

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2021-2022

Gestión del residuo orgánico de la
Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG)
y caracterización del compost producido

Alumno/Alumna: Laila Essamari

Directores: Junkal Gutierrez y Gorka Gallastegui

RESUMEN

En el año 2017, una experiencia piloto financiada por la Dirección de Sostenibilidad estimó que en la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG) se generó una cantidad de biorresiduos de aproximadamente 0.45 kg/hab/año.

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) enmarcado en la 4ª edición del programa Campus Bizia Lab dentro del proyecto titulado “#SOSustainability: a composter in the cloud to nourish the Earth”, tiene como objetivo la autogestión de dichos residuos orgánicos generados en la cafetería de la EIVG mediante su valorización como compost, así como la caracterización físico-química de este producto final.

La instalación de una compostadora monitorizada automáticamente en la EIVG permite dar los primeros pasos hacia una economía circular donde el término residuo no tiene cabida, objetivo “residuo 0”.

Asimismo, se promueve la sensibilización de los usuarios del Centro sobre la importancia de la gestión de los residuos. La presencia de la zona de compostaje en un lugar visible y frecuentado de la propia EIVG pretende modificar los malos hábitos de los usuarios del Centro en cuanto a la gestión de residuos se refiere, acercando el proceso de valorización de los residuos orgánicos y contribuyendo así a desechar los prejuicios que rodean el compostaje (dificultad, malos olores, proliferación de insectos, etc.).

Palabras clave: CBL, EIVG, residuos orgánicos, compost km 0.

ABSTRACT

In 2017, a pilot experience funded by the Sustainability Directorate estimated that the Faculty of Engineering Vitoria-Gasteiz (EIVG) generated up to 0.45 kg of biowaste per person per year.

This Final Degree Project (TFG) is part of the project entitled "#SOStainability: a composter in the cloud to nourish the Earth", which is framed within the 4th edition of the Campus Bizia Lab program, and it is devoted to the self-management of this organic waste generated in the cafe of the EIVG through its valorization by composting process, as well as the physico-chemical characterization of the final product.

The installation of an automatically monitored composter in the EIVG makes it possible to take the first steps towards a circular economy where the term waste has no place, in other words, to achieve the “zero waste” objective.

Likewise, the public awareness about the importance of waste management is promoted. The presence of the composting area in a visible place frequented by the users of the Faculty aims to change their poor behavior in terms of waste management, bringing the valorization process of organic waste closer and thus contributing to overcome the prejudices that surround the composting process (difficulty, bad smells, proliferation of insects, etc.).

Keywords: CBL, EIVG, organic waste, compost km 0.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Residuos sólidos urbanos: un grave problema ambiental	1
1.2. Marco normativo y estratégico sobre la gestión de los residuos	2
1.2.1. Jerarquía de residuos	2
1.2.2. Normativas europeas	3
1.2.3. Normativas estatales	4
1.2.4. Normativas autonómicas	6
1.3. Generación y gestión de residuos sólidos urbanos en Europa, España y País Vasco	6
1.3.1. Europa	6
1.3.2. España	7
1.3.3. Comunidad Autónoma del País Vasco	10
1.3.4. Residuos sólidos urbanos en Vitoria-Gasteiz	12
2. CONTEXTO	14
2.1. Agenda 2030	14
2.2. Campus Bizia lab	16
2.3. #SOSustainability: a composter in the cloud to nourish the Earth	16
3. OBJETIVOS	18
4. CRONOGRAMA	18
5. INTRODUCCIÓN AL COMPOSTAJE	20
5.1. Tipos de compostaje	20
5.1.1. Modo	20
5.1.2. Escala	22
5.2. Marco normativo	24
5.3. Componentes del compostaje	25
5.4. Fases del compostaje	26
5.5. Parámetros de control	28
5.5.1. Parámetros referentes al proceso de adición	28
5.5.2. Parámetros referentes al proceso de compostaje	29
5.6. Mantenimiento del proceso de compostaje	31
5.7. Biodiversidad durante el proceso de compostaje	33
5.8. Potenciales incidencias y soluciones	34
5.9. Caracterización y análisis de la calidad del compost	36
5.10. Aplicaciones del compost	38
6. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA EIVG	39
6.1. Descripción de los residuos orgánicos	39

6.2. Descripción de la zona de compostaje.....	40
6.2.1. Localización	40
6.2.2. Características de las compostadoras.....	40
6.3. Calendario de recogida y gestión de los residuos orgánicos.....	41
6.4. Especificación del proceso de compostaje	43
6.4.1. Ratios de los componentes de la mezcla compostada	43
6.4.2. Proceso de adición de los materiales	43
6.4.3. Mantenimiento	44
6.5. Parámetros de control	46
6.5.1. Automatización de la medición de los parámetros de control	47
6.5.2. Biodiversidad	49
6.5.3. Compresión y compactación	50
6.6. Caracterización del compost	50
6.6.1. Humedad	51
6.6.2. pH.....	51
6.6.3. Conductividad eléctrica.....	52
6.6.4. Composición química.....	52
6.6.5. Índice de germinación.....	54
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
7.1. Proceso de compostaje	56
7.1.1. Temperatura	56
7.1.2. pH.....	57
7.1.3. Humedad	58
7.1.4. Biodiversidad	59
7.1.5. Compresión y compactación	60
7.2. Caracterización del compost	61
7.2.1. Cantidad de compost producida	61
7.2.2. Propiedades físico-químicas.....	61
8. PRESUPUESTO	65
9. CONCLUSIONES.....	67
10. BIBLIOGRAFÍA	68

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Residuos sólidos urbanos: un grave problema ambiental

Los residuos antropogénicos se definen como contaminantes derivados de las diferentes actividades económicas, industriales y domésticas del ser humano. Entre ellos destacan los residuos sólidos urbanos (RSU), que a su vez se clasifican en diferentes categorías: plástico, papel, vidrio, madera, material verde y restos de comida. Como se muestra en la Figura 1, estos últimos representa el 44 % del total de RSU producidos a nivel global (Kaza et al. 2018).

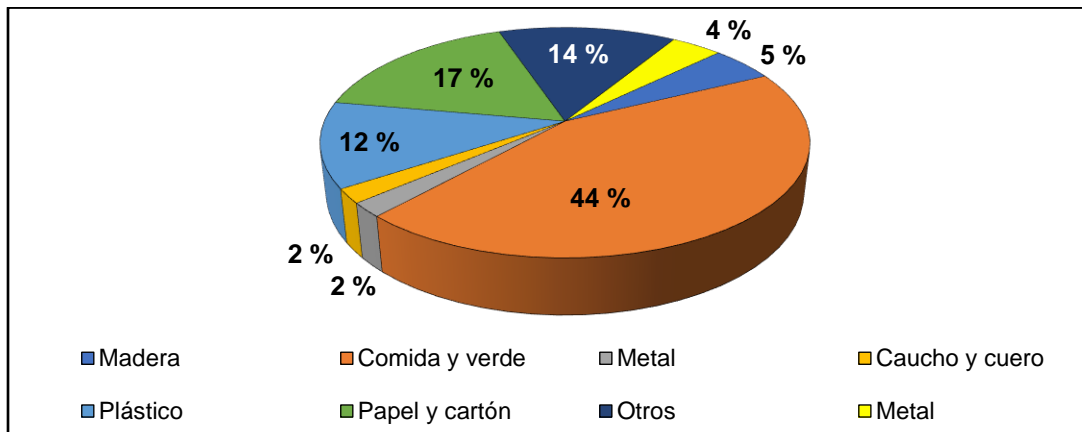


Figura 1. Composición de los residuos sólidos urbanos generados a nivel mundial (adaptado de Kaza et al. 2018).

Anualmente, se generan en el mundo más de 2.010 millones de toneladas de RSU (0,74 kg/hab/día) y al menos el 33 % se gestiona inadecuadamente. En general, se pueden señalar tres principales causas de esta problemática: la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico (Kaza et al. 2018).

La mala gestión de estos residuos y la inconsciencia de su peligro no solo tienen consecuencias medioambientales perjudiciales, sino que también supone un riesgo para la salud pública y plantea otros problemas económicos. Diversos estudios revelaron que la contaminación supone un coste del 6,2 % del PIB mundial, esto es, más de 4,5 billones de dólares. Además, la paliación de sus efectos supone un coste sanitario del 3,5 % del PIB, esto es, alrededor de 35.000 millones de euros al año (Lacambra. 2019).

Por otra parte, entre los problemas medioambientales destacan:

- **La contaminación del aire** debido a los gases emitidos a la atmósfera como dioxinas ($C_{12}H_4Cl_4O_2$) y gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y ozono (O_3), entre otros. Las grandes fuentes de estos gases son los vertederos y la quema abierta de los RSU, de modo que la primera supone el 15 % de las emisiones antropogénicas globales de CH_4 y la segunda el 11 % de las emisiones globales totales de partículas $<2,5 \mu m$ ($PM_{2,5}$) y el 6–7 % de las emisiones globales totales de carbono negro (BC) que representa entre el 2 % y el 10 % de las emisiones mundiales de equivalente CO_2 (Kiesewetter et al. 2022).
- **La contaminación de agua** generada a causa de la gran cantidad de los residuos acumulados y los productos liberados por su degradación (como los lixiviados). Por una parte, esto puede provocar la desaparición de la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos y, por otra, perjudicar la salud del ser humano al consumir las especies que viven en ellos y el agua contaminada (Navarro. 2021).

- **La contaminación del suelo** por el fenómeno de la erosión, la pérdida de carbono orgánico, la salinización, así como la compactación, la acidificación y la contaminación química. Estos problemas ponen en riesgo la salud y el bienestar de los seres humanos a través, sobre todo, de la alimentación. Además, dañan la biodiversidad del suelo y contaminan el agua subterránea (FAO. 2018).

1.2. Marco normativo y estratégico sobre la gestión de los residuos

1.2.1. Jerarquía de residuos

La jerarquía de residuos (Figura 2) establece un orden de prioridad de lo que constituye la mejor opción global para el medio ambiente en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos (Art. 4, Directiva 2008/98/CE). Estas acciones son (Art. 3, Directiva 2008/98/CE):

- **Prevención:** incluye el conjunto de medidas que se debe adoptar antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en residuo. Esta etapa tiene como objetivo reducir la cantidad de residuos que se podría generar, el impacto medioambiental y los riesgos a la salud, así como disminuir el contenido de las sustancias tóxicas en los materiales y los productos.
- **Preparación para la reutilización:** consiste en la comprobación, limpieza, reparación y restauración de los productos o artículos que se hayan convertido en residuos para poder reutilizarlos sin ninguna transformación previa.
- **Reciclado:** comprende toda operación cuyo objetivo sea transformar los residuos en nuevos productos, materiales o sustancias para su finalidad original o para cualquier otra. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.
- **Otro tipo de valorización:** consiste en cualquier operación cuyo objetivo sea que el residuo sirva para cumplir una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general. Esta fase comprende digestión anaeróbica, compostaje, incineración con recuperación de energía, gasificación y pirolisis. Todos ellos son procesos que producen energía (combustibles, calor y energía) a partir de residuos.
- **Eliminación:** una opción que no permite la recuperación de los materiales, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía. Tiene un gran impacto medioambiental e incluye su deposición en vertederos y la incineración.



Figura 2. Jerarquía en la gestión de residuos.

La gestión de los residuos de los Estados miembros de la Unión Europea en consonancia con la jerarquía de residuos ha supuesto una disminución del impacto medioambiental debido a la generación de residuos, el ahorro de energía y la conservación de los recursos naturales. A modo de ejemplo, en 2016, el reciclaje de los residuos domésticos aumentó hasta el 46 % y la fracción destinada a vertedero disminuyó hasta el 24 % en el conjunto de la UE, en comparación con el 25 % y 55 %, respectivamente, en 2000, y el 25 % y 64 %, respectivamente, en 1995. Sin embargo, existen diferencias entre los países de la UE; en 2016, 10 Estados miembros todavía eliminaban en vertederos más del 50 % de sus residuos domésticos, mientras que 6 de ellos incineraban el ≥ 40 % (RETEMA. 2018).

1.2.2. Normativas europeas

En 2018, la Unión Europea publicó un nuevo paquete de medidas relacionadas con la economía circular para impulsar la competitividad, crear empleo y generar crecimiento sostenible. Las nuevas Directivas compartían como finalidad reforzar la jerarquía de residuos, exigiendo a los Estados miembros dar prioridad a la prevención, reutilización y reciclado por delante del depósito en vertedero y la incineración. Asimismo, pretendían progresar en la gestión de residuos en la Unión con el objetivo de proteger, preservar y mejorar la calidad del medio ambiente, así como proteger la salud humana. Además, aspiraban a mejorar la eficiencia energética de Europa y garantizar el uso racional de los recursos naturales (European Commission. 2021):

- Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.
- Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.
- Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.

Directiva (UE) 2018/850: esta Directiva pretende reforzar los objetivos establecidos en la Directiva 1999/31/CE del Consejo, que impone restricciones al depósito en vertederos con el objetivo de avanzar hacia una economía circular y aplicar lo dispuesto por la Comisión en su comunicación «La iniciativa de las materias primas: cubrir las necesidades fundamentales en Europa para generar crecimiento y empleo».

La Directiva (UE) 2018/850 tiene como finalidad garantizar una reducción progresiva del depósito de vertidos, en particular de los vertidos aptos para el reciclado u otro tipo de valorización y adoptar medidas apropiadas a partir de 2030. También exige a los Estados miembros la adopción de las medidas para garantizar una reducir al 10 %, o a un porcentaje inferior, la cantidad de residuos municipales depositados en vertederos para el año 2035. Otras de las restricciones son la obligación de la recogida selectiva y la prohibición del vertido de residuos biodegradables que han sido objeto de recogida separada para su reciclado de conformidad con la Directiva 2008/98/CE (Directiva (UE) 2018/850).

Directiva (UE) 2018/851: por su parte, esta Directiva tiene como finalidad reforzar los objetivos establecidos en la directiva 2008/98/CE relacionados con la reutilización y el reciclado de los residuos. En el caso de los residuos municipales, la preparación de estos para las dos técnicas de tratamiento mencionadas anteriormente aumentará hasta un mínimo del 55 % en peso para 2025, del 60 % en peso para 2030 y del 65 % en peso para 2035. Otros de sus objetivos son convertir la economía en una economía verdaderamente circular mediante la toma de medidas adicionales sobre el ciclo de vida del producto para cerrarlo y preservar los recursos. Asimismo, pretende usar los recursos de forma más eficiente y, sobre todo, considerar los residuos como recursos, lo que permite reducir la dependencia de la Unión Europea de las importaciones de materias primas provenientes de terceros países.

Esta Directiva obliga a los Estados miembros a adoptar medidas adecuadas para prevenir la generación de residuos, siendo estas acciones la vía más eficiente para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos y reducir el impacto medioambiental de los residuos. Como ejemplos, se destacan la reducción de la generación de residuos alimentarios en todas las etapas del ciclo de vida para reducir un 50 % de los residuos alimentarios per cápita a escala mundial en el plano de la venta minorista y de los consumidores, y reducir las pérdidas de alimentos a lo largo de las cadenas de producción y suministro para 2030.

Por otra parte, esta Directiva incluye la obligación de la recogida separada de, al menos, los residuos de papel, metal, plástico y vidrio que los Estados miembros debían cumplir para 2015, y la introducción de la separación de los biorresiduos y sus reciclados en origen o la recogida separada de estos y de los residuos peligrosos de origen doméstico y residuos textiles. En el caso de los biorresiduos peligrosos y los de envases que contengan sustancias peligrosas, la recogida debe ser específica (Directiva (UE) 2018/851).

Directiva (UE) 2018/852: esta Directiva refuerza la gestión adecuada de los residuos utilizando la jerarquía de residuos establecida en la Directiva 2008/98/CE, y tiene como propósito modificar los objetivos establecidos por la Directiva 94/62/CE, aumentando el porcentaje de reutilización y reciclaje de los envases y residuos de envases planteado en esta última. En 2025, se deberá reciclar el 65 % de los residuos de envases, mientras que el porcentaje aumentará hasta el 70 % para 2030. En la Tabla 1 se recogen los objetivos mínimos en peso del reciclado de los residuos de envases específicos.

Tabla 1. Objetivos de reciclaje (% máximo) para los residuos de envases en 2025 y 2030.

Tipo de material de envase	2025	2030
Papel y cartón	75	85
Metales ferrosos	70	80
Vidrio	70	75
Aluminio	50	60
Plástico	50	55
Madera	25	30

Con respecto a la reutilización, destaca una serie de medidas que los Estados miembros deben adoptar para mejorar la eficiencia de los envases reutilizables comercializados y la reutilización de los envases, así como reducir el consumo de envases no reciclables y de envases excesivos. Algunos ejemplos de medidas son: el uso de sistemas de depósito y devolución, tener en cuenta la reutilización para la consecución de los objetivos de reciclado y la diferenciación de las contribuciones financieras para los envases reutilizables en el marco de los regímenes de responsabilidad ampliada del productor para los envases (Directiva (UE) 2018/852).

1.2.3. Normativas estatales

A nivel estatal, la **Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados** (BOE. 2011) establece el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos, así como las precauciones que se debe tomar para prevenir su generación y para evitar o reducir los impactos generados sobre la salud humana y el medio ambiente asociados a la generación y gestión de los mismos. Asimismo, tiene como finalidad regular el régimen jurídico de los suelos contaminados. Entre las acciones que incluye esta ley, resaltan la incorporación de la aplicación de la jerarquía de gestión de residuos y la obligación de la recogida y separación selectiva de las fracciones de papel, vidrio, plástico y metal, así como la reducción del peso de los residuos producidos en 2020 en un 10 % respecto a los generados en 2010. Antes del 2020, la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la

reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, biorresiduos u otras fracciones reciclables debe alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50 % en peso y en el caso de los residuos no peligrosos de construcción y demolición, con exclusión de los materiales en estado natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos, deberá alcanzar como mínimo el 70 % en peso de los producidos.

Por otro lado, esta Ley incorpora un artículo específico para los biorresiduos en el que se establecen medidas para impulsar las siguientes acciones:

- La recogida separada de estos tipos de residuos, en particular de la fracción vegetal, los biorresiduos de grandes generadores y los biorresiduos generados en los hogares que se gestionan mediante el compostaje o la digestión anaerobia.
- **El compostaje doméstico y comunitario.**
- El tratamiento de los biorresiduos recogidos separadamente en instalaciones específicas sin mezclarlos con residuos mezclados a lo largo del proceso con la finalidad de lograr un máximo grado de protección del medio ambiente.
- La sustitución de los fertilizantes minerales y las otras enmiendas orgánicas por el compost producido a partir de biorresiduos en el sector agrícola.

El 23 de diciembre del 2021, esta Ley fue revisada con la finalidad de cumplir con los nuevos objetivos establecidos en los últimos años por las Directivas Europea y a fecha de hoy, continua su tramitación en el senado. La revisión incluye muchos avances y novedades cuyos objetivos son impulsar una economía circular y baja en carbono en España. Entre las novedades se resaltan el establecimiento de un calendario de implantación de nuevas recogidas separadas de residuos para su valorización, además de las existentes de papel, metales, plásticos y vidrio. La nueva ley ha avanzado en la gestión de los residuos y da una gran importancia a las medidas de prevención en la política residuos, de modo que establece una reducción en peso de los residuos producidos de un 13 % en 2025 y 15 % en 2027 respecto a los generados en 2010. Además, debe alcanzarse la recogida separada del 50 % de los residuos municipales en 2035. En relación a las fracciones de biorresiduos, esta deberá contener como máximo un 20 % de impropios en 2022 y un 15 % en 2027.

Por otra parte, el proyecto incluye objetivos en línea de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (como la lucha contra el desperdicio de alimentos y la ampliación de la recogida separada de los biorresiduos domésticos) y la limitación del uso de plástico, así como medidas fiscales para incentivar la economía circular y la regulación de los suelos contaminados. **La denominación de esta nueva Ley será “Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular”** (MITECO. 2021).

El **Real Decreto (RD) 646/2020 de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero** (BOE. 2020). Tiene como finalidad establecer un marco jurídico y técnico adecuado para el vertido de los residuos de conformidad con la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, así como regular las características de los vertederos y su correcta gestión y explotación. Además, se fijan una serie de requisitos técnicos y operativos aplicables a los residuos y los vertederos para garantizar una reducción progresiva de los residuos depositados en vertederos, especialmente aquellos que son aptos para la reutilización. Este RD pretende prevenir, reducir e impedir los efectos negativos de este tipo de actividad sobre el medio ambiente, especialmente, las aguas superficiales y subterráneas, el suelo y el aire, la emisión de gases de efecto invernadero y la salud humana. Por otra parte, establece los objetivos de vertido de los residuos municipales para los años 2025, 2030 y 2035 que son el ≤40 %, el ≤20 % y el ≤10 % en peso, respectivamente. En el caso de los residuos municipales biodegradables, su vertido no debe superar el 35 % de la cantidad totales del mismo tipo de residuos generados en 1995.

1.2.4. Normativas autonómicas

La meta de la **Ley 3/1998, de 27 de febrero, general de protección del medio ambiente del País Vasco** es garantizar el consumo sostenible de los recursos naturales de modo que satisfaga las necesidades de la presente y futura generación, así como proteger el medio ambiente mediante un marco normativo que determina los derechos y los deberes de las personas. Asimismo, pretende integrar efectivamente las consideraciones medioambientales en la planificación urbana y la protección del patrimonio histórico para garantizar la sostenibilidad del medio ambiente urbano. Por otro lado, su objetivo es tratar de mejorar la calidad de vida de la ciudadanía, fomentar la investigación en todos los campos del conocimiento ambiental y promocionar la educación ambiental en todos los niveles educativos, al igual que la concienciación ciudadana en la protección del medio ambiente (BOPV. 1998).

El **Decreto 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos** tiene como objetivo regular las clases de vertederos, los criterios y procedimientos relativos a la admisión de residuos en los mismos, la regulación para su correcta instalación, gestión y explotación. Por otro lado, clasifica los vertederos existentes y los criterios que deben cumplir. Además, especifica los tipos de residuos admitidos en cada uno junto a los criterios de aceptación, debiendo garantizar las entidades explotadoras el cumplimiento de dicho procedimiento con carácter previo a su admisión (BOPV. 2009).

1.3. Generación y gestión de residuos sólidos urbanos en Europa, España y País Vasco

1.3.1. Europa

En Europa, la cantidad de RSU generados en 2019 fue 224,5 millones de toneladas, ~502 kg de residuo/hab/año. Este ratio varía considerablemente entre los diferentes países, tal como se muestra en la Figura 3. La cantidad más reducida pertenece a Rumania con 280 kg per cápita, mientras que la primera posición la ocupa Dinamarca con 844 kg per cápita. Con respecto al resto de países, la cantidad generada varía entre 336 y 790 kg per cápita, como es el caso de España, con 476 kg per cápita, ocupando la posición 18.

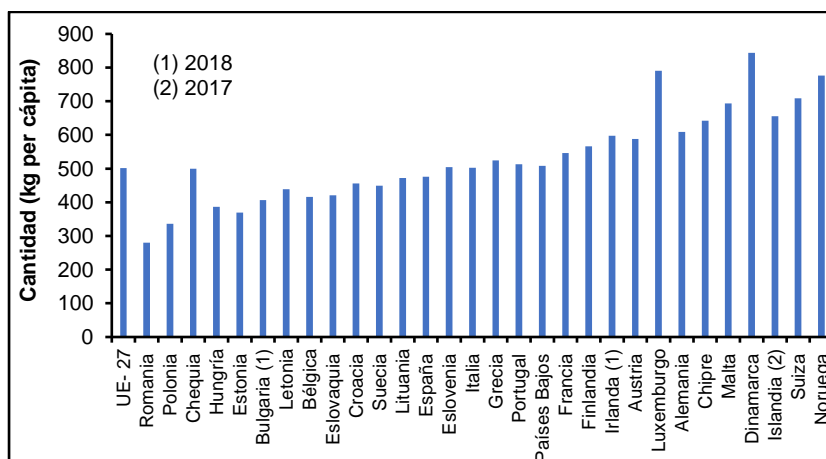


Figura 3. Cantidad de RSU registrada en los Estados miembro de la UE en el año 2019 (Eurostat, 2021).

Estas variaciones reflejan las diferencias en los patrones de consumo, en la riqueza económica y en el peso de las actividades económicas como el turismo en cada Estado miembro. No obstante, estos datos dependen también del sistema de recogida y gestión de cada país (Eurostat. 2021).

La gestión de los RSU es un reto para el desarrollo de una sociedad sostenible. Actualmente, los métodos de gestión más recurrentes son el reciclaje, la incineración, la deposición en los vertederos y el compostaje. En 2019, se incineraron y reciclaron 134 y 152 kg/hab/año, respectivamente. Respecto al vertido (119 kg/hab/año), la Unión Europea se divide en dos grupos: el primero está formado por los miembros que vierten grandes cantidades de residuos municipales y que están mayoritariamente en el este y el sur de Europa (Grecia, España, Eslovaquia, Bulgaria y Portugal, entre otros) y el segundo grupo lo conforman aquellos países donde casi no existen vertederos, como es el caso de Suecia, Alemania, Países Bajos y Bélgica, estados que centran sus esfuerzos en el reciclaje y la incineración (Eurostat. 2021). Cabe resaltar que, en estos países, la cantidad de residuos que terminan enterrados no llega al 1 % de su producción anual, de modo que tras su valorización energética quedan reducidos a solo un 2 % de escorias y cenizas. Estas últimas pueden ser además reutilizadas adicionalmente como material árido en obras y chatarra para empresas siderúrgicas (RETEMA. 2022).

En lo que respecta a la gestión de los residuos orgánicos (RO), el tratamiento más eficaz es el tratamiento biológico. De este modo, los biorresiduos se transforman en recursos como nutrientes, sustancias orgánicas y energía. Se distinguen dos tipos de técnicas, el compostaje y la digestión anaerobia, y ambas se clasifican como tratamiento de reciclaje cuando el compost (o el digestato) se utiliza en los cultivos y se aplica al suelo. Sin embargo, pueden catalogarse como un pretratamiento en el caso de la incineración y el depósito en los vertederos. El compostaje es el método más común y más adecuado para el tratamiento de los RO. En 2019, la cantidad de los biorresiduos transformada en compost fue de 87 kg/hab/año (Eurostat. 2021), aunque la digestión anaeróbica es la mejor opción cuando se desea recuperar tanto materiales como energía.

En relación a su aplicación, los países de la Unión Europea se dividen en tres grupos: aquellos que utilizan solo el compostaje para el tratamiento de los biorresiduos municipales (Grecia, Hungría, Letonia, y Rumanía), aquellos en los que el compostaje es la ruta de tratamiento dominante (Bélgica, Italia, Países Bajos, Eslovaquia y España) y el último grupo en los que la capacidad de digestión anaeróbica supera a la del compostaje, como en el caso de Croacia, Polonia, Portugal, Eslovenia y Suecia (European Environment Agency. 2020).

