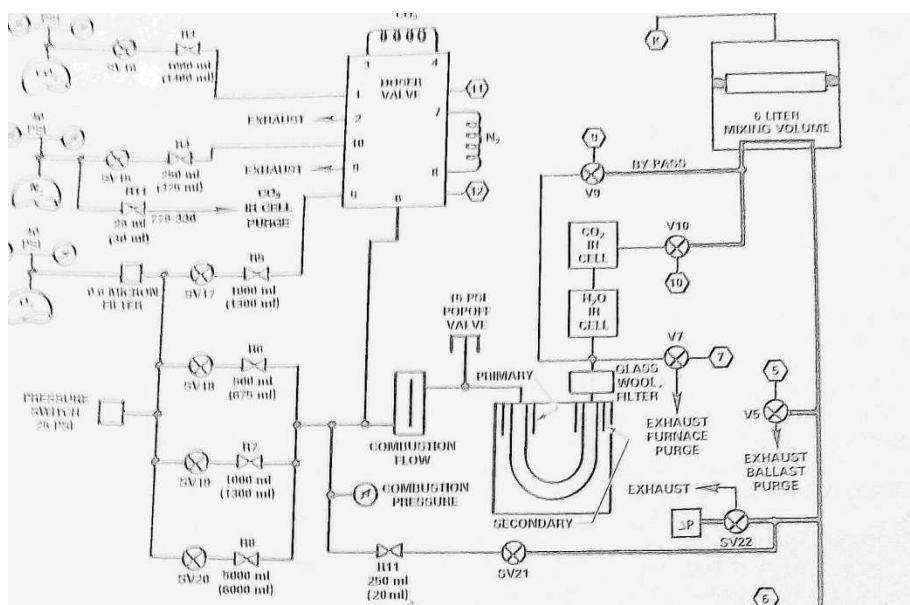


Figura 3.12: Diagrama parcial del analizador

### 3.2.2.11 ICP-OES

El equipo ICP-OES está constituido por un plasma de acoplamiento inductivo (ICP) que es una fuente de ionización junto a un espectrofotómetro de emisión óptica.

En esta técnica, la introducción continua de la muestra líquida y un sistema de nebulización forman un aerosol que es transportado por el Argón a la antorcha del plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. En el plasma, debido las altas temperaturas generadas, la muestra pasa a estados energéticos superiores, y tiende a recuperar su estado fundamental al cesar la energía, emitiendo radiación con una longitud de onda que es característica de los elementos que la componen.

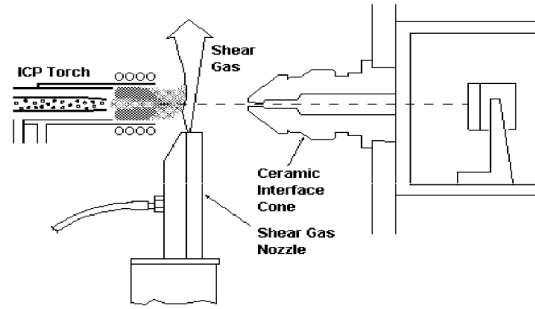


Figura 3.13: Antorcha de plasma

Esta radiación es detectada por el sistema óptico que puede ser de visión radial o de visión axial, este último tipo tiene mejor sensibilidad. Los espectros son dispersados por la red de difracción aislando las líneas de emisión y el detector se encarga medir su intensidad.

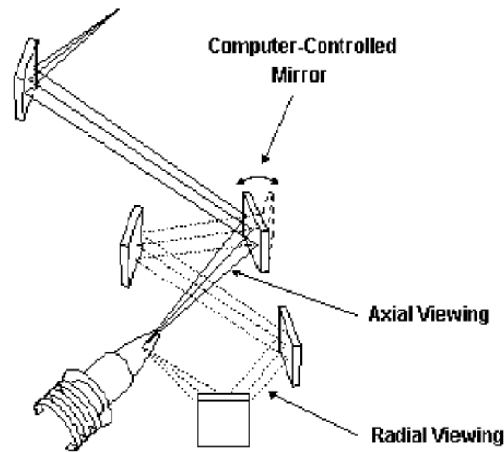


Figura 3.14: Sistema óptico

Este detector es un tubo fotomultiplicador que amplifica la señal recibida de orden de  $10^6$ . La información es procesada por el sistema informático.

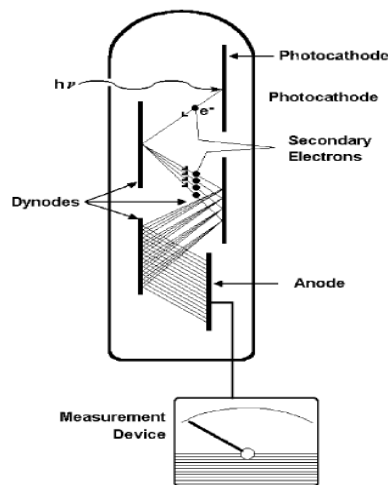


Figura 3.15: Foto-multiplicador

En este proyecto se ha utilizado un equipo ICP-OES fabricado por AGILENT modelo 5100 con Dual View (visualización doble) vertical sincrónica (SVDV) que puede actuar como cuatro instrumentos en uno: es capaz de funcionar en los modos axial, radial, Dual View (visualización doble) vertical y Dual View (visualización doble) vertical sincrónica. Este último modo permite capturar las visiones axial y radial del plasma en tan solo una lectura y obtener resultados precisos en el mínimo tiempo posible.

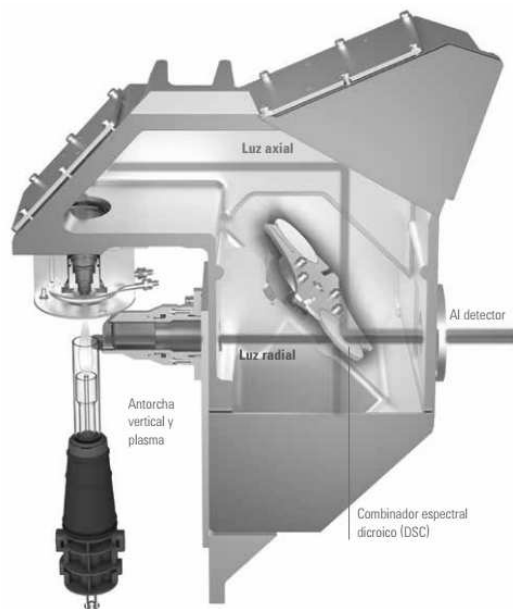


Figura 3.16: Tecnología dual view vertical sincrónica

Además, presenta las especificaciones de instalación de la tabla 3.15:

Tabla 3.15: Características del ICP-OES AGILENT 5100

Característica	Valor
Peso (kg)	106
Largo x Alto x Ancho(mm)	800 x 940 x 740
Alimentación	2,9 kVA, monofásica, con tensión de entrada de 200-240 V CA (50-60 Hz), con una intensidad máxima de 15 A.



Figura 3.17: ICP-OES

### 3.2.2.12 Mufla

Una mufla es un horno destinado normalmente para la cocción de materiales cerámicos y para la fundición de metales a través de la energía térmica. Dentro del laboratorio un horno mufla se utiliza para calcinación de sustancias, secado de sustancias, fundición y procesos de control.

En este estudio se ha usado una mufla NABERTHERM modelo L9/12/S27 con las características de la tabla 3.16:

Tabla 3.16: Características de la mufla NABERTHERM L9/12/S27

Característica	Valor
Temperatura máxima(°C)	1200
Capacidad (L)	9
Alto x Ancho x Fondo interior (mm)	170 x 230 x 240
Alto x Ancho x Fondo exterior (mm)	570 x 480 x 550
Potencia (W)	3000
Peso (kg)	45





Figura 3.18: Mufla

### 3.2.2.13 Instrumentación y materiales.

Durante el trabajo de laboratorio, a parte del uso de los equipos, se hace indispensable el uso de materiales complementarios a estos y de instrumentos. A continuación, se ofrece una lista de todo lo utilizado:

- Bandeja de muestra de horno.
- Desecador fabricado por SIMAX modelo CSN 70 4300 tapa con tapón de plástico con placa de porcelana.
- Cápsulas de porcelano.
- Frasco de polipropileno de 150 mL de capacidad.
- Botellas cilíndricas de polietileno de alta densidad con tapón estrella de capacidad 250 mL.
- Termómetro de mercurio con campo de medición de -10 °C a 110 °C.
- Papel de filtro WHATMAN GF/C de fibra de vidrio con tamaño de 1,2  $\mu\text{m}$  de poro, 0,26 mm de espesor y 55 mm de diámetro.
- Papel de filtro CINTOPUR NW-18 con tamaño de poro de 5  $\mu\text{m}$ .
- Matraces de reacción de 250 mL de volumen.
- Condensador de reflujo de serpentín.
- Bolas de vidrio de 2 mm de diámetro.
- Embudos de 100 mm de diámetro.
- Matraces aforado de capacidad nominal 100 mL.
- Probetas graduadas de 50,100, 250 y 1000 mL.

- Matracas para vacío de 250 y 1000 mL.
- Soportes de laboratorio.
- Pera de goma.
- Pipetas graduadas de capacidad nominal de 2, 10 y 25 mL.
- Frascos lavadores de 1000 mL de volumen.
- Varillas agitadoras.
- Tubería de silicona.
- Gradillas de acero inoxidable.
- Copas de papel de aluminio para análisis CHN que pueden contener de 50 a 350 g de muestra.
- Materia de seguridad: Guantes, gafas protectoras, pinzas y guantes de protección para hornos.

