

Trabajo Fin de Grado
Grado de Ingeniería Química

Estudio estadístico de la gestión de residuos sólidos
urbanos
Europa, España e Irlanda

Autor: Mariana Baleeiro Marques Rangel

Tutor: Yolanda Luna Galiano

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado de Ingeniería Química

Estudio estadístico de la gestión de residuos sólidos urbanos

Autor:

Mariana Baleeiro Marques Rangel

Tutor:

Yolanda Luna Galiano

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

Sevilla, 2019

A todos aquellos que compartieron conmigo estos años y que hicieron de esta jornada un recuerdo que jamás olvidaré.

Agradecimientos

A Priscila, mi eterna amiga, que me hacía seguir hasta el final cada vez que pensaba en desistir.

A mi madre, por su apoyo en cada suspenso, por enseñarme que las pequeñas derrotas pueden convertirse en grandes victorias.

A Ribkin por acompañarme desde el principio y enseñarme que con constancia y trabajo duro todo es posible.

A la profesora Encarnación Abajo Casado por su paciencia para enseñarme a realizar pronósticos estadísticos;
Espero estar a la altura de su enseñanza.

Mariana Baleeiro Marques Rangel

Sevilla, 2019

Resumen

Según el Banco Mundial, la cantidad de residuos sólidos urbanos está aumentando más rápidamente que la tasa de urbanización como consecuencia del aumento de la población, los patrones de consumo cambiantes, el desarrollo económico, la mejora de los ingresos de los hogares y la creciente urbanización e industrialización. A medida que una sociedad consume más materiales, exige más recursos y genera más contaminantes y desechos. Es por ello por lo que, en las últimas décadas, la Unión Europea ha implementado una amplia gama de legislaciones ambientales y ha desarrollado una serie de objetivos de obligado cumplimiento para los Estados Miembros, con el fin de lograr una economía circular, donde no se desperdicia nada, y respetuosa con el medio ambiente. Este trabajo analiza los datos acerca de la gestión de residuos en Irlanda y España, con el fin de poder pronosticar cuan cerca están ambos países del cumplimiento de dichos objetivos.

Abstract

According to the World Bank, the amount of urban solid waste is increasing faster than the urbanization rate, as a result of population growth, changing consumption patterns, economic development, improved household income and increasing urbanization and industrialization. As a society consumes more materials, it demands more resources and generates more pollutants and waste. That is the reason WHY, in recent decades, the European Union has implemented a wide range of environmental legislation and has developed a series of mandatory objectives for Member States in order to achieve a circular economy, (where it is not wasted nothing, and respectful with the environment.) by wasting nothing and being respectful with the environment. This paper analyzes the waste management data provided by Ireland and Spain, in order to predict how close both countries are to meeting these objectives.

Índice

Agradecimientos.....	V
Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Índice.....	XII
Índice de Tablas	XIII
Índice de Figuras	XIV
Notación.....	XV
1 Introducción	1
1.1. Residuos	1
1.1.1. Introducción	1
1.1.2. Definición de residuos	1
1.1.3. Clasificación de residuos.....	1
1.1.4. Gestión de residuos.....	2
1.1.4.1. Gestión de residuos en la Unión Europea	2
2 Objetivo y alcance	8
3 Generación de residuos	10
4 Economía circular: objetivos europeos	14
5 Propiedades de los residuos sólidos urbanos	17
6 Tratamiento de los residuos sólidos urbanos	19
6.1 Sistemas de recogida de RSU	20
6.2 Recogida de residuos en Irlanda	23
6.3 Recogida de residuos en España.....	25
6.4 Clasificación de residuos	26
6.4.1 Clasificación manual y automática	27
6.5 Vertederos.....	28
6.5.1 Porcentaje de residuos enviados a vertederos en Europa.....	31
6.5.2 Evolución del porcentaje de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España.....	32
6.6 Incineración.....	33
6.6.1 Tratamiento térmico avanzado (ATT)	35
6.6.2 Porcentaje de residuos enviados a incineración en Europa.....	36
6.6.3 Evolución del porcentaje de residuos incinerados en Irlanda y España.....	37
6.7 Compostaje	38
6.7.1 Porcentaje de residuos enviados a compostaje y digestión en Europa	42
6.7.2 Evolución del porcentaje de residuos compostados en Irlanda y España	43

6.8	<i>Reciclaje</i>	44
6.8.1	Porcentaje de residuos enviados a reciclaje en Europa	47
6.8.2	Evolución del porcentaje de residuos enviados a reciclaje en Irlanda y España	47
7	Pronósticos en el reciclaje de RSU en Europa, Irlanda y España	49
7.1	<i>Pronóstico Irlanda</i>	49
7.2	<i>Pronóstico España</i>	50
8	Conclusiones	53
9	Referencias	54
Anexo.	Datos Eurostat	56

Índice de Tablas

Tabla 1. Recogidas específicas (Fuente: Gobierno de España)	23
Tabla 2. Tecnologías en la clasificación de residuos	28
Tabla 3. Modelos de estimación Irlanda	49
Tabla 4. Modelos de estimación en España	51
Tabla 5. Datos sobre generación y tratamiento en Europa	56
Tabla 6. Kg per cápita de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España	57
Tabla 7. Kg per cápita de residuos enviados a incineración en Irlanda y España	57
Tabla 8. Kg per cápita de residuos enviados a compostaje en Irlanda y España	57
Tabla 9. Kg per cápita de residuos enviados a reciclaje en Irlanda y España	57

Índice de Figuras

Figura 1. Residuos generados por sectores UE, 2017	10
Figura 2. Residuos generados por sectores en Irlanda y España	11
Figura 3. Generación de residuos per cápita en la UE, 2017	12
Figura 4. Evolución de la generación de RSU Irlanda y España	13
Figura 5. Jerarquía de gestión residuos	15
Figura 6. Objetivos 2020 y 2025	16
Figura 7. Tipos de tratamientos de residuos	20
Figura 8. Sistemas de recogida de residuos.	21
Figura 9. Residuos que se aceptan en los puntos limpios	22
Figura 10. Porcentaje de hogares con recogida de residuos sólidos urbanos	24
Figura 11. Porcentaje de recogida separada por CCAA.	26
Figura 12. Esquema de un revestimiento compuesto en vertederos	29
Figura 13. Cobertura final de un vertedero	31
Figura 14. Porcentaje de residuos enviados a vertederos UE, 2017	32
Figura 15. Evolución del porcentaje de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España.	33
Figura 16. Porcentaje de residuos enviados a incineración UE, 2017	37
Figura 17. Evolución del porcentaje de residuos incinerados en Irlanda y España.	38
Figura 18. Esquema compostaje	39
Figura 19. Sistemas de compostaje	41
Figura 20. Porcentaje de residuos compostados UE, 2017	43
Figura 21. Evolución porcentaje de residuos compostados en Irlanda y España	44
Figura 22. Proceso de reciclaje	45
Figura 23. Porcentaje de reciclaje en UE, 2017	47
Figura 24. Evolución del porcentaje de residuos reciclados en Irlanda y España	48
Figura 25. Evolución y estimación del reciclaje en Irlanda.	50
Figura 26. Evolución y estimación del reciclaje en España	51
Figura 27. Previsiones para los países Miembros, objetivos 2020 y 2025	52

Notación

RSU	Residuos sólidos urbanos
EPA	Agencia de protección medioambiental

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Residuos

1.1.1. Introducción

Según el Parlamento Europeo, los residuos urbanos representan menos de una décima parte del total de los 2500 millones de toneladas de residuos que se generan actualmente en la Unión Europea. Sin embargo, se han convertido en uno de los principales problemas que se enfrenta la sociedad actual. Ello se debe a su heterogeneidad, que hace difícil la eficiencia de los tratamientos a los que se someten y a su fuerte dependencia social, ligados directamente a patrones de consumo y al crecimiento económico. Todo ello, ha conducido a que los residuos no solo sean vistos como una problemática medioambiental, sino también como un problema socioeconómico, debido a que grandes cantidades de recursos se destinan a la recolección y al tratamiento de los desechos urbanos. En el aspecto social, la población se ve afectada por la concentración de basura en las ciudades, lo que causa la proliferación de insectos, la transmisión de enfermedades, la contaminación visual, entre otros. La correcta gestión de residuos es esencial para controlar estos problemas.

La gestión de los residuos es compleja y el nivel de complejidad varía según los flujos de residuos y sus características. Debido a esta complejidad, se requiere la identificación de los tipos de residuos, herramientas para la segregación, rutas de transporte y métodos de tratamiento y disposición final. Todo esto debe responder a las condiciones físicas, químicas y biológicas de los diferentes flujos de residuos (Sthiannopkao & Hung, 2013). Existen varios tipos de residuos: agrícolas, industriales, urbanos, radiactivos, entre otros. Los tratamientos de residuos que se abordarán en este trabajo incluyen el reciclaje, compostaje, incineración y vertederos.

Sin embargo, el tratamiento de los residuos no está libre de contaminación y puede acarrear serios problemas ambientales, por ello, lo más importante es implementar políticas con el fin de reducir la generación y los tratamientos de residuos con mayores impactos ambientales y favorecer aquellos que son más respetuosos con el medio ambiente. Con tal fin la Directiva marco sobre residuos pretende transformar la UE en una «sociedad del reciclado, que trate de evitar la generación de residuos y que utilice los residuos como un recurso». Dicha Directiva impone a los Estados miembros la implementación de programas de prevención de residuos, así como objetivos de obligado cumplimiento para los años siguientes. (Parlamento Europeo, Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2008)

En este trabajo se analiza el cumplimiento de estos objetivos por parte de Irlanda y España, analizando mediante el programa Statgraphics la tendencia que han seguido dichos países en los distintos tratamientos de residuos desde 2000 hasta 2017; dicha evolución marcará el cumplimiento de los objetivos impuestos. Finalmente se muestra aquellos países que sí alcanzarían a cumplir con los objetivos impuestos.

La elección de Irlanda y España como objeto de análisis no es arbitraria y corresponde a las diferencias en la gestión de residuos que mi vivencia en ambos países me permite observar.

1.1.2. Definición de residuos

Los residuos se definen por la Directiva 2008/98 / CE Artículo 3 (1) como «cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse».

1.1.3. Clasificación de residuos

Según la misma directiva los residuos se pueden clasificar en las siguientes categorías.

1.1.3.1. Clasificación en función de su origen

«Residuos domésticos»: Son los residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias. Los residuos que se generan en los hogares como los aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres, así como residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria se incluyen también en esta categoría. También se incluye los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados

«Residuos comerciales»: Los residuos generados por la actividad propia del comercio como los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios.

«Residuos industriales»: Son los residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera.

1.1.3.2. Clasificación en función de su peligrosidad

Se define como residuo peligroso aquel que presentan una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III de la Directiva 2008/98 / CE, y aquél que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea, así como los recipientes y envases que los hayan contenido.

1.1.4. Gestión de residuos

1.1.4.1. Gestión de residuos en la Unión Europea

Según el artículo publicado por la Comisión Europea, para la Dirección General del Medio Ambiente, “*La UE apuesta por la gestión de residuos*” (Comisión Europea, 2000). La gestión de residuos en Europa se basa en proteger el medio ambiente sin distorsionar el mercado interior comunitario, y se fundamenta en los siguientes principios:

- Principio de prevención: La producción de residuos tiene que reducirse y, cuando sea posible, evitarse.
- Principio de responsabilidad: La responsabilidad del productor y el principio de que quien contamina, paga.
- Principio de precaución: Se debe anticipar a todos los problemas potenciales.
- Principio de proximidad: Los residuos deben eliminarse lo más cerca posible de su origen.

Como parte de su estrategia global de gestión de residuos, la Comisión Europea determinó los flujos de residuos a los que debe concederse la máxima prioridad. Lo que se pretende es reducir el impacto ambiental general de cada uno de ellos convirtiendo los desechos en un recurso, respaldándose en las siguientes medidas:

- Implementar plenamente la legislación de residuos de la UE, que incluye la jerarquía de residuos, la necesidad de garantizar la recogida selectiva de residuos, los objetivos de desvío de vertederos, etc.
- Reducir la generación de residuos.
- Limitar la recuperación de energía a materiales no reciclables y eliminar gradualmente los vertederos de residuos reciclables o recuperables.

La gama de directivas de la UE que se ocupan de la gestión de residuos incluye la Directiva integrada de prevención y control de la contaminación (1996/61 / CE), así como las que se exponen a continuación.

Directiva marco sobre residuos

La Directiva marco sobre residuos (Directiva 2008/98 / CE sobre residuos) establece requisitos básicos para el manejo de residuos y establece que los Estados Miembros de la UE deben:

- Asegurarse de que la eliminación y recuperación de residuos no presente un riesgo para el agua, el aire, el suelo, las plantas y los animales.
- No permitir que la eliminación de desechos constituya una molestia pública a través de niveles de ruido excesivos u olores desagradables, o que se degraden lugares de especial interés natural.
- Prohibir el vertido y la eliminación incontrolada de residuos.

Directivas sobre vertederos

Directiva 1999/31 / CE sobre el vertedero de residuos. Establece normas detalladas sobre los vertederos de residuos, cuya finalidad es ayudar a prevenir los efectos negativos del relleno sanitario en las aguas superficiales, subterráneas, del suelo y del aire.