1.3.2. España

En el caso concreto de España, las empresas gestoras de RSU recogieron en 2019 un total de 22,8 millones de toneladas de residuos urbanos (483,7 kg/hab/año), un 0,3 % más que el año anterior, de los cuales 17,8 millones de toneladas fueron residuos mezclados y 5,0 millones de toneladas fueron residuos procedentes de la recogida selectiva (INE. 2021). Estos datos están lejos de los objetivos marcados por el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que fijaban una reducción de residuos sólidos mezclados a 11 millones de toneladas y un incremento de la recogida separada hasta los 9 millones de toneladas para el 2020 (MITECO. 2015).

El Instituto Nacional de Estadística (INE) destaca que el tipo de RSU con mayor cantidad recogida fueron los residuos domésticos y similares (domésticos y vías públicas) con una cantidad de 17 millones de toneladas, seguido a continuación de los residuos de papel y cartón y aquellos que provienen de animales y vegetales con 1 millón de toneladas. Sin embargo, la menor cantidad correspondió a la categoría “otros” con 1.491 toneladas, tal como

se muestra en la Tabla 2. Esta clase incluye los medicamentos no utilizados, los residuos de caucho y los residuos sanitarios y biológicos (INE. 2021).

Tabla 2. Cantidad de residuos urbanos recogidos en España en 2019 (INE. 2021).

Tipo de residuos	Cantidad (t)
Domésticos y similares (domésticos y vías públicas)	17.034.229
Domésticos voluminosos mezclados (enseres domésticos)	730.551
Metálicos	21.887
Vidrio	904.986
Papel y cartón	1.287.418
Plásticos	39.506
Madera	139.473
Textiles	47.258
Equipos eléctricos y componentes de equipos electrónicos desechados	57.710
Pilas y acumuladores	2.047
Animales y vegetales	1.168.659
Envases mixtos y embalajes mezclados	827.965
Minerales (incluye residuos de construcción y demolición)	521.572
Otros	1.491

- **El sistema de gestión de los RSU**

En general, la gestión de RSU en España se puede dividir en 4 etapas: prerecogida, recogida, transporte y tratamiento (MITECO. 2015).

Prerecogida: incluye las operaciones de deposición en el lugar de generación y su presentación para ser recogidos por los servicios municipales. Los ayuntamientos establecen los lugares y horarios de deposición. Existen dos tipos de prerecogida: no selectiva o en masa y selectiva.

La prerecogida no selectiva consiste en depositar los residuos sin ninguna separación previa en los contenedores (contenedor gris, Figura 4). En cambio, la prerecogida selectiva es la etapa de clasificación que realiza la propia ciudadanía. En este caso, los ciudadanos depositan los residuos previamente separados en contenedores situados en zonas de la vía pública u otros lugares de acceso público. Actualmente, los contenedores (Figura 4) se clasifican en 5 grandes grupos codificados mediante colores:

- Contenedores de vidrio: verdes
- Contenedores de envases ligeros: amarillos
- Contenedores de papel y cartón: azules
- Contenedores de la fracción orgánica: marrones
- Contenedores de la fracción rechazo: grises



Figura 4. Contenedores selectivos para la recogida de RSU en Vitoria-Gasteiz.

Además, se puede encontrar otros contenedores para los residuos que no son objeto de recogida separada, como sucede en el caso de las pilas, aceite y los residuos textiles. Por otro lado, existen instalaciones específicas, fijas o móviles, denominadas puntos limpios donde se depositan aquellos residuos de origen doméstico que, por su naturaleza (gran volumen o peligrosidad), no son aptos para ser vertidos en los contenedores anteriormente mencionados. Algunos ejemplos de estos residuos son los muebles y enseres, los escombros de construcción y demolición o los filtros usados de automoción.

Recogida: consiste habitualmente en cargar las bolsas o los contenedores en vehículos específicos. Estos vehículos son camiones de una tolva en los que existe la opción de compactar los residuos.

Otro de tipo de recogida es la neumática (Figura 5). En esta alternativa, los residuos son conducidos a través de canalizaciones subterráneas hasta una instalación de transferencia para su posterior traslado a la planta de tratamiento. La ventaja de la recogida neumática frente al uso de camiones es su menor coste en personal y la poca molestia generada a los habitantes. No obstante, necesita una inversión muy grande para la construcción de sus instalaciones.



Figura 5. Contenedor de recogida neumática en Vitoria-Gasteiz (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2021).

El transporte: se basa en el traslado de los residuos a las estaciones de transferencia, las plantas de clasificación y las plantas de tratamiento. En las estaciones de transferencia, los residuos se compactan mediante instalaciones específicas y se almacenan para su posterior traslado a la planta de tratamiento.

Tratamiento: es la última etapa del proceso y comprende las operaciones destinadas a la eliminación de los residuos o el aprovechamiento de los recursos que contienen. Si los residuos vienen separados, se tratan directamente. En caso contrario, pasan primero por un sistema de separación según su naturaleza y después a la planta de tratamiento.

Entre los distintos tratamientos destacan el reciclado, el compostaje o biometanización, la valorización energética y la incineración o el vertido controlado. Cada tratamiento se aplica según la fracción, la naturaleza o el estado de los residuos. Según los datos del INE (Figura 6), en España, anualmente, los vertederos reciben la mitad de los RSU generados, muy por encima de la media europea, donde únicamente el 24 % se elimina mediante depósito en vertedero (Radiocable. Com. 2021), y muy lejos de cumplir los objetivos establecidos en la legislación (limitación del vertido al 35 % para el 2020) (MITECO. 2015). Por otro lado, su gestión mediante la incineración (11 %) o el reciclaje (38 %, incluyendo la gestión por compostaje), siguen siendo métodos minoritarios.

Estas cifras, muestran que España está lejos de los objetivos marcados para el año 2020, esto es, separar como mínimo el 50 % de los desechos (papel, metales, vidrio, plástico, biorresiduos u otras fracciones reciclables) para su reutilización y reciclado, y destinar como mínimo el 70 % en peso de la cantidad de residuos no peligrosos de construcción y

demolición, con exclusión de los materiales en estado natural, a la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales (Art. 22, Ley 22/2011, de 28 de julio).

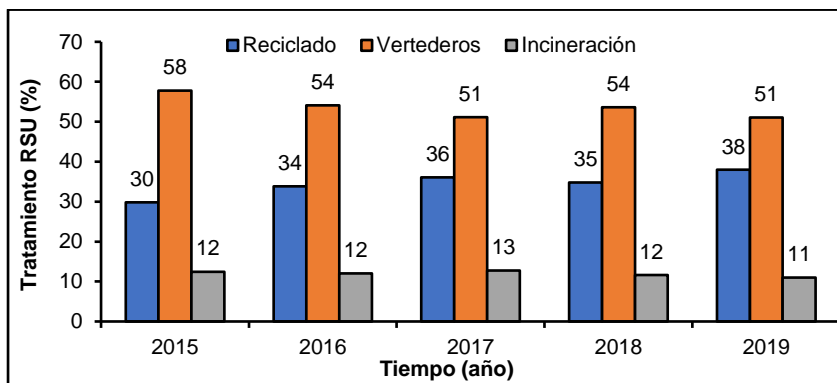


Figura 6. Tratamiento aplicado a los RSU durante el periodo 2015–2019 (INE. 2021).

1.3.3. Comunidad Autónoma del País Vasco

En 2018, la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) generó 1.186.733 t de RSU, un 12,3 % más que en 2010 (1.068.581 t), de los cuales el 77,6 % (921.300 t) fueron residuos domésticos y el 22,4 % (282.775 t) provenientes de comercios (Eustat. 2020). Esto supone un ratio per cápita de 544 kg/hab/año (Eustat. 2020), superior a la media estatal (485,9 kg/hab/año) (INE. 2021) y a la europea (496 kg/hab/año) (Eurostat. 2021). En relación al tipo de residuo (Tabla 3), los biorresiduos son los que se generaron en mayor cantidad (273.799 t), seguidos por los de papel y cartón (267.034 t) y envases ligeros (131.382 t) (Euskadi.eus. 2020).

Tabla 3. RSU generados en 2018, clasificados por el tipo de residuo (Euskadi.eus. 2020).

Tipo de residuo	Cantidad (t)
Parques y jardines	33.355
Residuos alimenticios y de cocinas	273.799
Papel y cartón	267.034
Vidrio	87.881
Envases ligeros	131.382
Plásticos no envases	26.592
Metales no envases	11.858
Pilas/Baterías	826
Fluorescentes	703
Otros residuos peligrosos	2.710
Textil	39.979
Madera	49.231
Aceites de cocina	3.205
Medicamentos	1.146
Radiografías	16
Otros misceláneos	29.128
Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEEs)	19.670
Voluminosos	15.237
Construcción y Reparación domiciliaria (RCRs)	126.720
Otros	66.259

En lo que respecta al tipo de tratamiento, desde el año 2018, la opción preferente es el reciclaje (35,9 %) frente a eliminación (30,8 %) y la valoración (17,2 %). Asimismo, la reutilización y el compostaje han sido actividades con tendencia ascendente en los últimos 4 años, con incrementos del 1,0 % y 2,0 %, respectivamente (Euskadi.eus. 2020).

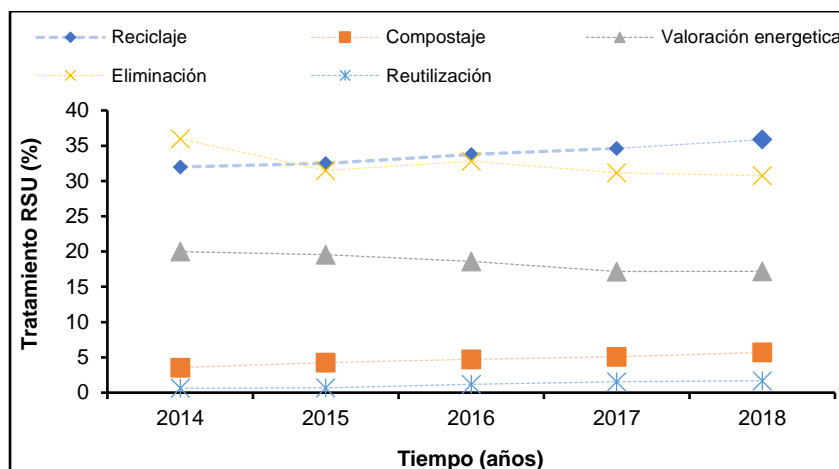


Figura 7. Evolución de los tratamientos de los RSU en Euskadi durante el periodo 2014–2018 (Euskadi.eus. 2020).

En Euskadi, el tipo de RSU más generado son los biorresiduos. En 2018, Gipuzkoa fue, con diferencia, la provincia con mayor tasa de recogida (53,5 t), seguida de Araba (7,2 t) y Bizkaia (5,3 t). (DFG. 2021, DFA. 2021, DFB. 2021, respectivamente). Esta diferencia se debe a que en Gipuzkoa este tipo de recogida está más limitado por restricciones como el número de veces máximo posible para abrir el contenedor, el control de aperturas de los contenedores de la fracción resto y materia orgánica, o la inspección de cubos en el sistema puerta a puerta. Además, el 60 % de los municipios de Euskadi que usan el sistema de recogida de la fracción resto mediante contenedores abiertos en la vía pública, lo componen algunos municipios de Gipuzkoa, todos los de Araba y todos los de Bizkaia, excepto alguna mancomunidad (Lea-Ibarra y los municipios de Ermua y Mallabia). La disposición de este tipo de contenedor, hace que la separación de residuos en origen, sobre todo en el caso de la materia orgánica y los envases ligeros, suele ser inferior en comparación con los sistemas personalizados (Euskadi.eus. 2021).

La fracción orgánica, tras ser depositada en el contenedor marrón, se remite a las distintas plantas de tratamiento de cada territorio para su aprovechamiento. En Bizkaia, los biorresiduos se envían a la planta de compostaje de Konpostegia, que está situada en Artigas (Bilbao). En Gipuzkoa, los biorresiduos se gestionan en las plantas de compostaje Lapatx y Epele, ambas situadas en Bergara (Gestión de residuos de Gipuzkoa. 2016). En el caso de Araba, los biorresiduos se tratan en la planta de tratamiento mecánico biológico-biocompost de Jundiz, en el extrarradio de Vitoria-Gasteiz. Esta instalación alavesa está diseñada para gestionar anualmente 125.000 t de residuos, puede recibir residuos orgánicos procedentes de la recogida selectiva (FORS), de los grandes productores y de aportaciones puntuales, residuos de poda y jardinería, así como RO de la recogida en masa tras una separación mecánica de los otros residuos urbanos (RU) en la propia planta. Las fracciones orgánicas se tratan por biometanización (para la producción de biogás) y compostaje. Cabe mencionar que el metano generado en la fermentación de este tipo de residuos se aprovecha posteriormente en motores de cogeneración (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2016).

La capacidad de tratamiento de biorresiduos en las 3 provincias ha aumentado de forma significativa en los últimos años (Figura 8). Por ejemplo, la evolución en Gipuzkoa es muy notoria ya que la cantidad de biorresiduo gestionada prácticamente se triplicó, siendo 29,0 kg/hab en 2013 y 75,0 kg/hab en 2018.

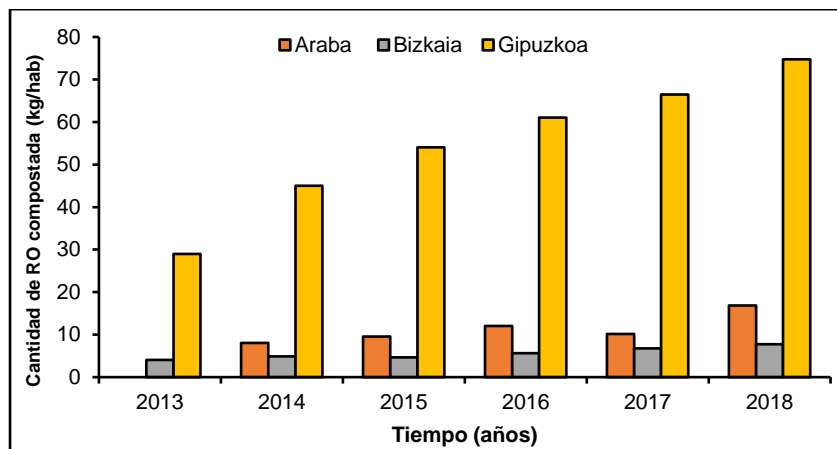


Figura 8. Cantidad de RO compostada por habitante y provincia durante el periodo 2013–2018 (Euskadi. eus. 2020).

En el caso de la CAPV, además del compostaje doméstico, existen alrededor de 200 instalaciones de compostaje comunitario (esto es, en comunidades de vecinos o pueblos) con un tamaño medio de 4 m³ y con una capacidad de producción de entre 800 y 1.000 t de compost (Ihobe. 2019a). Con el fin de promover los 2 tipos de compostaje, la CAPV cuenta con un programa de compostaje que, además realizar labores de formación y orientación, dota del material necesario a la persona o colectivo interesado (compostadora, aireador y cubo doméstico para la separación previa) (Gestión de residuos. 2019).

1.3.4. Residuos Sólidos Urbanos en Vitoria-Gasteiz

En 2019, la capital alavesa generó 38,3 t de RSU, un 1,0 % más que el año anterior. Realizando un análisis de las diferentes fracciones, el vidrio, el papel, los voluminosos, el textil y los residuos no peligrosos (RNP) experimentaron un descenso mientras que los residuos de aparatos eléctricos o electrónicos (RAEE), la madera, los envases y los biorresiduos aumentaron. En este caso, la fracción correspondiente a los biorresiduos está compuesta por FORS, poda y fracción orgánica gestionada en origen (FOGO) (Figura 9) (DFA. 2021).

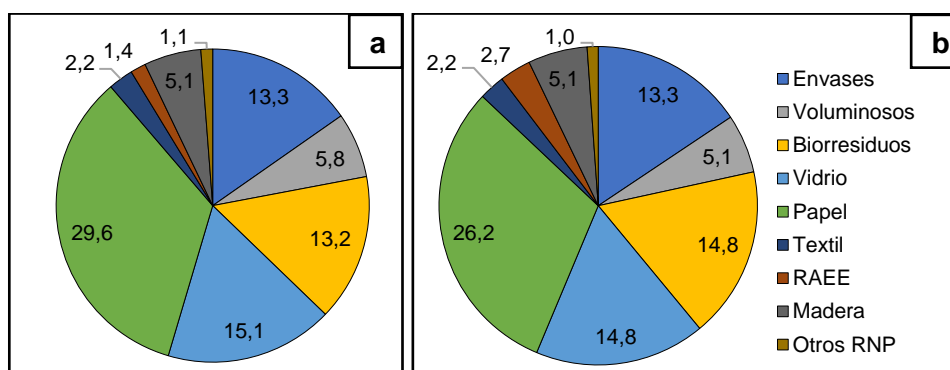


Figura 9. RSU generados en Vitoria-Gasteiz en 2018 (a) y 2019 (b) (DFA. 2021).

En 2010, Vitoria-Gasteiz aprobó el plan integral de gestión de residuos municipales (2008-2016) basado en la estrategia de las 5R: reducir la cantidad de residuos que se generan, reutilizar los residuos, reciclar, rechazar, no comprar productos envueltos en

envases que generan residuos innecesarios y responsabilizar a quienes generan un residuo difícilmente reciclable o peligroso. Este plan abarcaba una serie de acciones tales como la incorporación de la ciudadanía en las actuaciones para gestionar los residuos, el fomento de la recogida selectiva en origen o la separación del máximo número de fracciones, incluida la fracción orgánica de los residuos municipales, entre otras (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2020a). En consecuencia, tal y como se aprecia en la Figura 10, la cantidad de residuos reciclada fue aumentando desde un 23,4 % en 2010 a un 28,8 % en 2018 (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2020b).

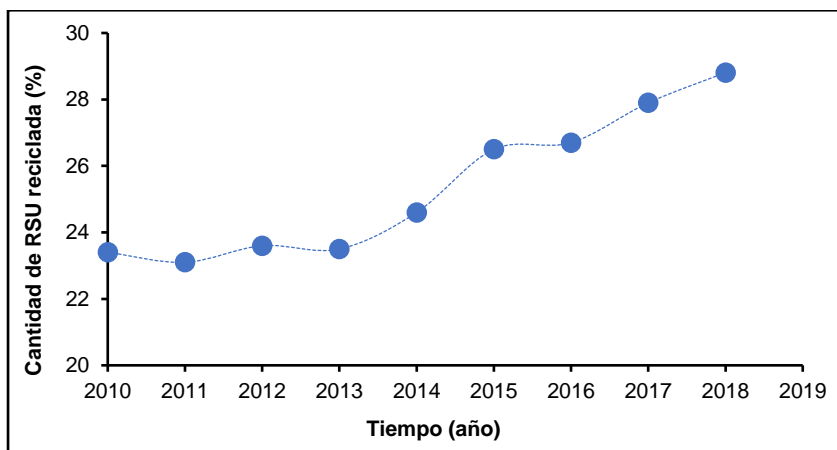


Figura 10. Cantidad de RSU reciclada durante el periodo 2010–2019 en Vitoria-Gasteiz (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2020b).

- **Gestión de los residuos orgánicos**

La correcta separación de los biorresiduos permite obtener fertilizantes orgánicos de alta calidad, un máximo aprovechamiento de los recursos y un beneficio para los vertederos (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2018). Por ello, Vitoria-Gasteiz dispuso en 2013 de 527 contenedores de color marrón (Figura 11) distribuidos por toda la ciudad, en los que se separan la materia orgánica del resto de los residuos. En estos contenedores se puede depositar restos de origen vegetal como verdura, fruta o plantas, restos de poda y jardinería, restos de origen animal (carne, cáscara de huevo, pescado, marisco, huesos, queso y pelo de mascota), posos y filtros de café, papel de cocina y todo el resto de materiales compostables (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2016).



Figura 11. Contenedor marrón en Vitoria-Gasteiz.

La colocación de estos contenedores en la ciudad provocó un aumento en la tasa de recogida de RO, de 5,2 kg/hab en 2010 a 22,6 kg/hab en 2019 (Figura 12). El descenso observado en el año 2020 puede atribuirse a la disminución de la poda recogida. Comparando los datos recogidos para Vitoria-Gasteiz con los datos referidos a la provincia, es importante mencionar

que los gráficos obtenidos son muy similares para ambos casos. Este comportamiento puede atribuirse a que el 75 % de los residuos generados en Araba provienen de la capital, por lo que también establecen la tendencia general del territorio (DFA. 2021).

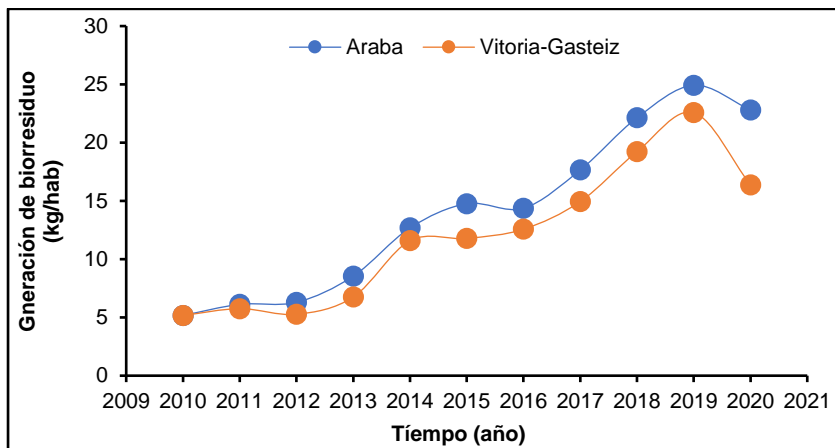


Figura 12. Cantidad de biorresiduo generado por habitante en Araba y Vitoria-Gasteiz durante el periodo 2010–2020 (DFA. 2021).

Existen otras alternativas de gestión de los RO como el autocompostaje y el compostaje comunitario. Para facilitar y fomentar los dos tipos de compostaje, en septiembre 2020, se puso en marcha un programa de compostaje doméstico y comunitario bajo el lema “Compostar, ¡Me gusta!”, impulsado por el servicio de Planificación y Gestión Ambiental. La iniciativa ofrece tanto materiales como formación para animar a la ciudadanía a gestionar sus propios biorresiduos (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2020c).

Como resultados, se recibieron 518 solicitudes de las personas interesadas, de ellas 286 dirigidas al compostaje comunitario y 232 al autocompostaje (Noticias de Araba. 2020). En 2021, la EIVG motivada por este proyecto participó en el programa. Por otra parte, en 2021 se instaló una zona de compostaje comunitario en el barrio de Salburua (Gasteiz Hoy. 2021). Tras este proyecto, se añadieron en 2022 dos nuevos puntos de este tipo de compostaje en el paseo de Moreda en Zabalgana y en la calle Ori en Lakua-Arriaga (Gasteiz Hoy. 2022).

2. CONTEXTO

2.1. Agenda 2030

La Agenda 2030 es un acuerdo mundial formado por 193 países y aprobado por la Asamblea General de las Naciones Unidas durante la cumbre del desarrollo sostenible llevada a cabo en septiembre del 2015. Este acuerdo está vigente hasta el año 2030 y tiene como objetivo luchar contra la pobreza mediante el cuidado del planeta y la disminución de las desigualdades, esto es, conseguir un mundo mejor, más inclusivo y desarrollado mediante la protección del medioambiente y el desarrollo tecnológico. En resumen, pretende ser una oportunidad para que todos los países del mundo y sus sociedades avancen hacia el desarrollo sostenible, bajo el lema de “no dejar a nadie atrás” (Unesco Etxea. 2021).

El contenido de dicha agenda gira alrededor de 5 elementos fundamentales:

- Personas (no dejar a nadie atrás, dignidad de todas las personas en un medio ambiente saludable).
- Planeta (colocar la protección del planeta en el centro de los problemas a resolver).

- Prosperidad (transformar las economías para disfrutar de una vida prospera y en plena armonía con la naturaleza).
- Paz (fomentar sociedades pacíficas justas y libres de miedo y violencia).
- Alianza (crear una alianza mundial entre los diferentes países).

Para conseguir estos 5 ejes, se plantearon 17 objetivos denominados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Figura 13). Cada uno de ellos fija las metas e indicadores para atacar las causas y no los síntomas de los problemas tratados (United Nations. 2019).



Figura 13. Iconos de los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (United Nations. 2019).

A nivel nacional, el Gobierno de España aprobó el “Plan de acción para la implementación de la Agenda 2030: hacia una estrategia española de desarrollo sostenible” como resultado del compromiso de la sociedad española con la Agenda 2030. Este plan se compone de 2 partes. En la primera, se presenta un análisis de la situación de los ODS en España, y en la segunda, se abordan las políticas y las acciones a través de las cuales se ponen en marcha los ODS de la agenda (Gobierno de España. 2018).

A nivel autonómico, el Gobierno Vasco adoptó la “Agenda Euskadi Basque Country 2030” en abril de 2018. Este documento refleja el grado de alineamiento y contribución del mismo y de las políticas sectoriales que lo desarrollan, con los objetivos y metas vinculados a los 17 ODS (Gobierno Vasco. 2021).

En el caso de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), el compromiso de esta institución con los ODS se refleja en la creación de la “EHUagenda 2030 por el desarrollo sostenible”, documento donde se recoge la contribución de la UPV/EHU a 12 de los 17 ODS, sumando otro nuevo. Con la incorporación de este objetivo adicional, la UPV/EHU muestra su compromiso con la diversidad lingüística y cultural, así como con los planes sectoriales que lo conforman (Campus Igualdad, Campus Inclusión y Campus Planeta) y con su modelo educativo IKD i³ (ikaskuntza x ikerketa x iraunkortasuna).

El modelo educativo IKD i³ se basa en potenciar el aprendizaje (ikaskuntza¹) a través de la investigación (ikerkuntza²) y la sostenibilidad (iraunkortasuna³). La UPV/EHU pretende incorporar este último eje en la comunidad universitaria a través de asignaturas, prácticas, planes de movilidad y conversaciones con el entorno social, económico, ambiental y cultural, así como con programas específicos que dan lugar a la publicación de trabajos fin de grado y trabajos fin de máster como el caso del programa “Campus Bizia Lab” (UPV/EHU. 2019).

¹ En euskera.

² En euskera.

³ En euskera.

2.2. Campus Bizia lab

Campus Bizia Lab (CBL) es una iniciativa derivada del proyecto “*Erasmus University Educators for Sustainable Development*” puesta en marcha anualmente por la UPV/EHU. A través de este proyecto, se pretende desarrollar un proceso colaborativo de aprendizaje entre los miembros de la Universidad, esto es, el Personal de Administración y Servicios (PAS), el Personal Docente e Investigador (PDI) y el alumnado, mediante un enfoque transdisciplinar, con el objetivo de abordar los desafíos/problemas de sostenibilidad dentro de la propia Universidad (Zallo et al. 2017).