### 3.2.3 Métodos analíticos.

#### 3.2.3.1 Determinación del contenido en materia seca y humedad.

En primer lugar se determina el peso de la bandeja vacía ( $M_B$ ), calentándola a 103 °C en la estufa y enfriándola en el desecador y posteriormente pesándola en la balanza analítica del punto 3.1.2. Posteriormente, se transfieren unos 50 g de muestra previamente tomada, preparada y mezclada a la bandeja, repartiéndose para que tenga un espesor uniforme y no superior a 2 cm, y se pesa enseguida con una precisión de 0,01 g ( $M_H$ ). Se coloca entonces la bandeja en la estufa y se seca hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas no exceda 0,1g. Se anota la masa seca de la muestra y la bandeja ( $M_S$ ).

- Para a determinar el contenido en materia seca se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_M = \frac{M_S - M_B}{M_H - M_B} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Donde  $D_M$  es el contenido en materia seca expresado como porcentaje en masa.

- Para a determinar el contenido de humedad se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_M = \frac{M_H - M_S}{M_H - M_B} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Donde  $W_M$  es el contenido en humedad expresado como porcentaje en masa.

### 3.2.3.2 Materia orgánica por calcinación

Para este procedimiento se utilizan las muestras desecadas que se han usado para determinar el contenido de humedad y materia seca, previamente molidas en un mortero.

Las capsulas de porcelana se desecan en la mufla a 240°C durante 30 min.

Se pesan con precisión de 0,1 mg de 3 a 4 g de la muestra ( $M_1$ ) en una capsula de porcelana con la balanza analítica. Posteriormente, se incineran la muestras en la mufla a una temperatura de 540°C durante 8h. Finalmente, se vuelve a pesar las muestras en la misma balanza anotándose su peso ( $M_2$ ).

El porcentaje en materia orgánica en base seca se calcula con la siguiente fórmula:

$$MOT = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Y el porcentaje de carbono orgánico se calcula, según el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, mediante la siguiente ecuación:

$$Carbono\ orgánico = \frac{MOT}{1,724} \quad (3.4)$$

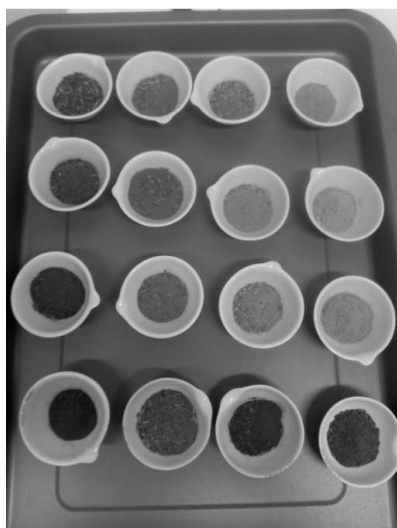


Figura 3.19: Muestras antes de la calcinación    Figura 3.20: Muestras después de la calcinación

### 3.2.3.3 Determinación de pH

Se toman aproximadamente 20 g de muestra diluyéndola en agua destilada para alcanzar un ratio muestra: agua de 1: 5 (g/ mL), se transfiere a un recipiente ajustando la tapa y se agita durante 1 h en el agitador.

Se calibra el pH-metro de acuerdo a las indicaciones del fabricante, utilizando las soluciones tampón de pH 4.01, 7.00 y 9.21.

Se agita la suspensión enérgicamente antes de iniciar la medición y se mide el pH en la suspensión

en sedimentación. La lectura del pH se realiza cuando se alcanza la estabilización, es decir, cuando la lectura no varíe más de 0,1 unidades de pH en el plazo de 15 s. Se anotan los valores con una cifra decimal.

#### **3.2.3.4 Determinación de la CE**

Se calibra el conductivímetro de acuerdo que las instrucciones del fabricante, utilizando la solución patrón de conductividad 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Para este análisis se utilizan las mismas muestras usadas en la medición del pH, pero en este caso se filtran desechando los 10 ml primeros. Además, se prepara un blanco siguiendo el mismo procedimiento pero omitiendo la muestra.

Se mide la conductancia eléctrica de los filtrados y se anotan los resultados.

#### **3.2.3.5 Medida de la temperatura.**

Para la determinación de la temperatura se introduce el termómetro de mercurio por el orificio superior el reactor, manteniéndose durante aproximadamente 30 s hasta que no se observe variación alguna de esta. Posteriormente se realiza igualmente por el orificio inferior anotándose la media de las dos temperaturas.

#### **3.2.3.6 Determinación de los metales pesados.**

Para este análisis hay que realizar una extracción de elementos solubles en agua regia. Es muy importante tener en cuenta, que este tipo de digestión es potencialmente peligrosa, por lo que se debe usar todo tipo de materia de seguridad necesario, como batas de laboratorio, guantes o gafas de seguridad. Además, todos los procedimientos se llevarán a cabo en una vitrina de gases bien ventilada.

En primer lugar, se debe limpiar el material de vidrio a utilizar cuidadosamente con ácido nítrico y posteriormente aclararlo con agua destilada.

Posteriormente, se prepara a muestra. Al igual que en el ensayo de calcinación se toman 5 g de las muestras secas usadas para la determinación de humedad y materia seca, moliéndose con el mortero, hasta que pase toda ella por un tamiz de 500  $\mu\text{m}$ .

A continuación, se pesa aproximadamente 1 g de esta muestra finamente molida con precisión de 0,001 g en la balanza analítica, en un matraz de reacción de 250 mL, anotándose esta masa. Se

humedece con aproximadamente 0,5 mL de agua y después se añaden agitando 21 mL de ácido clorhídrico, seguido por 7 mL de ácido nítrico, gota a gota si se hace necesario para reducir la formación de espuma. Se deja reposar aproximadamente 24 h a temperatura ambiente, permitiendo la lenta oxidación de la materia orgánica.

Una vez transcurrido este tiempo, se añaden tres bolas de vidrio y se sitúa el matraz de reacción en el aparato calefactor frío, instalándose a la columna de condensación de serpentín previamente enfriada. Se eleva la temperatura lentamente, hasta alcanzar condiciones de reflujo y se mantiene así durante 2 h. Se deja enfriar pasadas las 2 h.

En cada ensayo, se realizó la extracción de 4 muestras simultáneamente, por lo que se instalaron 4 columnas de refrigeración en serie conectadas al sistema de recirculación. Este sistema empezó a enfriar 30 minutos antes de cada ensayo.

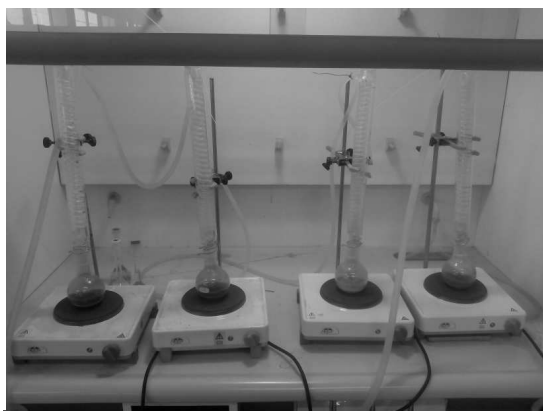


Figura 3.21: Calentamiento a reflujo de las muestras

Cuando las muestras están frías se transfiere el contenido un matraz aforado de 100 mL. El matraz de reacción se lava tres veces con agua, decantando cada lavado en el matraz aforado. Se enrasa con agua, se agita y se deja reposar para que sedimente cualquier residuo insoluble.

Por último, se filtra el sobrenadante en sistema a vacío, con papel de filtro de fibra de vidrio de 1,2  $\mu\text{m}$ , desechando los 10 mL primeros.

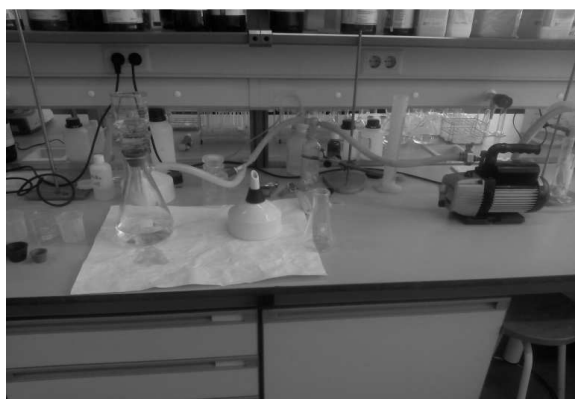


Figura 3.22: Sistema de filtración a vacío

Además, se prepara un blanco siguiendo el mismo procedimiento pero omitiendo la porción de ensayo.



Figura 3.23: Muestras digeridas y filtradas

Una vez completada la extracción las muestras son analizadas en el ICP-OCS, con visión radial, que es la utilizada para detectar concentraciones. Se obtendrán valores de los siguientes metales: Cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo. Estos valores se reciben en concentraciones en  $\mu\text{g/L}$ , y se pasan a  $\text{mg/kg}$  de compost con la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg de X metal}}{\text{kg de compost}} = \frac{\mu\text{g de X metal}}{\text{L de disolución}} \cdot \frac{0,1 \text{ L de disolución}}{\text{x kg de compost}} \quad (3.4)$$

Siendo “x” la masa de muestra pesada (1 g).