Decisión 2003/33/CE del Consejo, de 19 de diciembre de 2002. Establece los procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

Directivas sobre incineración de residuos

Directiva 2010/75/UE de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación). Expone disposiciones para instalaciones de incineración y de coincineración de residuos en su Capítulo IV e impone valores límite de emisión en su Anexo VI.

Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.

Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos. Establece los criterios para decidir si la incineración es una eliminación o recuperación.

Directivas sobre residuos de envases

Directiva 94/62 / CE sobre envases y residuos de envases. Establece objetivos para la recuperación y el reciclaje de residuos de envases y exige a los Estados miembros que establezcan planes de recogida, reciclaje y recuperación de dichos residuos.

Directiva (UE) 2019/904 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019 relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medioambiente.

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.

Comunicación de la Comisión de la Estrategia Europea para el plástico en una economía circular, SWD (2018) 16 final, Estrasburgo 16.1.2018.

Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.

Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases.

1.1.4.2. Gestión de residuos en Irlanda

Estas Directivas se implementan en Irlanda mediante la Ley de la Agencia de Protección Ambiental de 1992, la Ley de Gestión de Residuos de 1996, la Ley de Gestión de Residuos (Enmienda) de 2001 y la Ley de Protección del Medio Ambiente de 2003. La responsabilidad general de la política de gestión de residuos recae en el Departamento de Comunicaciones, Acción Climática y Medio Ambiente.

La política y la legislación sobre residuos son implementadas en gran medida por la Agencia de Protección Ambiental y las autoridades locales. La política actual de gestión de residuos se establece en “*A Resource Opportunity - Waste Management Policy in Ireland*”, la cual entre otras medidas, establece la política para eliminar los vertederos, reducir la cantidad de residuos producidos y maximizar el uso de residuos como fuente de reciclaje y energía renovable. (hogan , 2012)

Agencia de Protección Ambiental (EPA Ireland) y residuos

Las principales actividades de la EPA en el área de gestión de residuos son:

- Elaboración y revisión del Plan Nacional de Gestión de Residuos Peligrosos.
- Desarrollo de pautas para la selección, gestión, operación y finalización del uso de vertederos.
- Autorización de importación de residuos.
- Mantenimiento de una base de datos nacional de residuos.

Autoridades locales

Las autoridades locales son responsables de:

- Autorizar y controlar las actividades comerciales de recolección de residuos.
- Autorizar la exportación de residuos y vigilar los movimientos internos de residuos peligrosos.
- Otorgar permisos de residuos para actividades de recuperación y eliminación a pequeña escala.
- Garantizar una adecuada recolección de residuos, recuperación y disposición en sus áreas.
- Vigilar e inspeccionar las actividades de residuos en general.

Planes de gestión de residuos.

La EPA es responsable del Plan Nacional de Gestión de Residuos Peligrosos. El plan debe revisarse al menos una vez cada 5 años. Hay 3 regiones para la planificación de la gestión de residuos: Sur, Este-Midlands y Con-nacht-Ulster.

Los planes regionales de gestión de residuos abordan los residuos no peligrosos y deben incluir medidas para:

- Prevenir o minimizar la producción o la naturaleza nociva de los residuos.
- Fomentar y apoyar la recuperación de residuos.
- Asegurarse de que los desechos que no pueden prevenirse o recuperarse se eliminen sin causar contaminación ambiental.
- Asegurar que el principio de "quien contamina paga" se aplique efectivamente.
- Licencias de residuos.

Impuestos ambientales

El 1 de junio de 2002 se introdujo en Irlanda un gravamen de 15 euros por tonelada en el vertedero de residuos en virtud del Reglamento de Gestión de Residuos (embargo de vertedero) de 2002 para alentar el desvío de los residuos. Gravamen sobre la incineración de residuos para incentivar otros tratamientos de residuos, como el reciclaje, en 2014.

Ley de la Agencia de Protección Ambiental de 1992

En esta Ley, se incluye la prevención, limitación, eliminación, reducción de la contaminación ambiental y la

preservación de la calidad del medio ambiente. Establece definiciones sobre la contaminación ambiental, que incluye la atmósfera (Ley de Contaminación del Aire, 1987), la tierra, el suelo y las aguas (Ley de contaminación del agua, 1977).

Regula la eliminación de los residuos de forma que “no ponga en peligro la salud humana o dañe el medio ambiente o cree un riesgo para las aguas, la atmósfera, la tierra, el suelo, las plantas o animales, ni cause molestias por ruidos u olores, o afecte negativamente a lugares de especial interés”

Establece que los residuos deben ser tratados con la mejor tecnología disponible, pero que no implique costos excesivos para prevenir o eliminar los residuos.

Establece criterios y procedimientos para la selección, gestión y operación de los vertederos así como para la eliminación de desechos domésticos y de otro tipo.

Ley de Gestión de Residuos de 1996

Entre otras directivas, se incluye las siguientes relativas a los residuos:

Directiva 75/439 / CEE del Consejo, de 16 de junio de 1975, relativa a la eliminación de aceites usados.

Directiva 75/442 / CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, sobre residuos.

Directiva 87/101 / CEE del Consejo, de 22 de diciembre de 1986, que modifica la Directiva 75/439 / CEE sobre la eliminación de aceites usados.

Directiva 89/369 / CEE del Consejo, de 8 de junio de 1989, sobre la prevención de la contaminación atmosférica procedente de las nuevas plantas de incineración de residuos municipales

Directiva 91/156 / CEE del Consejo, de 18 de marzo de 1991, que modifica la Directiva 75/442 / CEE sobre residuos.

Directiva 91/157 / CEE del Consejo, de 18 de marzo de 1991, sobre baterías y acumuladores que contienen sustancias peligrosas.

Reglamento (CEE) N° 259/93 del Consejo, de 1 de febrero de 1993, sobre la supervisión y el control de los traslados de residuos dentro, dentro y fuera de la Comunidad Europea.

Ley de Gestión de Residuos (Enmienda) de 2001

Los actos en este grupo son:

- Ley de Gestión de Residuos de 1996 (10/1996)
- Ley de Gestión de Residuos (enmienda) de 2001 (36/2001).
- Ley de Protección del Medio Ambiente de 2003 (27/2003).
- Reglamento de de Gestión de Residuos (equipos eléctricos y electrónicos) de 2005 (S.I. No. 290 de 2005)
- Orden de de Gestión de Residuos (recaudación ambiental) (bolsa de plástico) de 2007 (S.I. No. 62 de 2007)
- Reglamento de Gestión de Residuos (Registro de Corredores y Distribuidores) 2008 (S.I. No. 113 de 2008)
- Orden de Gestión de Residuos (gravamen vertedero) de 2008 (S.I. No. 168 de 2008)

Ley de Protección del Medio Ambiente de 2003

Proporciona la aplicación de la directiva 96/61 / ce de 24 de septiembre de 1996 del consejo de las comunidades europeas relativas a la prevención y control integrados de la contaminación y entre otros fines enmienda la ley de la agencia de protección ambiental de 1992 y la ley de gestión de residuos de 1996.

1.1.4.3. Gestión de residuos en España

La legislación sobre residuos en España es administrada por las autoridades competentes en diferentes niveles

administrativos, las cuales, según Ley 22/2011 de 28 de julio de residuos y suelos contaminados, se encargan de:

- Nivel nacional: El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente es responsable de los planes nacionales y se encarga de la autorización e inspección de los desechos a / desde terceros países (fuera de la UE).
- Nivel regional: las comunidades autónomas son responsables de emitir planes estratégicos de gestión de residuos para cada región específica. También atienden la autorización, inspección y sanción de las actividades de gestión de residuos y el envío de residuos a / desde los países de la UE.
- Nivel local: las autoridades municipales son responsables de la gestión de los residuos urbanos (domésticos, industriales y comerciales, oficinas y servicios), incluida la recogida y el transporte por separado de RSU.

España tiene un Programa Estatal de prevención de residuos válido para 2014-2020 y un Plan nacional de gestión de residuos 2016-2022.

Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 en el que se desarrolla la política de prevención de residuos y cuyos objetivos son:

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

El Plan Marco Nacional de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 establece las directrices estratégicas para la gestión de residuos y las medidas necesarias para cumplir los objetivos de la UE. El objetivo final es reemplazar los modelos lineales de producción por modelos circulares que devuelvan los materiales de desecho a la línea de producción.

Impuestos medioambientales

Hasta el momento, España no tiene un impuesto nacional sobre los vertederos, pero el artículo 16 de la Ley Española de Residuos permite aplicar incentivos económicos para promover la prevención de residuos y la recogida selectiva, incluida la introducción de gravamen sobre los vertederos y la incineración. Varias regiones han establecido impuestos sobre los vertederos de residuos municipales (Cataluña, Castilla y León, Extremadura y Navarra).

Directiva sobre residuos de envases

Real Decreto 293/2018, de 18 de mayo, sobre reducción del consumo de bolsas de plástico.

Orden AAA/1783/2013, de 1 de octubre, modifica el anejo 1 del Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Orden MAM/3624/2006, de 17 de noviembre, modifica Anejo 1 del Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997.

Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, revisa objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, y modifica RD 782/1998.

Real Decreto 782/1998 de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de envases y residuos de envases.

Anexos modificaciones a la Ley 11/1997 de 24 de abril, de envases y residuos de envases.

Ley 11/97 de 24 de abril, de envases y residuos de envases.

Directiva sobre vertederos

Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertederos.

Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos.

Directiva sobre incineración de residuos

Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.

Se modifica el art. 4, por Real Decreto 367/2010 del 26 de marzo, con la corrección de errores del BOE núm. 224, de 18 de septiembre de 2003.

2 OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este estudio es realizar un análisis de los datos existentes sobre la gestión de residuos en Irlanda y en España, así como estudiar la evolución que han presentado ambos países desde 2000 hasta 2017 en los distintos tratamientos de residuos. Enriquecemos el estudio comparando ambos países con la media europea.

Asimismo, mediante un análisis estadístico, evaluamos si se podrán alcanzar los objetivos impuestos en el artículo 11 de la directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008, referente a la reutilización y reciclado en el que se fijan los objetivos que deben cumplir los estados miembros en el reciclaje para 2020, así como su reciente revisión con nuevos objetivos para 2025.

Nota: Este trabajo está sujeto a disponibilidad de datos.

3 GENERACIÓN DE RESIDUOS

La cantidad total de residuos generados cada año en Europa asciende, aproximadamente, a 2500 millones de toneladas. Las principales fuentes de residuos son la agricultura, la construcción, las actividades mineras y las zonas urbanas. Los industriales son los que tienen repercusiones más graves sobre el medio ambiente (Comisión Europea, 2000).

3.1. Generación de residuos por actividades económicas en la UE

La Figura 1, representa el porcentaje de residuos que se generan en los diferentes sectores económicos en el año 2017. En la EU-28, el sector de la construcción fue el que más residuos generó con un 36% sobre el total, seguida por las actividades extractivas (25%), la industria manufacturera (10%), y las viviendas (8%); el 16% restante correspondió a residuos procedentes de otras actividades económicas, principalmente servicios y energía (3%).



Figura 1. Residuos generados por sectores UE, 2017

3.2. Generación de residuos por actividades económicas en la Irlanda y España

En la Figura 2 se presenta una comparación del porcentaje de residuos generados por sectores en Irlanda y España.



Figura 2. Residuos generados por sectores en Irlanda y España

Como se observa, ambos países están por encima de la media europea en la generación de residuos de la industria manufacturera. El sector manufacturero es un componente importante de la economía irlandesa. La producción manufacturera representa el 24% de la producción económica total de Irlanda (Engineers Journal, 2016). En Irlanda dicho sector fue el responsable de poco más de la tercera parte del total de los residuos generados en 2017 con un 35%. En España dicho sector produjo el 11%.

El sector de mayor generación de residuos en España fue la construcción con un 28%, para Irlanda dicho sector solo aportó el 10% sobre el total. Según el informe publicado por Euroconstruct en 2019, España está por encima de la media europea para el sector de la construcción, mientras que Irlanda posee un mercado más pequeño.

Las actividades extractivas en ambos países generaron 16% de residuos, por debajo de la media europea. El sector de la energía en Irlanda y España generó el 2 y 3% de residuos y otras actividades económicas el 28% y 26%, respectivamente.

Los residuos generados por las viviendas representan el 17% del total en España, siendo el sector que más residuos genera junto con la construcción y otras actividades económicas, mientras que en Irlanda representa el 10%, siendo uno de los sectores que menos residuos genera, junto con el sector de la construcción y la energía. Las diferencias observadas en los porcentajes de residuos que producen las viviendas, se debe a la densidad poblacional, España con 46, 7 millones de habitantes obtendrán mayor porcentaje que Irlanda con 4,7 millones.

3.3. Generación de RSU en Europa

Según el Banco Mundial, las tasas de generación de RSU están influenciadas por el desarrollo económico, el grado de industrialización, los hábitos públicos y el clima. En general, cuanto mayor es el desarrollo económico y la tasa de urbanización, mayor es la cantidad de residuos sólidos producidos. (Banco Mundial, 2018)

A medida que aumentan los ingresos disponibles y el nivel de vida, el consumo de bienes y servicios aumenta, y consecuentemente también lo hará la cantidad de desechos generados. Además, los residentes en áreas urbanas producen aproximadamente el doble que los residentes en zonas rurales.