La UPV/EHU pretende que dichos retos sean identificados y resueltos de forma cooperativa, desarrollando una metodología que permita llevar a cabo con éxito los procesos de aprendizaje de alto impacto relacionado con la sostenibilidad. Tal y como se ha mencionado anteriormente, la resolución de los mismos debe plasmarse a través de TFGs o TFM (UPV/EHU. 2020a). A modo de ejemplo, en la primera edición (curso 2016/17) se presentaron 24 TFG y 1 TFM de más de 20 titulaciones diferentes, todos ellos relativos a la economía circular, la transición energética, la alimentación saludable y los huertos ecológicos (Zallo et al. 2017).

En el curso (2020/21), se puso en marcha la cuarta edición del CBL y entre los 40 proyectos presentados se resaltan los siguientes (UPV/EHU. 2020b):

Dentro del reto de energía, en la Escuela de Ingeniería de Bilbao se desarrolló un proyecto titulado “Uso de energías renovables en diferentes edificios de la Universidad” que pretendía generar conocimiento práctico sobre la viabilidad del fomento del uso de energía renovable en sustitución de la fósil. En relación a la reducción de la huella ambiental, el proyecto titulado “EHU-Aztarna2” analizó las amenazas y oportunidades surgidas a partir de la pandemia COVID-19.

3 de los proyectos se centraron en la gestión de los residuos generados en la UPV/EHU. A través del proyecto “ZAPLASTEKO: Zaborra, Plastikoa, Ekologia” se propuso dar una segunda vida al plástico utilizado en la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa a partir de la creación de una pequeña planta de reciclaje en la propia Universidad. Por otro lado, el proyecto “CARBIOTICS” realizado en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, planteó la posibilidad de reciclar los biorresiduos para producir adsorbentes carbonosos destinados a la eliminación de antibióticos de las aguas residuales. Finalmente, el proyecto “#SOSustainability: a composter in the cloud to nourish the earth”, dentro del cual se enmarca el presente TFG, tuvo como principal objetivo obtener compost a partir de los residuos orgánicos generados en la cafetería de la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG), así como automatizar la medición de los factores críticos asociados al proceso de obtención de este producto.

2.3. #SOSustainability: a composter in the cloud to nourish the Earth

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, se trata de un proyecto cuyo objetivo principal fue autogestionar los residuos orgánicos generados en la EIVG mediante su conversión en compost. Asimismo, promover la sensibilización de los usuarios del Centro sobre la importancia de la gestión de los residuos y acercar el proceso de compostaje al alumnado, PAS y PDI de la Escuela, eliminando los prejuicios formados sobre este biotratamiento.

Este proyecto se realizó en colaboración con diferentes usuarios y Departamentos de la Escuela (Figura 14), incluyendo a los responsables de la cafetería y estudiantes de las especialidades de Ingeniería Química, Electrónica y Mecánica que realizaron sus TFG enmarcados en este proyecto (#SOSustainability. 2020).

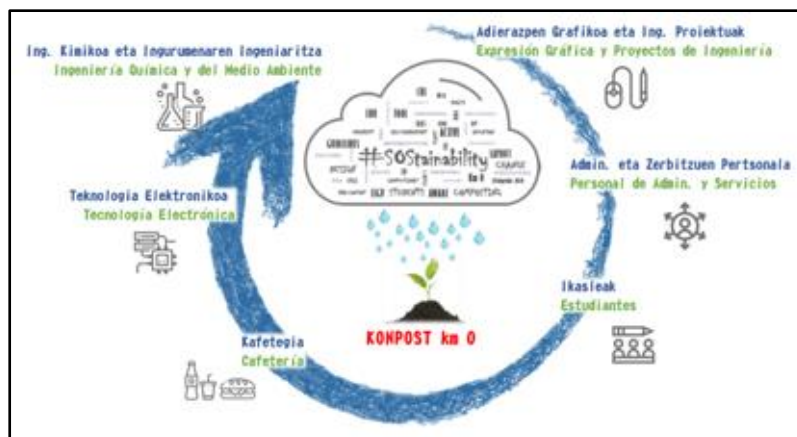


Figura 14. Logotipo del proyecto y departamentos implicados en el desarrollo del mismo (#SOSustainability. 2020).

El proyecto comenzó en la tercera edición (2019/20) del CBL y se prolongó hasta la cuarta edición del CBL (2020/2021), convirtiéndose en un proyecto bianual. Durante el primer cuatrimestre del curso 2019/20, se desarrolló el primer TFG de la propuesta por parte del ingeniero mecánico Ander Morquecho, bajo el título de “Diseño de una compostadora para la autogestión de los residuos orgánicos de la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz y estudio para su fabricación mediante impresión 3D”. El objetivo principal fue el diseño y el estudio de la fabricación mediante impresión 3D de una compostadora para la realización posterior del compostaje de los residuos orgánicos generados en la cafetería de la EIVG (UPV/EHU. 2019).

En esta fase del proyecto, se realizaron diversas tareas como la compra de dos modelos de compostadoras, una estática y otra rotativa formada por 2 compartimentos o tambores. El despiece de esta última ayudó a establecer los parámetros más importantes en el diseño de la compostadora, así como a dibujar el prototipo. Por otro lado, se estableció la clasificación en origen de los RO en 3 categorías: posos de café, cáscaras de naranja y otros biorresiduos. Durante 5 meses, y gracias a la colaboración de los alumnos Lorena Egurza y Andrés Barturen, se caracterizaron los 3 tipos de residuos recogidos mediante el registro de su volumen y masa. Por otra parte, para ampliar la repercusión del proyecto y universalizar el proceso de compostaje, se creó un blog con información relacionada con las etapas del desarrollo del proyecto (<https://sustainabilitycbl1920.wordpress.com/>) (#SOSustainability. 2020).

Durante el segundo cuatrimestre del curso 2019/20, se decidió empezar a compostar los residuos orgánicos de la EIVG y dar uso a los modelos comerciales de las 2 compostadoras compradas. Dicha decisión trajo consigo varias tareas como la determinación de la mejor ubicación de la zona de compostaje o la compra de los materiales necesarios para el acondicionamiento del espacio, entre otros. La irrupción del COVID-19 retrasó esta etapa hasta el curso (2020/2021), ya que se suspendieron todas las actividades y tanto la Escuela como la Cafetería permanecieron cerradas durante varios meses (#SOSustainability. 2020)

Tras este compás de espera, el proyecto retomó su actividad en la cuarta edición (2020/2021) del CBL. En este periodo, se desarrollaron 2 TFG; el primero fue el presente TFG, denominado “Gestión del residuo orgánico de la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG) y caracterización del compost producido” y paralelamente, Gorka Quintana, estudiante de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, llevó a cabo el TFG titulado “Desarrollo y puesta en marcha de un sistema de monitorización para una compostadora”, cuyo objetivo principal era diseñar e implementar un sistema basado en una tarjeta Raspberry Pi y desarrollar una base de datos.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) fue la autogestión de los residuos orgánicos generados en la cafetería de la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG) durante el curso 20/21, monitorizando el proceso de compostaje completo para conseguir un compost de calidad km 0. Esto incluye la caracterización de los residuos adicionados, así como el control y corrección de las desviaciones de los parámetros críticos durante el proceso (temperatura, pH y humedad).

Además, con el fin de comprobar el éxito del trabajo llevado a cabo, se determinaron las propiedades físico-químicas del compost producido.

Por lo tanto, el presente TFG se enmarca dentro del ODS 11, ciudades y comunidades sostenibles, el cual busca reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la gestión de los desechos municipales.

4. CRONOGRAMA

El proyecto comenzó en septiembre del 2020 y su ejecución finalizó en enero de 2022. Durante este tiempo, se realizaron diferentes tareas cuya denominación y duración se especifica en la Tabla 4.

Tabla 4. Diagrama de Gantt del TFG.

Tareas	2020				2021												2022		
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
T1. Revisión bibliografía del proceso de compostaje																			
T2. Recogida y caracterización de los residuos																			
T3. Realización del curso de compostaje comunitario-Edición 2020 (on-line) organizado por lhobe																			
T4. Llenado de la compostadora 1																			
T5. Medición manual de los parámetros de control (T, pH y humedad)																			
T6. Monitorización de los parámetros de control																			
T7. Traslado de los materiales de la compostadora 1 a la compostadora 2																			
T8. Seguimiento y mantenimiento del compost durante la etapa de estabilización																			
T9. Llenado de la compostadora 2																			
T10. Extracción y reparto de las remesas de compost																			
T11. Caracterización de muestras																			
T12. Redacción del TFG																			
T13. Preparación de la defensa del TFG																			

5. INTRODUCCIÓN AL COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso biológico exotérmico y consiste en la degradación de la materia orgánica (MO) por determinados microorganismos en condiciones aerobias. En consecuencia, se obtiene un producto final estable denominado compost, abundante en nutrientes y libre de patógenos y semillas, listo para su posterior almacenamiento y aplicación a la tierra (Plana González-Sierra. 2020a). La transformación de los RO en compost necesita aproximadamente entre 6 y 9 meses en función de las condiciones ambientales de la zona y el tipo de compost que se desea obtener, entre otros.

Durante este periodo, los residuos orgánicos sufren diferentes cambios físico-químicos acompañados de una reducción de volumen y masa cercana al 60 % debido a la liberación al ambiente de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), tal como se muestra en la Figura 15 (Plana González-Sierra. 2020b). En el caso de que el proceso de compostaje se llevase a cabo de forma incorrecta debido a la ausencia de oxígeno, la degradación de la MO se llevaría a cabo de forma anaerobia, produciendo malos olores y otros gases como metano (CH_4) y amoníaco (NH_3), entre otros.

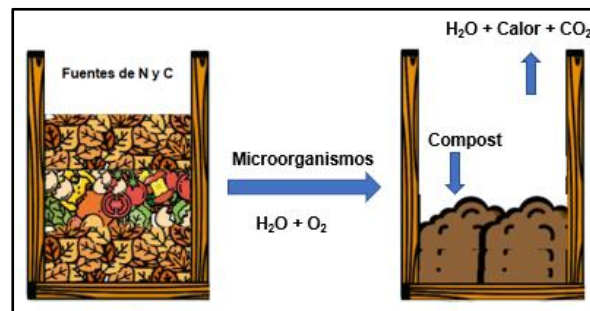


Figura 15. Esquema del proceso de compostaje.

5.1. Tipos de compostaje

5.1.1. Modo

En la actualidad, existen diferentes sistemas de compostaje, desde montajes muy sencillos a pequeña escala hasta métodos muy complejos y automatizados. La elección del sistema adecuado está condicionada por varios factores como el tiempo de proceso deseado, los requisitos de espacio o la seguridad higiénica requerida, así como el material de partida (presencia o no de material de origen animal) y las condiciones climáticas del lugar (temperatura, viento, lluvia, etc.). En general, los sistemas de compostaje se dividen en dos grupos: abiertos y cerrados (Campitelli et al. 2014).

- **Sistemas abiertos**

Este tipo de sistema es el más usado por su sencillez y viabilidad técnica y económica. Se emplea para gestionar grandes cantidades de residuos orgánicos ($\geq 1 \text{ m}^3$). La deposición de los materiales se realiza en montones o pilas de sección triangular que deben cumplir ciertas dimensiones y pueden estar al aire libre o protegidos bajo techo. El compostaje abierto puede clasificarse en función del método de aireación empleado en apilamiento con volteo o apilamiento estático con aireación forzada. En el primer caso, la aireación se realiza mecánicamente con una pala o una máquina volteadora. Por el contrario, el apilamiento estático con aireación forzada (Figura 16) no necesita voltear el material ya que dispone de una plataforma con agujeros para insuflar aire al interior de la pila (Tortosa. 2015).



Figura 16. Pila con un sistema de aireación forzada (Tortosa. 2015).

- **Sistemas cerrados**

Los sistemas cerrados se usan para el compostaje a pequeña y/o media escala, a nivel comunitario, en zonas poco pobladas o en complejos urbanos/industriales. Los materiales se compostan en un recipiente cerrado (con orificios de aireación) denominado compostadora. Estos dispositivos tienen muchas ventajas ya que evitan la acumulación de la lluvia en su interior, protegen el material a compostar de vientos fuertes y minimizan el espacio requerido. Además, disminuyen los tiempos de residencia, reduciendo la permanencia del material, controlan los olores y facilitan las labores de volteo. Sin embargo, presentan un mayor coste, tanto de inversión inicial como de explotación (Ramán et al. 2013). A su vez, las compostadoras cerradas se clasifican en reactores verticales y horizontales.

- **Los reactores verticales** (Figura 17) son adecuados para áreas pequeñas y fáciles de manipular. Permiten una mayor cohesión de las diferentes capas de materiales, lo que facilita el movimiento de insectos entre ellas, aumentando así la eficiencia del proceso. No obstante, esta ventaja afecta negativamente al proceso de compostaje cuando la cantidad de biorresiduos a tratar es elevada ya que se genera un alto grado de compactación por efecto de la masa, lo que produce problemas de aireación y de exceso de humedad (Pastor Fernández. 2019). En estos reactores, los materiales forman una columna única que se compostan gradualmente. Además, los nuevos materiales se añaden por la parte superior y el material compostado se extrae por la parte inferior, formando distintas capas de diferentes grados de madurez; el nivel más alto corresponde a los materiales frescos y el más bajo al compost maduro (Ramán et al. 2013).



Figura 17. Modelos de compostadoras verticales (Compostera. 2014).

- **Los reactores horizontales** o tambores rotativos (Figura 18) son recipientes que rotan sobre un eje longitudinal, en los cuales el proceso de compostaje se realiza por cargas. Es decir, una vez se carga la compostadora, se deja hasta que el proceso de formación y maduración del compost finalice y se extrae el producto, liberando el tambor para una nueva carga. La ventaja de esta configuración reside en que permite una mejor distribución de la humedad, pero ocupa más espacio que los modelos anteriores y permite gestionar menos material por reactor (Céspedes Sanchez et al. 2018).



Figura 18. Compostadora rotativa (Compostera. 2014).

5.1.2. Escala

El proceso de compostaje se realiza a diferentes escalas: pequeña (doméstica), media (comunitaria) o grande (industrial), en función del número de personas involucradas y la cantidad de biorresiduos gestionada. Las tres escalas permiten la transformación de los RO generados a través de un proceso biológico. Sin embargo, la cinética del este último y la influencia de los parámetros físico-químicos varían de una escala a otra (Puyuelo Sánchez et al. 2019).

- **Compostaje doméstico**

En este caso, las personas se encargan de compostar sus RO de forma individual. Se suele realizar en el jardín, terraza, huerta u otro lugar apropiado (Figura 19) (Campitelli et al. 2014). Existe un gran número modelos de compostadoras destinadas al ámbito doméstico, entre las que destaca el “modelo austriaco” de diversas capacidades con paredes modulares unidas con varillas que le hacen accesible por todos sus lados, con tapa y sin fondo. Este tipo de compostadora se considera muy versátil, cómoda para el usuario y fácil de transportar o almacenar. Otro modelo es la compostadora “compacta” de paredes cerradas que dispone de pequeñas puertas en la parte inferior para extraer el compost (Torras et al. 2012). El volumen de las compostadoras domésticas comerciales oscila entre los 150 L y varios metros cúbicos, pero se recomienda un volumen mínimo de 400–500 L para garantizar cierto grado de inercia térmica si la compostadora doméstica no está aislada térmicamente (Taherzadeh. 2016).



Figura 19. Compostaje doméstico (Plana González-Sierra. 2020c).

- **Compostaje comunitario**

El proceso de compostaje comunitario se realiza en colaboración entre grupos de personas que pertenecen al mismo barrio o pueblo, en espacios o jardines comunes de viviendas, en centros cívicos o escuelas, entre otros. El seguimiento del proceso lo suele realizar una persona encargada de su mantenimiento y, una vez obtenido el producto final, se utiliza en la jardinería municipal o se reparte entre los participantes. Esta iniciativa permite la participación en el reciclaje de los RO de aquellas personas que no puedan realizar el compostaje

doméstico (por no cumplir los requisitos) o no quieran tener una compostadora individual (MCP. 2020).

Para la realización de este tipo de compostaje, existen diferentes tipos de compostadoras que influyen en el dimensionamiento de la zona de compostaje y entre las que destacan las comerciales, las modulares y las casetas (Figura 20). La primera clase se caracteriza por una menor inversión inicial en comparación con las otras. No obstante, suele tener mayor número de incidencias. Con respecto a las otras dos, tienen una capacidad de tratamiento mayor, pero necesitan un mantenimiento regular (Plana González-Sierra. 2020c).



Figura 20. Zonas de compostaje comunitario: comerciales (a), modular (b) y casetas (c) (Plana González-Sierra. 2020c).

Tanto el compostaje doméstico como el comunitario son una opción viable para gestionar los residuos orgánicos en origen. De este modo, se logra reducir el impacto ambiental por la generación de residuos transformándolos en un recurso útil. Además, ambos sistemas son una herramienta para fomentar la educación y la concienciación medioambiental (Plana González-Sierra. 2020c).

- **Compostaje industrial**

El proceso se realiza en grandes plantas industriales utilizando los residuos orgánicos de origen urbano, comercial e industrial o agrícola. Dentro de este tipo de compostaje, cada planta elige su sistema de tratamiento según su localización, los volúmenes a tratar y el clima, entre otros factores a tener en cuenta. No obstante, el proceso se divide en tres grandes etapas: en primer lugar, la recepción de los residuos en la planta. Después, la selección de la fracción orgánica y el descarte de las otras fracciones (vidrio, metal, plástico, etc.). Por último, el proceso de compostaje, cribado del producto final, almacenamiento y distribución (Campitelli. 2014). El proceso de compostaje puede ser en pila (Figura 21a) o en sistemas cerrados. El tamaño de la pila va a depender de que esta sea estática o de volteo, mientras que la distribución del material va a depender de las dimensiones de la planta y de la maquinaria disponible para el volteo. En relación a los sistemas cerrados, se caracterizan por un mejor control de la temperatura, grado de humedad, pH y composición de los nutrientes. Como resultado, la degradación es más rápida y completa y se consigue un mejor control de los olores. En función del mezclado de los materiales durante el proceso, estos sistemas se clasifican en estáticos o de flujo-pistón (Figura 21b), en los que los materiales son aireados sin rotación, o en dinámico cuando los residuos son ventilados y volteados mecánicamente (Figuras 21c y d). Cabe resaltar que, en los tambores, la fase de maduración tiene lugar fuera del reactor, al contrario que las naves y los túneles en los que los materiales pasan por todas las etapas del compostaje (Claramunt et al. 2008).



Figura 21. Sistemas industriales de compostaje: pilas (a), túneles (b), naves (c) y tambores (d) (Esteve. 2012).

5.2. Marco normativo

- Nivel estatal

Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes (BOE. 2013). Este RD tiene como objetivo regular los aspectos del Reglamento (CE) nº 2003/2003, del Parlamento Europeo y del Consejo, del 13 de octubre de 2003, relativo a los abonos, cuya concreción y desarrollo han sido encomendados a los Estados miembros, así como definir e identificar los productos fertilizantes que puedan utilizarse en la agricultura, la jardinería o restauración de suelos degradados. Por lo tanto, este RD es el encargado de garantizar el cumplimiento de las condiciones de las riquezas nutritivas y otras características de los productos fertilizantes.

- Nivel autonómico

Real Decreto 63/2019, de 9 de abril, por el que se establece el régimen jurídico y las condiciones técnicas de las instalaciones y actividades de compostaje comunitario (BOPV. 2019). Este decreto nació debido a la carencia de una regulación específica del compostaje doméstico y comunitario, aunque ambas actividades se recogen como un objetivo en el plan de prevención y gestión de residuos del País Vasco (Gobierno Vasco. 2015). Tiene como propósito establecer las condiciones que deben cumplir las actividades y las instalaciones donde se compostan los biorresiduos de origen doméstico para que se consideren actividades de prevención.

Según este decreto, la ubicación de las instalaciones de compostaje comunitario será conforme a las normas que establezcan los ayuntamientos en los que se vayan a implantar, con el objetivo de evitar molestias a las personas y, en todo caso, respetando las zonas de dominio público. Asimismo, estas instalaciones no podrán superar los 10 m³ de volumen disponible para el proceso de compostaje.

En lo que respecta al control del proceso, para asegurar la higienización del producto final, será necesario que este haya estado durante un periodo mínimo de 14 días consecutivos a temperatura superior a 55 °C. La finalidad de esta condición es garantizar la eliminación de

patógenos, parásitos y semillas de malas hierbas. En caso de no ser reintroducido en el proceso, el producto resultante deberá ser gestionado como residuo a través del servicio público correspondiente.

Por último, el uso del compost maduro procedente del compostaje comunitario se llevará a cabo por las personas usuarias de las instalaciones y el ayuntamiento responsable de la zona de compostaje, con el cumplimiento de la normativa que regule el uso al que se destine el material y sin destinarlo a usos relacionados con la cadena alimentaria.

5.3. Componentes del compostaje

La elaboración del compost se lleva a cabo mediante la mezcla de dos tipos de materiales: material húmedo/verde (principalmente los residuos orgánicos) y material seco/marrón (material estructurante y similares). La primera capa del material depositado en la compostadora es una cama de 10–20 cm de altura de material seco para favorecer la aireación de la parte baja del sistema. Después, los materiales se depositan en forma de sándwich para facilitar la absorción de la humedad del material verde por el material seco. Tras la adición de los materiales, se mezclan con los de la capa inferior con el objetivo de acelerar la colonización por parte de los microorganismos (DFB. 2014). La proporción de mezcla añadida se establece según el tipo de compostadora, las características de humedad, compactación y relación C/N deseada (Puyuelo Sánchez et al. 2019).

- **Material húmedo**

Se trata de un material de rápida descomposición, rico en nitrógeno (necesario para el crecimiento y el desarrollo de los microorganismos) y agua. Este grupo lo integran principalmente los diferentes tipos de residuos orgánicos más habituales en el ámbito doméstico y de la restauración:

- Frutas y verduras
- Pan, pasta, arroz y legumbres
- Papel de cocina con restos de comida libres de tinta y productos químicos
- Posos de café, restos y bolsas de infusiones
- Pescado y carne (en cantidades limitadas)
- Lácteos
- Cáscaras de cítricos
- Alimentos caducados o estropeados

En caso de que el material verde tenga una importante cantidad de líquido, se aconseja realizar una separación de las dos fracciones. En caso contrario, se pueden generar problemas en el proceso de degradación por un exceso de humedad (Silbert Voldman. 2018).

- **Material seco**

Se considera una fuente de carbono para los microorganismos y se caracteriza por una descomposición lenta. Este grupo incluye:

- Material estructurante capaz de retener la humedad, permitir una adecuada circulación del agua y del aire, ser barato y relativamente inerte, al menos durante el periodo que dure el proceso de compostaje. Algunos ejemplos de material estructurante son los restos de poda o la madera triturada.
- Hojas secas
- Serrín (no forma parte de la categoría de material estructurante porque no sostiene la estructura de los materiales y se compacta rápidamente)
- Cáscaras de huevos y de frutos secos

- **Acelerador**

Se trata de un producto cuyo objetivo es acelerar el inicio del proceso de compostaje. Puede ser comercial o casero (compost maduro ya preparado con anterioridad). Su aplicación es opcional y se añade en pequeñas dosis durante las primeras adiciones de los residuos orgánicos (DFB. 2014).

5.4. Fases del compostaje

El proceso de compostaje (Figura 22) se puede dividir en dos fases que se diferencian en los niveles de actividad microbiana y la MO disponible: la fase biooxidativa o de crecimiento activo de los microorganismos, en la que existe una elevada cantidad de nutrientes, y la fase de maduración, en la que la actividad microbiana es menor y los nutrientes están limitados. A su vez, la primera fase se desarrolla en 3 subetapas: la fase mesófila (inicial), la fase termófila (intermedia) y la fase mesófila (final) o fase de enfriamiento (Moreno Casco. 2007).

- **Fase mesófila (inicial)**

En este periodo, se degradan los compuestos más simples de C y N (sustancias fácilmente biodegradables) por acción de los microorganismos y se produce un incremento de la temperatura desde la temperatura ambiental hasta aproximadamente 45 °C. Se caracteriza por la presencia de bacterias mesófilas. Su duración es de solo unos días (Román et al. 2013; Ihobe. 2019b).

- **Fase termófila**

Se inicia cuando la temperatura del proceso es superior a 45 °C y puede durar meses, según las condiciones ambientales y el tipo de materiales vertidos en la compostadora. En esta etapa, los microorganismos de la fase anterior se reemplazan por otros que pueden desarrollar su actividad microbiana a altas temperaturas (por encima de los 45 °C), denominadas bacterias termófilas. Estas nuevas bacterias descomponen todo tipo de MO, incluidos los compuestos complejos como proteínas, grasas e hidratos de carbono como la celulosa y la lignina, liberando una gran cantidad de calor a medida que desarrollan sus actividades. Mientras tanto, aumenta la temperatura del proceso hasta los 60–70 °C. Durante este intervalo, aparecen las bacterias que producen esporas y actinobacterias, que son las encargadas de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos carbonosos complejos. A partir de 70 °C, sobreviven algunas bacterias cuya actividad metabólica no permiten mantener los niveles de temperatura, lo que limita la variedad de microorganismos que intervienen en la degradación de la MO. En consecuencia, disminuye la eficiencia del proceso biológico (Puyuelo Sánchez et al. 2019). Esta segunda etapa también se denomina fase de higienización, ya que las elevadas temperaturas permiten la destrucción de bacterias y contaminantes como *Escherichia coli* y *Salmonella spp.* Además, se garantiza la eliminación de los quistes y huevos de gusanos, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de especies vegetales que puedan tener los materiales de partida (Román et al. 2013). El mantenimiento de las altas temperaturas durante mucho tiempo tiene un valor muy importante debido a que algunos contaminantes necesitan un tiempo de exposición mayor para su eliminación, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Temperatura y tiempo de exposición necesarios para garantizar la eliminación de los microorganismos indeseados (Román et al. 2013).

Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de exposición
<i>Salmonella spp</i>	55	1 h
	65	15–20 min
<i>Escherichia coli</i>	55	1 h
	65	15–20 min
<i>Brucella abortus</i>	55	1 h
	62	3 min
<i>Parvovirus bovino</i>	55	1 h
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	55	3 días

- **Fase de enfriamiento o etapa mesófila final**

Esta etapa requiere varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración. La temperatura disminuye hasta los 40–45 °C debido al agotamiento de las fuentes de carbono y, especialmente, a las de nitrógeno. Durante esta fase continúa la degradación de polímeros como la celulosa y lignina, y aparecen algunos hongos visibles a simple vista. A una temperatura menor de 40 °C los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque normalmente el pH se mantiene ligeramente alcalino.