### 3.2.3.7 Determinación del Carbono y Nitrógeno total.

Para esta determinación en primer lugar se debe preparar la muestra. Para ello, se toman 50 g que serán desecados a  $103^\circ\text{C}$  en una estufa de secado, para ser luego molidos hasta que toda la muestra pase por un tamiz de  $200 \mu\text{m}$ . Se toman unos 10 g de esta muestra tamizada.

Esta muestra se reparte en tres porciones (el ensayo se realizará por triplicado) en papeles de aluminio específicos, que permanecerán en el desecador hasta ser utilizadas. Cada papel contiene entre 80 y 100 mg de muestra. Además, se tomarán otras 3 porciones de 1 g de muestra, a las que se les realizará un estudio paralelo de humedad.

Las muestras se pasan una a una al analizador CHN, previamente calibrado con el patrón EDTA-AR, donde se quemarán a  $950^\circ\text{C}$  durante unos 5 minutos obteniéndose su porcentaje en masa de Carbono ( $C_{ad}$ ) y Nitrógeno ( $N_{ad}$ ). Para la determinación del porcentaje en base seca se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C_d = C_{ad} \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3.5)$$

$$N_d = N_{ad} \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3.6)$$

Donde el subíndice “d” es base seca y  $M_{ad}$  es el contenido en humedad de la muestra.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado, se presentan los resultados de la caracterización de las materias primas empleadas en los 12 reactores utilizados para la matriz de ensayos (ver apartado 3.1.3 de Materiales y Métodos). Por otro lado, se presenta la evolución de los parámetros físico-químicos que sirven para controlar la formación del compost durante la incubación. Finalmente, se han obtenido las medidas de los parámetros indicados en el RD 506/2013 que determinan la calidad del compost final.

### 4.1. Caracterización de las materias primas

En la Tabla 4.1 se muestra los resultados de la caracterización que presentan las materias primas que se han utilizado en el proceso de compostaje.

La humedad se determinó de por el método expuesto en el apartado 3.2.3.1. Los lodos y las cáscaras de naranja presentan el porcentaje de humedad más elevada, mientras que la poda de ciprés y la CV-Z contienen los menores porcentajes en humedad.

Por otra parte, se determinó el pH y CE mediante los métodos concretados en los apartados 3.2.3.3 y 3.2.3.4, para tener la seguridad de que no se iban a tener valores muy extremos, sobre todo en el caso de las CV-Z, cuyo contenido en cenizas podría suponer una alcalinidad importante. Se estudió la influencia de la naranja para contrarrestar el alto pH y CE de estas, obteniendo resultados favorables. Por otro lado, se podría suponer que la misma neutralización se iba dar con los lodos y la poda de ciprés.

Tabla 4.1: Caracterización de los distintos componentes del compost

	<b>Lodos</b>	<b>Poda de ciprés</b>	<b>CV-Z</b>	<b>Cáscaras de naranja</b>	<b>Compost</b>
<b>Humedad (%)</b>	74,20	12,63	9,90	77,57	53,49
<b>pH</b>	8,08	5,45	10,45	3,96	8,14
<b>CE (mS/cm)</b>	2,57	0,23	5,64	1,10	0,36

Como ya se ha comentado, los lodos presentan un alto contenido en metales pesados (tabla 4.5), en especial en Cinc, cuyo valor excede el permitido por el RD 506/2013. Las CV-Z son, en



general, el segundo componente que presenta mayor concentración, posiblemente debido a la fracción residual de ceniza volante que contiene. Este aspecto es muy negativo, ya que nos puede dificultar la valoración de la CV-Z como enmienda para retener metales.

En relación con el compost maduro utilizado presenta una concentración aceptable por el RD 506/2013, por el que alguno de los elementos le darían una clase A y otros clase B. Las cáscaras de naranjas y la poda de ciprés son las materias primas que menos trazas de elementos pesados contienen.

Tabla 4.2: Metales pesados en las materias primas

	Lodo	Poda de ciprés	Cáscaras de naranja	Compost	CVZ
<b>Cadmio (mg/kg)</b>	1,69	0,00	0,19	0,77	1,29
<b>Cobre (mg/kg)</b>	320,99	11,12	24,08	59,66	68,38
<b>Níquel (mg/kg)</b>	23,34	0,42	7,40	31,17	43,14
<b>Plomo (mg/kg)</b>	145,48	2,00	4,99	26,78	21,35
<b>Cinc (mg/kg)</b>	1336,17	20,93	90,73	159,73	90,33
<b>Mercurio (mg/kg)</b>	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
<b>Cromo (mg/kg)</b>	47,42	3,10	6,46	70,28	78,47

## 4.2. Control de la evolución del proceso de compostaje

El proceso de compostaje desarrollado en este proyecto tuvo lugar desde el día 20 de Mayo de 2015, hasta el día 15 de Julio de 2015, por lo que tuvo una duración de 57 días. Durante este periodo se llevaron a cabo varias tomas de muestras para el estudio de los principales parámetros y realizar las aireaciones periódicas (Tabla 4.2).

Tabla 4.3: Tomas de muestras y aireación

Parámetro	Control/Toma de muestras
<b>Aireación</b>	Aireación forzada: días 3 y 10 Volteos: 2º y 4º día de cada semana
<b>Temperatura</b>	A diario
<b>Humedad</b>	Semana 1, 3, 4 y 7
<b>pH y CE</b>	Semana 1, 4 y 7
<b>C y N, MOT y metales pesados</b>	Día 1 y día 57 (Inicio y fin)

#### **4.2.1 Temperatura, humedad y aireación.**

En la Figura 4.1.a se representa la evolución de la temperatura de los reactores C1, C2, C3 y C4 (ver apartado 3.1.3 Matriz de ensayos). La temperatura inicial de los reactores fue muy similar entre 36-39 °C. Como se puede observar el primer y segundo día se produce un incremento de temperatura en todos ellos, debido a que comienza la actividad de los microorganismos mesófilos. Sin embargo, es mayor el incremento en los reactores C3 y C4, que llegan a sobrepasar la temperatura de 45 °C. Este hecho posiblemente esté relacionado con la humedad de cada reactor, ya que estos son los que presentan una humedad menor del 65%, mientras que las de C1 y C2 son mayores (Figura 4.1.b), fuera del rango recomendado entre el 40 y 60%, y por tanto favoreciendo una posible la actividad anaerobia. Que los reactores C3 y C4, presenten menor humedad se puede deber fundamentalmente a que contienen una mayor cantidad de CV-Z, que como puede observarse en la Tabla 4.1, se trata de la materia prima con menor humedad (9,90 %), además de presentar propiedades higroscópicas.

A 15 días desde el comienzo de la inoculación, las temperaturas sufren un descenso, incluso por debajo de los 30 °C, para después volver a aumentar y estabilizarse a los 30 días de proceso, donde podría comenzar la fase de maduración.

En cuanto a la humedad, podemos ver como desciende hacia la zona óptima pasadas dos semanas, para luego volver a sufrir un aumento o estabilizarse, como en el caso de C4.

El caso de los reactores C5, C6, C7, C8 es prácticamente similar. Éstos siguen el mismo patrón que los anteriores (Figura 4.1.c y 4.1.d). Se produce un pequeño aumento de temperatura al inicio, aunque nunca se alcanzó el rango óptimo de 60-70 °C, seguido de un descenso pasados 15 días, y una estabilización a los 30 días. En cuanto a la humedad, se produce un descenso en las 2 primeras semanas, seguido de un aumento paulatino en el caso de C7, o de un aumento y descenso en el resto de los casos.

Cabe destacar el pico de máxima y de mínima temperatura de todos los reactores, se dio en el C7 alcanzando los 53 °C y los 25 °C respectivamente, y el brusco descenso de humedad del reactor C5.

Por otra parte, el grupo de reactores C9 a C12 (Figura 4.1.e y 4.1.f), presentan la media de humedad más elevada, ya que no sufren el acusado descenso del resto, posiblemente debido a que son los reactores con mayor cantidad de cáscara de naranja. Además, es destacable que el reactor C9, sufre el mayor incremento de temperatura, siendo el reactor con mayor humedad.

Respecto a la aireación, se ha de comentar que los reactores fueron aireados al final de las dos primeras semanas mediante aireación forzada, pasando después a volteos, en concreto 2 por

semana. Se decidió así, tras observar un descenso brusco de temperatura después de ser aireados forzosamente, pudiendo haber condicionado el hecho de no alcanzar la temperatura deseada en la fase termófila. Sin embargo, también puede haber sido el condicionante de los descensos de humedad, todos ellos favorables.

La circunstancia de no haber logrado temperaturas más elevadas, podría estar relacionado también con el pequeño tamaño de los reactores, ya que se favorecen unas mayores pérdidas por las paredes. Este hecho puede ser contrastado con el estudio de Eljaiek. y col., 2013, quienes usando reactores de similares dimensiones a los de este estudio obtuvieron perfiles de temperatura muy parecidos (Figura 4.2), no alcanzándose en ningún caso temperaturas superiores a 45 °C (53).

Por otro lado, es importante tener en cuenta que muchos de los reactores se han encontrado por encima del rango óptimo de humedad en algún momento, pudiendo provocar déficit de oxígeno. Sin embargo, en ninguna fase de la fermentación se han detectado malos olores, síntoma de anaerobiosis.