La Figura 3 permite visualizar los kilogramos de residuos generados per cápita en la UE-28 y en algunos países no miembros durante el año 2017.

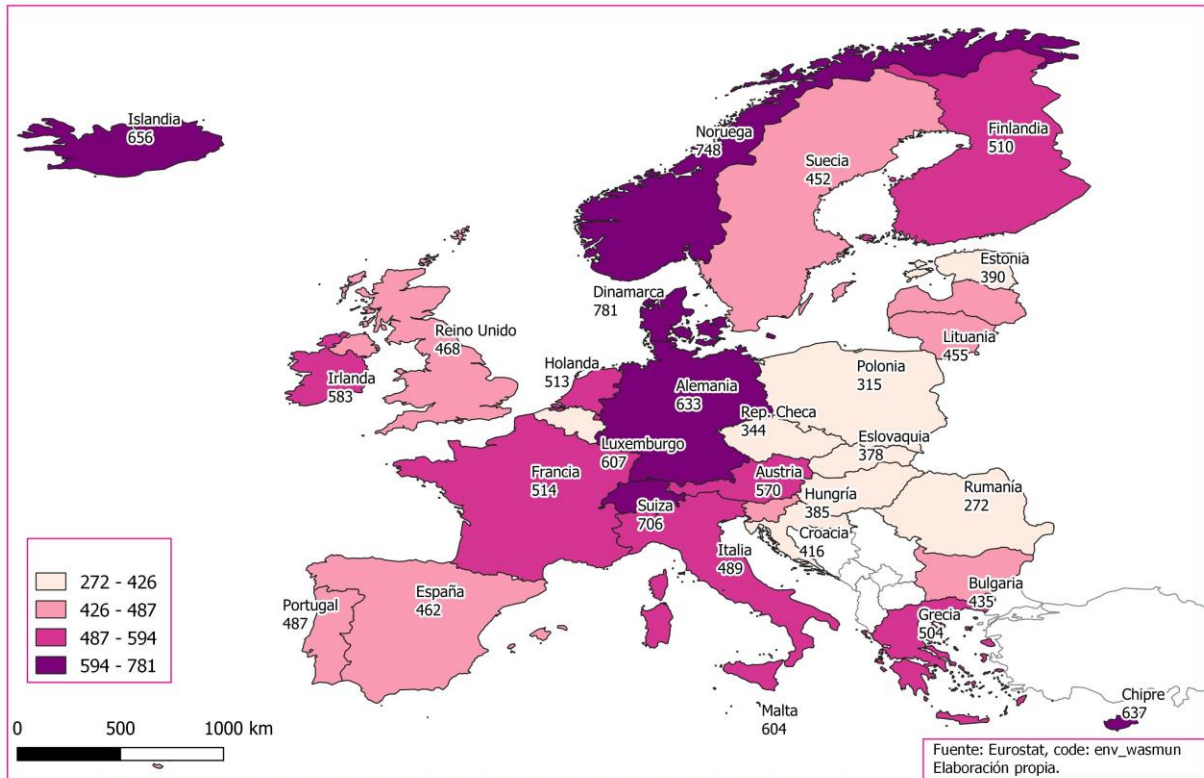


Figura 3. Generación de residuos per cápita en la UE, 2017

Como se ha mencionado previamente, los países con altos ingresos producen la mayor cantidad de residuos per cápita, mientras que los países de bajos ingresos producen la menor cantidad de residuos sólidos. Rumanía se posiciona como el país que menos residuos ha generado en 2017 con 272 kg per cápita; según Eurostat dicho país presenta las tasas más elevadas de pobreza de la UE, le siguen Polonia (315 kg por persona), República Checa (344 kg por persona) y Eslovaquia (378 kg por persona). En el otro extremo, se encuentra Dinamarca (781 kg) como el país que más residuos ha generado, muy por delante de Malta (604 kg por persona), Alemania (633 kg por persona) y Luxemburgo (607 kg por persona).

Irlanda con 583 kg per cápita ocupó la novena posición dentro de los países que más residuos han generado. Entre los países que generaron más que Irlanda se encuentran los citados anteriorente junto con Noruega (748 kg/hab), Suiza (706 kg/hab), Islandia (656 kg/hab) y Chipre (637 kg/hab). Entre Irlanda (583 Kg/hab) y España (462 Kg/hab) se encuentran Austria (570 kg/hab), Francia (514 kg/hab), Holanda (513 kg/hab), Finlandia (510 kg/hab), Grecia (504 kg/hab), Italia (489 kg/hab) y Reino Unido (468 kg/hab). Por lo tanto, España se sitúa en la décimo séptima posición de los países europeos en cuanto a la cantidad de residuos generados.

Globalemente, en 2017, Irlanda ha generado más residuos que la media de la UE-27 que para ese año fue de 486 kg/hab, mientras que España generó aproximadamente 220 kg/hab menos que la media europea.

3.4. Evolución de la generación de RSU en Irlanda y España

La Figura 4 representa la evolución de la generación de los RSU per cápita en Irlanda y España entre 2000 y 2007.

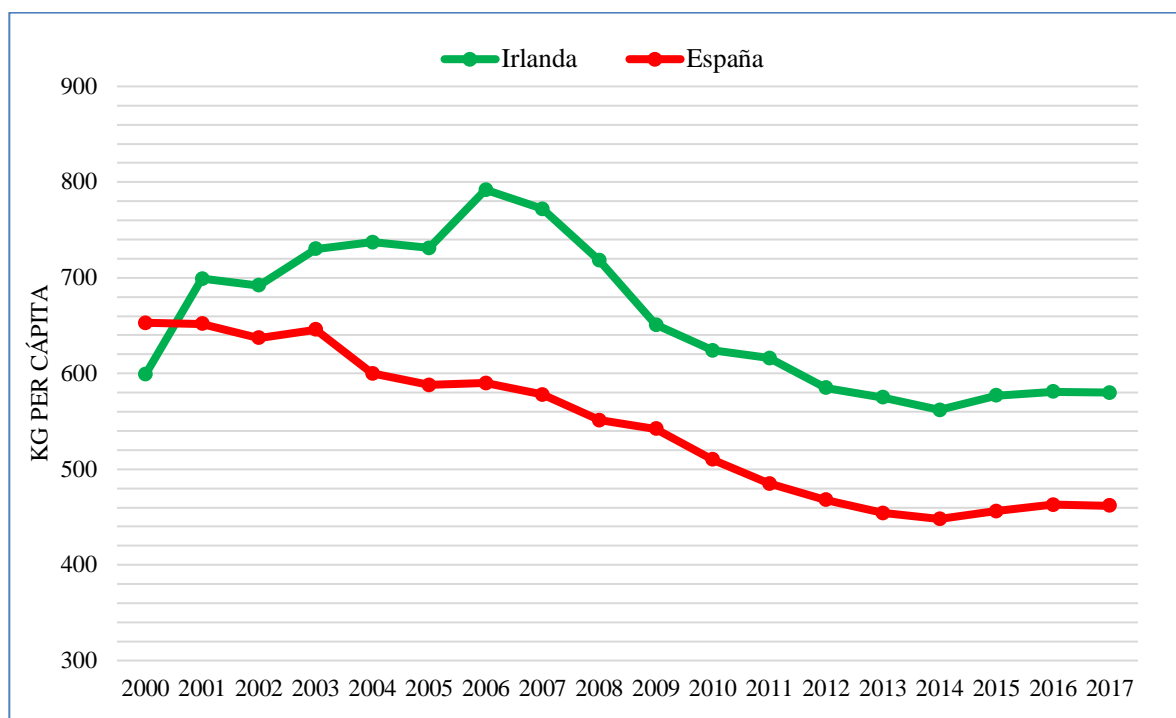


Figura 4. Evolución de la generación de RSU Irlanda y España

Los datos de Eurostat indican que en España se generaron 462 kg de residuos urbanos por habitante en 2017, valor bastante inferior a los 653 kg/hab generados en el año 2000, año en el cual produjo más residuos que la media europea. A partir de 2003, se observa un descenso continuo en la generación de residuos, y dicha tendencia decreciente permanece hasta el año 2014. En el periodo 2014-2017 la generación de residuos adoptó un leve crecimiento.

Desde 2001, Irlanda se sitúa por encima de la media europea en la generación de residuos, alcanzando su máximo en 2006 con 792 kg per cápita; a partir de dicho año desciende la generación de residuos lográndose una reducción en 2014 de un 43%, 450 kg per cápita. Probablemente sea el resultado de la recesión económica que siguió a la crisis financiera que comenzó en 2007. Al igual que en España, en el periodo 2014-2017 se incrementa la cantidad de residuos generados, coincidiendo con el despegue de la actividad económica.

4 ECONOMÍA CIRCULAR: OBJETIVOS EUROPEOS

La gestión y la eliminación de los residuos pueden tener un impacto medioambiental importante. Aunque la gestión de residuos en la UE ha mejorado considerablemente en las últimas décadas, más de una cuarta parte de los residuos municipales aún se depositan en vertederos y menos de la mitad se recicla o composta, aunque con amplias variaciones entre los Estados Miembros. Como parte de un cambio hacia una economía circular, el Parlamento Europeo formuló cuatro propuestas legislativas que introducen nuevos objetivos de gestión de residuos en relación con la reutilización, el reciclaje y el vertedero, además de fortalecer la prevención de residuos y la responsabilidad extendida del productor. El objetivo de las políticas de gestión de residuos de la UE es reducir el impacto sobre el medio ambiente y la salud, así como mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, reducir la cantidad de residuos generados y, cuando la generación de residuos sea inevitable, promover los residuos como recurso. (Bonafè, 2018)

Las cuatro propuestas de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo son:

- Modificación de la Directiva marco 2008/98/EC sobre residuos
- Modificación de la Directiva 1999/31/EC sobre vertederos
- Modificación de la Directiva 94/62/EC sobre envases y residuos de envases
- Modificación de las Directivas 2000/53 / CE sobre vehículos fuera de uso, 2006/66 / CE sobre baterías y acumuladores y baterías y acumuladores de desecho, y 2012/19 / UE sobre residuos de equipos eléctricos y electrónicos.

4.1. Directiva marco 2008/98/EC sobre residuos

La Directiva marco sobre residuos de 2008 establece los conceptos básicos y las definiciones relacionadas con la gestión de residuos, como las definiciones de residuos, reciclaje y recuperación. Define los conceptos principales relacionados con la gestión de residuos, introduce el "principio de que quien contamina paga" y la "responsabilidad extendida del productor", la "jerarquía de residuos" (orden de prioridad en la gestión de residuos, establecido entre opciones de prevención y gestión de desechos, ilustradas en la Figura 5) y explica cuándo los residuos dejan de ser considerados como tal. La Directiva establece que los residuos deben gestionarse sin poner en peligro la salud humana ni dañar el medio ambiente y sin causar molestias por ruidos u olores. Asimismo, introduce objetivos que deberán alcanzarse para 2020. En particular, establece que un 50% de residuos municipales deben reutilizarse o reciclarse. La directiva fue revisada recientemente para incluir nuevos retos: 55% en 2025, 60% para 2030 y 65% para 2035.

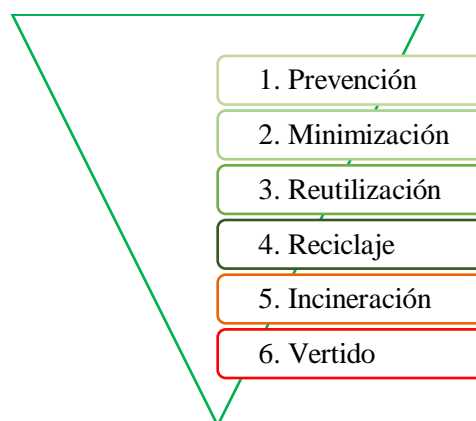


Figura 5. Jerarquía de gestión residuos

4.2. Directiva 1999/31/EC sobre vertederos

La Directiva de 1999 sobre el vertido de residuos prohíbe el vertido de residuos no tratados e incrementa la restricción del depósito de residuos en vertederos, empezando por los flujos de residuos sujetos a recogida separada, como los de plásticos, metales, vidrio, papel y biorresiduos, debido a sus beneficios medioambientales, económicos y sociales.

Establece medidas sobre vertidos, así como procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del vertedero.

Establece objetivos, considerando 1995 como el año base, de modo que la proporción de residuos municipales biodegradables que van a los vertederos no puede ser superior al 75% en 2006, al 50% en 2009 y al 35% en 2016, con excepciones otorgadas a 16 Estados miembros.

Dicha directiva fue revisada en 2018 para incluir nuevos objetivos, tales como que los Estados miembros deben garantizar que, a partir de 2030, todos los residuos aptos para el reciclado u otro tipo de valorización, en particular los residuos municipales, no sean admitidos en vertederos, y deberán adoptar las medidas necesarias para garantizar que para 2035 la cantidad de residuos municipales depositados en vertederos se reduzca al 10 %, o a un porcentaje inferior, de la cantidad total de residuos municipales generados.