- **Fase de maduración**

El material compostado permanece durante meses a temperatura ambiente según el grado de madurez y la estabilidad del compost que se desee obtener. En este periodo, se degradan fracciones más resistentes de la MO y se forman los ácidos húmicos y fúlvicos por las reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados. Finalmente, el compost adquiere un color oscuro, una textura granular y un olor a tierra vegetal (Ihobe. 2019b). En determinadas guías de compostaje, se considera que las fases de enfriamiento y maduración forman una sola etapa cuya duración es de aproximadamente 3 o más meses.

A continuación, en la Figura 22 se muestra un resumen de las etapas del proceso de compostaje, donde se puede observar cómo evolucionan la temperatura y el pH en cada una de ellas.

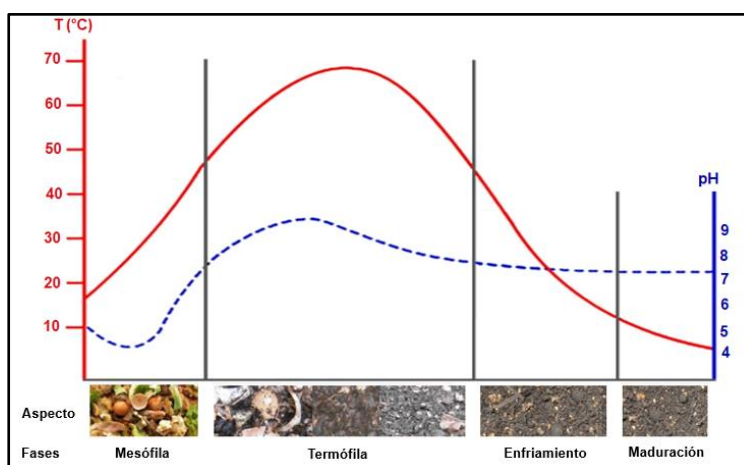


Figura 22. Etapas del proceso de compostaje (Adaptada de Campitelli et al. 2014).

5.5. Parámetros de control

El proceso de compostaje es un proceso biológico donde intervienen diferentes tipos de microorganismos responsables de la degradación de la MO. Los factores que afectan a estos serán los mismos que requerirán ser controlados a lo largo del compostaje. Las variables que se deben controlar para realizar un correcto compostaje se pueden clasificar en parámetros referentes al proceso de adición y en aquellos relativos al proceso de compostaje.

5.5.1. Parámetros referentes al proceso de adición

Este apartado incluye los factores a tener en cuenta durante la preparación de la mezcla del material húmedo y seco para asegurar el arranque del proceso y durante todo el proceso de adición de RO.

- **Tamaño de partículas**

Este parámetro afecta tanto al material estructurante como a los biorresiduos. Su importancia reside en su efecto sobre la superficie de contacto entre los materiales y los microorganismos, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción (Plana González-Sierra. 2020d). Por lo tanto, la trituración del material facilita el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso (Moreno Casco. 2007).

El tamaño de partícula adecuado en cada caso está condicionado por el tipo de compostadora empleada. Un tamaño demasiado grande genera pérdidas de calor y, por lo tanto, reduce la eficiencia de la actividad biológica.

En cambio, un tamaño de partículas demasiado pequeño dificulta la difusión del oxígeno hacia el interior y del dióxido de carbono hacia el exterior, lo cual restringe la proliferación microbiana, además de generar riesgos de compactación, dando lugar a un proceso anaeróbico. En el caso de los residuos orgánicos, el tamaño recomendado está comprendido entre 1 y 5 cm; con respecto al estructurante, su tamaño está entre los 10 y 13 cm aproximadamente (Campitelli et al. 2014).

- **Estructura física o matriz**

La porosidad de la mezcla de los materiales es un factor muy importante, ya que permite el paso del aire por el interior de la masa desde el primer momento y, por lo tanto, asegura el proceso aeróbico (Figura 23). Este parámetro está directamente relacionado con el tamaño de partícula (Ihobe. 2019b).

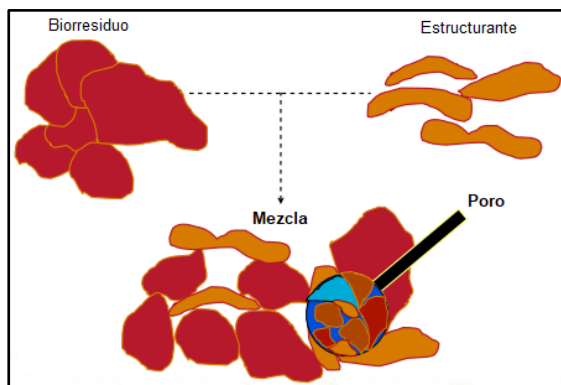


Figura 23. Estructura física de la mezcla de compost (Plana González-Sierra. 2020d).

- **Relación superficie/volumen**

La conservación del calor generado por la actividad de los microorganismos permite el aumento de la temperatura hasta alcanzar las condiciones termófilas, por eso es muy importante el dimensionamiento de la compostadora acorde a la cantidad añadida, así como tener en cuenta la frecuencia del aporte de los materiales orgánicos. A su vez, durante los primeros días, los materiales deben disponerse en el interior del módulo de forma que se garantice una relación superficie/volumen baja. Una relación elevada facilita la pérdida de calor por convección y la humectación de los materiales (Ihobe. 2019b).

- **Humedad**

Es un parámetro clave ya que afecta a todo el proceso desde la formación de la mezcla inicial hasta la fase de maduración. Su influencia es mayor sobre la actividad microbiana que sobre la temperatura debido a la relación directa que hay entre los niveles de humedad y la tasa de la actividad de los microorganismos. Al tratarse de un proceso biológico de degradación enzimática extracelular, el desplazamiento del agua entre las partículas garantiza el transporte de los nutrientes necesarios para la actividad metabólica y fisiológica de las bacterias (Puyuelo Sánchez et al. 2019). En la fase inicial, cuando se realiza el aporte de los materiales, es muy importante mantener este parámetro en valores entre 40–60 % para evitar la lixiviación y facilitar el inicio de la actividad microbiana (Plana González-Sierra. 2020d).

- **Relación carbono/nitrógeno**

Los microorganismos utilizan nutrientes como el carbono, el nitrógeno y otros elementos como el fósforo para llevar a cabo el proceso de compostaje. El carbono se considera una fuente de energía mientras que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos y enzimas necesarios para el crecimiento celular (Claramunt Vallespi et al. 2008). Aunque la cantidad de carbono necesaria es notablemente superior a la de nitrógeno, el contenido de este último es el factor principal para conseguir temperaturas termófilas que garanticen la higienización y la eliminación de semillas viables. Además, también favorece la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Plana González-Sierra 2. 2020).

La relación carbono/nitrógeno (C/N) influye en la velocidad del proceso de compostaje y en la pérdida de amonio durante el mismo. Si dicha relación es mayor que 40, la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono en forma de dióxido de carbono (CO₂). Para ello, se requiere la aparición de diferentes especies microbianas, cuya posterior muerte libera el N contenido en su biomasa. Si la relación C/N es muy baja, indica un exceso de nitrógeno asociado a mayores pérdidas en forma de emisiones, sobre todo amoniac (NH₃), generación de olores desagradables e incluso un mayor consumo de oxígeno (Moreno Casco. 2007).

Dependiendo de las características de los biorresiduos que se depositen en la compostadora, puede ser necesario considerar una corrección de la relación C/N mediante el aporte de material estructurante (Ihobe. 2019b). Aunque no haya concordancia entre los autores sobre el valor de la referencia de C/N, generalmente se indica un intervalo óptimo de 25–35 para el material inicial (Del Pilar Cabildo Miranda et al.2008). Para el compostaje de los restos de comida se aconseja un ratio C/N de 30 (Plana González-Sierra. 2020d).

5.5.2. Parámetros referentes al proceso de compostaje

Son parámetros que permiten el seguimiento de la evolución del proceso y determinan las condiciones óptimas para el desarrollo de la actividad biológica.

- **Humedad**

El contenido de humedad afecta directamente la biodegradación de los materiales, ya que el agua es el medio de transporte de los alimentos de las células y de los productos de desecho derivados de las reacciones que tiene lugar durante el proceso de compostaje. Por este motivo, es imprescindible el control de este parámetro de manera regular y su corrección cuando se desvíe del intervalo óptimo (40–60 %). Si el contenido de humedad es mayor, el agua ocupará todos los poros y se puede producir una compactación, por lo que el proceso se volverá anaeróbico generando malos olores y productos fitotóxicos. No obstante, si la humedad es excesivamente baja la actividad microbiana disminuye y, por lo tanto, el proceso será más lento o incluso cesará su actividad (Campitelli et al. 2014).

A continuación, en la Tabla 6, se especifica el porcentaje de humedad correspondiente a cada estado del proceso de compostaje. La desviación de la humedad de los valores óptimos durante el proceso está relacionada con factores como el volumen del proceso, los materiales y su exposición a las condiciones ambientales. Por último, la monitorización de este parámetro se realiza mediante el método de puño o con la ayuda de un sensor capaz de medir la humedad de materiales sólidos como la tierra (Ihobe. 2019b).

Tabla 6. Relación entre la humedad de la mezcla y el estado del proceso de compostaje (Plana González-Sierra. 2020d).

Humedad (%)	Estado del proceso de compostaje
<30	Proceso detenido
30–40	Actividad biológica limitada (únicamente en zonas menos secas)
40–50	Adecuado
50–60	Óptimo
>60	Excesivo

- **Porosidad**

Como el proceso de compostaje es un proceso aeróbico, se debe garantizar que el agua acumulada en el interior de la compostadora no ocupe totalmente los poros de la masa de compostaje y permita la circulación tanto del oxígeno como de otros gases producidos en la reacción, evitando así la compactación de los materiales, sobre todo de aquellos desechos orgánicos que se encuentran en la parte inferior de la compostadora (Moreno Casco. 2007). Para asegurar una humedad adecuada, el tamaño de las partículas compostadas debe ser adecuado y el volteo tiene que ser intensivo y frecuente (Ihobe. 2019b).

- **Temperatura**

La temperatura es el mayor indicador de la actividad microbiana desarrollada en el interior de la compostadora. La evolución de este parámetro permite evaluar la eficiencia y el grado de estabilidad al que ha llegado la conversión de los residuos en compost, debido a la relación directa, ya mencionada en el apartado 5.4, entre la temperatura y la degradación de la materia orgánica (Moreno casco. 2007).

- **pH**

El valor del pH está determinado por los componentes de los materiales y por la actividad microbiana. Mediante este parámetro se puede realizar de forma indirecta un control de la aireación de la mezcla debido a que, si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas, se liberan ácidos orgánicos característicos que provocan la caída del pH. Asimismo, a partir de la relación entre los dos parámetros (aireación del compost y pH) se puede determinar si el compost este maduro o no. Es decir, un compostaje con aireación adecuada produce un

abono con un pH entre 7 y 8; en caso contrario, se puede suponer que el producto obtenido todavía no está maduro. A su vez, mediante la relación entre el pH, la aireación y los microorganismos, se puede deducir el estado de la descomposición que tiene lugar durante el proceso. En otras palabras, si el pH se mantiene por encima de 7,5 durante el proceso, es síntoma de una buena descomposición, ya que la degradación orgánica se inhibe a pH bajos.

Por otra parte, la evolución de este durante el proceso de compostaje se divide en tres fases: durante la primera fase (mesófila) se produce una disminución causada por la liberación del ácido orgánico, como resultado de la acción de los microorganismos sobre la MO más lábil. Esta caída del pH puede ser mayor si existiesen condiciones anaeróbicas. En la segunda fase (termófila) se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco liberado por la descomposición de las proteínas. En la última etapa, como se forman compuestos húmicos que tienen propiedades amortiguadoras, el pH tiende a neutralizarse (Moreno Casco et al. 2007).

- **Aireación**

El oxígeno es un parámetro básico para la producción de una degradación aerobia rápida y efectiva, ya que una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por otros anaerobios responsables de la disminución de la velocidad del proceso y de la consiguiente producción de sulfuro de hidrogeno (H_2S) y de malos olores. Por el contrario, un exceso de aireación podría provocar el enfriamiento de los materiales y una alta desecación. En consecuencia, se reduce la actividad metabólica de los microorganismos (Claramunt Vallespi et al. 2008).

5.6. Mantenimiento del proceso de compostaje

Se trata de un trabajo imprescindible en el proceso de compostaje. Un correcto mantenimiento incluye varias tareas cuyo objetivo es corregir las incidencias del proceso y asegurar su viabilidad (Puyuelo Sánchez et al. 2019; Sanchez. 2020a).

- **Volteo**

Esta tarea tiene como finalidad recuperar la porosidad de la mezcla para asegurar la aireación de los materiales, así como mezclar y homogeneizar todos los componentes de la matriz, rompiendo así la compactación que pudiese haber, y homogeneizar la humedad. El volteo es un factor central del proceso de compostaje ya que reduce la emanación de olores, la proliferación de insectos y el exceso de humedad. Además, aumenta la aireación favoreciendo un proceso más rápido y completo de la degradación de la MO, reduce el contenido en MO y en general facilita la maduración del compost (Adhikari et al. 2012).

La intensidad del volteo viene determinada por la etapa del proceso. Así, en la fase biooxidativa el volteo debe ser intenso y frecuente (2–3 veces a la semana aproximadamente), mientras que en la fase de maduración no se debe voltear tan a menudo (1 vez a la semana). Durante la realización del volteo, es importante que todo el material incorporado pase por el centro de la compostadora, puesto que es el lugar donde sucede con mayor intensidad el proceso de descomposición y se alcanzan las mayores temperaturas de higienización. Para realizar esta tarea se emplea un aireador, una herramienta en forma de espiral que facilita las tareas de coger y remover el material (Sanchez. 2020a).

- **Riego**

Su propósito es humedecer la mezcla. Sin embargo, antes de realizarlo, se recomienda remover y homogeneizar la mezcla para ver la humedad real del compost, porque puede estar seco en la superficie, pero húmedo en el interior. Para el riego se aconseja emplear una

regadera que se aplicará de forma suave mientras se voltea, con el objetivo de homogeneizar el grado de humedad en todos los materiales para recuperar las condiciones adecuadas. La recuperación de la humedad en materiales muy secos es una tarea muy difícil, por lo que es muy importante evitar que la mezcla en el interior de compostadora se seque.

- **Aporte de material seco**

La corrección del exceso de humedad o de la compactación excesiva de la mezcla se realiza mediante el aporte de material seco como hojas secas o estructurante mientras se voltea.

- **Trasvase**

Consiste en el traslado de los materiales de una compostadora (o módulo) a otra (u otro) una vez se llene la primera compostadora. Tiene como objetivo homogeneizar la mezcla, corregir la humedad, y detectar posibles desviaciones que mediante los volteos son inapreciables. Además, esta acción permite reactivar el proceso degradativo para asegurar la máxima eficiencia del proceso (Puyuelo Sánchez et al. 2019).

- **Tamizado**

Una vez finalizado el proceso de compostaje, se realiza el tamizado del compost (\varnothing 1 cm) en la misma zona del compostaje y mediante diferentes formas, tal como se aprecia en la Figura 24, siendo el cribado horizontal y el oblicuo las formas más comunes para llevarlo a cabo. Para poder completar esta acción el material debe estar seco, por lo que se aconseja extenderlo previamente durante unas horas (Sanchez. 2020a).



Figura 24. Formas de realizar el cribado: horizontal (a), oblicua (b), industrial (c) y motora (d).

Esta tarea tiene como objetivo separar los materiales más resistentes a la degradación (cáscaras de frutos secos o huevos y trozos de madera, entre otros) que, posteriormente, pueden ser utilizados como material estructurante (Figura 25).

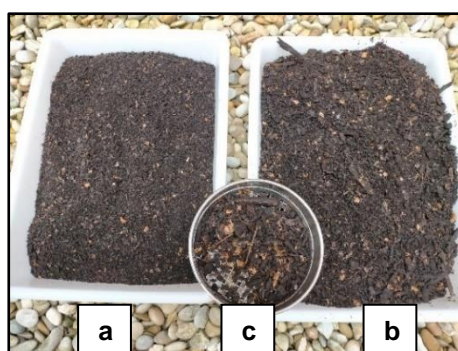


Figura 25. Compost antes (a) y después (b) del cribado, junto a la fracción de rechazo (c).

- **Almacenamiento**

El almacenamiento del producto obtenido, en el caso de que no se desee utilizarlo de manera inminente, se realiza ensacado en un lugar seco, protegido del sol, del viento y de la lluvia. El lugar donde se almacena debe estar identificado y definido para evitar posibles contaminaciones procedentes de acciones humanas, presencia de animales o de semillas (Sanchez. 2020a).

5.7. Biodiversidad durante el proceso de compostaje

Las diversas poblaciones de “bichos” que actúan en el compostaje llegan junto con los materiales orgánicos empleados, a través del aire o el suelo donde está colocada la compostadora. La presencia de algunos de estos seres vivos indica el buen funcionamiento del proceso e incluso llegan a ser imprescindibles para la completa degradación de la MO.

Los insectos encuentran en la compostadora un lugar donde desarrollar su ciclo de vida y, a pesar de las falsas creencias, nunca salen de la compostadora, ya que en su interior disponen de las condiciones ideales de temperatura y humedad (DFG. 2012). Entre los seres vivos que se puede encontrar en el proceso de compostaje destacan:

- **Lombrices**

Son unos de los actores más importantes en el proceso de compostaje, ya que realizan muchas tareas como descomponer la MO, disolver y mezclar las sustancias orgánicas e inorgánicas. Además, facilitan la aireación del compost y mantienen las condiciones aeróbicas en la mezcla de biorresiduos mediante la excavación de túneles, facilitando la separación mecánica de la MO mientras se alimentan de ella. En consecuencia, favorecen la transformación de los nutrientes en formas biodisponibles y aumentan la actividad microbiana. Las lombrices tienden a ubicarse entre la capa de los materiales más frescos (los últimos en ser vertidos) y el compost más maduro que está en el fondo (Steel et al. 2011).

- **Babosas y escarabajos de jardín**

Las primeras son atraídas por la MO, pero no generan ningún problema en el proceso y la presencia de los segundos indica que la calidad del compost es óptima (DFG. 2012).

- **Cochinillas de la humedad**

Estos pequeños animales son esenciales en la descomposición de la MO vegetal leñosa, procesando esta materia en varios ciclos y de forma rápida (Noticias del ayuntamiento de Madrid. 2019). Su presencia determina el estado de madurez del compost. En otras palabras, cuando las cochinillas forman una bola al tocarlas indican que el compost está maduro. Por el contrario, cuando no se hacen la bola y son de color más claro significa que el compost todavía no está estabilizado. Si se encuentran los dos tipos, hay que esperar unas semanas antes de utilizar el compost.

- **Tijeretas**

Son predadores de los otros insectos y muy beneficiosas para el proceso, ya que ayudan a mantener el equilibrio de la fauna dentro y fuera de la compostadora (DFG. 2012).

- **Ácaros**

Son beneficiosos para el proceso debido a que participan en la descomposición de la MO, aumentando la tarea de acción de los organismos descomponedores mediante la fragmentación de los RO (Bazán-Morales et al. 2012). Son amantes de los abonos y se

conocen como los ácaros del contenedor de gusanos. Además, son inofensivo para los seres humanos y para las plantas. Existen dos tipos (Patterson et al. 2020):

- Ácaros depredadores: planos y de color marrón claro, se mueven rápidamente y se encuentran en todo tipo de contenedores de abono.
- Ácaros del suelo: redondos y brillantes, similares a huevos diminutos; se caracterizan por un movimiento muy lento en el compost.

- **Colémbolos**

Los colémbolos son insectos muy pequeños. Fraccionan y trituran los restos vegetales, participan en el control y dispersión de los microorganismos. La mayoría se alimenta de hifas de hongos, polen, algas o de material vegetal en descomposición, aunque también existen otros que se alimentan de nemátodos, rotíferos y de otros colémbolos (Bazán-Morales et al. 2012).

5.8. Potenciales incidencias y soluciones

Durante el proceso de compostaje pueden darse diversas incidencias por la incorrecta composición de la mezcla, la falta de mantenimiento, el control irregular de la humedad o por las condiciones ambientales.

- **Olores**

El mal olor es un indicativo del incorrecto funcionamiento del proceso de compostaje debido, entre otros, a la falta de equilibrio entre los parámetros relativos al proceso de adición. En muchas ocasiones, se produce por la escasa cantidad o el inadecuado tamaño del estructurante. En la Tabla 7 se detalla el origen de los diferentes tipos de olores que puedan darse (Sanchez. 2020b).

Tabla 7. Tipos de olores generados durante el compostaje, causas y soluciones.

Olor	Causas	Solución
Ácido (vinagre)	Falta de oxígeno	Volteo
Agrio (leche cortada)	Déficit de estructurante Condiciones ácidas	Añadir bastante estructurante Volear e intentar bajar la temperatura (mediante un ligero riego o con estructurante)
Alcantarilla	Material ahogado Exceso de humedad	Añadir estructurante o material complementario y volear
Amoniaco	Perdida de nitrógeno Relación C/N excesiva	Mezclar componentes más secos y con mayor contenido en carbono (serrín o poda) y volear

- **Insectos indeseados**

Teniendo en cuenta que un proceso de compostaje correcto no genera malos olores, siempre que aparezcan los insectos listados en la Tabla 8 será debido a una mala gestión del mismo (DFG. 2012).

Tabla 8. Tipos de insectos más usuales en el compostaje, causas y soluciones.

Insectos	Causas	Solución
Mosquitos (p. ej. mosca de la fruta) y moscas comunes*	Mala gestión de la compostadora (p. ej. exceso de humedad, restos de comida al descubierto, falta de volteo)	Mezclar con materiales secos Cubrir los materiales con una capa de materiales secos (hojas secas, paja, serrín, etc.)
Gusanos blancos y gordos (Normalmente son larvas de mosca que proliferan)	Exceso de humedad	
Roedores	Mala gestión del compostaje Bajas temperaturas	Mezclar bien los materiales Cubrir los materiales con una capa de material seco
Muchas hormigas	Ambiente seco y carencia de humedad en el material Abandono del compost	Voltear y regar Añadir RO

*Estos insectos son atraídos por el material en fermentación y su presencia no afecta en ningún caso a la calidad del producto final (Ihobe. 2019b).

- **Otros problemas**

Además de los problemas mencionados anteriormente, el compostaje puede tener otras incidencias como las que se muestran en la Tabla 9 (Alcolea et al. 2000).

Tabla 9. Otros problemas habituales en el compostaje, causas y soluciones.

Problemas	Causas	Soluciones
Bajas temperaturas	Hay poco material	Aumentar el volumen de material y/o cubrir
	Poca humedad	Añadir agua mientras voltear
	Poca aireación (gradientes de T con la altura)	Voltear
	Falta de nitrógeno	Mezclar con componentes nitrogenados
	T ambiental baja	Aumentar el volumen de material y/o cubrir
	Exceso de lluvias	Voltear y añadir material absorbente y drenante
Altas temperaturas	Exceso de humedad	Añadir material seco y voltear
	Insuficiente ventilación	Voltear y regar
Exceso de sequedad No disminución del volumen	Sequedad en el ambiente Exceso de materiales secos Abandono temporal	Añadir material húmedo (mejor de rápida descomposición) Regar ligeramente con agua (si está muy seco)
Filamentos blanquecinos: proliferación de hongos (habituales del compost)	Demasiado seco y/o pobre en elementos nitrogenados	Remover bien pila y regarla

5.9. Caracterización y análisis de la calidad del compost

La calidad del compost obtenido está relacionada con diferentes factores como la elección de los materiales compostados, la proporción de la mezcla preparada, la duración del proceso y la calidad del mantenimiento (volteo, riego y aporte de los materiales), entre otros factores (Campitelli, et al. 2014). El compost maduro se distingue por las siguientes características:

El tamaño de las partículas debe ser pequeño, sin formar aglomeraciones, de color oscuro (marrón, parduzco o negro), según la humedad que tenga y un olor de carácter fúngico o similar al sotobosque. Además, debe asegurarse la ausencia de impropios como plástico y cristales (Irigoien Iriarte. 2020).

La humedad debe estar entre el 30 % y 70 % y la densidad en el rango 0,4–0,8 kg/L (Irigoien Iriarte, 2020). Además, el pH debe ser ligeramente alcalino (6–9), la conductividad eléctrica menor que 3,5 mS/cm y el índice de germinación (IG) superior al 85 % si se desea utilizarlo como fertilizante (Zaha et al. 2013). Finalmente, la relación C/N debe ser inferior a 12 (Vázquez et al. 2017).

Según el RD 506/2013 sobre productos fertilizantes, considerando el producto obtenido como una enmienda orgánica (compost), la cantidad de la materia orgánica total y la humedad no deben superar el 35 % y 40 %, respectivamente. Además, la C/N será menor a 20 y el 90 % de las partículas tienen que pasar por una malla de 25 mm; asimismo, el porcentaje de N total, N orgánico, N amoniacal, óxido de fósforo(V) (P_2O_5) total y óxido de potasio (K_2O) total deben ser superior al 1 % (BOE. 2013).

Por otra parte, la evaluación de un compost antes de utilizarlo es un paso muy importante, ya que la aplicación de un abono inmaduro crea diversos problemas como la inmovilización del nitrógeno mineral, lo que produce un aumento de la microflora que utiliza parte del nitrógeno presente en el suelo para la formación de estructuras celulares. Además, el descenso del nivel de oxígeno y el aumento de temperatura provocados por la descomposición de la MO que contiene el compost inmaduro puede producir defectos en el desarrollo de las plantas. Por último, el compost inmaduro puede contener sustancias fitotóxicas como amoníaco (NH_3), óxido de etileno (C_2H_4O) o ácidos orgánicos como el ácido acético (CH_3COOH), el ácido propiónico ($C_3H_6O_2$) o el ácido butírico ($C_4H_8O_2$). Todas ellas son sustancias inhibitoras de la germinación y el correcto desarrollo de las plántulas (Alcolea et al. 2000). Para la realización de este test, existen diferentes métodos, tal y como se detalla a continuación.

- **Métodos caseros**

Son técnicas de bajo coste cuyo objetivo es indicar si el proceso de compostaje ha finalizado o no. Uno de los métodos más habituales consiste en comprobar que el compost no se calienta a pesar de que haya condiciones óptimas de humedad. Además, debe tener un olor agradable a sotobosque y una apariencia de tierra disgregada, marrón, homogénea y sin la presencia de materiales de aspecto similar al de los biorresiduos de partida.