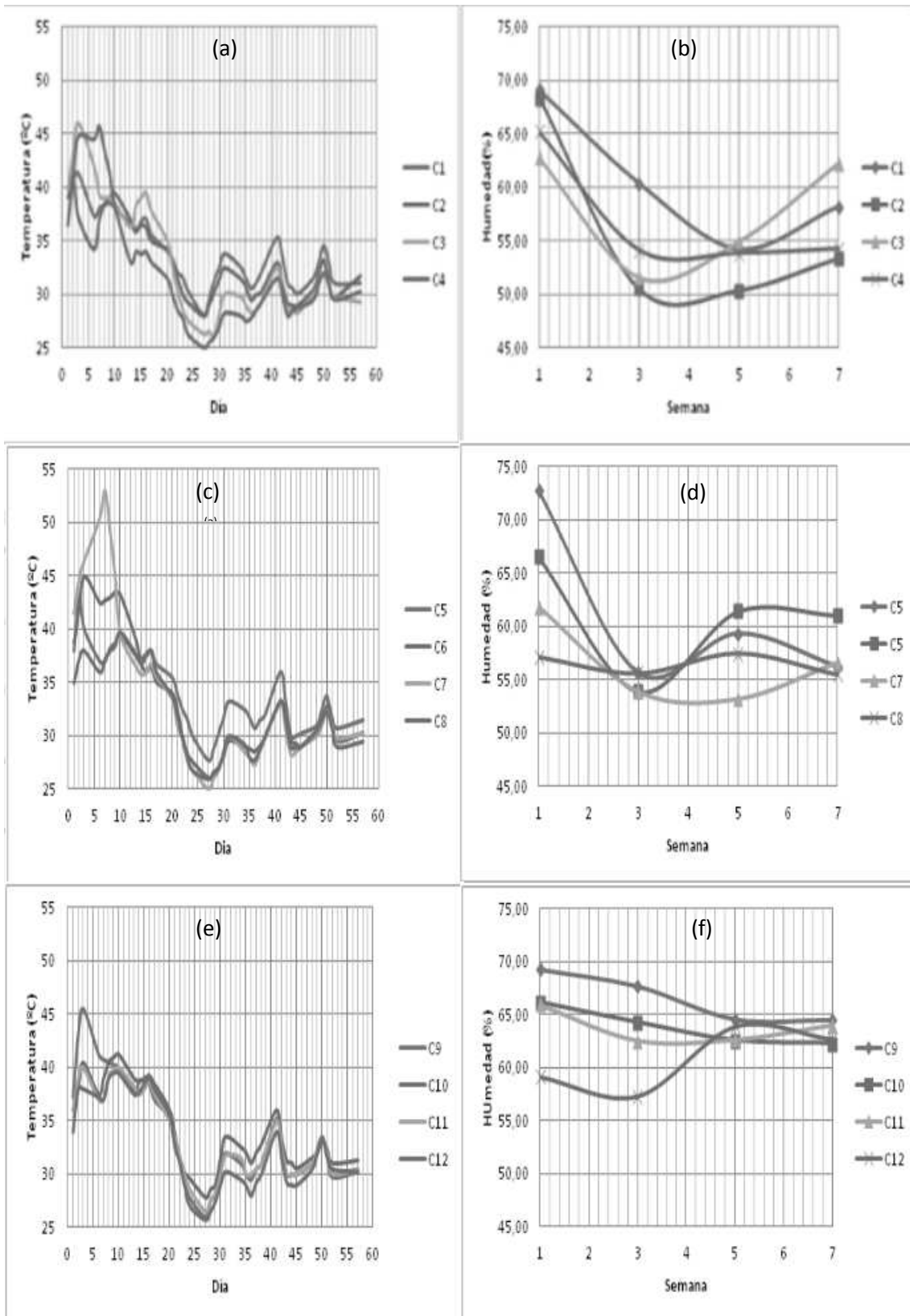


Figura 4.1: (a)Perfil de temperatura de los reactores C1 a C4; (b) Variación de la humedad de los reactores C1 a C4; (c)Perfil de temperatura de los reactores C5 a C8; (d) Variación de la humedad de los reactores C5 a C8; (e)Perfil de temperatura de los reactores

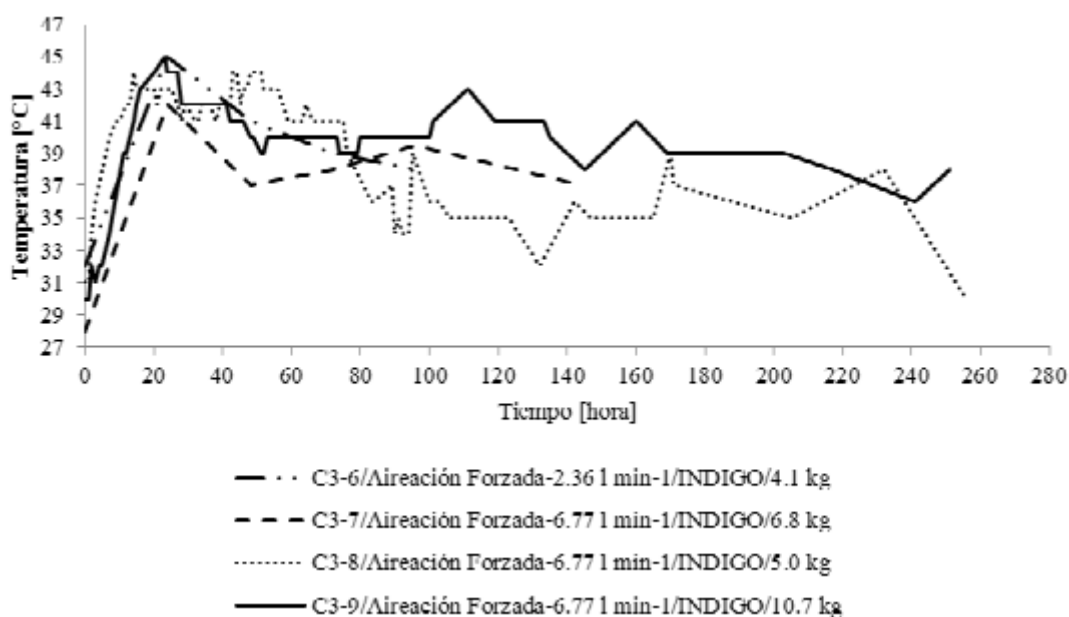


Figura 4.2: Perfiles de temperatura en el estudio de Eljaiek, y col., 2013.

#### 4.2.2. pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante el proceso de compostaje se tomaron tres muestras, en las semanas 1, 4 y 7. Los reactores con más CV-Z tienen un pH más elevado que los que tienen menor cantidad. A pesar de ello, todos los reactores mantienen un pH adecuado, encontrándose mayormente entre 7 y 8, y en la mayoría de los casos, presentando un aumento en las primeras semanas, para posteriormente sufrir una neutralización. (Figuras 4.3 a 4.5).

Según Suler y col (1977) un compostaje con la aireación apropiada conduce a productos finales con pH entre 7 y 8. Valores más bajos son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. Se ha de indicar también, que si el pH se mantiene por encima de 7,5 durante el proceso es síntoma de una buena descomposición (34). En este proyecto, los reactores con el 20% p/p de CV-Z (C4, C8, C12) se mantuvieron, en todo momento, por encima de este umbral.

Se ha de resaltar que en la semana 4, el pH de todos los reactores aumentó, excepto el de los reactores C1 y C2 que aún continuaron en descenso. Este hecho se debe, probablemente, a que estos dos son los que tienen mayor cantidad de materia orgánica y de carbono, por lo que, en este momento de control, podrían encontrarse generando ácidos orgánicos..