4.3. Directiva 94/62/EC sobre envases y residuos de envases

La Directiva de 1994 sobre envases y residuos de envases tiene como objetivo proteger el medio ambiente y salvaguardar el funcionamiento del mercado interior. Exige a los Estados miembros que adopten medidas para evitar el desperdicio de envases y desarrollen sistemas de reutilización de envases. La Directiva original de 1994, y la versión modificada de 2004, establecieron objetivos con respecto a la recuperación y al reciclaje de los residuos de envases. La directiva fue revisada recientemente con el fin de incluir nuevos retos para los años posteriores.

Dichos objetivos establecen que para el año 2025 deben reciclarse un mínimo del 65 % en peso de todos los residuos de envases. Además, se deberán reciclar los siguientes materiales contenidos en los residuos de envases: al menos 50% de plástico, 25% de madera, 70% metales ferrosos, 50% aluminio, 70% vidrio, 75% papel y cartón.

Más restrictivamente, para 2030 se deberá reciclar un mínimo del 70% en peso de todos los residuos de envases siendo al menos 55% de plástico, 30% de madera, 80% metales ferrosos, 60% aluminio, 75% vidrio, 85% papel y cartón

4.4. Directivas sobre vehículos al final de su vida útil, baterías y acumuladores, y RAEE

La Directiva del 2000 de la UE tiene como objetivo garantizar una gestión adecuada de los vehículos al final de su vida útil. Alienta a los fabricantes e importadores a limitar el uso de sustancias peligrosas y desarrollar la integración de materiales reciclados. La Directiva establece objetivos para la recuperación y el reciclaje que deben cumplirse para 2006 y 2015. La Directiva 2006 sobre baterías y acumuladores tenía como objetivo mejorar la gestión de residuos y el rendimiento medioambiental de las baterías y acumuladores, así como garantizar el funcionamiento del mercado único mediante el establecimiento de normas para su recogida, reciclaje, tratamiento y eliminación. También establecía valores límite para ciertas sustancias peligrosas (en particular mercurio y cadmio) en baterías y acumuladores. La Directiva preveía la creación de esquemas de responsabilidad extendida del productor y establecía objetivos de reciclaje y recolección que debían cumplirse para 2010, 2012 y 2016. La Directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (Directiva RAEE), actualizada en 2012, establece tasas mínimas para la recogida selectiva, recuperación y reciclaje.

La Directiva fue revisada recientemente para incluir nuevos objetivos:

- Fijar valores de concentración máximos de determinadas sustancias que puedan ser tolerados en materiales y componentes específicos de los vehículos.
- Garantizar que todos los vehículos al final de su vida útil sean almacenados y tratados conforme a la jerarquía de residuos.
- Designar aquellos materiales y componentes de vehículos que pueden ser retirados antes de ser sometidos a otro tratamiento.

Este trabajo se centra en analizar los objetivos expuestos en la Directiva marco 2008/98/EC sobre residuos, en concreto los establecidos para 2020 y 2025, tal como se muestra en la Figura 6, a modo de resumen.



Figura 6. Objetivos 2020 y 2025

5 PROPIEDADES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para un mejor manejo en la gestión de residuos, es esencial identificar las propiedades de los residuos. Conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas de los desechos ayuda a elegir el tipo de tratamiento adecuado. Las propiedades físicas son las que determinan cómo recolectar, almacenar, separar, transportar y transferir los desechos. Asimismo, determinar las sustancias químicas en los desechos será útil para los tratamientos como la incineración. Es importante conocer las propiedades biológicas de los residuos como producción de olores y la biodegradabilidad para los procesos de compostaje o digestión anaeróbica.

Según el estudio *Physical, Chemical and Biological Properties of MSW* (Municipal solid waste), las propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos son las que se presentan a continuación. (Marmara University, 2012)

5.1. Propiedades Físicas de los RSU

Las características físicas más importantes de los RSU incluyen: peso específico, contenido de humedad, tamaño de partícula y distribución del tamaño, capacidad de campo y porosidad de los residuos compactados.

Peso específico: El peso específico se define como el peso de un material por unidad de volumen. Los datos sobre el peso específico a menudo son necesarios para valorar la masa y el volumen total de los residuos que tienen que ser gestionados. Por lo general, se refiere a residuos no compactados.

Contenido de humedad: El contenido de humedad se utiliza para evaluar la viabilidad económica del tratamiento de residuos por incineración, ya que se debe suministrar energía para la evaporación del agua y para elevar la temperatura del vapor de agua. El contenido de humedad también juega un papel importante en otros métodos de procesamiento, como el compostaje y la digestión anaeróbica.

Tamaño de partícula: El tamaño y la distribución del tamaño de los componentes de los materiales en los residuos sólidos son una consideración importante dentro de la recuperación de materiales, especialmente con medios mecánicos, como cribas, trómmel y separadores magnéticos.

Capacidad de campo: La capacidad de campo de los residuos sólidos es la cantidad total de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad. Es importante para determinar la formación de lixiviados en los vertederos. La capacidad de campo varía con el grado de presión aplicada y el estado de descomposición del residuo.

Permeabilidad: La permeabilidad (conductividad hidráulica) de los desechos sólidos compactados es una propiedad física importante porque gobierna el movimiento de líquidos y gases en un vertedero. La permeabilidad depende de distribución del tamaño de poro, área de superficie y porosidad.

5.1 Propiedades Químicas de los RSU

Si se van a utilizar desechos sólidos como combustible, las cuatro propiedades más importantes que se deben conocer son:

- Análisis físico: incluye análisis sobre contenido en humedad, material orgánica volátil, carbono fijo y cenizas.
- Punto de fusión de las cenizas. El punto de fusión de la ceniza se define como la temperatura en la que la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólido (escoria) por la fusión y la aglomeración.

- Análisis elemental de los componentes de residuos sólidos. El análisis elemental de un residuo normalmente implica la determinación del porcentaje carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza. Es importante para determinar la relación C/N necesaria en los procesos de compostaje.
- Poder calorífico. Es importante para evaluar si es posible su uso como combustible en un sistema de combustión.

Cuando la fracción orgánica de los RSU se va a utilizar en un tratamiento biológico como por ejemplo el compostaje, es importante conocer el contenido en nutrientes esenciales y otros elementos presentes en los residuos. Algunos de los nutrientes esenciales y los elementos encontrados en los principales materiales que conforman la fracción orgánica de los RSU son hierro, níquel, fósforo, magnesio, sodio potasio, amonio, etc.

5.2 Propiedades Biológicas de los RSU

Biodegradabilidad: La biodegradabilidad es la capacidad que tienen las sustancias y los materiales orgánicos para descomponerse en sustancias más sencillas debido a la actividad enzimática de microorganismos. El contenido en sólidos volátiles (SV), se ha usado frecuentemente como una medida de la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los RSU

Producción de olores: Los olores pueden desarrollarse cuando los residuos sólidos se almacenan durante largos periodos de tiempo in situ entre recogidas, en estaciones de transferencia, y/o en vertederos. El desarrollo de olores se produce por la descomposición anaerobia de los componentes orgánicos fácilmente descomponibles que se encuentran en los RSU.

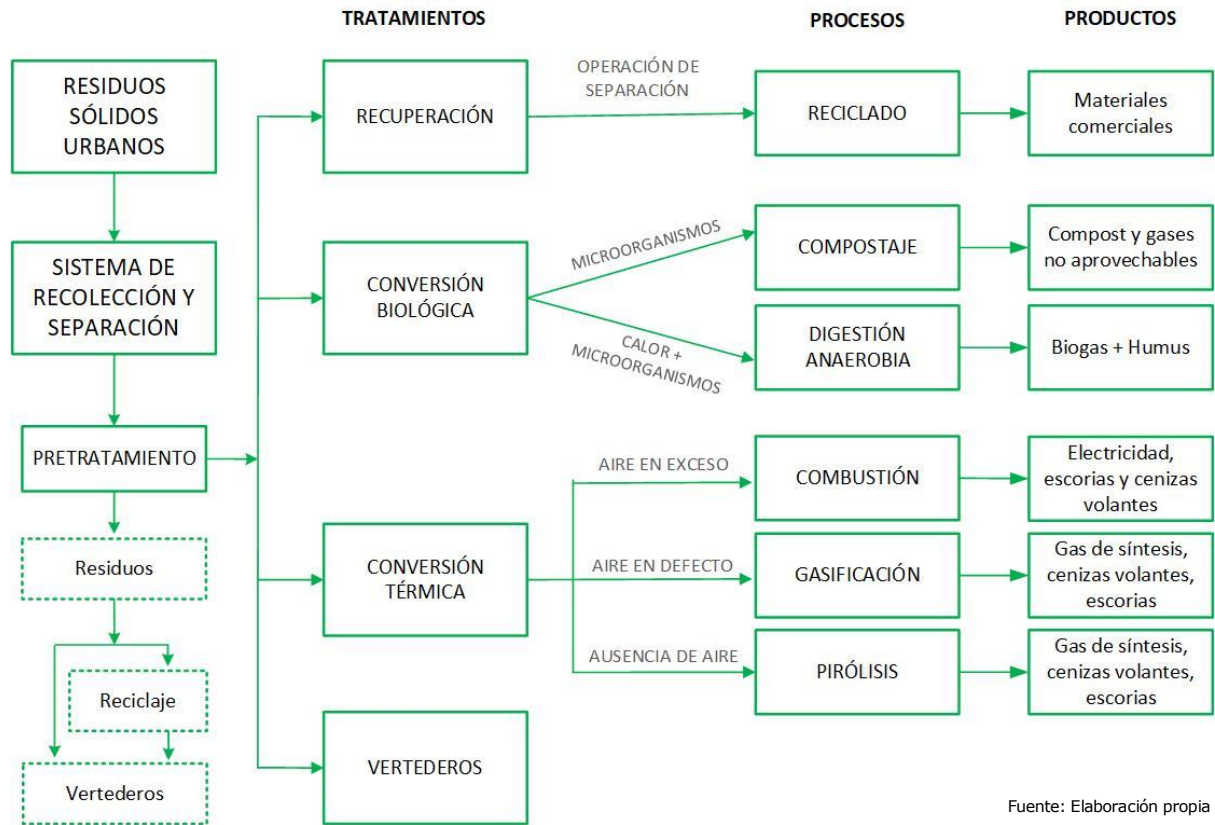
6 TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Según la jerarquía de residuos, la cual se ha mencionado previamente, de las distintas opciones de gestión de residuos, la más deseable es no producir tales residuos (prevención de residuos) y la menos deseable, es deshacerse de los desechos en vertederos. Entre ambos extremos hay una amplia variedad de opciones y estrategias alternativas de gestión disponibles para tratar los RSU y así limitar la cantidad que queda para desechar en el vertedero.

La Directiva de la EU 96/2002, contempla que la responsabilidad principal de la gestión de residuos recae en el productor. Para hacer frente a estas obligaciones, estos tienen la posibilidad de asociarse creando entidades sin ánimo de lucro que se responsabilicen de la correcta gestión de sus residuos. Estas entidades se denominan Sistemas Integrados de Gestión (Revertia, 2010).

El sistema integrado de gestión de residuos SIG o ISWM, por sus siglas en inglés (Integrated Solid Waste Management), es un método comúnmente aplicado en muchos países desarrollados. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) lo define como un sistema de reducción, recolección, compostaje, reciclaje y eliminación de desechos. Los centros integrados de gestión de residuos separan los RSU en diferentes fracciones como plástico, vidrio, residuos orgánicos o residuos combustible, lo que permite un mejor aprovechamiento de cada flujo de residuos. La fracción orgánica de los residuos se envía a un proceso de compostaje o a digestión anaeróbica para obtener biogás. La fracción no orgánica, que no se pueda reciclar, se considera para la generación de calor y / o electricidad a través de procesos de producción térmica. Otras fracciones como el acero inerte, el aluminio y los residuos de cenizas se reciclan o se reutilizan como arena para propósitos de construcción (Van & Van, 2007).

Los tipos de tratamiento de residuos que se van a analizar en este trabajo se contemplan en la Figura 7; dichos tipos de tratamientos son los de mayor aplicación en la gestión de residuos, lo que permite una mejor comparabilidad de datos entre países. De forma marginal, se menciona la gasificación y pirolisis por ser las nuevas técnicas que se quieren aplicar en los sistemas de gestión de residuos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Tipos de tratamientos de residuos

6.1 Sistemas de recogida de RSU

Existen distintos modelos de recogida de residuos urbanos, cuya aplicación de un método u otro dependerá del tipo de residuo que se recolecta, así como de si se trata de una zona urbana o rural, o si la recolecta se realiza en zonas turísticas. La recogida selectiva, es el paso previo a los sistemas de tratamiento de residuos, y la calidad de las diferentes fracciones de residuos determinará la eficiencia de los procesos de tratamiento.

Los sistemas de recogida se pueden ordenar en función de la proximidad del punto de generación. Cuando el sistema de recogida es selectivo, a mayor proximidad, mayor nivel de recogida selectiva.

En la Figura 8, se presentan los distintos modelos de recogida de residuos que se pueden encontrar.