La segunda técnica se basa en introducir en una bolsa de congelado aproximadamente 500 g de compost con un nivel de humedad adecuado, cerrarla, eliminar el aire que haya dentro de la bolsa y dejarla 72 h a temperatura ambiente. Posteriormente, se abre la bolsa en un lugar cerrado y si el olor es desagradable quiere decir que hay actividad biológica debido a la existencia de materiales lábiles fáciles de descomponer. Al contrario, si el olor es agradable, el compost está maduro (Irigoien Iriarte. 2020).

- **Test de autocalentamiento (Test Rottegrade (UNE-EN 16087-2:2012))**

Esta técnica permite determinar el grado de estabilidad en función de la evolución de la temperatura del compost aislado térmicamente. Para la determinación del estado del

compost, se utiliza una escala entre I y V, según el incremento de temperatura producido entre la temperatura máxima de autocalentamiento y la temperatura ambiental. El grado I indica que el abono es fresco y los grados IV y V corresponden a un abono maduro (Tabla 10). A partir de los resultados obtenidos se determinan la madurez, la calidad e incluso el precio del compost (Storino. 2017).

Tabla 10. Grados de estabilidad (índice Rottegrade) según los resultados del test del autocalentamiento (Grundler. 2007).

Incremento T_{compost} (°C)	Estabilidad	Características de compost	Grupo mayoritario
0–10	5	Compuesto muy estable y correctamente madurado	Compost maduro
10–20	4	Moderadamente estable; maduro	
20–30	3	Material en descomposición; compost activo	Compost activo
30–40	2	Compost inmaduros, jóvenes o muy activos	
40–50	1	Compost fresco y crudo	Compost fresco

Para llevar a cabo este método, se añade agua al compost hasta alcanzar una humedad estándar (55–60 %). Después se introduce la mezcla preparada en vasos Dewar y se conectan con el registrador de datos (equipo RM 82 en la Figura 26) mediante las sondas, tal como se aprecia en la Figura 26. Se compara la temperatura que se desarrolla en el interior de los vasos Dewar con la temperatura del exterior y en función del aumento de esta variable se determina el estado de compost (fresco, premaduro o maduro). Dicho de otro modo, a menor incremento de la temperatura, mayor es la estabilidad del compost (Brinton. 1995). Los resultados requieren de 2 a 9 días para registrarse (Grundler. 2007).



Figura 26. Equipo básico del test de autocalentamiento (Amare natura. 2015).

- **Test Solvita**

Es un test de colorimetría e indica el grado de estabilidad del compost mediante un gel colorimétrico sensible al dióxido de carbono (CO₂) y su madurez mediante otro gel colorimétrico sensible al gas amoníaco (NH₃). Ambos colores se interpretan a partir de una escala numérica de 1 a 8 para determinar el grado de estabilidad y de 1 a 5 para su madurez, donde los números más altos indican mayor estabilidad/madurez (Hill et al. 2013).

El test consiste en introducir una cantidad de compost en unas condiciones adecuadas de granulometría y humedad en un recipiente hasta la línea de llenado y se asegura de que la

densidad es la adecuada golpeando fuertemente el fondo del tarro sobre un mostrador. Después, se introducen dos tarjetas, una de color amarillo (para determinar el amoníaco) y la otra de color morado (para determinar el dióxido de carbono) (Figura 27a), y se cierra el recipiente. Se mantiene el recipiente a temperatura ambiente (20–25 °C) fuera de la luz solar durante 4 h. Tras ese tiempo, se interpreta el resultado final a partir de la escala de colores suministrada por el fabricante (Figura 27b) (Wood and Research. 2002).

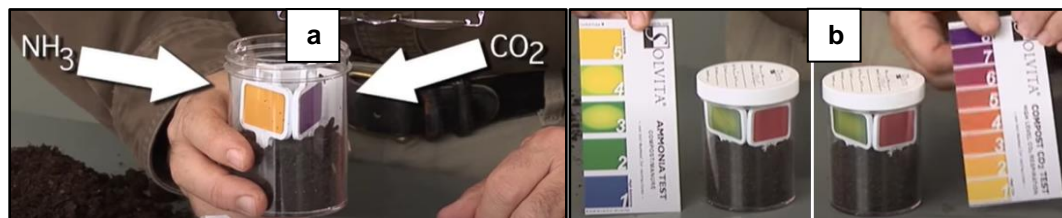


Figura 27. Procedimiento del test de Solvita: introducción de las tarjetas en el compost (a) y lectura de los resultados (b) (Woods End Laboratory. 2009).

Por otro lado, también debe cuantificarse la presencia de patógenos como la *Escherichia coli* y la *Salmonella spp*, así como la concentración de metales pesados. A partir de la cantidad de dichos metales, se puede clasificar el compost producido en base a los niveles de referencia establecidos en la legislación sobre fertilizantes (BOE. 2013) donde se establecen tres clases (Tabla 11).

Tablas 11. Cantidad de los metales pesados en cada clase de compost (BOE. 2013).

Metal	Clase A	Clase B	Clase C
Cd	0,7	2	3
Cr	70	250	300
Cu	70	300	400
Hg	0,4	1,5	2,5
Ni	25	90	100
Pb	45	150	200
Zn	200	500	1000

5.10. Aplicaciones del compost

El empleo del compost tiene muchas ventajas tanto para el suelo como para las plantas. Su uso mejora la estructura del suelo, lo que disminuye el riesgo de erosión y de compactación, logrando un aumento de la capacidad de retención de agua. Además, supone un aporte de nutrientes y el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, disminuyendo el riesgo de lixiviación de nutrientes y la necesidad de añadir fertilizantes químicos. Asimismo, favorece el aumento de la cantidad y diversidad de microorganismos y fauna en el suelo, incrementando la resiliencia y productividad (Alcolea et al. 2000).

Por otra parte, a nivel ambiental cumple una serie de efectos positivos, tales como el cierre del ciclo de la MO, la recuperación y el reciclaje de los recursos naturales y la disminución de la cantidad del carbono en la atmosfera, almacenándose en la tierra como abono natural. Además, supone un ahorro económico en la compra de fertilizantes químicos y, por encima de todo, la reducción de la cantidad de los residuos sólidos urbanos destinados a vertedero e incineración (Campitelli. 2014). En caso de utilizarlo como abono en superficie o enterrado en los primeros centímetros del suelo, la dosis comprende un rango entre 0–5 kg por m² en función del cultivo, de las condiciones ambientales y de las condiciones del suelo. En superficies continuas de más de 5000 m², la dosis aplicada no debe superar los 250 kg de nitrógeno por hectárea.

Cuando se desea aprovecharlo como sustrato o medio de cultivo en contenedores, jardineras, macetas y cultivos en suelos no naturales, la dosis óptima para cada uso se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Proporción de compost a emplear en función de su uso.

Usos	Ratio	Composición
Plantas en general	1:1 (v:v)	Compost : Otro material (tierra, turba, arena, etc.)
Plantas sensibles a la salinidad	1:3 (v:v)	Compost : Otro material (turba, arena, tierra, etc.)
Alcorques de los árboles otoño/primavera	5:1 (L·m ⁻²)*	–
Céspedes urbanos y deportivos (recebo, medio cultivo)	1:1 (v:v)	Compost : Arena

*Variable en función del tamaño de la copa del árbol

Con respecto a los semilleros y las especies muy sensibles a la salinidad, se aconseja que la dosis sea moderada o incluso evitar utilizarlo (Ihobe. 2019b).

6. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA EIVG

6.1. Descripción de los residuos orgánicos

La cafetería de la EIVG está ubicada en el sótano del edificio principal. Este local ofrece un servicio de lunes a viernes de 8 h a 17 h a todos los usuarios del Centro y al alumnado de los institutos cercanos a este. Durante el periodo lectivo, cada jornada se sirven en este sitio diferentes alimentos como platos combinados, bocadillos, hamburguesas, ensaladas, pizzas, bollería, cafés, refrescos y zumos, entre otros. En general, los productos más demandados son los bocadillos y el café, cuyas cantidades se aproximan a más de 100 y 200 unidades diarias, respectivamente.

La preparación y el consumo de estos productos generan RO que se clasifican en tres fracciones diferenciadas (posos de café, cáscaras de naranja y otros biorresiduos) gracias a la colaboración de los responsables de la cafetería. La fracción “otros biorresiduos” contiene diferentes tipos de residuos orgánicos dependiendo de los platos servidos durante la semana. Entre estos residuos destacan la lechuga, las peladuras y trozos de otras frutas/verduras como cebolla, tomate o patata, los restos de pan, el papel de cocina y las servilletas, las tiras de pollo/panceta y las cáscaras de huevo. La determinación de la masa de los tres tipos de RO se llevaba a cabo cada lunes en una báscula industrial básica situada en el sótano de la Escuela (Figura 28).



Figura 28. Báscula industrial empleada para la pesada de los RO.

El cálculo del volumen de los posos de café y de los otros biorresiduos se realizó con la ayuda de un cubo cilíndrico ($h = 40$ cm y $r = 15$ cm), mientras que en el caso de las cáscaras de naranja se aplicó el principio de Arquímedes.

6.2. Descripción de la zona de compostaje

6.2.1. Localización

El proyecto llevado a cabo para lograr la autogestión de los residuos orgánicos generados en la cafetería de la EIVG tuvo múltiples finalidades. Una de ellas, fue mostrar la importancia de aprovechar estos residuos biodegradables para obtener abono natural y dar a conocer el proceso de compostaje a las personas que desarrollan su actividad en la Escuela. Por ello, se decidió colocar las compostadoras en el patio interior del Centro, en la parte anexa a la puerta de salida (Figura 29). Se trata de un lugar cercano al punto de generación de los RO (la cafetería), visible y altamente frecuentado, ya que es el camino más corto para cualquier usuario del Centro (estudiantes, PDI y PAS) que desee atravesar la Escuela o salir del edificio.



Figura 29. Zona de compostaje.

Las compostadoras se dispusieron en una zona umbría lo que ayudó a conservar mejor la humedad en el interior de las mismas. Por otro lado, estaban muy cerca de una toma eléctrica (situada en el interior de la antigua aula de Motostudent), lo que facilitó la instalación de los sensores de temperatura, humedad y pH para implementar la monitorización de dichos parámetros. Finalmente, la zona del compostaje se acotó con un cercado de madera y en el suelo se instaló una malla antihierbas (material geotextil) a modo de aislante.

6.2.2. Características de las compostadoras

Para el compostaje de los RO se usaron 2 compostadoras estáticas. La primera (Figura 30a), denominada compostadora 1, con forma piramidal (la base inferior presentaba unas dimensiones de 85×85 cm y la base superior de 60×60 cm), de 75 cm de altura y un volumen de 300 L. La segunda compostadora (Figura 30b), denominada compostadora 2, se obtuvo gracias a la participación de la EIVG en la campaña "Compostar, ¡Me gusta!" impulsada por el servicio de Planificación y Gestión Ambiental del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Su volumen era de 342 L, su altura de 77,6 cm, mientras que la base superior e inferior medían 74×74 cm y $58,5 \times 58,5$ cm, respectivamente. Las dos se caracterizaban por un sistema de ventilación (ranuras). Asimismo, estaban abiertas en su base para permitir la salida del exceso de agua y disponían de una tapa superior que evitaba la entrada de lluvia e insectos.

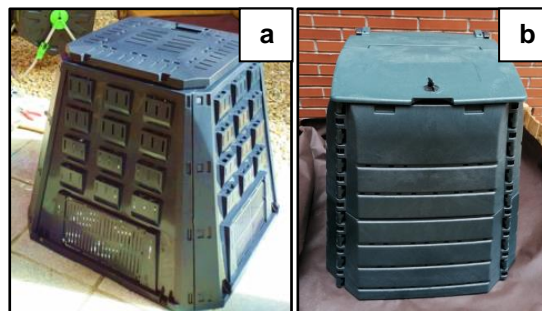


Figura 30. Compostadoras estáticas empleadas: compostadora 1 (a) y compostadora 2 (b).

6.3. Calendario de recogida y gestión de los residuos orgánicos

La compostadora estática de la Escuela (compostadora 1, Figura 30a) no comenzó a llenarse con los RO hasta el mes de octubre del año 2020. Previamente, durante el mes de septiembre, tras su caracterización, el biomaterial se vertía en el contenedor municipal de RO situado a escasos metros de la Escuela, de manera que su recogida y posterior tratamiento era responsabilidad municipal. A partir de octubre, y hasta el 9 de noviembre (fecha a partir de la cual la cafetería cesó su actividad debido a las nuevas restricciones a causa del Covid-19), el vertido de los deshechos se realizó regularmente en la compostadora. El cierre obligado de la cafetería impulsó la búsqueda de residuos de origen externo, pero con características similares que permitiesen proseguir con el proceso de compostaje y asegurar el llenado de la compostadora. Como solución, se decidió emplear los RO de un restaurante, además de los posos de café generados en una cafetería.

La cafetería retomó su actividad habitual a principios de enero de 2021. Es reseñable que, durante las dos semanas de Navidades, no hubo adición de nuevos residuos en la compostadora. Tras las vacaciones de Navidad, se procedió al compostaje de los residuos de la cafetería, del restaurante y de los posos de café del bar hasta la última semana de enero. Posteriormente, se incorporaron únicamente los residuos procedentes de la cafetería hasta el 8 de marzo. Después, se prolongó la adición de los residuos hasta el 24 de mayo, gracias al uso de una nueva compostadora (compostadora 2, Figura 30b), a préstamo por el ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. A continuación, en la Tabla 13 se muestra el resumen del calendario de llenado.

Tabla 13. Cronograma de recogida y gestión de los residuos orgánicos.

	Sep				Oct				Nov				Dic				Ene				Feb				Mar				Abr				May			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Caracterización de los RO y su gestión en el contenedor (marrón) municipal																																				
Compostaje de los RO de la cafetería EIVG en la compostadora 1																																				
Compostaje de los RO externos en la compostadora 1																																				
Cierre de la cafetería por el Covid-19																																				
Vacaciones de invierno																																				
Compostaje de los RO de la cafetería EIVG en la compostadora 2																																				

- **Cantidad de residuo orgánico compostada recogida**

A lo largo de los 9 meses, se recogieron aproximadamente 575 kg de residuos orgánicos (318 kg de otros biorresiduos, 13 kg de cáscaras de naranja y 244 kg de posos de café). En promedio, se recogió 64,6 kg/mes durante 18 días/mes. A continuación, en la Figura 31, se reflejan en detalle la cantidad gestionada de cada tipo de RO y el número mensual de días de muestreo.

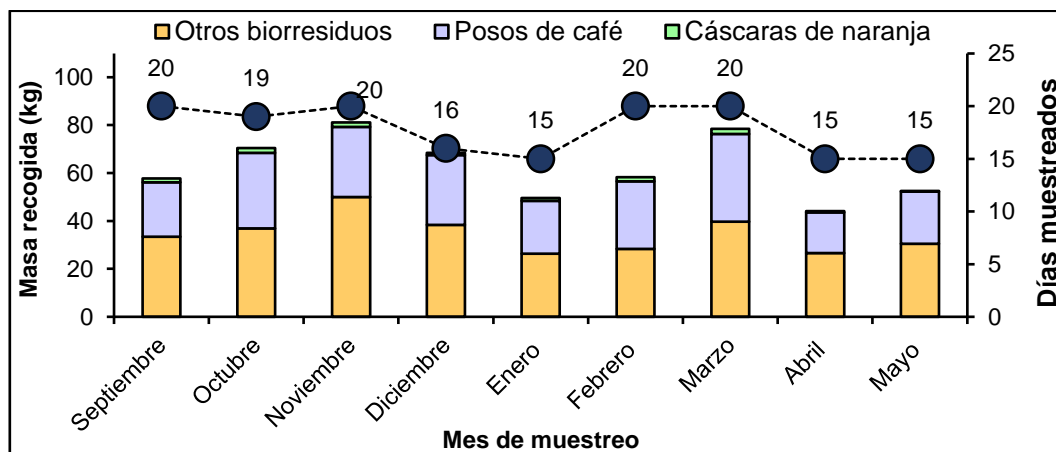


Figura 31. Masa recogida de cada tipo de RO y días de muestreo realizados mensualmente.

6.4. Especificación del proceso de compostaje

6.4.1. Ratios de los componentes de la mezcla compostada

Tal y como se ha mencionado previamente en el apartado 5.3, la preparación de un buen compost requiere una mezcla de materiales de tamaño adecuado y de diferente velocidad de degradación. En el presente TFG, la relación volumétrica empleada entre la materia verde y la marrón fue de 2 a 1 (relación volumétrica). Este ratio fue seleccionado con el objetivo de compostar todo el material verde que se generase en la cafetería, además de mantener la humedad durante el proceso de compostaje y lograr una proporción adecuada de C/N.

El material marrón estaba formado por:

- Hojas recogidas alrededor de la Escuela y posteriormente secadas y trituradas en el laboratorio (1/3 del volumen seco).
- El material estructurante, obtenido del punto limpio del Garbigune de Gardelegi, y compuesto principalmente por restos de poda triturados y astillas de madera (2/3 del volumen seco).

El material estructurante evitó la excesiva compactación de los RO por su propio peso, o dicho de otro modo, el mantenimiento de la porosidad deseada y, por lo tanto, la degradación aerobia de los RO. Por su parte, las hojas secas se consideraron un material complementario y se utilizaron principalmente para mantener y corregir la humedad.

El material verde estaba compuesto por tres grupos de desechos: restos orgánicos (2/3 del volumen húmedo), posos de café (1/3 del volumen húmedo) y una fracción residual de cáscaras de naranja troceadas (volumen despreciable).

6.4.2. Proceso de adición de los materiales

El proceso de compostaje comenzó con la preparación de una cama (o lecho) de material seco

en la base de la compostadora. La altura de este lecho fue de aproximadamente 10 cm y su función fue permitir una buena circulación de aire, es decir, asegurar el drenaje de la materia orgánica que posteriormente se depositaría sobre el mismo. Después, cada semana, se depositaron las diferentes fracciones, anteriormente detalladas, en el siguiente orden: en primer lugar, los restos orgánicos (Figura 32a), los posos de café (Figura 32b) y las cáscaras de naranja (Figura 32c). Después, una parte de las hojas secas y cáscaras de nuez (en caso de que las hubiera) (Figura 32d) y, por último, el estructurante (Figura 32e). A continuación, se mezclaban los materiales frescos (Figura 5f) con la capa inferior (material más antiguo) con la ayuda del aireador. Este último paso, aceleraba la dispersión de los microorganismos sobre los nuevos biorresiduos, facilitando así la descomposición de los materiales vertidos. Finalmente, se cubría toda la mezcla con hojas secas (Figura 32g) para evitar la proliferación de moscas de la fruta y prevenir su agrupación. Este proceso se repetía hasta el llenado de la compostadora.

El aporte de los materiales se realizó una vez a la semana con el objetivo de dejar el tiempo suficiente para la degradación de los materiales añadidos y evitar problemas de lixiviaciones. Es decir, al añadir la nueva mezcla, la capa de abajo debería haber pasado por una fase en la cual su humedad hubiera sido absorbida de modo que cuando empezase a sufrir compactación por el material superior no se generasen lixiviados.

Por otra parte, y con el objetivo de facilitar el arranque del proceso durante las 2 primeras semanas, se añadió un acelerante comercial (Compo, composte, acelerador de la descomposición de residuos vegetales) siguiendo las indicaciones del fabricante (2 kg del acelerador por cada 3 m³ de mezcla de material).

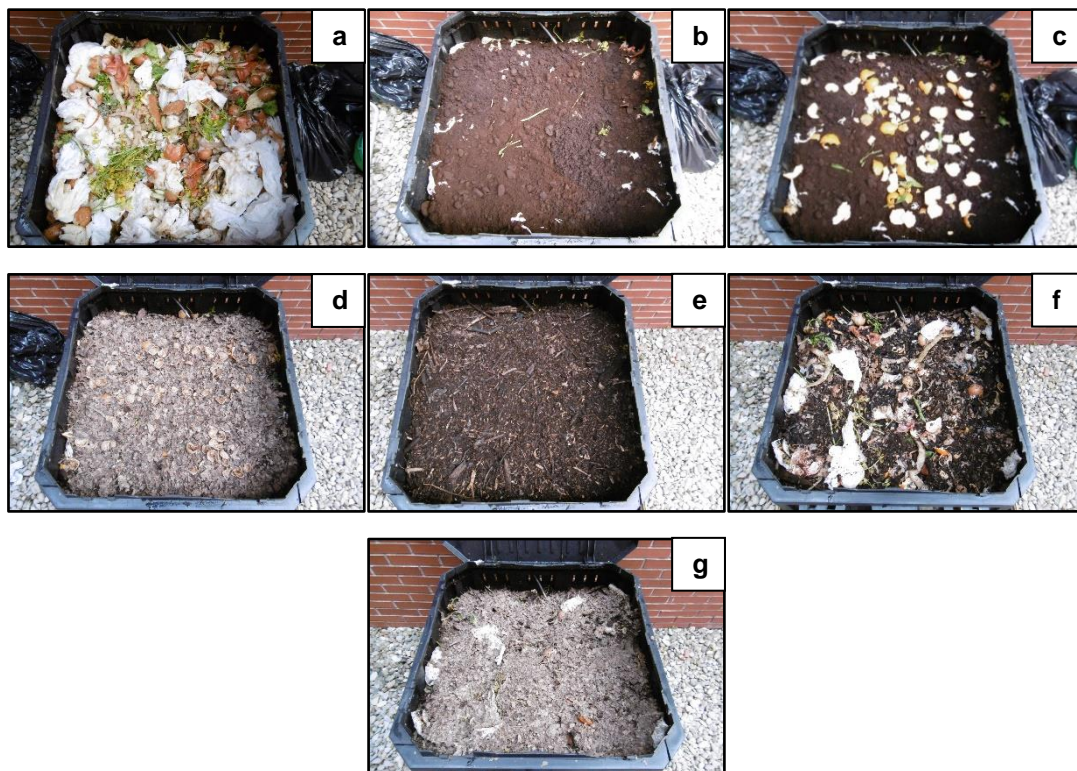


Figura 32. Secuencia de la adición de materiales en la compostadora.

6.4.3. Mantenimiento

El mantenimiento del compost se realizó mediante el volteo, riego y adición de material seco (hojas secas), así como el trasvase del material una vez estuvo llena la compostadora 1.

- **Volteo**

Durante el proceso de compostaje y hasta que se llevó a cabo el trasvase (154 días), se volteó la mezcla 2 veces por semana: el día de la adición de los nuevos materiales (normalmente los lunes), antes de proceder al vertido de los biorresiduos, y tras 4 o 5 días (el jueves o viernes de la misma semana). Posteriormente, tras el trasvase, el material compostado se volteó una vez por semana para mantener los niveles del oxígeno y evitar el consumo de los compuestos húmicos formados y a una rápida mineralización de los mismos causado por un exceso de oxígeno (Moreno Casco et al. 2007).

- **Riego y aporte del material seco**

En caso de secado de la mezcla, se añadió agua mientras se volteaba con el objetivo de asegurar la corrección de humedad de todo el material. Por el contrario, para corregir el exceso de humedad, se recurrió a la adición de hojas secas trituradas.

- **Trasvase**

Tras 5 meses de adición de los materiales, el día 146 del proceso de compostaje se completó el llenado de la compostadora 1 (Figura 33a). Se observó que los materiales del fondo empezaban a compactarse excesivamente por el peso que ejercían los de arriba. En consecuencia, el volteo no era homogéneo y no llegaba hasta el fondo de la compostadora, sobre todo en las esquinas. Esto generó una pérdida de porosidad y una acumulación de un exceso de humedad (Figura 33b). Como solución, el 16 de marzo se decidió retirar la mitad superior del material acumulado en la compostadora 1 y trasvasarlo a la compostadora 2 (Figura 33c), mientras que el resto del material (altura total de 48.8 cm), permaneció en la compostadora 1 otros 3 meses más hasta su completa maduración.



Figura 33. Estado de la compostadora 1: llena (a), exceso de humedad en bordes del fondo (b) y trasvase de los materiales (c).

Este procedimiento permitió la corrección de las posibles desviaciones que mediante los volteos eran inapreciables. Además, se trató el exceso de humedad acumulada en los materiales del fondo mediante el aporte de 3,3 kg de material seco; 2,5 kg de estructurante y 0,9 kg de hojas secas.

Durante el trasvase, se extrajeron 4 muestras a diferentes alturas con la ayuda de un tubo perforado (Figura 34). A mayor profundidad, mayor tiempo de residencia de la muestra en el interior de la compostadora. En este caso, la 1ª muestra contenía el material vertido durante el 1º mes de compostaje (en total, 5 meses de compostaje), la 2ª muestra se asoció al material vertido durante el 2º mes (4 meses de compostaje) y así sucesivamente.



Figura 34. Extracción de las muestras mediante un tubo perforado.

6.5. Parámetros de control

Para efectuar el control y seguimiento del proceso de compostaje, se midieron diariamente tres parámetros (temperatura, humedad y pH) antes de llevar a cabo las tareas de mantenimiento anteriormente descritas. Tras el trasvase, y teniendo en cuenta que el material se hallaba en fase de maduración (temperatura de la mezcla baja y constante en el tiempo), el control de las 3 variables se realizaba exclusivamente 2 veces por semana.

- **Temperatura**

En primer lugar, se midió la temperatura ambiente y la del material acumulado en la compostadora. En este último caso, cada día de toma de datos se realizaron 3 mediciones a lo largo de una diagonal imaginaria: en la zona delantera (Figura 35a), central (Figura 35b) y trasera (Figura 35c). En cada zona, se midió la temperatura a diferentes profundidades en función de la cantidad de material acumulado: desde los 5 cm hasta los 35 cm, a intervalos regulares de 5 cm.



Figura 35. Procedimiento de medición de la T en la zona delantera (a), central (b) y trasera (c).

- **pH**

La determinación del valor del pH se realizó con tiras de papel indicador (Metria) y un medidor digital (medidor de pH en suelos, Yangers).

Al igual que en el caso de la temperatura, la medición del pH se llevó a cabo en 3 zonas de la compostadora (delantera, central y trasera). El procedimiento del primer método (Figuras 36a y 36b) es el siguiente: se coge una muestra en un recipiente y se introduce un pedazo de papel indicador, para luego añadir una pequeña cantidad de agua y proceder a su mezclado. A continuación, se retira el papel indicador de la mezcla y se determina el valor de pH con la ayuda del código de colores del papel pH. En el segundo caso (Figura 36c), se introduce la vaina del medidor de pH digital en la compostadora y se apunta el valor obtenido.