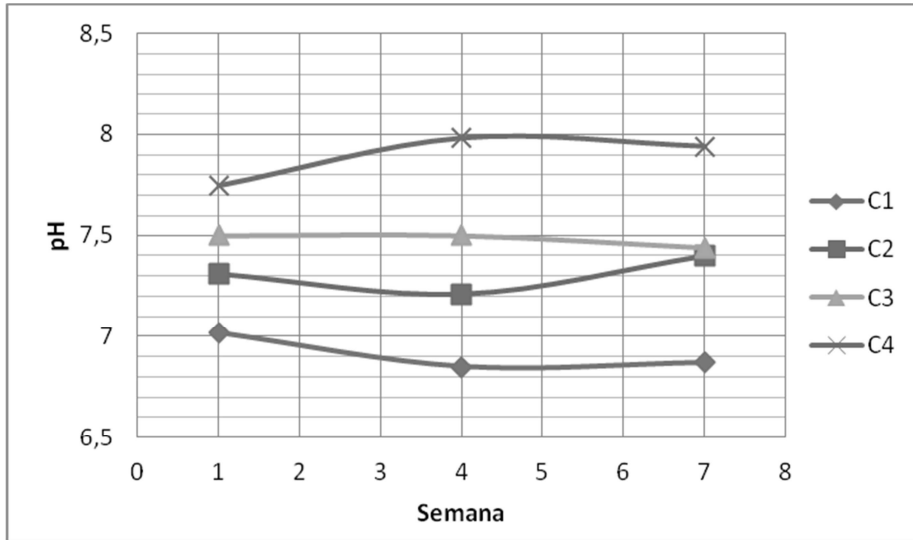


Figura 4.3: pH en los reactores C1 a C4

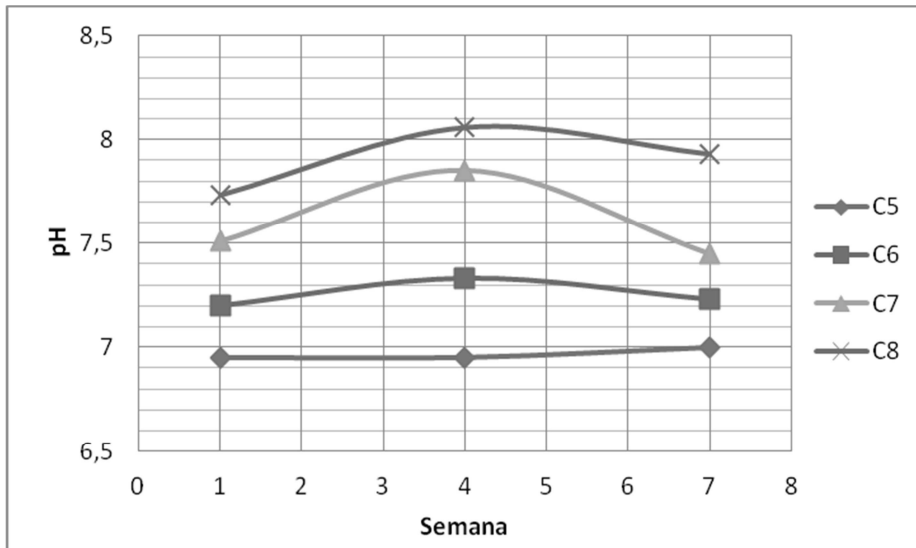


Figura 4.4: pH en los reactores C5 a C8

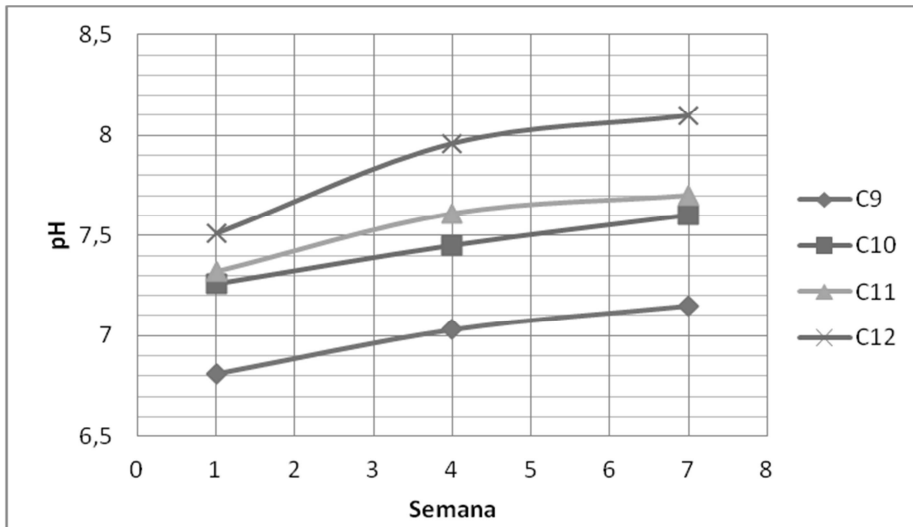


Figura 4.5: pH en los reactores C9 a C12

Con respecto a la CE, se produce una evolución similar a la del pH, presentando un valor superior los reactores con mayor cantidad de CV-Z (Figuras 4.6 a 4.8). Además, los reactores C3, C4, C7, C8, C12 están por encima del valor 3,5 mS/cm, considerado ligeramente elevado para la mayoría de las plantas. Mientras que el resto tienen un valor satisfactorio para la mayoría de las plantas, según la interpretación de los niveles de salinidad de un sustrato expresada como CE del extracto de saturación (54). El hecho de que la CE aumente durante el compostaje, ya ha sido descrito por otros autores (55) (56), con aumentos más acusados en las primeras semanas, donde la degradación de la materia orgánica es mayor.

El reactor C7 presenta el mayor incremento de pH y CE durante las semanas posteriores a la etapa termofílica debido probablemente a la generación de amoníaco por la descomposición de las proteínas durante esta etapa.

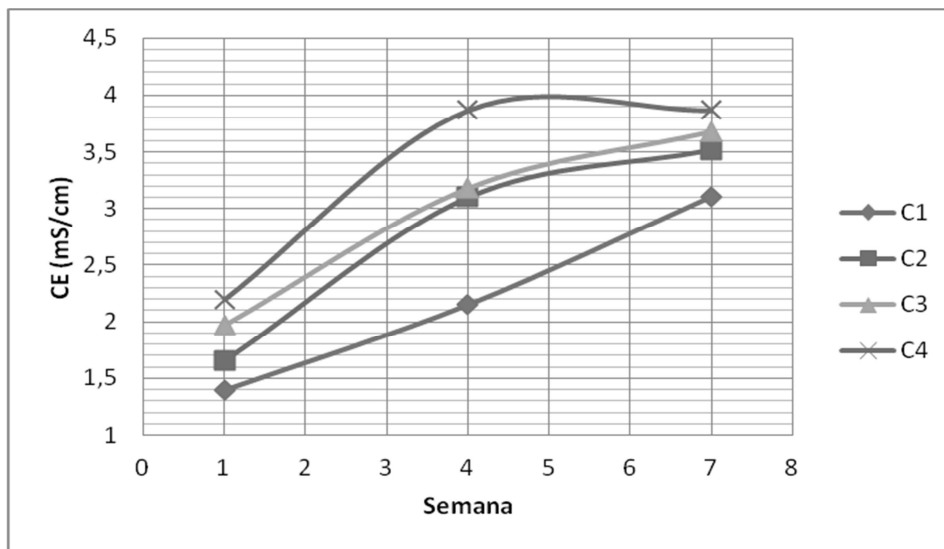


Figura 4.6: CE en los reactores C1 a C4

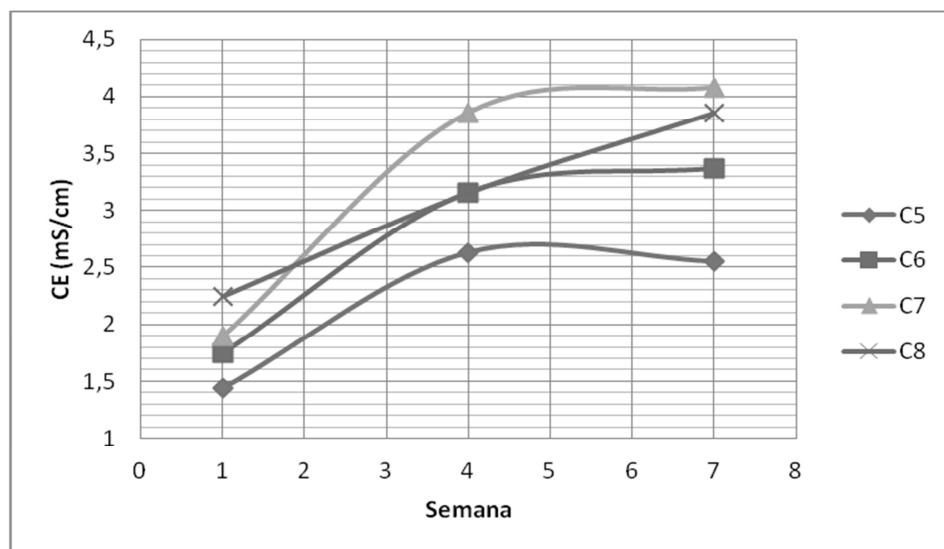


Figura 4.7: CE en los reactores C5 a C8

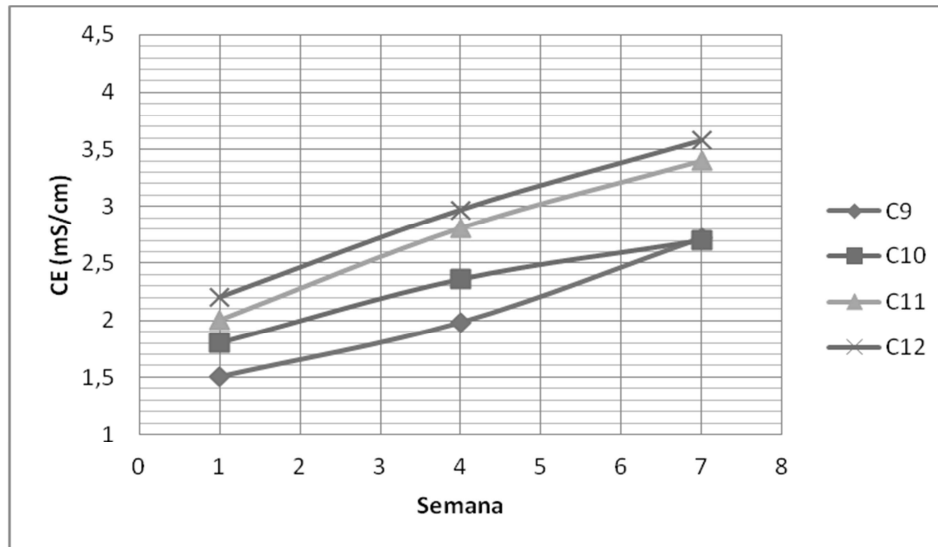


Figura 4.8: CE en los reactores C9 a C12

#### 4.2.3. Materia Orgánica Total (MOT)

Las pérdidas de materia orgánica, debidas a la conversión en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, durante del proceso pueden llegar a alcanzar un 20 % de la masa total. En este trabajo, este valor no se alcanza en ninguno de los reactores, presentando C7, C10 y C11 las mayores pérdidas. (Tabla 4.3).