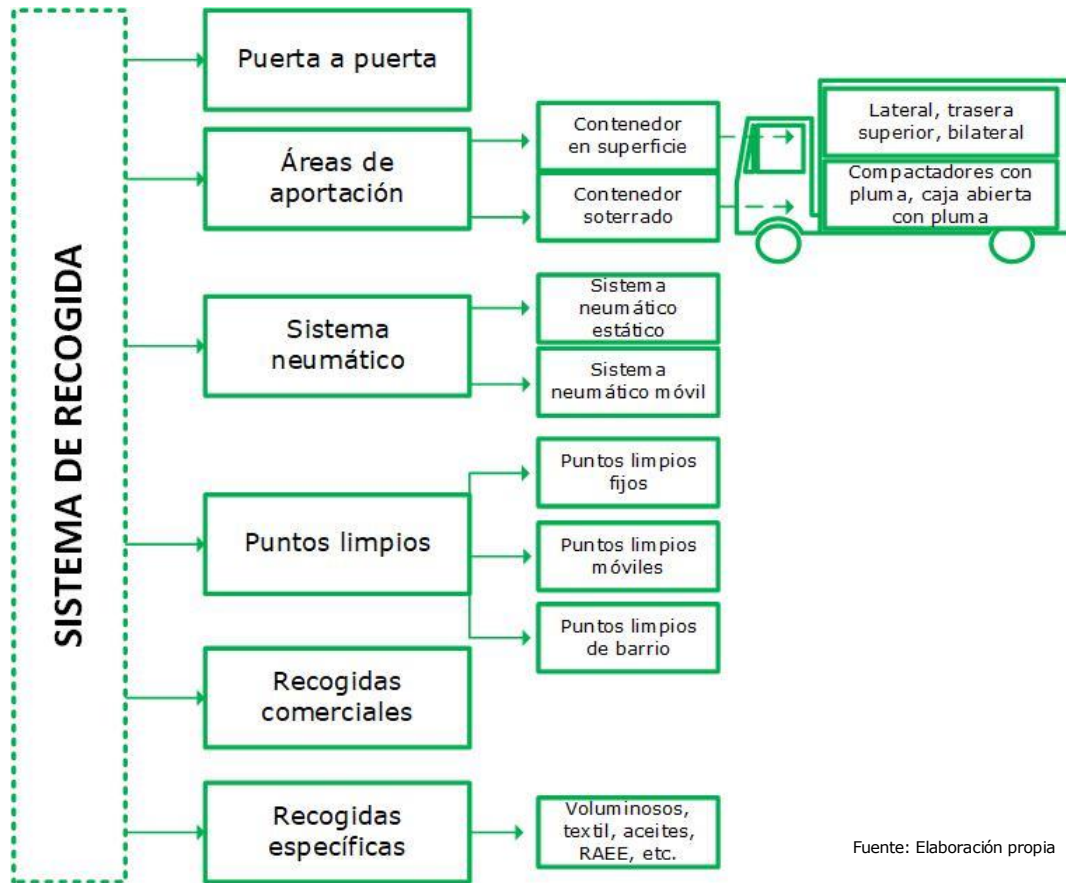


Figura 8. Sistemas de recogida de residuos.

Recogida domiciliaria o puerta a puerta: Se suele utilizar en zonas donde se genera gran cantidad de residuos de un mismo tipo, así como en zonas de baja densidad poblacional. Este sistema es muy habitual para las recogidas específicas comerciales. Su principal característica es que cada vivienda o comercio entrega sus residuos al servicio municipal de recogida en el horario y días estipulados. Comparado con los demás tipos de recogida, este sistema obtiene resultados superiores de recogida separada. Este sistema es el más utilizado en Irlanda.

Recogida en áreas de aportación: Por área de aportación se entiende cualquier zona de la vía pública, o de otros lugares de acceso público, en la que se sitúan contenedores para la recogida de una o varias fracciones y a la que el ciudadano debe desplazarse para depositar sus residuos (Diputación De Granada). Actualmente este sistema es el más utilizado en España. Dentro de este sistema se pueden encontrar dos modelos: recogida en acera y contenedores soterrados.

- Recogida en acera: Se ubican en la vía pública contenedores de diferentes tipologías según el tipo de fracción a recoger y el urbanismo de la zona. La frecuencia de recogida de los contenedores se adapta a los niveles de llenado en algunos casos en función de las características del residuo.
- Contenedores soterrados: Los contenedores se ubican bajo el nivel del suelo, siendo la forma de acceso a ellos a través de un buzón en el cual se depositan los residuos. El impacto visual que producen es menor, pero necesitan de una gran inversión inicial, y los costes de mantenimientos son también elevados. Se suele utilizar en zonas turísticas.

Sistema neumático: Consiste en buzones de vertido conectados a una red de tuberías subterráneas a través de los cuales los residuos son transportados hasta una central de recogida. En general este sistema se utiliza en nuevos núcleos urbanos. Por sus propias características, este sistema no admite la recogida de vidrios, pues

estos pueden romperse y generar un polvo abrasivo que dañaría las tuberías. Por lo que está diseñado para la recogida de envases ligeros y fracción resto. Se pueden encontrar dos modalidades en este sistema: el sistema estático y el móvil.

- Sistema estático: La totalidad del transporte de residuos se realiza de forma neumática desde el punto de recogida hasta la central.
- Sistema móvil: Los residuos se almacenan en puntos de recogida intermedios el cual tiene un punto de succión donde se conecta un vehículo que aspira los residuos de forma periódica.

Puntos limpios: Los puntos limpios son centros de aportación y almacenamiento, fijos o móviles, que son habilitados para que se depositen los residuos de origen doméstico, que por sus características no son aptos para su eliminación a través de los medios convencionales de recogida de residuos. Estos pueden ser: fijos, móviles o puntos limpios de barrio. Los residuos que se aceptan en un punto limpio se muestran en la Figura 9.



Figura 9. Residuos que se aceptan en los puntos limpios

Recogidas comerciales: Según el “Estudio de los diferentes estados de la UE” realizado por el Gobierno de España los residuos de origen comercial representan entre un 15% y un 30% de los RSU dependiendo de la tipología y actividad económica que posea el municipio. El sistema de recogidas comerciales diferenciados de los sistemas ordinarios para grandes productores y polígonos industriales ha demostrado ser eficaz para incrementar los resultados de recogida separada tanto en cantidad como en calidad, debido a que fomenta la responsabilidad del productor y aplica impuestos de recogida diferentes para los comercios en función del peso o volumen generados, pudiendo desarrollar procesos de control y sanción complementarios.

Recogidas específicas: Además del sistema de punto limpio se prestan otras recogidas específicas con diferentes modalidades y ubicaciones de servicio para las siguientes fracciones, las cuales se representan en la Tabla 1.

Recogida separada: Se trata de recoger separadamente las distintas fracciones de los residuos sólidos, las principales fracciones que se recogen son: vidrio, plástico, papel y cartón y residuos orgánicos. Este tipo de recogida puede ser mediante contenedores situados en las calles (áreas de aportación, modelo español) o mediante recogida domiciliaria.

Fracción	Sistema de recogida				Otras recogidas
	Recogida a demanda	Recogidas en equipamientos	Recogidas en comercios	Recogidas en puntos limpios	
Pilas		*	*	*	
Fármacos		*	*		
Aceites vegetales usados		*		*	Circuito hostelería, centros educativos...
RAEE	*		*	*	Recogida entidades sociales
Voluminosos	*			*	Recogida entidades sociales
Textil				*	Contenedores vías públicas, recogida entidades sociales
Escombros				*	
Poda y restos vegetales	*			*	Se recoge juntamente con la fracción orgánica
Otras fracciones				*	

Tabla 1. Recogidas específicas (Fuente: Gobierno de España)

Todos los Estados miembros de la UE emplean una combinación de prestación de servicios de gestión de residuos directos e indirectos. Sin embargo, se pueden identificar diferentes tendencias específicas de cada país. A continuación, se analiza el modelo de Irlanda y de España.

6.2 Recogida de residuos en Irlanda

Según “*The Operation of the Household Waste Collection Market*” publicado en 2018, los servicios de recolección de residuos, así como su coste son determinados por operadores privados. Sujeto a licencia, los operadores de residuos pueden ofrecer sus servicios en cualquier lugar del país, con la decisión de ingresar a un área basándose en consideraciones comerciales y, por lo tanto, es posible que más de un operador brinde servicios en un área determinada. El Estado participa en la emisión de licencias para la gestión de residuos y en la aplicación de la normativa ambiental. Dentro de la estructura actual del mercado, los operadores privados asumen la propiedad de los residuos y la responsabilidad de transportarlo a la instalación de tratamiento de su elección, sujeto a las condiciones ambientales pertinentes (Commission, 2018).

En Irlanda, los residuos se recogen de los hogares de forma periódica, semanalmente. Los camiones de recolección de residuos son compartimentados para cada fracción, de forma que se recoge separadamente los residuos orgánicos de los reciclables. Además, los camiones de recolección tienen la capacidad de pesar los desechos de los hogares de forma individual en el punto de recolección.

En 2005 el gobierno estableció que los hogares pagarían por sus residuos en un sistema basado en pago por uso (*pay-by-use system*) que demuestra mejores resultados ambientales respecto a otros sistemas. En general se pueden encontrar tres principales categorías:

- Pago basado en el volumen: Los domicilios pagan por un contenedor de un determinado volumen. A mayor volumen de contenedor, mayor coste.
- Los domicilios pagan por cada recogida efectuada *pay-by-lift* o pagan por las etiquetas que están asociadas a las bolsas de residuos, es decir, los operadores etiquetan sus bolsas de residuos y las recolectan en un punto de recolección designado. A este sistema se conoce por *Tag-a-bag and pay-by-lift system*. Este sistema es el más utilizado en Dublín.
- Sistema de pago por peso: Este sistema se puede dividir en tres subcategorías:
 - Sistema de pago por kilo.
 - Sistema de bandas: El hogar paga un precio fijo por el servicio de recolección. Sin embargo, si dicho hogar sobrepasa un límite prefijado, deberá pagar por kilo que haya sobrepasado.

- Sistema de peso promedio: Se calculan una tasa promedio de generación de residuos, que podría ser específica del hogar o del área. Si un hogar presenta menos residuos que el promedio recibe una reducción en su factura y si presentan más, pagan más.

En la Figura 10, se muestra el porcentaje de hogares abonados al servicio de recolección de residuos. Se ha destacado en el mapa, las ciudades principales de Irlanda.

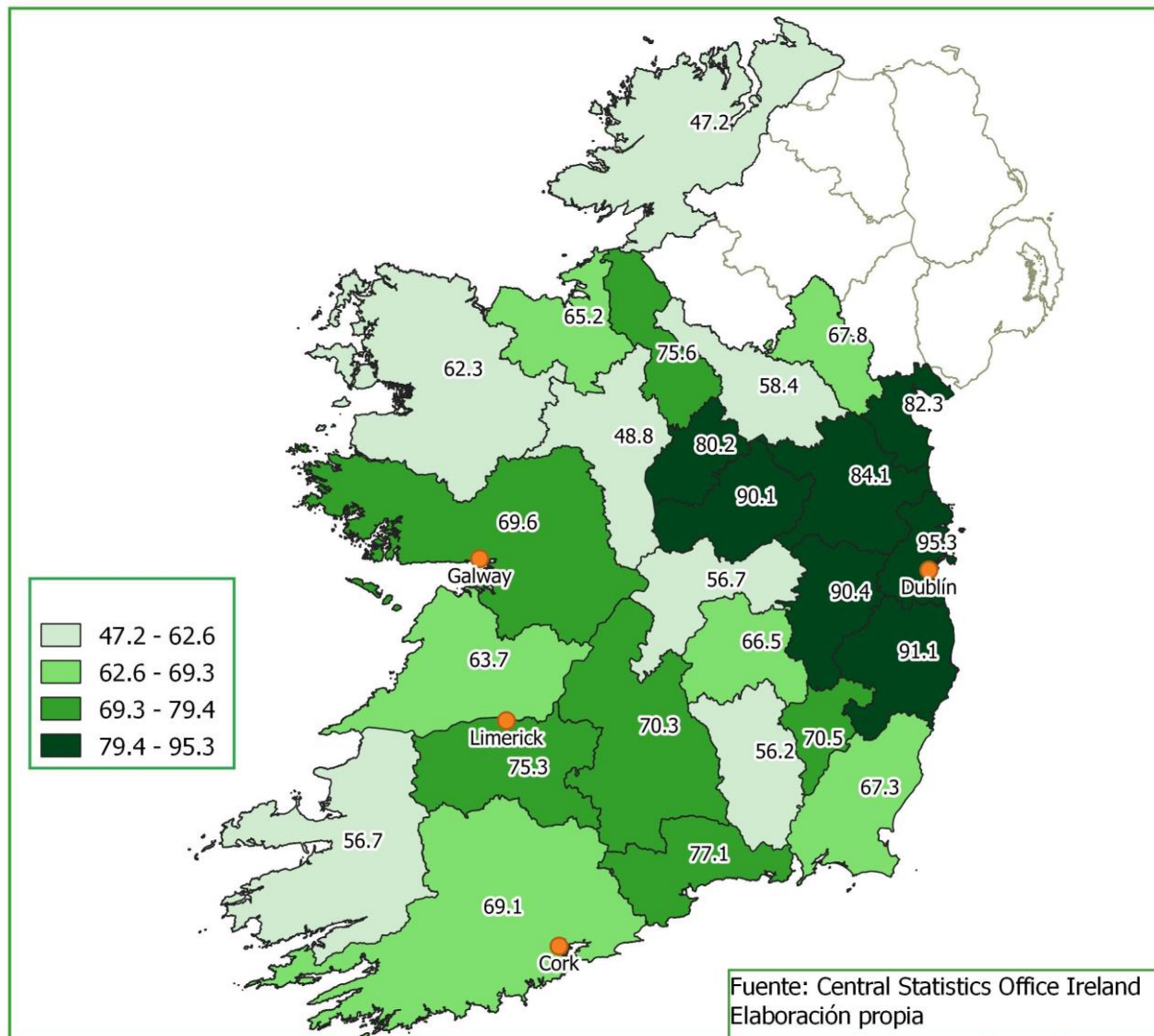


Figura 10. Porcentaje de hogares con recogida de residuos sólidos urbanos

Como se puede observar en dicho mapa, la participación por parte de los hogares en la recogida de residuos es más alta en las ciudades que constan de un perfil económico más elevado (zona este de Irlanda), debido a que sus residentes pueden hacer frente a los costes de dichos servicios. Sin embargo, las zonas más rurales como Kilkenny (56.2%), Kerry (56.7%) o Mayo (62.3%) presentan un bajo porcentaje de participación, donde los residentes de dichas zonas prefieren transportar sus residuos a los puntos de recolección.