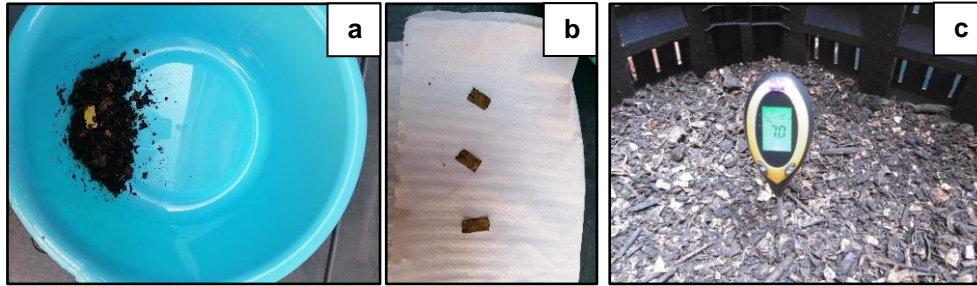


Figura 36. Medición del pH de la mezcla con papel indicador (a y b) y con medidor digital (c).

- **Humedad**

La determinación de la humedad también se realizó mediante 2 métodos: empleando el medidor digital descrito anteriormente y aplicando el método de puño. Esta segunda técnica consiste en coger un puñado de la mezcla (Figura 37a) y mantenerlo apretado durante unos segundos (Figura 37b). Si solamente se humedece la mano y no se escurre agua entre los dedos, indica que la mezcla tiene una humedad adecuada. Si gotea o chorrea, muestra un exceso de humedad. Por último, si al abrir la mano la bola formada se desmorona, significa que el compost está seco (Figura 37c).

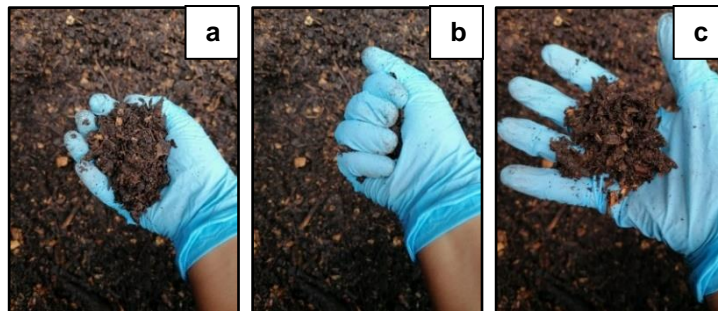






Figura 37. Secuencia para el método del puño: coger (a), apretar (b) y abrir (c).

6.5.1. Automatización de la medición de los parámetros de control

Durante el presente TFG, se llevó a cabo la monitorización automática de los parámetros de control en paralelo con la medición manual anteriormente descrita. Los sensores utilizados en esta tarea (Tabla 14) fueron seleccionados en el TFG desarrollado por Gorka Quintana, alumno del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática, bajo el título "Desarrollo y puesta en marcha de un sistema de monitorización para una compostadora".

En su TFG, Gorka diseñó un sistema basado en una tarjeta Raspberry Pi para la realización de esta tarea y se completó con una base de datos para registrar los valores de los parámetros medidos. La visualización de estos últimos se realizó a través del software libre Grafana, mediante una representación gráfica de sus evoluciones.

Tabla 14. Características de los sensores.

Sensor	Variable medida	Características	
		Tipo	Rango de medición
	Temperatura	DS18B20	(-40–125) °C
	Humedad relativa	SEN0193	(0–100) %
	pH	SEN0169-V1 y SEN0169-V2	0–14
	Temperatura y humedad ambiental	SHT85	(40–105) °C (0–100) %

Se instalaron 6 sensores para medir los parámetros del compost, 2 para cada variable, capaces de soportar el gradiente de temperaturas (~50 °C) y la presencia de agua. Se coloraron en las zonas más importantes de la compostadora, de modo que los de temperatura y pH se situaron en la zona delantera a una profundidad de 10 cm (Figuras 38a y 38b) y en el centro a una profundidad igual a la mitad de la altura ocupada por los materiales (Figuras 38c y 38d). Además, los sensores de humedad (Figuras 38e y 38f) se colocaron uno en la zona delantera y el otro en la trasera. Por otra parte, se dispuso de otro sensor para medir las condiciones ambientales tanto de temperatura como de humedad. Este se ubicó fuera de la compostadora, en una zona elevada y protegida para evitar posible contacto con el agua. Los sensores se pusieron en marcha el día 23 de diciembre y el proceso de medición duró hasta el día en que se trasvasó el compost maduro (16 de julio). Con respecto al mantenimiento, la limpieza de los sensores de la humedad y pH se realizó los días del volteo tras retirarlos del compost.

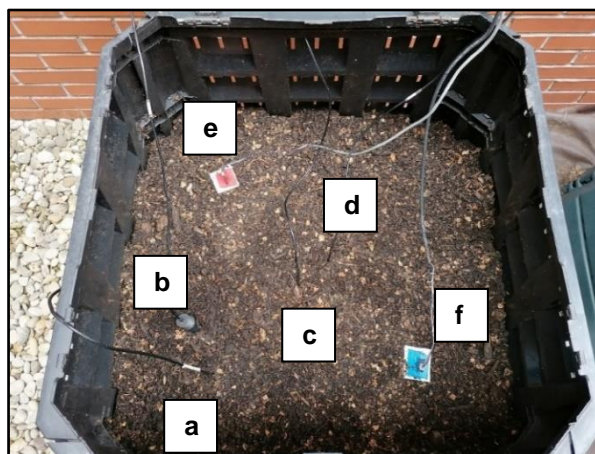


Figura 38. Sensores temperatura (a y c), pH (b y d) y humedad relativa (e y f).

6.5.2. Biodiversidad

La degradación de los RO es un proceso dinámico debido a la sucesión de distintas poblaciones microbianas (bacterias, hongos, etc.), en función de las condiciones (temperatura, humedad, nutrientes, etc.) y el grado de degradación de los desechos orgánicos. A lo largo del proceso, se observó la aparición de diferentes insectos y otros seres invertebrados característicos de cada etapa. En la fase mesófila (primer mes de compostaje), se observó la aparición de lombrices inmaduras (Figura 39a) y muchas moscas de la fruta junto con sus correspondientes larvas (Figura 39b).



Figura 39. Insectos de la fase mesófila: lombriz inmadura (a) y larva de la mosca de la fruta (b).

En la fase termófila (fase comprendida entre el 2º y 5º mes de compostaje), desaparecieron las larvas de mosca y en su lugar se observó la aparición de nuevos insectos y animales como cochinillas (Figura 40a), tijeretas negras (Figura 40b), babosas (Figura 40c), lombrices maduras (Figura 40d) y ácaros (Figura 40e). Finalmente, en el 4º y 5º mes de compostaje aparecieron gran cantidad de ácaros y lombrices.

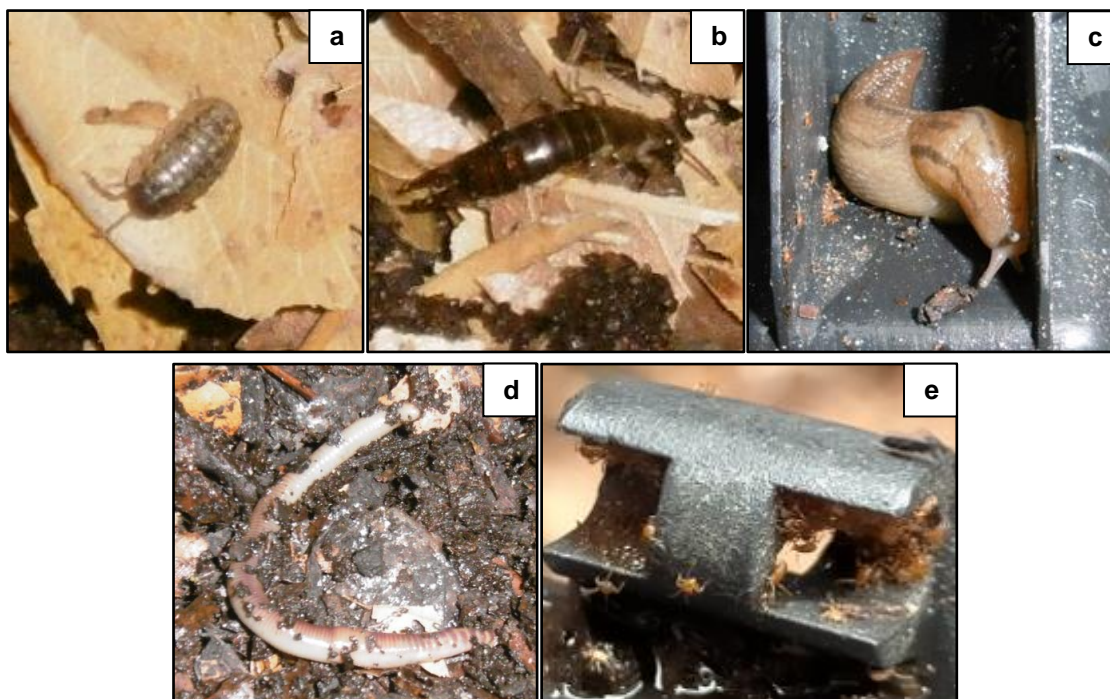


Figura 40. Insectos de la fase termófila: cochinillas (a), tijeretas negras (b), babosas (c), lombrices maduras (d) y ácaros (e).

Durante las primeras semanas de la fase de maduración (entre el 6º y el 8º mes de compostaje) predominaron las lombrices que ocuparon las esquinas del fondo de la compostadora y los mosquitos. En los siguientes 2 meses, se apreció la presencia de arañas, ácaros en muy poca cantidad y ciempiés (Figura 41).



Figura 41. Ciempiés hallado durante la fase de maduración.

6.5.3. Compresión y compactación

Durante el proceso de compostaje, la degradación de los materiales debido a la actividad microbiana conllevó una reducción progresiva del volumen de los desechos orgánicos acumulados y una compactación por el efecto del peso de los materiales de la capa superior. Para poder determinar el grado de compactación, antes y después de proceder a un nuevo vertido, se midió la altura (h) y la pendiente (ap) del nivel alcanzado por el material dentro de la compostadora (Figura 42).

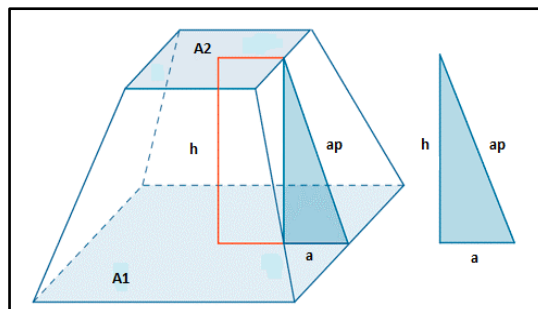


Figura 42. Esquema de la geometría de la compostadora.

6.6. Caracterización del compost

La evaluación del compost obtenido es imprescindible para asegurar la madurez, la estabilidad del producto y su calidad. Por ese motivo, se realizó la caracterización de distintas propiedades clasificadas como físicas (olor y temperatura), químicas (pH, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes), biológicas (fitotoxicidad), microbiológicas (análisis de respiración) o espectroscópicas (métodos de RMN e infrarrojos), entre otros. Para ello, se analizaron las muestras descritas en la Tabla 15, recogidas siguiendo la metodología descrita en el apartado 6.4.3, por triplicado.

Tabla 15. Muestras de los materiales analizados en el laboratorio.

Muestra	Especificaciones
5-meses	5 meses de compostaje: seca y triturada
4-meses	4 meses de compostaje: seca y triturada
3-meses	3 meses de compostaje: seca y triturada
2-meses	2 meses de compostaje: seca y triturada
Maduro-seco	8 meses de compostaje (compost maduro): seca y triturada y sin tamizar
Maduro-húmedo	8 meses de compostaje (compost maduro): húmeda, tamizada y sin triturar

6.6.1. Humedad

La determinación de la humedad de las primeras 5 muestras antes de secarse y triturarse se realizó según el siguiente procedimiento: en primer lugar, se pesó un crisol de porcelana vacío en una balanza analítica (P_1). Después, se añadieron 50 g de compost y se pesó el conjunto (P_2) (Figura 43a). A continuación, se introdujo la muestra en la estufa a 105 °C durante 48 h para eliminar la humedad. Transcurrido ese tiempo, se sacó de la estufa, se dejó enfriar y se pesó la muestra seca (P_3) (Figura 43b).

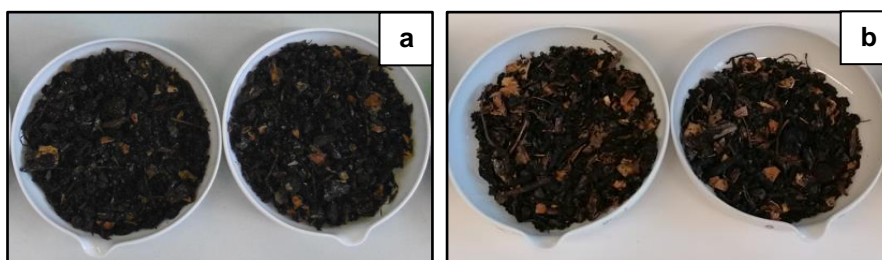


Figura 43. Muestras del compost de la prueba de humedad: antes (a) y después (b).

El porcentaje de humedad relativa (RH (%)) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$RH (\%) = \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} \right) \cdot 100$$

6.6.2. pH

El valor de pH (Figura 44) se determinó mediante la preparación de una disolución acuosa con una proporción de muestra fresca/agua de 1/5 (relación másica). Se mezclaron 50 g de la muestra madura-húmeda con 250 mL de agua destilada. Se agitó la disolución durante 30 min en un agitador magnético y después se centrifugó (equipo: Meditronic, Selecta) durante 15 min a 3000 rpm. A continuación, se filtró el sobrenadante obtenido y el filtrado se utilizó para la medición del pH (equipo: Crison pH Meter Basic 20).



Figura 44. Medición del pH de una muestra de compost.

6.6.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) está determinada por la naturaleza y composición de los residuos orgánicos compostados, principalmente por su concentración de sales, fundamentalmente debido a los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y de los aniones HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , que corresponden aproximadamente al 98 % del total de sales solubles (López Martínez et al. 2011). Durante el proceso de compostaje, la CE tiende generalmente a aumentar por la mineralización de la materia orgánica, lo que produce un aumento de la concentración de nutrientes. Un descenso de la CE durante el proceso puede ser causado por el fenómeno de lixiviación en la masa, provocados por un exceso de humedad de la misma (Campitelli et al. 2014).

La importancia de este parámetro se muestra cuando el compost se aplica al suelo, puesto que una salinidad excesiva es un factor limitante en la germinación y en el desarrollo de los cultivos, debido a la dificultad de la absorción de agua por las raíces. Asimismo, puede dar información sobre los materiales de entrada y/o el funcionamiento del proceso. En el caso de las muestras cogidas a lo largo del proceso de compostaje, la CE está muy relacionada con el contenido en nitrógeno en forma amoniacal, mientras que en muestras de compost maduro puede tener relación con el contenido en nitratos (López Martínez et al. 2011). La medición de la conductividad se realizó con la ayuda de un conductímetro (modelo 524, Crison) con un extracto acuoso, preparado siguiendo el procedimiento ya descrito en el apartado del pH (Figura 45).

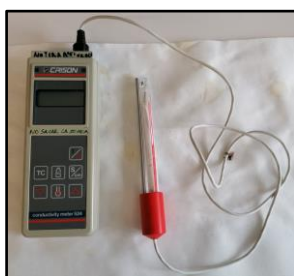


Figura 45. Conductímetro.

6.6.4. Composición química

- **Nutrientes**

Uno de los beneficios de la aplicación de compost a la tierra es la aportación de los nutrientes necesarios para la mejora de sus características. No obstante, la cantidad de los nutrientes donados suele ser limitada, si se compara con el efecto que ejercen los abonos minerales tradicionales. La concentración de los nutrientes en el compost es muy variable según el origen de los materiales compostados y puede variar a lo largo del compostaje (Vázquez et al. 2017).

El contenido de K, N y P en las muestras secas de la Tabla 15 se determinó usando el Kit de análisis de tierra de la marca Natcare (Figura 46), el cual incluye los reactivos y los materiales necesarios, así como un manual que explica el procedimiento a seguir para la determinación de cada parámetro, junto a una escala para la visualización de los resultados.



Figura 46. Kit de análisis de pH y nutrientes del compost.

- **HCNS**

Durante el compostaje, el contenido del nitrógeno no varía significativamente, sin embargo, el carbono se pierde hasta más de las 2/3 partes, por lo que la relación C/N disminuye durante el proceso (Mihaela Matei et al. 2016). El producto final obtenido por el compostaje se caracteriza por los ácidos húmicos, teniendo en cuenta que estos condicionan la calidad del compost final obtenido y son un buen indicador del grado de estabilización y madurez de la MO del compost.

En general, las sustancias húmicas están compuestas por una gran variedad de anillos aromáticos (fenólicos y quinónicos) unidos por grupos funcionales ácidos o por cadenas alifáticas periféricas (polisacáridos, péptidos, etc.) y agrupados en las diferentes disposiciones moleculares que conforman la estructura de las sustancias húmicas. Éstas pueden dividirse principalmente en fracciones húmicas y fúlvicas (Jouraiphy et al. 2008). El contenido de las estructuras aromáticas y grupos carboxílicos presentes en un compost se mide mediante el ratio H/C, de modo que cuanto mayor sea este índice mayor es la cantidad de ácidos húmicos (Mihaela Matei et al. 2016).

El porcentaje másico de C, N, H y S se determinó mediante un análisis elemental usando un analizador TruSpec CHNS (LECO) (Figura 47). El ensayo se basó en una oxidación completa de 300 mg de las muestras secas de la Tabla 15 mediante una combustión instantánea a una temperatura de 1350 °C. Por lo tanto, los elementos anteriormente mencionados se liberaron en gases simples (CO₂, N₂, H₂O y SO₂, respectivamente) y mediante una separación posterior se cuantificó cada uno independientemente.

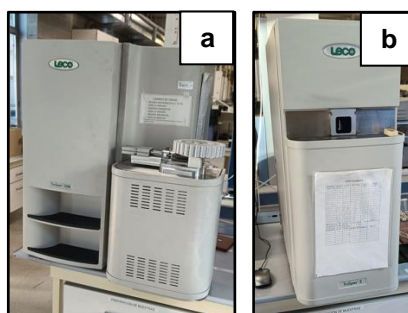


Figura 47. Analizador TruSpec CHNS (LECO) de CHN (a) y S (b).

- **FTIR**

Durante el proceso de compostaje, la relación entre ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) varía, de modo que se produce un incremento progresivo de AH y un descenso de AF. La relación entre ambos (AH/AF) es un índice importante de la madurez del compost. Se considera que debe ser superior a 1 en un compost maduro (Mihaela Matei et al. 2016).

El análisis de infrarrojos por transformada de Fourier es una herramienta cualitativa para determinar los grupos químicos que componen las estructuras húmicas que conforman el compost. Las moléculas absorben la energía del espectro infrarrojo que provoca vibraciones en los enlaces de los átomos. En consecuencia, se obtienen espectros (una representación gráfica del efecto de esa interacción) que puedan dar información de la presencia de determinados enlaces químicos debido a que cada enlace “vibra” a una frecuencia característica (Tortosa. 2013).

En este análisis, se utilizó un espectrómetro Nicolet Nexus 670 provisto de un accesorio MKII Golden Gate (Specac) con un cristal de diamante en un ángulo de incidencia nominal de 45° y lente ZnSe. Las mediciones se realizaron a 32 escaneos con una resolución de 4 cm⁻¹ en el rango entre 4000 y 650 cm⁻¹ (Figura 48).



Figura 48. Espectrómetro Nicolet Nexus 670.

6.6.5. Índice de germinación

Es un método que evalúa la fitotoxicidad y la estabilidad del compost. Integra los diferentes aspectos que pueden influir negativamente en el crecimiento vegetal, a consecuencia de la inmadurez del compost o de la presencia de elementos tóxicos. Estas sustancias incluyen los ácidos orgánicos de bajo peso molecular (p. ej. los ácidos fenólicos, el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), los metales pesados o los compuestos xenobióticos (p. ej. antibióticos y agroquímicos).

La prueba consiste en cultivar semillas en muestras de un extracto acuoso del compost analizado y en agua (blanco). Tras terminar el experimento, se mide la longitud de las retículas de las semillas germinadas y se cuenta el número de estas. A partir de estos resultados se calcula el índice de germinación (IG) y la germinación relativa (RSG) usando las siguientes formulas (Zaha et al. 2013).

$$\text{IG} = \frac{\text{Número de semillas germinadas} \cdot \text{longitud media de la retícula de la muestra de compost}}{\text{Número de semillas germinadas} \cdot \text{longitud media de la retícula del blanco}} \cdot 100$$

$$\text{RSG} = \frac{\text{Número de semillas germinadas en la muestra de compost}}{\text{Número de semillas germinadas en el blanco}} \cdot 100$$

Los valores de IG inferiores al 50 % indican una alta fitotoxicidad, entre el 50 y 80 % la fitotoxicidad es moderada y los valores superiores a 80 % revelan que el compost no presenta fitotoxicidad. Cuando el IG supera el 100 %, el compost puede ser considerado un fitonutriente o fitoestimulante (Fain Binda et al. 2018). En el caso del RSG, los valores superiores al 60 % confirman la madurez del compost y que no es toxico para las plantas en crecimiento (Zaha et al. 2013).

Para la realización de esta prueba se eligieron semillas de rabanito redondo rojo (Figura 49) y se analizaron 2 muestras: una del compost maduro húmedo y otra de agua destilada (muestra control o blanco).



Figura 49. Tipo de semillas utilizadas en el análisis.

Antes de proceder a la preparación de la disolución, se trituró la muestra madura-húmeda. A continuación, se mezclaron 145,35 g de la muestra con 500 mL de agua destilada y se agitaron mediante un equipo Jar test durante 30 min a ~150 rpm (Figura 50).



Figura 50. Muestra madura-húmeda dentro del Jar test.

Tras ese tiempo, se centrifugó la disolución (Figura 51a y 51b) durante 10 min a 4000 rpm y se filtró al vacío el sobrenadante obtenido a través de un filtro de 0,45 μm (Figura 51c).

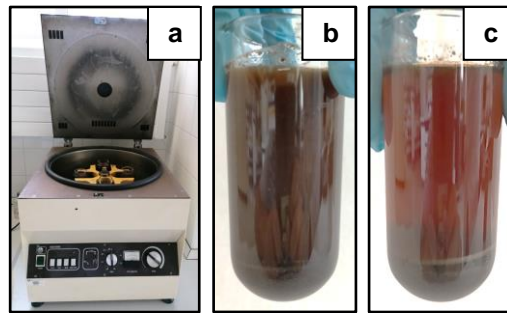


Figura 51. Proceso de centrifugación de la muestra preparada: muestra dentro de la centrifugadora (a); aspecto de la muestra antes (b) y después (c) de la centrifugación.

A continuación, se colocó un papel filtro húmedo en las placas de Petri limpias y secas y se añadió 5 mL del filtrado, mientras que en otra placa de Petri se añadió únicamente agua destilada (muestra control o blanco). Luego, se distribuyeron 20 semillas en todo el papel (Figura 52). Se introdujeron las muestras en la incubadora de la marca Raypa a 27 °C y se controló el crecimiento de las semillas durante tres días (72 h).

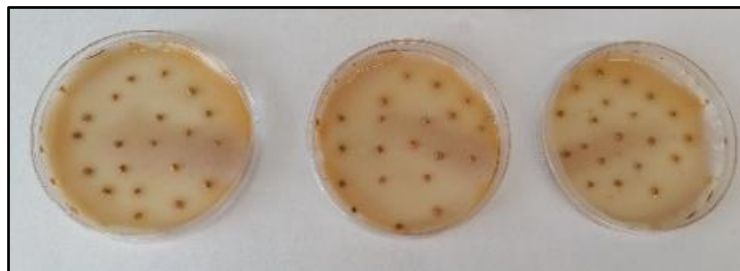


Figura 52. Muestra 5-meses con las semillas.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Proceso de compostaje

7.1.1. Temperatura

En la Figura 53, se muestra la evolución a lo largo del proceso de la temperatura medida en la mitad de la altura ocupada por los RO (T_{mitad}) y la altura total de los materiales (h) en cada momento para la compostadora 1. Además, se indica el mantenimiento realizado, adición de RO, riego, volteo y el día del trasvase a la compostadora 2.

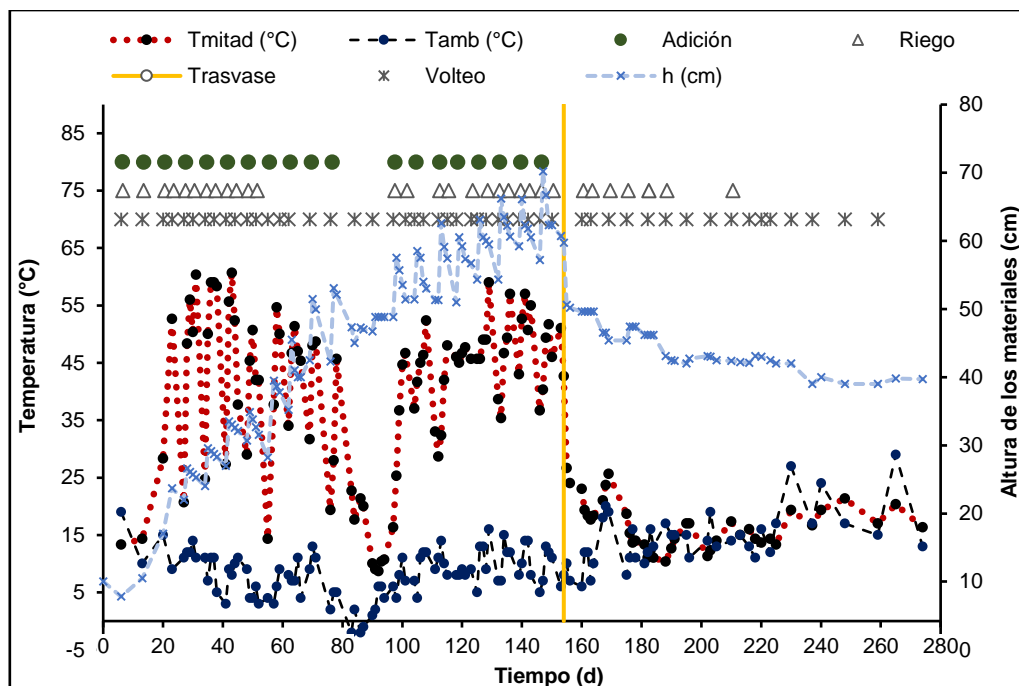


Figura 53. Evolución de la temperatura y la altura ocupada por los materiales junto al mantenimiento realizado a lo largo del proceso.

Tal y como se muestra en la Figura 53, al principio del proceso, la T_{mitad} no alcanzó valores termófilos, estando en todo momento por debajo de los 40 °C. Esto fue debido a las pequeñas cantidades añadidas (entre 25 L y 46 L), lo que hizo que la cantidad acumulada no era lo suficientemente grande para que se conservara el calor liberado por la degradación de la MO.