Cabe destacar, que los reactores con un 10% de CV-Z (C3, C7, C11) presenta una degradación de la materia orgánica bastante elevada con respecto al resto. En especial, el reactor C7 es el que ha presentado una etapa termofílica mas duradera (7 días).

Tabla 4.4: MOT en los reactores

	% MOT INICIAL	% MOT FINAL	Perdida MOT (%)
<b>C1</b>	83,22	69,66	13,56
<b>C2</b>	69,79	59,72	10,07
<b>C3</b>	67,15	53,70	13,45
<b>C4</b>	53,20	48,17	5,03
<b>C5</b>	76,03	64,06	11,97
<b>C6</b>	68,18	60,88	7,30
<b>C7</b>	65,45	50,13	15,32
<b>C8</b>	50,97	47,90	3,07
<b>C9</b>	71,87	66,29	5,58
<b>C10</b>	69,15	54,27	14,88
<b>C11</b>	66,59	49,31	17,28
<b>C12</b>	52,62	42,68	9,94



#### 4.2.4. Carbono total y nitrógeno total

La relación C/N ideal de partida se encuentra en el intervalo 25-35, sin embargo, nuestros reactores presentan una relación bastante baja con respecto a este óptimo (57). Se puede observar, como esta relación es menor cuanto menos cantidad de poda de ciprés tienen los reactores (por tanto más CVZ), y cuanto más cantidad de naranja contienen.

Como la relación C/N inicial es baja el compostaje se lleva con mayor rapidez, pero se puede producir una excesiva pérdida de N lo que conlleva un derroche de un nutriente valioso en el compost, y una emisión de amoníaco a la atmósfera. Es posible que esta producción de amoníaco se haya dado en los reactores, ya que como se ha visto en el apartado 4.2.3, se ha sufrido un incremento del pH y la CE, y que este amoníaco haya sido retenido por la CVZ, justificando entonces los posteriores descensos en estos parámetros, y la similitud, en general, de los porcentajes de Nitrógeno final e inicial (39) (60) (61) (62)

Tabla 4.5: Relación C/N inicial en los reactores

	<b>Carbono Inicial</b> (%) <sub>BASE SECA</sub>	<b>Nitrógeno Inicial</b> (%) <sub>BASE SECA</sub>	<b>C/N Inicial</b>	<b>Carbono Final</b> (%) <sub>BASE SECA</sub>	<b>Nitrógeno Final</b> (%) <sub>BASE SECA</sub>	<b>C/N Final</b>
<b>C1</b>	41,48	2,89	14,35	37,32	3,15	11,85
<b>C2</b>	28,29	2,59	10,92	28,12	2,58	10,90
<b>C3</b>	26,18	2,21	11,85	26,13	2,27	11,51
<b>C4</b>	16,4	1,91	8,59	22,02	1,92	11,47
<b>C5</b>	41,18	2,9	14,20	35,61	3,36	10,60
<b>C6</b>	25,6	2,52	10,16	30,07	2,85	10,55
<b>C7</b>	27,7	2,39	11,59	25,7	2,28	11,27
<b>C8</b>	16,07	1,88	8,55	20,99	1,88	11,16
<b>C9</b>	28,27	3,2	8,83	35,41	3,17	11,17
<b>C10</b>	24,4	2,79	8,75	29,71	2,51	11,84
<b>C11</b>	17,54	1,96	8,95	23,49	2,07	11,35
<b>C12</b>	13,92	1,65	8,44	17	1,66	10,24

Un aspecto a destacar, es el aumento de carbono producido, sobre todo en los reactores que contienen menor cantidad de poda. Este hecho se puede deber a que al contener estos mayor

porcentaje en carbono fácilmente biodegradable, la segunda toma de muestras ha contenido mayor cantidad del componente con el carbono menos asimilable (poda), que además tiene un contenido de carbono total mayor que el resto de materias primas.

#### **4.2.5. Metales pesados**

La concentración en metales de los reactores ha aumentado en la mayoría de los casos (Tabla 4.6). A continuación, se van a mostrar los resultados más interesantes:

- Con respecto al Cadmio, en general, la concentración inicial es superior cuanto mayor es la cantidad de CV-Z. Cabe destacar, que se da un aumento en todos los reactores, excepto en los reactores que presentan mayor concentración inicial (C4, C8 y C10), donde disminuye.
- Los reactores presentan una disminución en la concentración final de Cobre, Plomo, Cinc con la cantidad de CV-Z.
- No se obtienen valores de concentración de mercurio, pero esta se encuentra por debajo de 5 mg/kg en todos los reactores.
- Son C4 y C8 los que mejores resultados presentan, dos de los reactores con mayor contenido en CV-Z. En especial, el reactor C4, que muestra una reducción en la concentración de Pb, Cu, Cd y Zn.

Zorapas y col. (2000) obtuvo que Pb, Cd, Zn, y Mn eran los metales que más eran retenidos por la zeolita natural (clinoptilolita), y en nuestro caso, es con dos de estos metales, Pb y Zn, con los que mejores resultados se han obtenido. (58)

También Zorapas y col.(2009) y Mohammad Koushifar y col.(2011) con clinoptilolita demostraron una muy eficaz retención de Cd en el compostaje de lodos (59). Por nuestra parte, el Cd ha sido uno de los metales que ha mostrado reducción en los reactores que más cantidad de CV-Z contenían.

Con respecto los límites en metales pesados establecidos en el RD 506/2013, solo C4, C8 y C12, entrarían dentro de la clase B, el resto correspondería a una clase C, sin embargo, el compost aún se encuentra en fase de maduración. Si tenemos en cuenta los límites propuestos por el informe FdR, los reactores C2,C4,C7 y C8 los cumplirían.

Tabla 4.6: Concentración de metales pesados en los reactores

		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12
Cadmio (mg/ kg)	Inicial	0,39	0,57	0,71	0,87	0,50	0,60	0,56	1,34	0,54	0,85	0,60	0,82
	Final	0,57	0,99	2,99	0,82	0,79	0,85	1,18	1,09	0,78	0,80	0,91	1,05
Cobre (mg/ kg)	Inicial	118,89	140,12	181,09	127,99	162,98	151,09	120,94	123,12	133,98	121,72	103,02	130,34
	Final	157,39	140,84	122,88	115,11	187,03	166,06	154,45	136,11	179,34	169,44	130,87	133,95
Niquel (mg/ kg)	Inicial	9,32	18,42	16,42	29,38	14,41	19,41	20,39	30,41	23,05	26,33	56,17	30,23
	Final	45,20	26,36	78,25	36,10	39,36	73,38	42,23	35,41	22,32	33,28	98,25	59,89
Plomo (mg/ kg)	Inicial	52,44	59,99	75,98	49,99	71,92	61,98	51,91	54,99	59,04	51,78	40,38	50,69
	Final	62,70	56,88	47,89	42,62	80,95	68,97	60,73	51,98	83,62	72,69	53,89	60,43
Cinc (mg/ kg)	Inicial	495,73	560,87	710,84	450,44	670,31	590,75	480,17	430,90	601,24	509,20	423,98	487,96
	Final	627,97	579,71	569,73	437,05	750,53	640,66	538,56	490,84	727,71	678,14	519,89	476,74
Mercurio (mg/ kg)	Inicial	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
	Final	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Cromo (mg/ kg)	Inicial	20,45	35,81	36,54	59,71	36,56	43,12	41,41	59,47	37,30	42,84	75,04	55,09
	Final	82,19	55,81	63,90	66,64	93,28	167,44	64,56	60,53	49,20	58,60	106,42	110,50

#### 4.2.6. Aspecto físico

El compost final presenta un olor característico similar al de la “tierra húmeda”, este factor es importante, ya que ese olor es producido por la excreción de geosima, metabolito secundario producido por actinomicetos mesófilos que predominan en la fase de maduración.

El color que presenta es pardo oscuro, en reactores con mayor contenido en CVZ, mientras que los que tienen menor contenido presentan un color casi negro.

La granulometría es mayor en el caso de los reactores con mayor contenido en poda, ya que la degradación no ha llegado a fragmentarla. A continuación, se muestra el aspecto que tienen tres de los reactores al principio y al final del proceso.