Los datos proporcionados por CCPC (Competition and Consumer Protection Commission) muestran que el 2% de la población que no está abonada a dicho servicio arrojan sus residuos y que el 1% optan por quemar sus desechos, ambos se realizan de forma ilegal. Según CCMA (Customer contact management association) 50000 hogares eliminan sus desechos de forma no regulada.

Los domicilios en Irlanda tienen la opción de elegir la contratación del servicio de recogida de residuos. Aunque disponen de forma gratuita de contenedores de fracción reciclable, no estando disponible dichos contene

dores para la fracción orgánica. Los datos sobre el porcentaje de recogida separada no fueron encontrados y por ello no se aborda en este trabajo.

6.3 Recogida de residuos en España

En España el modelo más común de recogida de residuos urbanos es la subcontratación de este servicio a empresas privadas por parte de los Ayuntamientos. Al ser un servicio público se aplica lo que se conoce como “tasa de basuras” que es el importe que pagan los ciudadanos a cambio de una determinada contraprestación, en este caso, a cambio de la recogida y gestión de sus residuos. Al tratarse de una tasa y no de un impuesto, el coste de esta nunca puede superar el coste del servicio prestado, lo que significa que no tiene como finalidad obtener un beneficio económico al contrario del modelo irlandés, en el cual las empresas buscan un beneficio económico en la prestación de dicho servicio. (Reale Seguros, 2018)

Esta tasa de basuras es de origen municipal y no es igual en todos los municipios. Según el informe “Ranking Tributario de los Municipios Españoles”, de 2017, elaborado por La agencia tributaria de Madrid, de los 52 municipios capitales de provincia, solo 8 no financian este servicio mediante una tasa específica para la gestión de residuos sólidos urbanos. Estas ocho capitales de provincia son: Badajoz, Barcelona, Las Palmas de Gran Canaria, Madrid, Málaga, Pamplona, Valencia, Valladolid. En dichos municipios este servicio se sufraga con el IBI (Impuesto sobre Bienes inmuebles). (Madrid, 2017)

Para el caso de aquellos municipios que sí aplican dicha tasa, se puede encontrar dos tipos diferentes de la misma (Organización de Consumidores y Usuarios, 2018):

- Tasa fija: Todos los domicilios pagan la misma cantidad, independiente de como sean y su localización dentro del municipio. El modelo de tasa fija abunda más en los municipios más pequeños. Según el informe “Las tasas de residuos en España” elaborado por Ignasi Puig Ventosa, el 44% de los municipios españoles presentan un modelo de tasa con cuota fija (Residuos Profesional, 2018).
- Tasa variable: Este a su vez se divide en tres subcategorías:
 - En función de la calle donde se localiza la vivienda.
 - En función del valor catastral.
 - Según el consumo de agua.

En la Figura 11 se muestran las comunidades autónomas que más recogieron de forma separada sus residuos. Se analiza solo el caso de España por disponibilidad de datos.

A partir de los datos proporcionados por INE, se observa que Cataluña, Navarra y Asturias son las que mejores resultados obtienen en la recogida separada, según Ecoembes las diferencias geográficas se debe sobre todo a la desigual dotación de contenedores y a la aplicación de las leyes ambientales. En Navarra, con un 42,9% de recogida separada, el 98% de sus ciudadanos tuvieron acceso a los contenedores de recogida selectiva, la Comunidad Foral es uno de los territorios mejor contenerizados de Europa con un iglú verde por cada 111 habitantes (Diario de Navarra, 2019). Andalucía con un 11,1%, posee una ratio media de 320 habitantes por contenedor verde, según la Junta de Andalucía. En definitiva, para mejorar el porcentaje de la recogida selectiva de residuos una de las medidas a aplicar es aumentar la ratio contenedor/habitante.

Además de Navarra, Cataluña y Asturias también demuestran buenos resultados para la recogida selectiva, con 31,05% y 26,03%, respectivamente. Entre las comunidades que menos han recolectado de forma separada sus residuos destacamos Castilla La Mancha (9,21%) y Murcia (9,99%) que no llegaron ni al 10%.

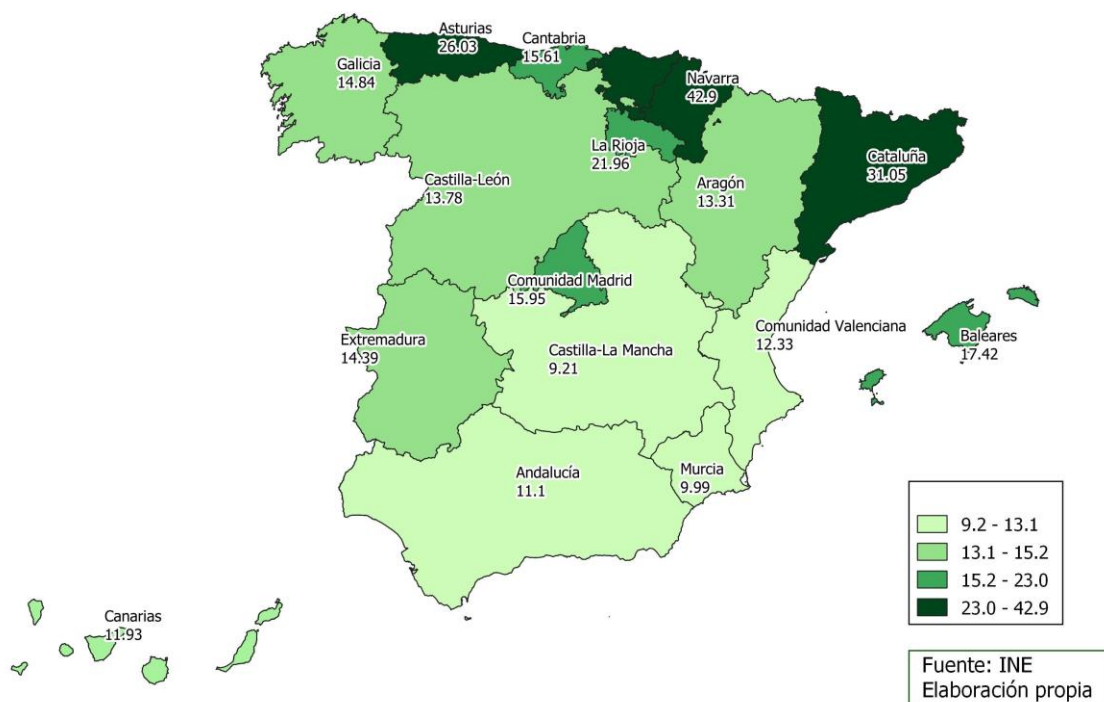


Figura 11. Porcentaje de recogida separada por CCAA.

En cuanto a los diferentes métodos de recogida de residuos analizados entre España y Irlanda hacemos notar que la privatización total de dicho sistema puede presentar problemas tales como la libre elección por parte de los domicilios de pagar o no por el servicio de recogida. Como se ha mencionado anteriormente, el 3% de la población de Irlanda prefiere gestionar ilegalmente sus residuos.

En España, el pago de la gestión de residuos se realiza de forma obligatoria, sin elección por parte de los domicilios de abonarse a dicho servicio o no, por ende, todos los domicilios poseen dicho servicio,

6.4 Clasificación de residuos

Una vez que los residuos han llegado a una planta de tratamiento de residuos, se procede a la clasificación de los diferentes tipos de desechos para su posterior procesamiento. Las instalaciones de clasificación junto con el sistema de recolección actúan como un filtro en la cadena de gestión de residuos, separando las fracciones recuperables de la mezcla de residuos y preparándolas para la comercialización. Los materiales no aptos para el reciclaje se preparan para ser procesados con un tratamiento finalista, típicamente incineración o vertedero. En conclusión, una correcta separación en origen, así como la posterior clasificación, significa una reducción de métodos poco respetables con el medio ambiente.

La configuración exacta de una planta de clasificación depende en gran medida de la entrada de residuos, la salida deseada y el nivel de tecnología. Las plantas de clasificación exigen un flujo constante de entrada de material de desecho para ser financieramente viable. Un déficit en el flujo de entrada significa una reducción en la cantidad de material de salida para vender. Como tales, a menudo son extra municipales o regionales, y sirven a varios municipios desde una ubicación central para garantizar la viabilidad económica a largo plazo.

Las instalaciones de clasificación de residuos varían desde simples líneas de clasificación manual hasta complejas y automatizadas líneas de clasificación multiproceso.

A continuación, se presenta un resumen de las operaciones básicas utilizadas en las IRM (Instalación para la recuperación de materiales).

6.4.1 Clasificación manual y automática

Existen dos enfoques para clasificar los desechos en flujos de materiales individuales: clasificación manual y clasificación automática o mecánica. La configuración de la línea de clasificación depende en gran medida del flujo de desechos entrantes, debido a que el coste de adquisición de los equipos suele ser elevado, se necesita un caudal másico mínimo de residuos para ser rentables.

6.4.1.1 Clasificación manual

Triaje positivo y negativo

Existen dos enfoques diferentes para clasificar los desechos: triaje positivo y triaje negativo. El triaje positivo se centra en identificar y eliminar una fracción deseada del flujo de residuos de entrada, y, por el contrario, el triaje negativo se centra en identificar y eliminar una fracción no deseada. En la práctica, las plantas de clasificación de desechos suelen usar ambos enfoques

6.4.1.2 Clasificación automática

Tecnologías de clasificación

A medida que los países se desarrollan, los RSU generados tienden a convertirse en una mezcla compleja de materiales que exigen complejas tecnologías para su clasificación. Ese alto nivel de variación de composición de los desechos exige una combinación de tecnologías para separar con éxito los desechos. Dichas tecnologías deben tener la capacidad de clasificar un rango y volumen de materiales cada vez más diversos, independientemente del tamaño, el contenido de humedad y/o el nivel de contaminantes.

La Tabla 2 describe brevemente algunas de las principales tecnologías empleadas en las plantas de clasificación.

Reducción de tamaño	<ul style="list-style-type: none"> • Molinos de martillo 	Dispositivo de impacto en el que se acoplan una serie de martillos a un eje que gira a altas velocidades. Al entrar los residuos son golpeados con suficiente fuerza como para ser aplastados. El proceso sigue hasta que el material tiene el tamaño deseado y cae por el fondo del molino
	<ul style="list-style-type: none"> • Trituradoras cortantes 	Operan con una acción de tijera, en la que dos cuchillas girando en sentido opuesto cortan los residuos
	<ul style="list-style-type: none"> • Cubas trituradoras 	Son esencialmente molinos de martillos móviles que se puede llevar al sitio para procesar los residuos in situ. Se han utilizado para árboles, ramas y residuos de construcción.
Separación por tamaño	<ul style="list-style-type: none"> • Trómmeles 	Cilindro giratorio en ángulo con orificios por los cuales los residuos caen a través.
	<ul style="list-style-type: none"> • Cribas vibratorias 	Pantalla vibratoria / oscilante que permite el paso de desechos más pequeños y transporta los residuos más grandes hasta el final.
	<ul style="list-style-type: none"> • Cribas de discos 	Discos giratorios, entrelazados y paralelos. Los materiales que hay que separar caen entre los espacios, los materiales grandes se llevan por encima de los discos como en una cinta transportadora.
Separación por densidad	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificadores neumáticos 	Los RSU triturados caen por un conducto vertical. El aire ascendente transporta los materiales más ligeros hasta lo alto del conducto. El aire es insuficiente para transportar los elementos pesados que caen al fondo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Separación por inercia 	Los residuos caen en una cinta vibrante inclinada agitada por un doble movimiento alternativo en dirección horizontal y vertical. Se utilizan para separar los objetos planos de los objetos rodantes. El tapiz está agujereado de forma que los finos caen a una cinta situada en la parte inferior del equipo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación 	Se utiliza un fluido para separar dos componentes de densidad diferente.
Separación por campo eléctrico y magnético	<ul style="list-style-type: none"> • Imanes 	Imanes permanentes o electroimanes en una de sus dos configuraciones: - "Overband": El imán se coloca perpendicular y por encima de la cinta de transporte de residuos. - Disco: La cinta de transporte de residuos gira por encima del disco magnético.
	<ul style="list-style-type: none"> • Corrientes de Foucault 	Si se coloca un conductor como el aluminio en un campo magnético variable, se genera un flujo de una corriente e inducirá un campo magnético que estará opuesto en polaridad al campo aplicado, produciendo así una fuerza magnética que expulsará al conductor fuera del campo magnético.
	<ul style="list-style-type: none"> • Carga electrostática 	Los campos electrostáticos de alto voltaje pueden utilizarse para separar materiales no conductores, como el vidrio, el plástico y el papel, de materiales conductores, como son los metales.
Densificación (compactación)		Operación básica que incrementa la densidad de los materiales residuales para almacenarlos, transportarlos más eficazmente y preparación de combustibles derivados de residuos (CDR) densificados. Existen varias tecnologías disponibles incluyendo el empaquetamiento y la peletización.