Trascurridos 25 días, los materiales empezaron a entrar en la fase termófila (53,7 °C) debido al aumento del volumen derivado de las continuas adiciones de RO (~50 L). Tras añadir una nueva remesa de RO (51 L) (día 41, Figura 54), se produjo un aumento significativo de la temperatura (se alcanzaron valores máximos de T_{mitad} de 60 °C). Posteriormente, al añadir cantidades similares de RO, el valor de T_{mitad} permanecía por encima de los 50 °C durante 3–4 días, lo que afectó positivamente a la higienización del compost.

Entre los días 83 y 94 (periodo vacacional de Navidades) (Figura 53), el decrecimiento de T_{mitad} fue significativo hasta llegar a los 8,6 °C, debido probablemente al agotamiento de la MO más accesible y a la ausencia del aporte de nuevos materiales para activar la pila. Además, en este periodo, la T_{amb} bajó mucho, hasta -1 °C, lo que dificultó la conservación de la temperatura en el interior de la compostadora 1.

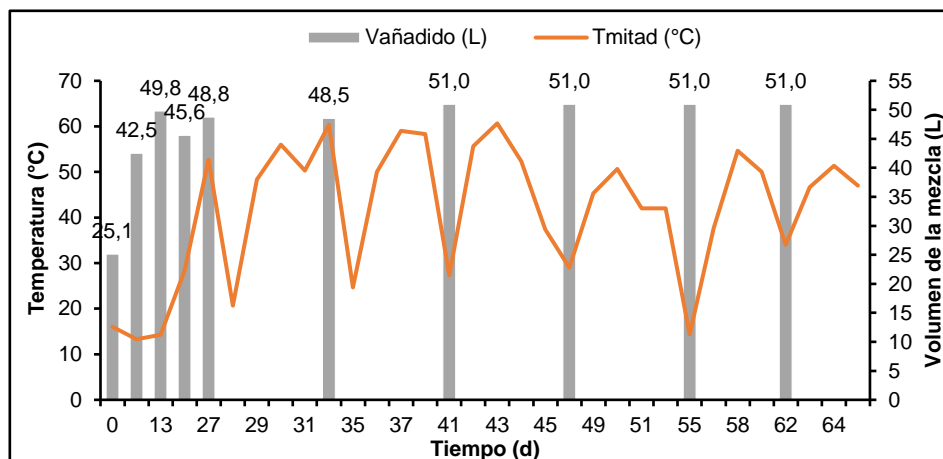


Figura 54. Evolución de la temperatura a la mitad de la altura de los materiales y volumen de la mezcla adicionada durante el proceso de compostaje.

Durante los días 100 y 154, la cantidad de material acumulado alcanzó la altura máxima en el interior de la compostadora (70,2 cm). En consecuencia, la duración de la etapa termófila se vio prolongada entre 4 y 12 días y se obtuvieron altos valores de T_{mitad} , entre 58 °C y 68 °C. Tras el día 154, se decidió no verter más biorresiduos y se hizo el trasvase para dar comienzo a la etapa de maduración, donde la T_{mitad} en el interior de la compostadora fue similar a la temperatura ambiental.

Por otra parte, la evolución de la temperatura en el centro de la compostadora a la mitad de la altura de los RO ($T_{mitad\ centro}$) fue mayor (Figura 55) que en la periferia, ya que es una zona caracterizada por una alta actividad microbiana. En la fase mesófila (primeros 20 días del proceso), la variación de este con respecto a la T_{mitad} fue pequeña debido a los motivos mencionados anteriormente. No obstante, en la fase termófila (periodo 20–154), la $T_{mitad\ centro}$ alcanzó valores muy altos (~70 °C). Tras el trasvase, el enfriamiento de los materiales fue lento. Durante la maduración, el comportamiento de $T_{mitad\ centro}$ fue similar al de la temperatura ambiente. Comparando los valores de $T_{mitad\ centro}$ recogidos de forma manual con los obtenidos de forma automática, se comprobó que ambos eran muy similares.

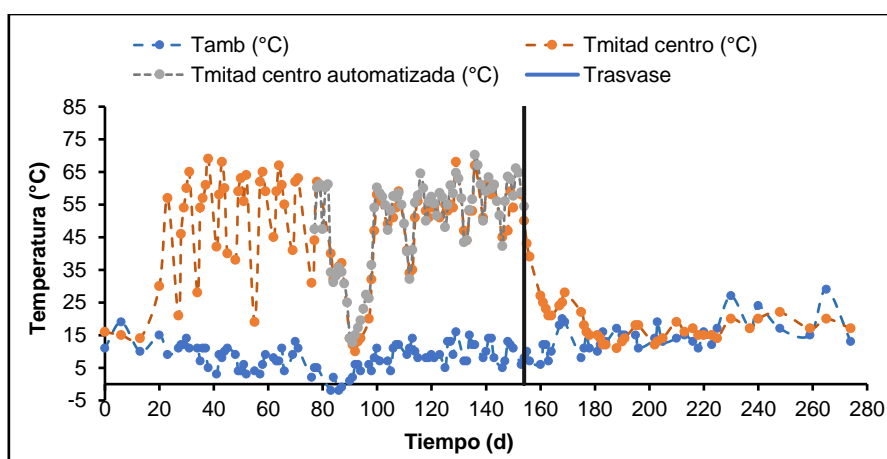


Figura 55. Evolución de la temperatura en el centro medida a la mitad de la altura de los materiales mediante dos métodos (manual ($T_{mitad\ centro}$) y automático ($T_{mitad\ centro\ automatizada}$)).

7.1.2. pH

El seguimiento del pH permitió obtener una idea general de la cantidad de oxígeno que tenía la mezcla, ya que, si este es escaso, se crean condiciones anaeróbicas. Por ende, se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH. Durante el proceso de compostaje, el pH

inicialmente se midió mediante papel indicador de pH y una vez avanzado el proceso, gracias a la adquisición de un medidor digital, se combinaron ambas mediciones. Por último, la medida también se realizó de forma automatizada tras la instalación de un sensor de pH (en la compostadora 1). A continuación, en la Figura 56 se presentan los resultados de la medición de este parámetro mediante los tres métodos.

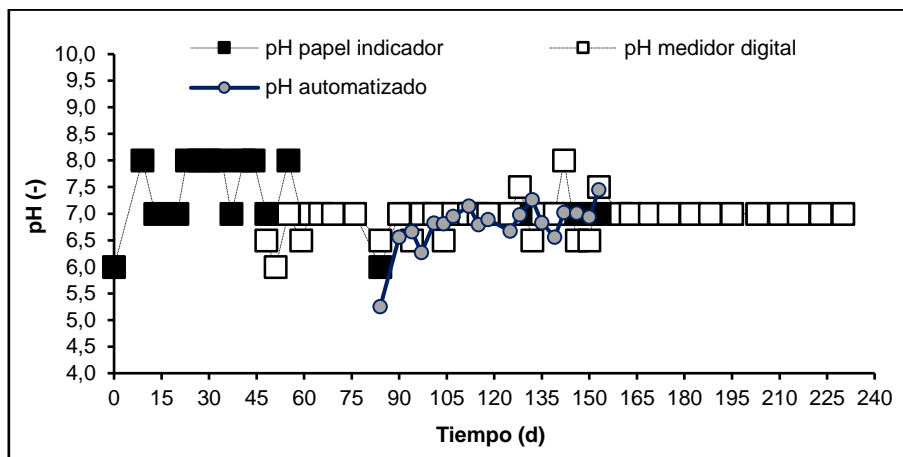


Figura 56. Evolución del pH durante el proceso de compostaje empleando 3 métodos.

Durante el proceso de compostaje, el pH se mantuvo dentro un intervalo adecuado (6–8) para el desarrollo correcto del proceso. En general, el pH de la primera fase del proceso (20 días) fue básico. Sin embargo, en teoría, el pH en esta etapa tiende a descender debido a la liberación de ácidos orgánicos por la acción de los microorganismos sobre la MO. El no haber experimentado una disminución en esta parte inicial a pesar de tener sustratos ácidos como el café y las cáscaras de naranja pudo deberse a la acción amortiguadora del estructurante que se añadía junto a los biorresiduos.

Durante la etapa inicial de fase termófila (entre 20 y 55 días), el pH de la mezcla se mantuvo básico. Esto puede atribuirse a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco como consecuencia de la degradación de aminas procedentes de proteínas y bases nitrogenada de la MO. A continuación, se observó una neutralización del medio.

A partir del día 154 del proceso, la mezcla entró en una fase de enfriamiento corta, seguida de una de maduración, lo que explica la estabilidad, la neutralidad y la coincidencia de los valores de pH medido tanto con las tiras como con el instrumento. Este hecho se debe a la formación de compuestos húmicos que se caracterizan por propiedades tampón.

7.1.3. Humedad

El control de este parámetro a lo largo del proceso se realizó mediante la combinación del método de puño y el medidor digital. Los resultados obtenidos se reflejan en la Figura 57 de modo cualitativo, de modo que el grado de la humedad oscila entre 1 y 3 (1: muy seco, 2: seco y 3: húmedo). Se incluye también el dato del riego que permite interpretar mejor los resultados obtenidos.

De acuerdo con la Figura 57, la humedad de la mezcla, durante todo el proceso de compostaje fue adecuada. En la fase mesófila, la humedad de la mezcla fue muy baja. Para corregir el grado de humedad, se aportó frecuentemente agua durante el volteo. Entre los días 20 y 150, las altas temperaturas registradas (~70 °C) secaron rápidamente el lecho por lo que junto con los volteos también se requirió el aporte de agua mediante riegos.

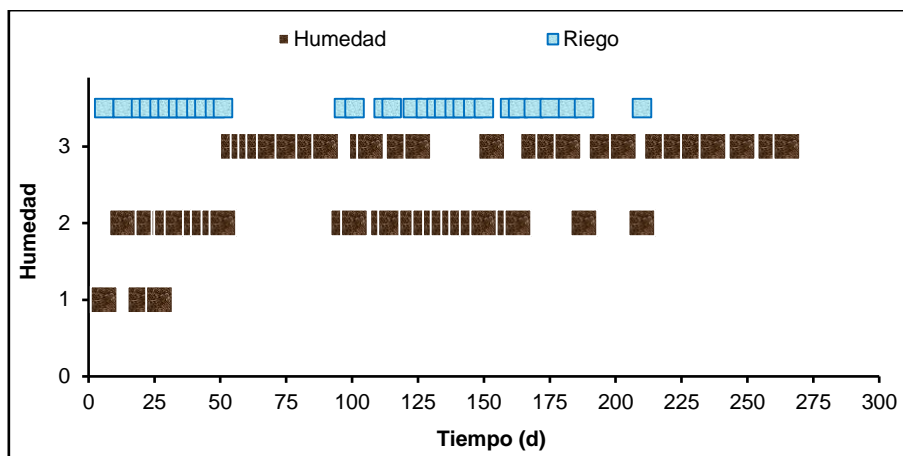


Figura 57. Evolución de la humedad de la mezcla a lo largo del proceso de compostaje indicando los instantes de riego.

Es resaltable que, en esta etapa, los bordes del fondo de la compostadora tendieron a acumular un exceso de humedad. Esto pudo ser debido al aumento de la cantidad de residuo dentro de la compostadora que dificultaba la efectividad de los volteos en esas partes de la compostadora. Asimismo, se perdió porosidad por efecto del peso de los materiales de las capas superiores. Este exceso de humedad se corrigió mediante la adición de hojas secas.

7.1.4. Biodiversidad

A continuación, en la Tabla 16 se muestran los diferentes tipos de insectos detectados durante las distintas etapas del proceso.

Tabla 16. La abundancia de los diferentes tipos de insecto y otros invertebrados detectados durante el proceso de compostaje.

Insecto	Mesófila	Termófila				Maduración		
	Mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6	mes 7	mes 8
Moscas de fruta	+++++	+++++						
Larvas de moscas	+++	+						
Lombrices pequeñas	+	+	+++++	+	+		+	+
Lombrices maduras			+	+++	+++++	+++	++	+
Mosquitos		+++++	+	+++++	+++++	+++++	+	
Tijeretas		+	++	+++	+++			
Babosa			+					
Cochinilla			++	+++				
Ácaros				+++++	+++++	+++++	+	
Araña							++	+
Ciempiés								+

Abundancia: reducida (+), media (+++), abundante (+++++)

Se registraron un total de 11 tipos insectos y otros invertebrados: moscas de fruta, larvas de moscas, 2 tipos de lombrices (pequeñas y maduras), mosquitos, tijeretas, babosas, cochinillas, ácaros, arañas y ciempiés. Evidentemente, la fase termófila fue la etapa de mayor presencia y cantidad de estos animales de pequeño tamaño.

Durante la primera fase, las moscas de frutas eran abundantes, ya que eran atraídas por la MO en descomposición. Por ello, se decidió que tras cada nueva adición de RO era importante terminar con una capa de material seco. Aplicando esta medida se dejó de observar la presencia de moscas de la fruta. Durante este mismo periodo, se detectaron lavas de mosca (en una cantidad regular) y algunas (escasas) lombrices pequeñas.

Durante la fase termófila, los mosquitos, las tijeretas, y las lombrices pequeñas estaban presentes en toda la etapa. Transcurridos los 2 primeros meses de esta, se observó la aparición de las lombrices maduras y los ácaros que predominaron la compostadora hasta el primer mes de maduración del compost. Por otra parte, las babosas y las cochinillas aparecieron en cantidades pequeñas.

Durante la fase de maduración, tras el primer mes, se desaparecieron las lombrices y los ácaros y se detectó la presencia de arañas y ciempiés en pequeñas cantidades.

7.1.5. Compresión y compactación

El grado de compactación se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Grado de compactación (\%)} = 100 - \frac{V_{\text{teórico adicionado}}}{V_{\text{real}}}$$

A continuación, en la Figura 58, se grafica el grado de compactación que sufrió el lecho a lo largo del proceso de compostaje y expresado mediante el porcentaje de reducción.

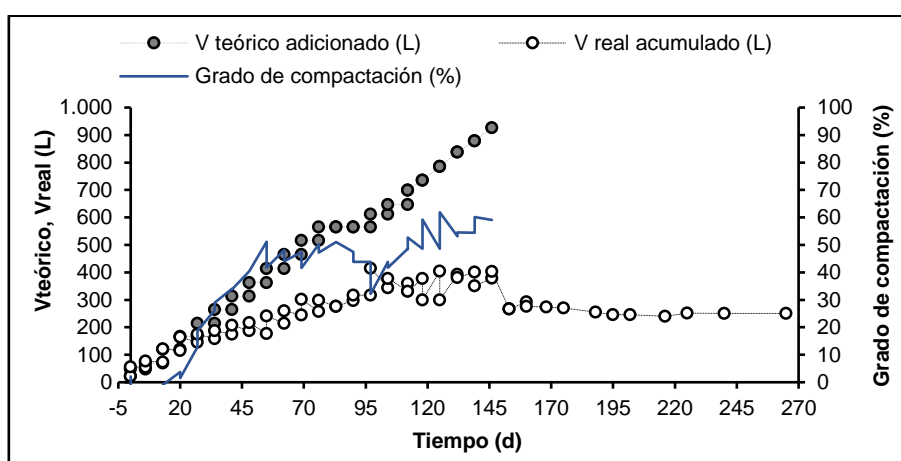


Figura 58. Evolución del porcentaje de reducción junto a los dos tipos de volúmenes: teórico adicionado y real acumulado, durante el proceso de compostaje.

Al principio del proceso, se obtuvieron valores pequeños y negativos del grado de compactación. Esto se debe a las dificultades en la medición de la altura. En otras palabras, como el cálculo del grado de compactación se hizo a partir de mediciones de alturas, cuando el volumen de RO aportado no era significativo era complejo medir correctamente su altura dentro de la compostadora.

En la fase termófila (20–154 días), se incrementó la actividad microbiana y la cantidad de los materiales añadidos, lo que aumentó la pérdida del carbono y la disminución del volumen, de modo que el mayor grado de compactación alcanzado fue del 61.9 %.

Durante la fase de maduración (desde el día 160), la reducción se detuvo debido al trasvase realizado. Además, la reducción del volumen real acumulado fue inapreciable, a causa del agotamiento de la MO y la reducida actividad microbiana.

7.2. Caracterización del compost

7.2.1. Cantidad de compost producida

El presente TFG contribuyó en la gestión de un total de ~575 kg de RO generados en la EIVG. Tras finalizar el proceso de compostaje, se obtuvo una cantidad de compost total de 201,5 kg dividida en 2 remesas: la primera obtenida de la compostadora 1 (133,3 kg) el día 16 de marzo del 2021 (Figura 59) y la segunda sacada de la compostadora 2 (68,2 kg) el 17 de septiembre del mismo año.



Figura 59. Bolsas de compost de la primera remesa.

7.2.2. Propiedades físico-químicas

- **Aspecto**

El producto obtenido tras 8 meses de compostaje (Figura 60) tenía un color oscuro y olor agradable de tierra, y estaba libre de materiales de aspecto similar a los biorresiduos de partida, a excepción de las cáscaras de huevo, cuyo proceso de degradación es bastante lento. El tamaño de las partículas era pequeño y no presentaba aglomeraciones.



Figura 60. Aspecto del compost producido.

- **Humedad**

Los resultados derivados de la prueba de humedad se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Porcentaje de humedad calculado de las 6 muestras analizadas.

Muestra	5-meses	4-meses	3-meses	2-meses	Madura-húmeda
Humedad (%)	61,2	57,2	55,2	61,3	65,6

La humedad de las muestras analizadas fue muy similar, variando en un rango muy estrecho entre 55 % y 66 %, siendo el máximo valor el de la muestra del compost maduro (muestra madura-húmeda). Estos valores están dentro del intervalo óptimo (30–70 %) (Irigoién Iriarte, 2020). Sin embargo, todas ellas superan el límite del Real Decreto (valor óptimo < 40 %).

- **pH**

El pH de la muestra madura-húmeda fue 7,05. Este valor está dentro del rango entre 6 y 9 (Zaha et al. 2013), lo que muestra que el producto obtenido completó su fase de maduración en la que se formaron los compuestos húmicos. Este hecho hace que el pH tiende a neutralizarse.

- **Conductividad**

La conductividad de la muestra madura-húmeda fue de 3,14 mS/cm. Este valor respeta el límite establecido por varios autores (<3,5 mS/cm) (Zaha et al. 2013), por lo que no es un factor limitante en la germinación de las semillas y en el desarrollo de los cultivos.

- **Composición química**

- **FTIR**

A continuación, en la Figura 61 se muestran los resultados de las primeras 4 muestras analizadas y de la muestra correspondiente al compost maduro y seco.

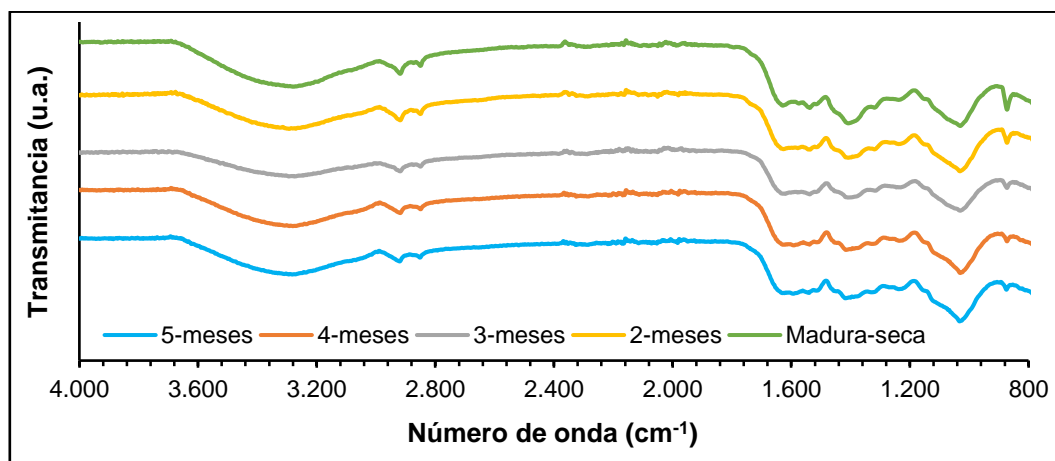


Figura 61. Espectros infrarrojos que muestran la evolución de un compost de los residuos orgánicos.

Las bandas detectadas tanto en las muestras correspondientes a los 5 primeros meses del proceso de compostaje como en la muestra madura-seca muestran los mismos picos de absorbancia. Estos resultados indican que a nivel elemental, los grupos funcionales son los mismos por lo que la composición no varía durante el proceso de compostaje. Las muestras de los primeros 5 meses del proceso de compostaje y de la muestra madura-seca muestran los mismos picos de absorbancia y tienen el mismo comportamiento.

- **Nutrientes**

A continuación, en la Tabla 18, se resumen los resultados obtenidos en el análisis de los nitratos, potasio (K) y fósforo (P). La cantidad de nitratos aumenta entre la fase termófila (muestra 2-meses, Figura 62d), los primeros meses de la fase de maduración (muestras 3-meses (Figura 62c) y 4-meses (Figura 62b)) debido al proceso de nitrificación que tiene lugar a bajas temperaturas ($T < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta obtener un producto (muestra madura-seca, Figura 62e) de cantidad media de nitratos.

Tabla 18. Contenido en nutrientes (N-Nitratos, P y K) de las muestras analizadas.

Muestra	2-meses	3-meses	4-meses	5-meses	Madura-seca
N-Nitratos	Medio-bajo	Medio-bajo	Alto	Alto-medio	Medio
P	Medio-bajo	Bajo	medio	medio	Bajo
K	Medio	Alto	Alto-medio	Alto	Alto-medio

Este hecho se explica por el agotamiento del amonio liberado por la mineralización de la MO, lo que limita el proceso de formación de los nitratos (Vázquez et al. 2017).

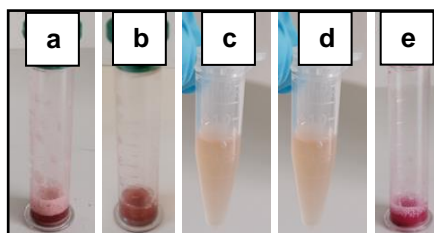


Figura 62. Análisis cualitativo de los nitratos en las muestras: 5 (a), 4 (b), 3 (c), 2 (d)-meses y madura-seca (e).

En el caso del fósforo (P) (Figura 63 izquierda), su cantidad no varía entre las muestras a estudio, manteniéndose estable en el rango medio-bajo. Asimismo, la cantidad de potasio (K) se mantiene entre media y alta en todas las muestras (Figura 63 derecha).

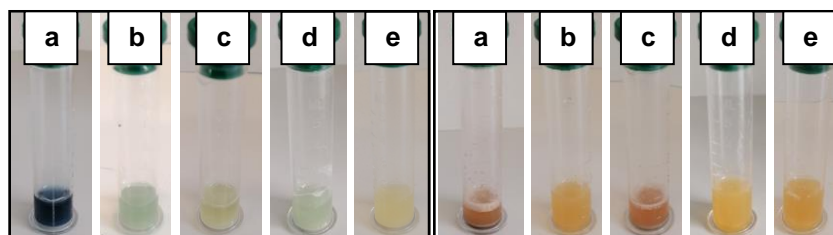


Figura 63. Análisis cualitativo de fósforo (izquierda) y potasio (derecha) en las muestras (5(a), 4 (b), 3 (c), 2 (d))-meses y madura-seca (e).

➤ CNHS

El análisis elemental muestra que la relación entre C, H, N y S es similar en todos los casos (Tabla 19).

Tabla 19. Porcentaje de C, N, H y S de las muestras analizadas.

Muestra	% C	% H	% N	% S	C/N	H/C
5-meses	35,4	4,8	3,4	0,3	10,3	0,1
4-meses	34,7	4,7	3,3	0,3	10,4	0,1
3-meses	34,4	5,0	3,4	0,3	10,0	0,1
2-meses	35,1	4,6	3,3	0,3	10,7	0,1
Madura-seca	35,2	4,0	3,9	0,4	9,1	0,1
Promedio	35,0 ± 0,4	4,6 ± 0,4	3,5 ± 0,2	0,3 ± 0,1	10,1 ± 0,6	0,1 ± 0

La determinación del porcentaje de estos elementos permite el cálculo de las relaciones atómicas de los ácidos húmicos, C/N y H/C, siendo estos indicadores de estabilidad y madurez del compost.

En el caso de la relación C/N, su variación entre las primeras 4 muestras es también muy pequeña, mientras que en el caso del compost maduro (muestra madura-seca), la relación C/N disminuyó hasta un valor de 9,1. Esta caída de C/N podría atribuirse a la pérdida del contenido del C en forma de CO₂ y el aumento del N debido al consumo de compuesto orgánicos por parte de los microorganismos. Por otra parte, el C/N de todas las muestras respeta los límites establecidos por varios autores (<12) (Vázquez et al. 2017) y por el BOE (<20). En cuanto la relación H/C, su valor es prácticamente constante a lo largo del proceso (~0,1).

➤ Germinación

En la Figura 64 se muestra el aspecto de las semillas germinadas transcurridas 72 h.

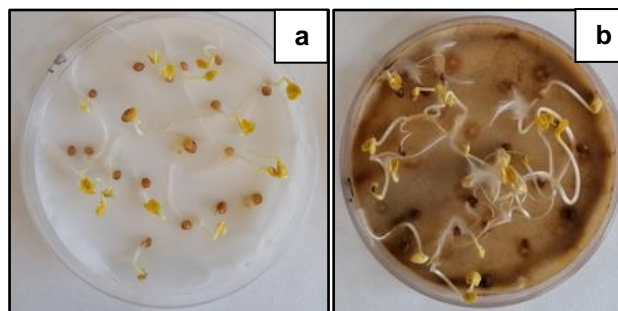


Figura 64. Estado de las muestras (blanco (a) y madura-húmeda (b)) tras 72 h.

El número de las semillas germinadas en la muestra en blanco (Figura 64a) es mayor que en la muestra madura-húmeda (Figura 64b). Sin embargo, el crecimiento de estas semillas es superior en la segunda muestra, por lo que se obtiene un índice de germinación (Tabla 20) inferior en el blanco (115 % vs 100 %). Por otro lado, el IG del compost maduro-húmedo supera el 80 %, lo que indica que el producto obtenido analizado está libre de sustancias fitotóxicas.

Tabla 20. Resultados de la prueba de germinación junto al IG calculado.