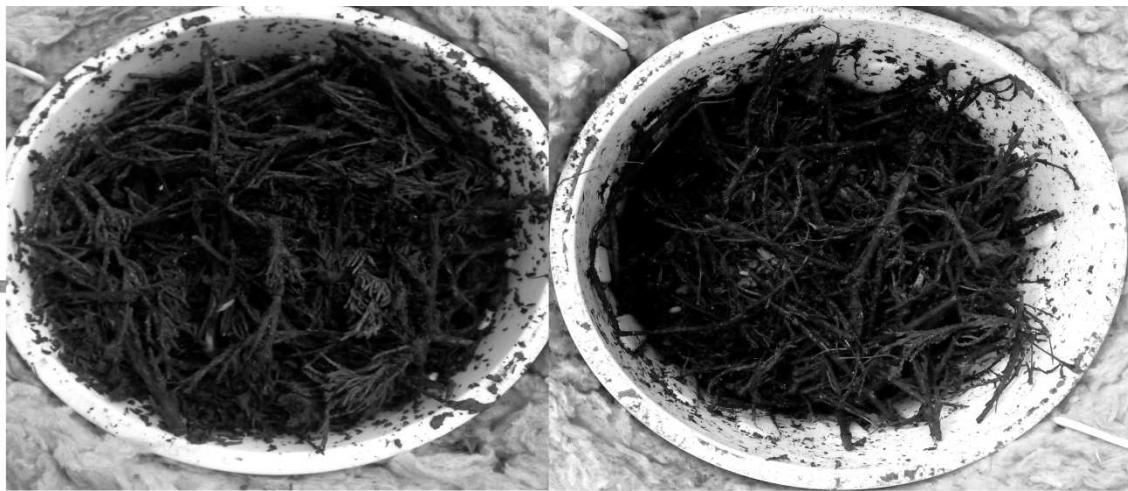


Figura 4.9: Aspecto del reactor C1 al principio y al final del proceso



Figura 4.10: Aspecto del reactor C8 al principio y al final del proceso

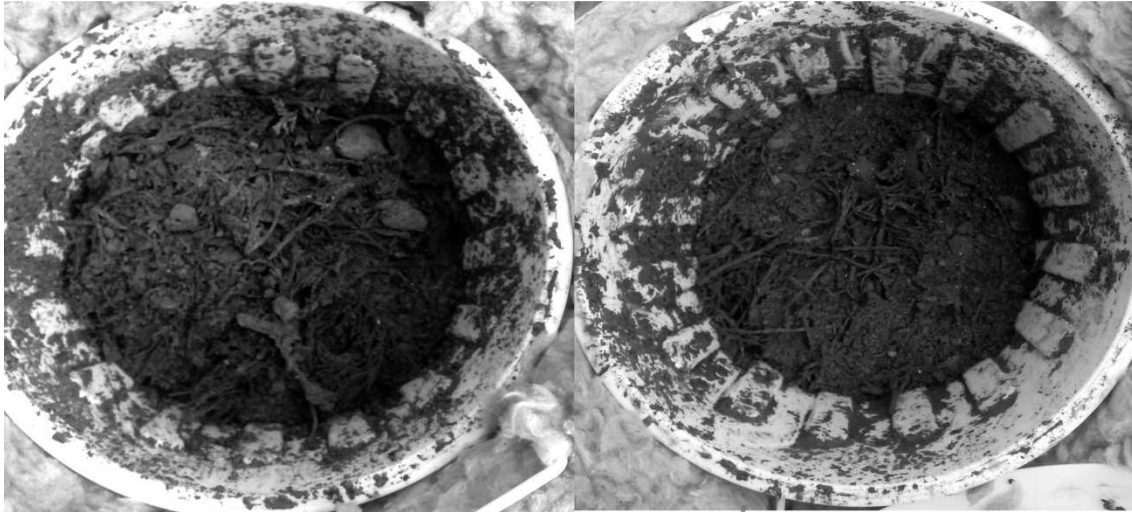


Figura 4.11: Aspecto del reactor C11 al principio y al final del proceso

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

Según los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se ha llegado a unas conclusiones que se detallan a continuación:

- El compostaje en reactores de pequeño tamaño, a pesar del aislamiento, no consigue el autocalentamiento necesario para higienizar el compost.
- La humedad recomendada por el RD 506/2013 es del 40%. Ninguno de nuestros reactores tienen esta humedad, sin embargo, esto se puede conseguir con un secado una vez finalizada la maduración.
- La adición de CVZ ha propiciado que, en la mayoría de los casos, los parámetros de humedad y pH se sitúen más cercanos los valores óptimos. También propicia un mayor aumento de la CE, generando un compost con una salinidad ligeramente elevada. Este aspecto no tiene porque ser negativo, ya que la salinidad correcta para un compost dependerá del suelo donde va a ser usado y la proporción en la que va a ser aplicado.
- La idea de usar la cáscara de naranja como neutralizador en el caso de los reactores con CVZ ha sido acertada, ya que, los ha situado mas cerca del pH óptimo de 7,5. Sin embargo, no es recomendable la adición de cáscara de naranja sin la presencia de este componente con elevado pH, ya que si se añadiera sola haría descender el pH por debajo de 7.
- Un mayor porcentaje de cáscara de naranja en lugar de poda, hace disminuir la relación C/N inicial con los consiguientes problemas. Además, los parámetros de temperatura, humedad y, sobre todo, pH y CE, presentan una evolución con menos altibajos, con aumentos o descensos paulatinos. Posiblemente, este hecho se deba a que la cáscara de naranja contenga componentes con un Carbono más difícil de degradar (limoneno).
- La relación final C/N está entre 10 y 12, por tanto, debajo de 20 que el límite que establece el RD 506/2013, y entorno a 10, que es la relación que indica un óptimo grado de madurez.
- El contenido en MOT final se encuentra lejos del 35 %, porcentaje ideal según en RD 506/2013, sin embargo, se ha de tener en cuenta que la poda de ciprés y la cáscara de naranja contienen gran cantidad de lignina, compuesto muy poco biodegradable, por lo que el proceso, en concreto la fase de maduración, se podría alargar algunas semanas más.
- En cuanto al contenido de metales, en el estado final de este trabajo se puede concluir que, a pesar de no haber conseguido los resultados de retención deseados, ninguno de los compost obtenidos se encuentra fuera de los límites máximos recogidos en el RD 506/2013, aunque habrá que tener en cuenta las dosis que se aplican en caso de ser utilizados en suelo agrícola.

Como ya se ha comentado, el proceso de compostaje de los reactores empleados en este trabajo aún se encuentra en fase de maduración, por lo que los resultados finales ,podrán diferir de los actuales. De este modo, pueden ser objeto de trabajos posteriores:

- La caracterización del compost a la finalización de la maduración, así como los tratamientos y acondicionamientos para una posible puesta en el mercado.
- El estudio de las características biológicas de este compost, como el análisis de grupos de microorganismos, tests de germinación, así como del estudio de su utilización como enmienda de sustrato de cultivo o en otra de sus aplicaciones.
- Así mismo, las conclusiones establecidas en este trabajo, pueden servir de guía para estudios posteriores del proceso de compostaje. Como se ha visto, son numerosos los parámetros que influyen en este proceso y que pueden ser analizados.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---

1. SHARMA, V. K.; CANDITELLI, M.; FORTUNA, F and CORNACCHIA, G. "Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: Review". *Energy Conversion and Management*. 1977, Vol. 38, p. 453-478.
2. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. BOE, 2013. 164, p. 51119 a 51207.
3. SOLIVA, Montserrat; LÓPEZ, Marga; HUERTA, Óscar. "Pasado, Presente Y Futuro Del Compost". II International Conference on Soil and Compost Eco-Biology. Puerto de la Cruz, Tenerife, 2008.
4. SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; ROIG, A.; PAREDES, C.; BERNAL, M. P. "Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures". *Bioresource Technology*, 2001, Vol. 78, p. 301-308.
5. *Amigos de la Tierra. Área Residuos*. <http://www.compostaenred.org>. [En línea] [http://www.compostaenred.org/documentacion/Manuales/6Manual\\_Compostaje\\_AdT.pdf](http://www.compostaenred.org/documentacion/Manuales/6Manual_Compostaje_AdT.pdf).
6. LAICH, Federico. "El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje". Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo. Experiencias de fertilización orgánica en platanera. 2011.
7. BUENO MÁRQUEZ, Pedro; DÍAZ BLANCO, Manuel Jesús y CABRERA CAPITÁN, Francisco. "Factores que afectan al proceso de Compostaje". *El proceso de compostaje*. 4. 2008. p. 93-109.
8. BRECK, W. "Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use". 1974.
9. TURRO, Nicholas J.; HAN, Nianhe; LEI, Xue-gong; FEHLNER, James R.; ABRAMS, Lloyd. "Mechanism of Dichlorination of n-Dodecane and Chlorination of 1-Chlorododecane Adsorbed on ZSM-5 Zeolite Molecular Sieves. A Supramolecular Structural Interpretation". *Journal of the American Chemical Society*. 1995, Vol. 117, p. 4881-4893.
10. CHICA TORO, Fáber de Jesús. "Evaluación de la adición de zeolitas al suelo como factor para mitigar la contaminación producto de la fertilización agrícola". *Producción + Limpia*. 2008, 1, Vol. 3, p. 7-24.
11. BARRER, Richard. "Hydrothermal chemistry of zeolites". *Academic Press*. 1982. p. 360.
12. FLEISCHER, Michael; MANDARINO, J.A. "Glossary of Mineral Species". *Mineralogical Record*. 1991, 6, p. 256.
13. ÁLVARO, Mercedes; GARCÍA, Hermenegildo; GARCÍA, Sara; MÁRQUEZ, Francisco; SCAIANO, J. C. "Intrazeolite Photochemistry. 16. Fluorescence of Methylviologen Adsorbed within Medium- and Large-Pore Zeolites". *The Journal of Physical Chemistry*. 1996, Vol. 100, p. 18173-18176.