Tabla 2. Tecnologías en la clasificación de residuos

Después de la clasificación, los materiales serán enviados, según su tipología, a distintos tipos de tratamientos. Los tratamientos de RSU que se van a abordar en este trabajo son: vertederos, incineración, compostaje y reciclaje.

6.5 Vertederos

Los vertederos controlados son instalaciones que se ubican, diseñan, operan y monitorean para garantizar el

cumplimiento de las distintas directivas que los regulan, las cuales establecen que los vertederos deben estar diseñados para proteger el medio ambiente de los contaminantes que puedan estar presentes en los residuos sólidos. El plan de emplazamiento de vertederos evita la ubicación de vertederos en áreas ambientalmente sensibles, mientras que los sistemas de monitoreo ambiental in situ monitorean cualquier señal de contaminación de aguas subterráneas y de gas de vertederos, y proporcionan medidas adicionales de seguridad. Además, muchos vertederos nuevos recogen emisiones de gases potencialmente dañinas y convierten el gas en energía (Meegoda, Hettiarachchi, & Hettiaratchi, 2016).

Los vertederos son un método biológico de tratamiento de residuos, donde la ausencia de oxígeno en el interior de los vertederos permite la descomposición anaeróbica del material orgánico que degrada este a formas más estables. Este proceso es muy lento y puede continuar durante muchos años después del cierre del vertedero.

Los vertederos de RSU contienen residuos recolectados de fuentes residenciales, comerciales e industriales, y también pueden aceptar residuos de construcción y demolición, pero no residuos peligrosos. El uso de los vertederos se limitará a los residuos que no sean adecuados para el reciclaje o para el procesamiento biológico, así como para el rechazo de las instalaciones de procesamiento de residuos (Nagarajappa & Rashmi, 2015). Los rechazos de los residuos sólidos son componentes de los residuos que no se reciclan, que quedan después del procesamiento en una instalación para la recuperación de materiales, o que quedan después de la recuperación de productos de conversión y/o energía.

Revestimiento

La selección del material del revestimiento debe basarse en el tipo de desecho y el método de operación del vertedero. Además, se debe tener en cuenta que el lixiviado no debe tener ninguna interacción con el material de revestimiento (Meegoda, Hettiarachchi, & Hettiaratchi, 2016).

Los revestimientos se pueden describir como simples, compuestos o dobles. Normalmente no se utiliza los revestimientos simples en los vertederos de RSU, su aplicación se restringe a vertederos de residuos de construcción y demolición, ya que es más barato desecharlos en vertederos específico para ese tipo de residuos debido a que estos son más económicos de construir y mantener.

Los revestimientos compuestos son los que más se utilizan en los vertederos de RSU debido a que son más efectivos para controlar la migración de lixiviados al subsuelo. Los revestimientos dobles se utilizan en algunos vertederos de RSU, para proporcionar mayores capacidades de control, y en todos los vertederos de residuos peligrosos. (Hughes, Christy, & Heimlich, 2005). En la Figura 12 se presenta un esquema del revestimiento compuesto.

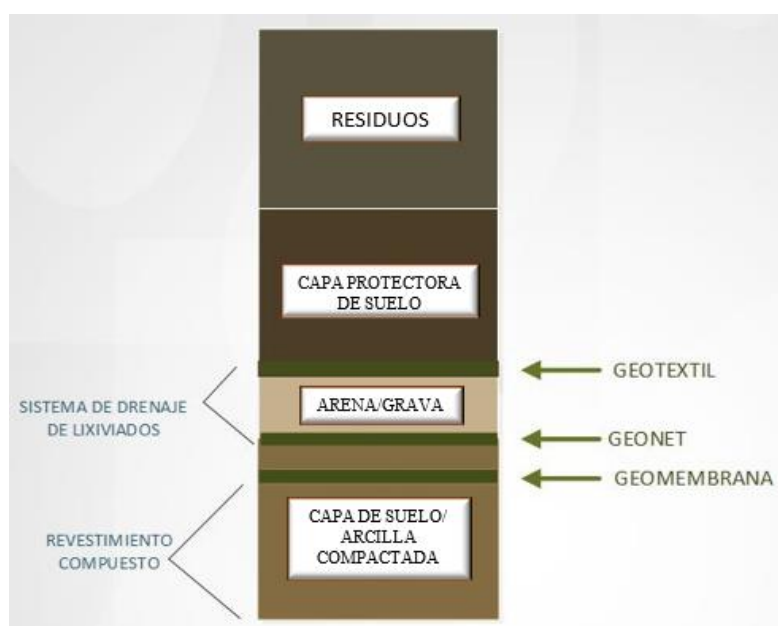


Figura 12. Esquema de un revestimiento compuesto en vertederos

El revestimiento de los vertederos proporciona un sistema de protección del suelo, las aguas subterráneas y las aguas superficiales, ayuda a controlar la migración del gas de vertedero y también facilita la recolección y eliminación de lixiviados producidos por los residuos durante la fase activa o de explotación del vertedero (EPA, Ireland, 2000).

Sistema de drenaje de lixiviados

El lixiviado en un vertedero se produce cuando el agua se ha filtrado a través de los desechos, recogiendo materiales suspendidos y solubles que se originan o son productos de la degradación de los desechos. Los lixiviados presentan un problema de contaminación para aguas superficiales y subterráneas y a pesar de que el revestimiento del suelo permite la recogida de los lixiviados es posible que este sea capaz de fluir a través del revestimiento, por tanto, se requiere una red de gestión, así como una red de detección de lixiviados para garantizar que el lixiviado se detecte tan pronto como aparezca (EPA, Ireland, 2000).

Un sistema de recogida de lixiviados consiste en una tubería elevada, desde el pozo a la superficie del suelo, para permitir la extracción de lixiviados. Dicha tubería elevada permite que los lixiviados sean bombeados a la superficie donde se conduce los líquidos hasta tanques de acumulación, para posteriormente ser enviados a un tratamiento conveniente.

En algunos países se practica la recirculación de lixiviados cuyo objetivo principal es promover tasas de degradación más uniformes y como medida de almacenamiento de lixiviados a corto plazo.

Sistema de drenaje de gases

La generación de gases de los vertederos se debe a la degradación anaeróbica de material orgánico presente en los residuos sólidos. Las bacterias anaeróbicas descomponen los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, y uno de los productos de esta descomposición anaeróbica es el biogás, que contiene aproximadamente 70% de metano y 25% de dióxido de carbono, trazas de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno sulfuro. La composición del biogás varía de un vertedero a otro y depende de los tipos de residuos. Se puede esperar que el biogás no diluido tenga un valor calorífico de 15 a 21 MJ / m³ (la mitad del gas natural) (EPA, Ireland, 2000).

La tasa de generación del gas varía a lo largo de la vida de un vertedero y depende de factores como los tipos de desechos, el contenido de humedad, el grado de compactación, el pH del vertedero, la temperatura y el periodo de tiempo desde que se depositaron los desechos. En condiciones óptimas, una tonelada de desechos degradables puede producir teóricamente 400-500 m³ de gas.

Se requiere de una instalación de recolección y control de gas (opcional para vertederos pequeños) constituida por tubos de cemento perforados verticales, colocados en puntos determinados del vertedero, dichos tubos atraviesan todo el vertedero en sentido vertical, desde el suelo hasta el exterior y recolecta y extrae el gas. Asociados a los tubos verticales se proyectan tubos horizontales y oblicuos, que facilitan un drenaje más eficiente de la masa de residuos (Nagarajappa & Rashmi, 2015).

La utilización del gas depende de la calidad del gas, el rendimiento del gas y de la economía de la producción al mercado disponible. Si la calidad del gas es demasiado baja para usarse como combustible, entonces puede quemarse (convertir CH₄ en CO₂) sin recuperación de energía. Normalmente, se especifica un contenido de metano de al menos 20% en volumen para la combustión de gas de vertedero con aprovechamiento energético.

El proceso de tratamiento más común utilizado hasta la fecha es la quema de los gases provenientes del vertedero, en los propios tubos colectores de gases.

Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo tiene la función de conocer y evaluar, a través de un sistema de control continuo y sistemático, el impacto causado por los vertederos. Este consta de un monitoreo geotécnico, como por ejemplo el control de desplazamientos horizontales y verticales, el control del nivel de lixiviado y de la presión de los gases del vertedero, y monitoreo ambiental, como el control de la calidad de las aguas subterráneas, control de la contaminación del suelo, control de la calidad del aire, etc. (EPA, Ireland, 2000).

Sistema de cobertura

El sistema de cobertura es un elemento esencial en las operaciones de los vertederos y realiza una serie de funciones para minimizar los impactos ambientales que se derivan de la explotación de este. El material debe ser resistente al proceso erosivo y adecuado a la utilización futura del área. El sistema de cobertura se divide

en: Cobertura diaria. Es el material que se deposita sobre los residuos al final de cada día laboral.

- Cobertura intermedia, se utiliza cuando no se planifica un nuevo levantamiento de residuos en un periodo prolongado de tiempo.
- Cobertura final que es una barrera permanente entre los residuos depositados y el ambiente externo que sirve para minimizar el impacto a largo plazo del vertedero. Su función es mejorar el drenaje de la superficie, minimizar la infiltración y apoyar la vegetación, y en particular, controlar el escape de gas de vertedero y la generación o gestión de lixiviados. Se coloca sobre los vertederos que han alcanzado su capacidad total y los grados finales de diseño del vertedero.

El esquema típico de una cobertura final se presenta en la Figura 13. El sistema de cobertura final consiste típicamente en múltiples capas de materiales, y por lo general consiste en una capa de control de gases, una capa de barrera hidráulica que puede ser arcilla compactada, una capa de drenaje, seguida por un revestimiento sintético, y la capa superior de suelo, que debe ser apropiado para el crecimiento de especies vegetales. (EPA, Ireland, 2000).

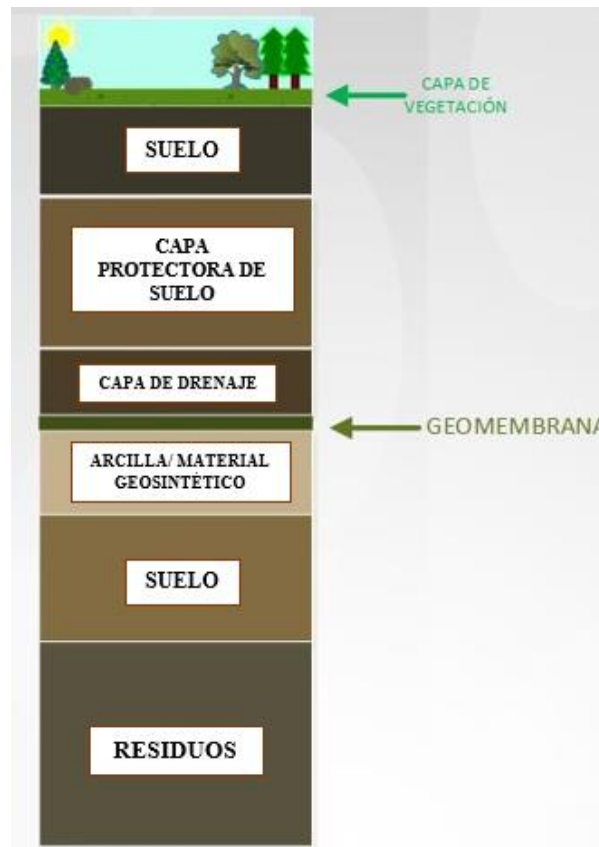


Figura 13. Cobertura final de un vertedero

6.5.1 Porcentaje de residuos enviados a vertederos en Europa

En la Figura 14 se muestra el porcentaje de residuos que se envían a vertederos en la UE-28 y en algunos países no miembros.