Muestra	Longitud de las raíces media (cm)	Nº de semillas germinadas medio	IG (%)
Muestra madura-húmeda	5,1	18	115,1
Muestra en blanco	4,0	20	100,0

• Producto final

En Tabla 21 se presentan las principales características del compost elaborado a partir de los residuos orgánicos generados en la EIVG, así como los intervalos normales de los distintos parámetros, establecidos en la bibliografía y la legislación española. Los resultados obtenidos muestran una conductividad eléctrica y pH dentro de los intervalos determinados por diversos autores (Irigoien Iriarte. 2020; Zaha et al. 2013). No obstante, se obtiene un porcentaje de humedad mayor que el marcado en la legislación 40 % (BOE, 2013). Por otro lado, la relación C/N sí respeta los límites del BOE, indicando así que su incorporación en el suelo no generaría problemas de inmovilización de nitrógeno. El producto final es rico en potasio, mientras que la cantidad de nitratos y fósforo es media y baja, respectivamente. Finalmente, la relación H/C se establece alrededor del 0,1.

El valor de IG de la prueba de fitotoxicidad es 115 %, lo que indica que el producto obtenido está libre de sustancias fitotóxicas y se define como un material maduro. Además, se puede emplear como fitonutriente, ya que su IG es mayor que el 100 % (Zaha et al. 2013).

Tabla 21. Resumen de las propiedades físico-químicas del compost maduro producido, comparativa bibliográfica y valores límite permitidos por la legislación.

Propiedades	Compost km 0	Bibliografía	Límites legislados ⁴
Humedad (%)	65,6	30–70 ¹	<40
pH	7,0	6–9 ²	-
Conductividad (mS/cm)	3,1	<3,5 ²	-
P	Bajo	-	P ₂ O ₅ >1 %
K	Alto-medio	-	K ₂ O >1 %
Nitratos	Medio	-	-
N (%)	3,9	-	N >1 %
C (%)	35,2	-	-
S (%)	0,4	-	-
H (%)	4,0	-	-
C/N	9,1	<12 ³	<20
H/C	0,1	-	-
IG (%)	115,1	>80 ²	-

¹ Irigoien Iriarte. 2020; ² Zaha et al. 2013; ³ Vázquez et al. 2017; ⁴ BOE. 2013

8. PRESUPUESTO

La realización del TFG “Gestión del residuo orgánico de la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG) y caracterización del compost producido” supuso tres tipos de costes: materiales, mano de obra y caracterización de las muestras. Los gastos de los materiales fueron cubiertos por la Dirección de Sostenibilidad gracias a la subvención recibida en el marco del proyecto “SOStainability: a composter in the cloud to nourish the Earth” (convocatoria CBL 20/21).

Estos se dividen en dos grupos: material inventariable y material fungible. Es importante mencionar que únicamente se lista el material inventariable adquirido expresamente para la realización de este proyecto. El resto del material inventariable empleado pertenece a los laboratorios del Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente de la EIVG.

Se define material inventariable como los bienes reutilizables. Están asociados tanto con los materiales empleados para el acondicionamiento de la zona del compostaje (postes de madera y vallado, entre otros), como con los utillajes del proceso de compostaje (compostadora, aireador y bolsas compostables). Como se ha mencionado en el apartado 6.2.2, la compostadora 2 y un aireador fueron suministrados por el Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz dentro del marco de la campaña “Compostar, ¡Me gusta!” (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2020c). A continuación, en la Tabla 22, se muestra el material inventariable empleado y su coste.

Tabla 22. Material inventariable, coste y proveedor.

Concepto	Cuantía (€)	Suministrador
Compostadora 1	84,9	
Vallado	102,1	Leroy Merlin
Poste de madera	8,4	
Aireador de compost	23,5	
Termómetro para compostaje	11,8	Planeta Huerto
Acelerador composter compo 2 kg	9,4	
Triturador/Molinillo	20,0	Cecotec
Bolsas	9,9	Maxi China
Compostadora 2	Colaboración	
Aireador	Colaboración	Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz
Bolsas compostables	Colaboración	
Medidor digital	24,2	Yangers Ltd
Total	294,2	

El material fungible se corresponde con aquellos productos que no pueden ser reutilizados. En la Tabla 23 se muestra el material fungible empleado tanto durante el proceso de compostaje como para la posterior caracterización de compost.

Tabla 23. Material fungible, coste y proveedor.

Concepto	Cuantía (€)	Suministrador
Estructurante	Colaboración	Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz
Semillas (prueba de germinación)	3,5	Endanea
Hojas	Recogida	Campus de Araba

Con respecto al gasto correspondiente a la mano de obra (Tabla 24), se computó un gasto horario de 25 € y el total de horas dedicadas a la realización del proyecto son 300 h.

Tabla 24. Costes del proyecto asociado a la mano de obra.

Concepto	Tiempo (h)	Precio de la hora (€)	Cuantía (€)
Mano de obra	300	25	7500

Además, habría que tener en cuenta el coste de los ensayos de caracterización del compost. Como se menciona en el apartado 6.6.4, se realizaron ensayos de espectroscopía infrarroja de la transformada de Fourier (FTIR) y análisis elemental C, H, N y S. En la EIVG no se dispone de este equipamiento, pero gracias a la colaboración con 2 grupos de investigación de la UPV/EHU, grupo 'Materiales + Tecnologías' (Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa) y grupo SUPREN (Escuela de Ingeniería de Bilbao) que disponen de estas técnicas, la realización de los ensayos de caracterización del compost no supuso ningún gasto adicional.

9. CONCLUSIONES

Se instauró con éxito un sistema de autogestión de los residuos orgánicos generados en la cafetería de la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG) basado en el compostaje. Esta instalación permitió transformar ~575 kg de desechos biodegradables generados por las más de 135 personas asociadas al PDI y al PAS, y los aproximadamente 850 estudiantes inscritos en los diferentes Grados de la EIVG, en ~200 kg de compost km 0.

Gracias al seguimiento de los parámetros críticos del proceso de compostaje (temperatura, pH y humedad) realizado tanto de forma manual como automática, se pudieron efectuar las debidas correcciones y garantizar la correcta valorización de los residuos mediante el proceso biológico de degradación de la materia orgánica.

El compost se repartió entre el PAS de la EIVG y la caracterización físico-química del mismo confirmó que trataba de un producto maduro, libre de sustancias fitotóxicas y adecuado para su uso como fertilizante de la tierra en jardines o huertos.

10. BIBLIOGRAFÍA

#SOSustainability. blog 2020. (<https://sustainabilitycbl1920.wordpress.com/equipo/>). (Consultado 18-03-2022).

Adhikari, B. K., Trémier, A., Martínez, J., Barrington, S. Home composting of organic waste - part 2: effect of management practices. Int J Environ Technol Manag. 2012; 15, 438-464.

Alcolea, M; González, C. Manual de compostaje doméstico. 2000. (<http://www.resol.com.br/cartilhas/manual-compostaje-en-casa-barcelona.pdf>). (Consultado 18-03-2022).

Amare natura. Medidores de calidad de abonos orgánicos. 2015. (<https://amarenatura.wixsite.com/amarenatura/medidores-calidad-abonos>). (Consultado 18-03-2022).

Asobiocom. Compostaje. 2019. (<https://www.asobiocom.es/compostaje/>). (Consultado 18-03-2022).

Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Infraestructuras y equipamientos de depósito, proceso y reciclaje de residuos - Planta de Tratamiento Mecánico Biológico (biocompost). 2016. (https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=779a88e3_11ab3f60bda_7fb0). (Consultado 18-03-2022).

Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Recogida de residuos orgánicos - Contenedor marrón – Biorresiduos. 2018. (<https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/wb021/contenidosEstaticos/adjuntos/es/14/03/51403.pdf>). (Consultado 18-03-2022).

Ayuntamiento de Vitoria- Gasteiz. Plan Integral de Gestión de los Residuos Municipales de Vitoria-Gasteiz (2008-2016). 2020a. (https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?uid=u_4a0e6e5d_12669164dbb_7fba&idioma=es) (Consultado 18-03-2022).

Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Generación y reciclaje de residuos. 2020b. (https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=app_j34_0195). (Consultado 18-03-2022).

Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. El Ayuntamiento busca familias y comunidades vecinales para realizar compost en sus domicilios. 2020c. (<https://blogs.vitoria-gasteiz.org/medios/2020/09/08/el-ayuntamiento-busca-familias-y-comunidades-vecinales-para-realizar-compost-en-sus-domicilios/>). (Consultado 18-03-2022).

Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Sistema de recogida neumática. 2021. (https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=75d40235_11ac4bbcf6e_7ffc). (Consultado 18-03-2022).

Bazán-Morales, A; Herrera-Fuentes, M C; López-Jardines, J; Guzmán-Mendoza, R; Nava-Aguilar, G. Artrópodos asociados a las diferentes etapas de la formación de la composta. Entomología Mexicana. 2012; 572-575.

Brinton, W F; Evans, E; Droffner, M L; Brinton, R B. A standardized Dewar test for evaluation of compost self-heating. Biocycle. 1995; 36: 1-16.

Campitelli, P; Ceppi, S; Velasco, M; Rubenacker, M. Compostaje: obtención de abonos de calidad para las plantas. Editorial Brujas. Buenos Aires (Argentina); 2014; 83.

Cespedes Sanchez, S, S; Jimenez Farieta, M, C. Desarrollo de un proceso de compostaje para el aprovechamiento de lodos resultantes de la planta de tratamiento de agua potable francisco wiesner eaab-esp. 2018. (<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6852/1/6132192-2018-21Q.pdf>). (Consultado 14-02-2021).

Claramunt Vallespí, R M; Del Pilar Cabildo Miranda, M; Del Pilar Cornago Ramírez, M; Escolástico León, C; Farrán Morales, M Á; García Fernández, M A; López García, C; Pérez Esteban, J; Pérez Torralba, M; Santa María Gutierrez, D; Sanz del Castillo, D. Reciclado y tratamiento de residuos. Editorial UNED: Madrid; 2008; 390.

Compostera. Tienda Online de Composteras. 2014. (<https://compostera.net/>). (Consultado 18-03-2022).

Decreto 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos. Boletín Oficial del País Vasco, de 18 de marzo de 2009, núm 54.

Decreto 63/2019, de 9 de abril, por el que se establece el régimen jurídico y las condiciones técnicas de las instalaciones y actividades de compostaje comunitario. Boletín Oficial del País Vasco, de 16 de abril de 2019, núm 74.

Diputación Foral de Araba (DFA). Gestión de residuos. 2021. (<https://web.araba.eus/es/medio-ambiente/residuos/gestion-de-residuos>). (Consultado 18-03-2022).

Diputación foral de Araba (DFA). Inventario de Residuos Domésticos del Territorio Histórico de Araba 2020. 2021. (<https://web.araba.eus/documents/105044/1361838/01+Inventario+de+residuos+Araba+2020+-+V04.pdf/359f1548-72af-b8c0-889d-19803f2def17?t=1626934038146>). (Consultado 18-03-2022).

Diputación Foral de Bizkaia (DFB). Manual de autocompostaje. 2014. (http://www.txorierri.eus/es-ES/Documents/guia%20del%20autocompostaje_baja.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Diputación Foral de Bizkaia (DFB). Recogida urbana contenerizada de residuo urbano (RU) municipal. 2021. (<https://web.bizkaia.eus/es/resultados-busqueda?q=RECOGIDA+URBANA+CONTENERIZADA+DE+RESIDUO+URBANO+%28RU%29+MUNICIPAL&b=Buscar>). (Consultado 18-03-2022).

Diputación Foral de Gipuzkoa (DFG). Guía de autocompostaje. 2012. (<https://www.urolakosta.eus/documents/2206762/2241775/Etxean+konposta+egiteko+gida/ea6fb86e-9741-4fd6-b479-d148b90863a5>). (Consultado 18-03-2022).

Diputación Foral de Gipuzkoa (DFG). Datos sobre la gestión de residuos urbanos. 2021. (<https://www.gipuzkoa.eus/es/web/ingurumena/residuos-urbanos/observatorio/datos-gestion>). (Consultado 18-03-2022).

Directiva (UE) 2008/98 del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos. Diario Oficial de la Unión Europea n° L 312.

Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos. Diario Oficial de la Unión Europea, n° L 150.

Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la directiva 2008/98/CE sobre los residuos. Diario Oficial de la Unión Europea, n° L 150.

Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases. Diario Oficial de Unión Europea, nº L 150.

Esteve, J. Compost: fabricación de fertilizantes naturales (II). 2012. Reciclaje Verde. (<https://reciclajeverde.wordpress.com/2012/05/14/compost-fabricacion-de-fertilizantes-naturales-ii/>). (Consultado 18-03-2022).

European Commission. First circular economy action plan. 2021. (https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_en). (Consultado 18-03-2022).

European Environment Agency. Bio-waste in Europe - turning challenges into opportunities. 2020. (<https://www.eea.europa.eu/publications/bio-waste-in-europe>). (Consultado 18-03-2022).

Eurostat. Waste statistics. 2021. (https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_generation). (Consultado 18-03-2022).

Euskadi.eus. Inventario residuos urbanos del País Vasco 2015. 2017. (https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/inventario_ru/es_pub/adjuntos/2015.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Euskadi.eus. Estadística de residuos urbanos de la C.A del País Vasco. 2020. (<https://www.euskadi.eus/busqueda/?cat=Goiburua&q=Estad%C3%ADstica+de+Residuos+Urbanos+de+la+C.A.+del+Pa%C3%ADs+Vasco>). (Consultado 18-03-2022).

Euskadi.eus. Plan de prevención y gestión de residuos de euskadi 2030. 2021. (<https://www.euskadi.eus/gobierno-vasco/-/documentacion/2021/plan-de-prevencion-y-gestion-de-residuos-de-euskadi-2030/>). (Consultado 18-03-2022).

Eustat. Residuos urbanos generados en la C.A. de Euskadi por tipo de residuo y de recogida (t). 2003-2018. 2020. (https://www.eustat.eus/elementos/ele0009300/residuos-urbanos-generados-en-la-ca-de-euskadi-por-tipo-de-residuo-y-de-recogida-t/tbl0009365_c.html). (Consultado 18-03-2022).

Fain Binda, V; Butti, M; María Juliana Torti, M. Índice de germinación como indicador de madurez en compost de residuos de incubación. Avicultura. 2018; 10. 54-57.

García de Vinuesa Fernández, D. Evaluación agronómica de residuos orgánicos mediante caracterización físico-química y bioensayos de laboratorio e invernadero. 1999. (<https://digital.csic.es/handle/10261/152084>). (Consultado 18-03-2022).

Gasteiz hoy. Salburua estrena la primera zona de compostaje comunitario en Vitoria. 2021. (<https://www.gasteizhoy.com/salburua-compostaje-comunitario/>). (Consultado 18-03-2022).

Gasteiz hoy. Lakua-Arriaga y Zabalzana estrenan composteras comunitarias. 2022. (<https://www.gasteizhoy.com/lakua-zabalzana-compostaje-comunitario/>). (Consultado 18-03-2022).

Gestión de residuos de Gipuzkoa. Planta de compostaje de Epele. 2016. (<https://ghk.eus/planta-de-compostaje-de-epele.htm>). (Consultado 18-03-2022).

Gestores de residuos. La gestión de los residuos orgánicos en los albergues forales de Araba permite compostar más de 50 toneladas al año. 2019. (<https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-gestion-de-los-residuos-organicos-en-los-albergues-forales-de-alava-permite-compostar-mas-de-50-toneladas-al-ano>). (Consultado 18-03-2022).

Gobierno de España. Plan de acción para la implementación de la agenda 2030 hacia una estrategia española de desarrollo sostenible. 2018. (https://www.agenda2030.gob.es/recursos/docs/Plan_de_Accion_para_la_Implementacion_de_la_Agenda_2030.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Gobierno Vasco. Plan de prevención y gestión de residuos de la CAPV 2020. 2015. (https://www.aprr.eus/wp-content/uploads/2016/11/Plan_VASCO_RESIDUOS_2020_Anexos.compressed.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Gobierno Vasco. Contribución Vasca a la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. 2021. (https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/agenda2030/es_def/adjuntos/Agenda_Euskadi_Basque_Country_2030_desarrollo_sostenible.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Grundler, S. Comparison of Dewar self-heating test, Solvita compost maturity Test and the OxiTop® measuring system to establish stability and maturity of composted material for use in growing media. 2007. (https://solvita.com/wp-content/uploads/2014/04/Compost-Maturity-Methods_Bord-na-Mona-2007.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Hill, G B; Susan A. Baldwin, S A; Vinnerås, B. Evaluation of Solvita compost stability and maturity tests for assessment of quality of end-products from mixed latrine style compost toilets. Waste Management. 2013; 33. 1602-1606.

Ihobe. Los ayuntamientos deberán registrar las instalaciones de compost comunitario. 2019a. (<https://www.ihobe.eus/actualidad/ayuntamientos-deberan-registrar-instalaciones-compost-comunitario-2>). (Consultado 18-03-2022).

Ihobe. Guía práctica para el compostaje comunitario en el País Vasco. 2019b. (https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/guia_compostaje/es_def/adjuntos/guia_compostaje_Pais_vasco_cast.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Instituto Nacional de Estadística (INE). Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos. 2018. (https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176844&menu=ultiDatos&idp=1254735976612). (Consultado 18-03-2022).

Irigoién Iriarte, N. Calidad y Usos del compost. 2020. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Jouraihy, A; Amir, S; Winterton, P; El Gharous, M; Revel, J C; Hafidi, M. Structural study of the fulvic fraction during composting of activated sludge–plant matter: Elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. Bioresource Technology. 2008; 99. 1066-1072.

Kaza, S; Yao, L; Bhada-Tata, P; Van Woerden, F. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. 2018. 295.

Kiesewetter, G; Gómez-Sanabria, A; Klimont, Z; Wolfgang Schoepp, W; Haberl, H. Potential for future reductions of global GHG and air pollutants from circular waste management systems. Nature Communications. 2022; 13: 1-12.

Lacambra, N. La contaminación destruye la salud y la economía. Comunidad #por el clima. 2019. (<https://porelclima.es/equipo/2656-graves-efectos-de-la-contaminacion-en-la-salud-y-la-economia>) (Consultado 18-03-2022).

Leco. TruSpec® Micro CHN / CHNS / O. 2019. (<https://es.leco.com/product/truspec-micro>). (Consultado 18-03-2022).

Ley 3/1998, de 27 de febrero, General de Protección del Medio Ambiente del País Vasco. Boletín Oficial del País Vasco, de 27 de marzo de 1998, núm 59.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE, de 29 de julio de 2011, núm 181.

López Martínez, M; Soliva Torrento, M; Huerta Pujol, O. Proceso de compostaje: característica de muestras. Deputación de Barcelona. 2011; 240.

MCP. Compostaje doméstico y Comunitario. 2020. (<http://www.mcp.es/residuos/gestion-de-residuos/compostaje-domestico-y-comunitario>). (Consultado 18-03-2022).

Mihaela Matei, P; Martín-Ramos, P; Silva Castro, I; Martín-Gil, J; Hernández-Navarro, S; Sánchez-Báscones, M; Stoian, M. Alternativas metodológicas para el seguimiento de la calidad de un compost mediante técnicas analíticas multirespuesta. 2016. (https://www.researchgate.net/publication/308916285_Alternativas_metodologicas_para_el_seg_uimiento_de_la_calidad_de_un_compost_mediante_tecnicas_analiticas_multirespuesta). (Consultado 18-03-2022).

MITECO. Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR) 2016-2022. 2015. 1-182.

MITECO. La Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular entra en la recta final de su tramitación parlamentaria. 2021. (<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/la-ley-de-residuos-y-suelos-contaminados-para-una-econom%C3%ADa-circular-entra-en-la-recta-final-de-su-tramitaci%C3%B3n-parlamentaria/tcm:30-534544>). (Consultado 18-03-2022).

Moreno Casco, J; Moral Herrero, R. Compostaje. Editorial Científicos. Madrid; 2007; 530.

Navarro, J. Contaminación del agua debido a la descomposición de los residuos sólidos (IV/IV). Iagua. 2021. (<https://www.iagua.es/blogs/javier-navarro/efecto-lluvias-desechos-solidos-iiiiiv-0>) (Consultado 18-03-2022).

Noticias del Ayuntamiento de Madrid. Los aliados del compostaje. 2019. (<https://diario.madrid.es/huertoscolares/2019/04/11/los-aliados-del-compostaje/>). (Consultado 18-03-2021).

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro. (<http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1126977/>). (Consultado 18-03-2022).

Pastor Fernández, C. Proyecto de diseño de un biorreactor para la producción de compost a partir de biorresiduos. 2019. (http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/183933/TFG_C.Pastor.pdf?sequence=1&isAllowed=y). (Consultado 18-03-2022).

Patterson,S; Gardener, M. Soil mite info: what are soil mites and why are they in my compost? 2020. (<https://www.gardeningknowhow.com/plant-problems/pests/insects/soil-mites-info.htm>). (Consultado 18-03-2022).

Plana González-Sierra, R. El compostaje en la gestión de los residuos urbanos. 2020a. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Plana González-Sierra, R. Evolución del proceso de compostaje a pequeña escala. 2020b. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Plana González-Sierra, R. Requerimientos de las zonas de compostaje comunitario. 2020c. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Plana González-Sierra, R. Introducción al proceso de compostaje. 2020d. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Puyuelo Sánchez, B; Rizmendiarieta, J; González-Sierra, R P; J; Irigoién Iriarte, I; Nohales Duarte, G. Guía práctica para la implementación del compostaje comunitario como alternativa para la gestión local de los biorresiduos. 2019. (<https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/3808babc-0271-4fe6-829a-ff0eeddd37de/DOC20190507094243anexo+XXIV++Guia+compostaje+comunitario++FEA.pdf?MOD=AJPERES>). (Consultado 18-03-2022).

Radiocable.com. ¿Por qué algunos países apenas usan vertederos mientras que otros tienen cientos? 2021. (<https://www.radiocable.com/por-que-algunos-paises-apenas-usan-vertederos-mientras-que-otros-tienen-cientos.html>). (Consultado 18-03-2022).

Real decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. BOE, de 10 de julio de 2013, núm. 164.

Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. BOE, de 8 de julio de 2020, núm. 187.

Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA). España es el país de la Unión Europea que más residuos deposita en los vertederos. 2022. (<https://www.retema.es/noticia/espana-es-el-pais-de-la-union-europea-que-mas-residuos-tira-a-los-vertederos-DorUZ>). (Consultado 18-03-2022).

Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA). La unión europea aprueba formalmente las nuevas normas en materia de residuos y economía circular. 2018. (<https://www.retema.es/noticia/la-union-europea-aprueba-formalmente-las-nuevas-normas-en-materia-de-residuos-y-econo-VCIE0>). (Consultado 18-03-2022).

Román, P; Martínez, M; Pantoja, A. Manual de compostaje del agricultor experiencias en américa latina. 2013. (Consultado 18-03-2022).

Sanchez, J. Manejo, gestión y monitorización de la zona de compostaje. 2020a. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Sanchez, J. Manejo, gestión y monitorización de la zona de compostaje (parte 2). 2020b. (<https://www.ihobe.eus/agenda/curso-compostaje-comunitario-5>). (Consultado 18-03-2022).

Silbert Voldman, V. Manual de buenas prácticas para producir compost hogareño. 2018. (<https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/348>). (Consultado 18-03-2022).

Soliva, M; Lopez, M. Calidad del compost: influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. 2004. (https://ruralcat.gencat.cat/documents/20181/81510/Altres3_Calidad+del+compost_+influencia+del+tipo+de+material+tratado+y+delas+condiciones+del+procesopdf/80b5b931-0521-426b-a733-6be0ac2d3a68). (Consultado 18-03-2022).

Steel, H; Bert, W. Biodiversity of compost mesofauna and its potential as an indicator of the composting process status. Dynamic Soil, Dynamic Plant. 2011; 5: 45-50.

Storino, F. Compostaje descentralizado de residuos orgánicos domiciliarios a pequeña escala. 2017. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. (<http://www.compostaenred.org/documentacion/TESIS%20Francesco%20Storino.pdf>). (Consultado 18-03-2022).

Taherzadeh, J M; Richards, T. Resource recovery to approach zero municipal waste. CRC Press. USA; 2016; 315.

Torras Pérez, A; Manuel Bollo, J; García García, S; Haas Caruso, M; López de Munain, N; Martín Castro, B; Mur Bielsa, V; Osuna García, D; Rodríguez Lafuente, M; De Santos Medina, S; Urquiaga Cela, R; Yaben Oyarzum, B. Situación del compostaje doméstico y comunitario en el Estado español. 2012. Composta en Red. (http://www.compostaenred.org/proyectos/Proyecto1/publicacion/Sit_compostaje_domycomunitario_Composta%20en%20Red.pdf). (Consultado 18-03-2022).

Tortosa, G. Análisis espectrofotométrico de la materia orgánica durante el compostaje. 2013. Compostando ciencia. (<http://www.compostandociencia.com/2013/10/analisis-espectrofotometrico-compostaje-html/>). (Consultado 18-03-2022).

Tortosa, G. Sistemas de compostaje. 2015. Compostando Ciencia. (<http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>). (Consultado 18-03-2022).

UNE. UNE-EN 16087-2:2012. 2017. (<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/N0049708>). (Consultado 18-03-2022).

Unesco Etxea. Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. 2021. (<http://www.unescoetxea.org/agenda-2030/>). (Consultado 18-03-2022).

United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. 2019. (<https://sdgs.un.org/2030agenda>). (Consultado 18-03-2022).

UPV/EHU. EHU agenda 2030. 2019. (<https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/ehuagenda-2030>). (Consultado 18-03-2022).

UPV/EHU. Convocatoria de proyectos campus Bizia Lab deialdia 2020/21. 2020a. (<https://www.ehu.eus/documents/4736101/14781770/Convocatoria-CAMPUS-BIZIALAB-2020-2021.pdf/09a92e6d-f061-5276-d156-94101892065d?t=1593074918000>). (Consultado 18-03-2022).

UPV/EHU. CBL 2020/21. 2020b. (<https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/campus-bizia-lab-2020-2021>). (Consultado 18-03-2022).

Vázquez, M A; Soto, M. The efficiency of home composting programmes and compost quality. Waste Management. 2017; 64. 39-50.

Wood end Research. Guide to Solvita testing for compost maturity index. 2002. (<https://projects.sare.org/wp-content/uploads/982665solvita-compost-test-manual.pdf>). (Consultado 18-03-2022).

Woods End Laboratory. Solvita compost test: how to perform it. 2009. (https://www.youtube.com/watch?v=nD8O_TRN6bY&ab_channel=WoodsEndLaboratory). (Consultado 18-03-2022).

Zaha, C; Dumitrescu, L; Manciualea, I. Correlations between composting conditions and characteristics of compost as biofertilizer. Engineering Sciences. 2013; 6. 51-58.

Zallo, A; Segalas, J. Campus Bizia Lab: programa de aprendizaje servicio para la sostenibilidad universitaria a través de la colaboración de personal-profesorado-estudiantes. 2017. (<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106711>). (Consultado 18-03-2022).