14. SCOTT, Jeanette. *Zeolite technology and applications : recent advances*. Park Ridge, N.J. : Noyes Data Corp., 1980.
15. MAGGTORE, R. "Zeolites, Uses and Perspectives". *La Chimica e l'Industria*. Vol. 67. 1985, p. 349-359.
16. PUPPE, Lothar. "Zeolites-Proprieties and Technical Applications". *Chemie in unserer Zeit*, Vol. 20. 1986, p. 117-127.
17. KIRK, R.E. and OTHMER, D.F. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 6. John Wiley and Sons, Inc, 1991. p. 2240.
18. GATES, Bruce C. *Catalytic Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc , 1992. p. 480.
19. HOLDEIRISH, W. y GALLEI, E. "Industrial Uses in Petrochemical Process. *Chem. Ing. Tech.*, Vol. 56. 1984, p. 908-915.
20. CHEN, N.Y. Y DEGNAN, T.F. "Industrial Catalytic Applications of Zeolites". *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 84. 1988, p. 32-41.
21. TRIMM, D.L. *Catalysts in Petroleum Refining* . ELSEVIER, 1990.
22. DYER, A. *An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*. John Wiley & Sons, 1988. p. 149.
23. CEJKA, Jiri; VAN BEKKUM, Herman; CORMA, A.; SCHUETH, F. *Introduction to Zeolite science and practice*. Elsevier Science. p. 754.
24. HOLLER, H. y WIRSCHING, U. "Zeolite Formation from Fly Ash". *Fortschritte der Mineralogie*, Vol. 63. 1985, p. 21-43.
25. KATO, Y.; KAKIMOTO, K.; OGAWA, H.; TOMARI, M. "Application of Hydrothermally Crystallized Coal Ash for Wastewater Treatment". *Kogyo Yosui*, Vol. 338. 1986, p. 37-45.
26. BERGK, K.H.; PORSCHE, M. y DREWS, J. "Conversion of solid primary and recycled raw materials to zeolite-containing products. Part VI. Continuous manufacture of zeolite A-containing products". *J. Chem. Tech.*, Vol. 39. 1987, p. 308-310.
27. MONDRAGÓN, F.; RINCÓN, F.; SIERRA, L.; ESCOBAR, C.; RAMÍREZ, J. y FERNÁNDEZ, J. "New perspectives for coal ash utilization: synthesis of zeolitic materials". *Fuel*, Vol. 69. 1990, p. 263-266.
28. LAROSA, J.L.; KWAN, S. y GRUTZECK, M.W. "Zeolite Formation in Class F Fly Ash Blended Cement Pastes". *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 75. 1992, p. 1574-1580.
29. SHIGEMOTO, N.; SHIRAKAMI, S.; HIRANO, S. y HAYASHI, H. "Preparation and Characterisation of Zeolites From Coal Ash". *Nippon Kagaku Kaishi*, Vol. 5. 1992, p. 484-492.
30. KOLOUSEK, D.; SEIDL, V.; PROCHAZKOVA, E.; OBSASNIKOVA, J.; KUBELKOVA, L. y SVETLIK, I. "Ecological Utilization of Power-Plant Fly Ashes by Their Alteration to Phillipsite: Hydrothermal Alteration, Application". *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, Vols. 1-2. 1993, p. 167-178.

31. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE, 1990. 292, p. 32339 a 32340.
32. RED ESPAÑOLA DE COMPOSTAJE. "Residuos urbanos". En: De Residuo a Recurso, El Camino hacia la Sostenibilidad. Mundi Prensa, 2015, Vol. 1, 4, p. 356.
33. CUADROS, Santos. Compostaje y Biometanización. *EOI*. [En línea] 2010. <a href='http://www.eoi.es/savia/documento/eoi-45609/compostaje-y-biometanizacion'><img src='http://api.eoi.es/api\_v1\_dev.php/fedora/asset/eoi:45609/componente45608.gif' /></a>.
34. SULER, D.J.; FINSTEIN, S. "Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO<sub>2</sub> Formation in Bench-Scale, Continuously Thermophilic Composting of Solid Waste". *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 33. 2, 1977, p. 345-350.
35. KIEHL, F.J. *Fertilizantes orgánicos*. Editora Agronômica Ceres Ltda, 1985. p. 492.
36. ZUCCONI, F.; DE BERTOLDI, M. "Specifications for solid waste compost". *Biocycle*, Vol. 28. 5-6, 1987, p. 56-61.
37. TOMATI, U.; MADEJON, E.; GALLI, E. "Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability". *Compost Sci. Util.*, Vol. 8. 2, 2000, p. 108-115.
38. CASTALDI, P.; ALBERTI, G.; MERELLA, R.; MELIS, P. "Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity". *Waste Manag.*, Vol. 25. 2005, p. 209-213.
39. JHORAR, B.S.; PHOGAT, V.; MALIK E. "Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment". *Arid Soil Rest. Rehabil*, Vol. 5. 1991, p. 297-306.
40. MUSTIN, M. *Le compost. Gestion de la matière organique*. Paris : François Dubusc. , 1987. p. 954.
41. DE BERTOLDI, M.; GRAPELLI, A.; GUIDI, A. Guida alla utilizzazione in agricoltura dei fanghi, derivante dai trattamenti biologici delle acque di scarico urbane. Roma: Collana del progetto finalizzato Promozione della qualità dell'ambiente. [Consiglio Nazionale delle Ricerche]. 1982.
42. ÁLVAREZ, José M. *Manual de Compostaje para la Agricultura Ecológica*. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía. p. 47.
43. WILLSON, G. B.; PARR, J. F.; EPSTEIN, E.; MARSH, P. B.; CHANEY, R. L.; COLACCICO, D.; BURGE, W. D.; SIKORA, L. J.; TESTER, C. F.; HORNICK, S. *Manual for composting sewage sludge by the Beltsville aerated-pile method*. Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. p. 65.
44. GORE™. [En línea]  
[http://www.gore.com/en\\_xx/products/fabrics/swt/gore\\_cover\\_complete\\_system.html](http://www.gore.com/en_xx/products/fabrics/swt/gore_cover_complete_system.html).

45. RICHARD, THOMAS L.; RYNK, ROBERT. "Sistemas de producción comercial de compost". En: KAHN, BRIAN A.; STOFFELLA, PETER J. Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola. Mundi Prensa Libros S.A., 2005, p. 51-94.
46. Ohio University. *Office of Sustainability*. [En línea]  
<https://www.ohio.edu/sustainability/programs/compost.cfm>.
47. NEGRO, M.J.; VILLA, F.; AIBAR, J.; ALARCÓN, R.; CIRIA, P.; CRISTÓBAL, M.V.; DE BENITO, A.; GARCÍA MARTÍN, A.; GARCÍA MURIEDAS, G.; LABRADOR, C.; LACASTA, C.; LEZAÚN, J.A.; MECO, R.; PARDO, G.; SOLANO, M.L.; TORNER, C.; ZARAGOZA, C. *Producción Y Gestión Del Compost*. (CCMA) Artículos. 2000, p. 31.
48. SAÑA, J. Y SOLIVA, M. "El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones". En: DIPUTACIÓ DE BARCELONA. SERVEI DE MEDI AMBIENT. Quaderns d'ecologia aplicada. Barcelona . 1987, 11.
49. CHICA, ARTURO; GARCÍA, JOSÉ LUIS. "Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje". En: MORAL, RAÚL y MORENO, JOAQUÍN. Compostaje. Mundi Prensa Libros S.A., 2008, p. 141-164.
50. *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals* . Joint Research Centre, European Commission. 2014.
51. *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Gobierno de España. 2009.
52. MORENO, NATÀLIA. "Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales". [Tesis Doctoral]. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals, 2002.
53. ELJAIK, Mónica; SAN JUAN, Jorge; TORRENTE, Bernardo." Influencia de la configuración del material aislante de reactores a escala laboratorio en el proceso de compostaje de residuos orgánico". En: VSIR-REDIS. Hacia un sistema de gestión integral de los residuos sólidos. 2013.
54. BUNT, A.C. *Media and mixes for container-grown plants*. Unwin Hyman Ltd, 1988. p. 309.
55. SOLIVA, M. Compostaje de materiales orgánicos para su uso como sustrato. *Curso Superior de Especialización "Cultivos sin Suelo II"*. 1999.
56. TAM, S.M. y TIQUIA, N.F.Y. "Co-composting of spent pig litter and sludge with forced-aeration". *Bioresource Technology* , Vol. 72. 2000, p. 1-7.
57. JHORAR, B.S.; PHOGAT, V.; MALIK, E. "Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment". *Arid Soil Rest. Rehabil*, Vol. 5. 1991, p. 297-306.
58. ZORPAS, ANTONIS A. "Heavy metals leachability before, during and after composting of sewage sludge with natural clinoptilolite. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 8. 1-3, 2009 p. 256-262.

59. KOUSHAFAR, Mohammad; HOSSEIN, Amir; AGHILI, Forough. "Natural Zeolite Reduces Salinity and Heavy Metal Availability of Compost Produced from Sewage Sludge-rose Residue Mixture". *Journal of Residuals Science & Technology*, Vol. 8. 1, 2011, p. 9-14.
60. GOLUEKE, C.G., DIAZ, L.F. "Composting and the Limiting Factors Principle". *Biocycle*, Vol. 28. 4, 1987, p. 22-25.
61. HEDEGAARD, M., KRÜGER, I. "Composting of agricultural wastes in Denmark in respect of potential, industrial process technology and environmental considerations". En: DE BERTOLDI, M.; SEQUI, P.; LEMMES, B., PAPI, T. *The Science of Composting*, Vol. 1, 1996, pp. 691-697.
62. ZHU, N.W. "Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system". *Biores. Technol.* Vol. 97. 15, 2006, pp. 1870-1875.
63. UNE-EN ISO 3696:1996. "Agua para uso en análisis de laboratorio. Especificación y métodos de ensayo".
64. UNE-EN 15104 : 2011. "Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales".