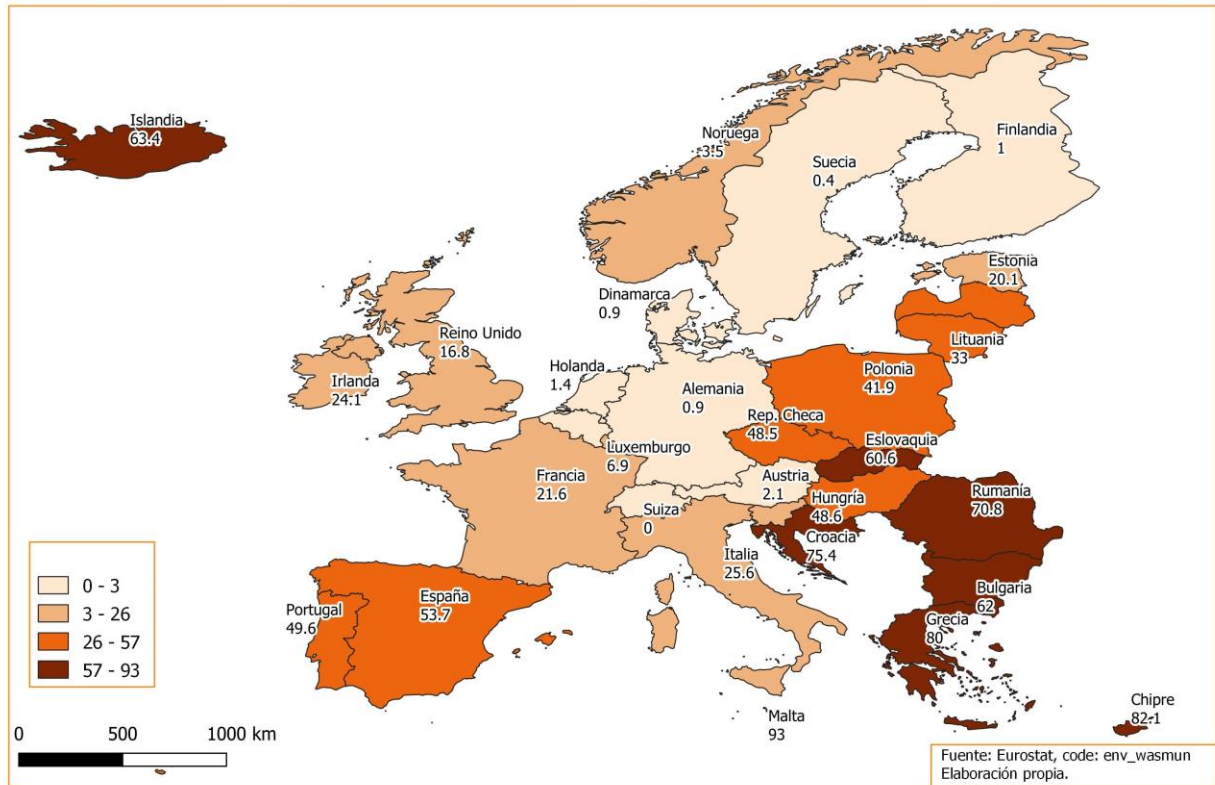


Figura 14. Porcentaje de residuos enviados a vertederos UE, 2017

La implantación de políticas que desalientan el uso de los vertederos o la aplicación de impuestos sobre vertederos permitió que, en países como Suecia, Suiza, Dinamarca, Alemania, donde incluso se prohibió por decreto dicho método de gestión de residuos, o Países Bajos prácticamente no haya vertederos, y la cantidad de residuos que acaban enterrados no llega al 1% de su producción anual.

Se puede observar que las economías emergentes de la UE son también aquellos países que suelen optar por los vertederos, como es el caso de los países del este, como Rumania (70,8%), Grecia (80%), Bulgaria (62%), Eslovaquia (60,6%) y Chipre (82%) que envían a vertederos más del 50% de sus residuos, al ser el método de gestión de residuos más barato.

Irlanda envía a vertederos aproximadamente 24% de sus residuos totales, casi la cuarta parte del total, y prácticamente la mitad que España con casi el 54%.

6.5.2 Evolución del porcentaje de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España

La Figura 15 representa la evolución de la tasa de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España, desde 2000 hasta 2017

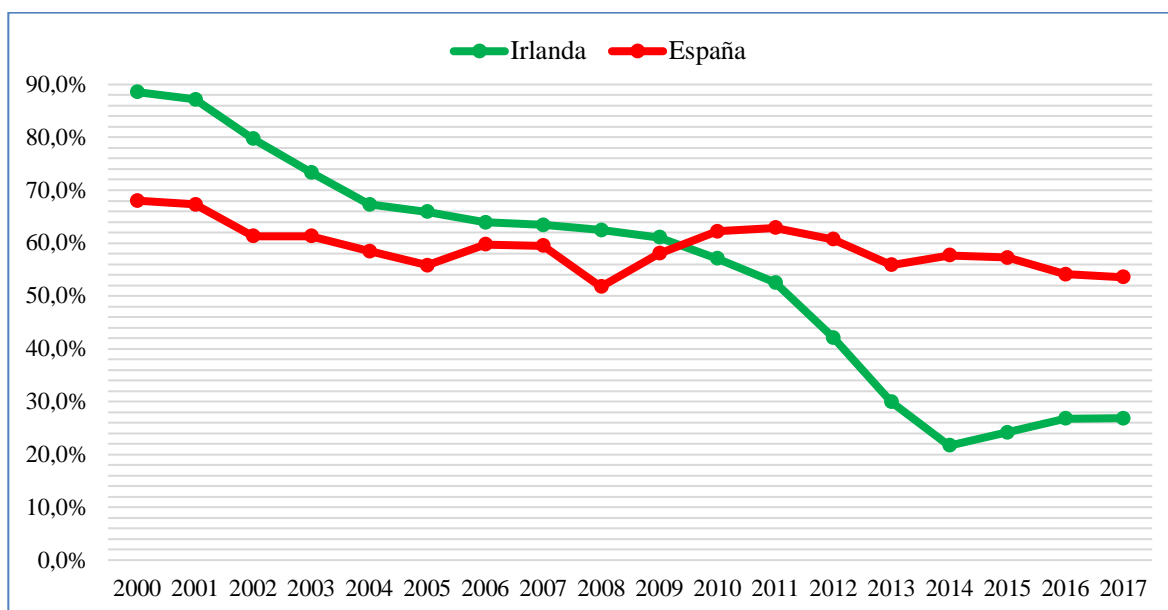


Figura 15. Evolución del porcentaje de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España.

En Irlanda, en junio del 2002, se introdujo un impuesto de 15 euros por tonelada de residuos enviados a vertederos en virtud del Reglamento de gestión de residuos. Aunque a diferencia de otros países de la UE, donde los impuestos sobre los vertederos aumentaron gradualmente cada año, Irlanda mantuvo dichos impuestos constantes hasta 2008, año en el cual aumentaron cinco euros por tonelada, y así sucesivamente hasta 2010, año en el cual el impuesto sobre residuos enviados a vertederos era de 30 euros por tonelada. Los años posteriores se produjo un fuerte aumento de dicho impuesto y para 2013 se alcanzó una cifra de 75 euros la tonelada. Se observa una caída brusca de la tasa de residuos enviados a vertederos desde 2010 (57%) hasta niveles mínimos de 21,7% en 2014. Según EPA Ireland, en los últimos años la mayoría de los desechos aceptados a vertederos fueron residuos de construcción y demolición, por ello el incremento de dichos residuos fueron los responsables del incremento de la tasa de vertederos entre 2015 y 2017.

En España, el porcentaje de residuos enviados a vertederos permanece prácticamente constante a lo largo de los años, las variaciones que se pueden encontrar en la gráfica se deben fundamentalmente a cambios en la generación de residuos y no a cambios sobre políticas medioambientales. En 2000 la proporción de residuos enviados a vertederos era de 68%, en 2008 bajó a 51,7% para incrementarse gradualmente hasta los valores actuales. En España llevar los residuos al vertedero es mucho más barato que invertir en otras infraestructuras de tratamiento de residuos. Los impuestos sobre vertidos, de común aplicación en otros Estados Miembros de la Unión Europea, no han sido aún puestos en práctica a escala estatal en España.

6.6 Incineración

La incineración se define como un proceso térmico que conduce a la reducción en peso y volumen de los residuos sólidos mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno o de aire. Las reducciones oscilan alrededor del 75% en peso y 90% en volumen (Romero).

Los productos finales son gases de combustión compuestos por CO_2 , H_2O , O_2 no reaccionado, N_2 en el caso de que se utilice aire como agente oxidante, y otros compuestos en menores proporciones, y un residuo sólido compuesto por escorias inertes y cenizas. Los aspectos medioambientales que causan mayor preocupación son las emisiones atmosféricas, especialmente las dioxinas y furanos, y las escorias y cenizas formadas. Durante la combustión de los residuos en un incinerador se genera calor, lo que se conoce como calor de combustión, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía para el mismo proceso o para otros como el calentamiento de agua o la generación de vapor. La recuperación de la energía de los residuos sólidos como energía eléctrica presenta grandes posibilidades y hace más atractivo el proceso de incineración desde el punto de vista económico. (Romero) (Secretaría Desarrollo Social).

Actualmente, existen distintos tipos de tecnologías de tratamiento térmico: incineración, gasificación, pirólisis

y gasificación por plasma, aunque cada una de ellas se ha desarrollado a distinto nivel. De estas tecnologías, tan solo la incineración está ampliamente desarrollada y probada en todos los aspectos y es por ello por lo que la mayoría de los países industrializados con densidades de población elevadas, han empleado la incineración como procedimiento alternativo al vertedero controlado para el tratamiento de los RSU. Sin embargo, la tendencia de crecimiento en la implantación de instalaciones de gasificación, pirólisis y gasificación por plasma, que se conocen como tratamiento térmico avanzado o ATT, por sus siglas en inglés, se debe tanto por una baja aceptación a nivel social de la incineración, como por la voluntad y expectativa de conseguir una recuperación energética más eficiente (Affairs, 2013).

Combustión y tipos de Hornos Incineradores

La combustión de los residuos sólidos es un proceso complejo en el que se une la heterogeneidad de la alimentación. Para obtener la mayor eficiencia en el proceso, es esencial la disponibilidad de oxígeno, que se suministra con el aire en cantidades superiores a la estequiométrica y que se determina en función de la composición del combustible que se va a incinerar y del tipo de horno utilizado (Comisión Europea, 2011).

En este proceso es indispensable operar con un exceso de aire para asegurar la combustión completa y para evitar que la temperatura sea demasiado elevada ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) y además para que pueda ablandar y fundir las cenizas y escorias. La formación de óxidos de nitrógeno también se reduce cuando se controla la temperatura de la cámara. Para que la combustión sea completa es necesario conseguir un buen contacto entre el aire y los sólidos y que el tiempo de residencia sea superior al de conversión completa (Romero).

Los componentes de un incinerador son (Romero):

Pretratamiento y alimentación del residuo

Existen dos sistemas de incineración de los RSU que se diferencian por el requerimiento de tratamiento previo de los residuos. El primer sistema requiere eliminar los elementos no combustibles de los residuos sólidos y además reducir el tamaño de las partículas para su incineración, pero el segundo no tiene estos requerimientos, por lo que la incineración se hace al total de los residuos sin ningún tratamiento previo. A este segundo método se le denomina incineración en masa. La incineración en masa se encuentra actualmente en un estado muy avanzado en su desarrollo tecnológico.

Cámara de combustión. Existen varios tipos de incineradores desarrollados para el tratamiento de los diferentes residuos, debido a que, según las características de estos como composición, PCI o contenido de inertes, es uno de los factores determinantes para poder elegir el tipo de horno.

Hay diversas clases de hornos que pasamos a describir:

Horno de parrillas: Los residuos se cargan en el horno donde se les hace circular por un tren de parrillas de material refractario que están expuestas a la acción del aire de combustión. El movimiento de los residuos se consigue bien por el diseño de las parrillas y el efecto del aire introducido, bien porque aquellas son móviles. Al final del recorrido del tren de parrillas se recogen las escorias que proceden de los residuos incinerados. La recuperación de energía y la eficiencia térmica es mayor que en otros hornos, debido a la necesidad de controlar la cantidad de aire inyectado. Son utilizados ampliamente para la incineración de residuos urbanos mixtos. Aproximadamente un 90 % de RSU en Europa es tratado en parrillas.

Hornos rotatorios: Entre las tecnologías más modernas se encuentra el incinerador rotatorio en el cual los residuos sólidos son vaciados dentro de una cámara cilíndrica que puede tener hasta 18 m o más de longitud y son quemados hasta convertirlos en cenizas y agua. El horno gira muy lentamente y el tiempo de residencia de los sólidos es de 30 minutos. Los productos de los gases combustibles provenientes del horno son enviados a una cámara secundaria.

Horno de lecho fluidizado: Este horno ha sido usado para el tratamiento de materiales con bajo Poder Calorífico Inferior. El horno contiene un material inerte, como sílice o arena, dispuesto sobre un plato de distribución, a través de cuyos orificios es insuflado el aire de combustión en sentido ascendente. A una determinada velocidad de ascensión del aire el lecho de inerte adquiere características propias de un fluido. La alta inercia térmica de la arena proporciona una temperatura adecuada normalmente mantenidas en un rango de 760 a 870 °C. Los residuos al entrar se comportan como si flotaran en el lecho fluido, hundiéndose lentamente a medida que ganan densidad como consecuencia de su combustión. Las escorias junto con una parte del lecho abandonan la cámara, gracias a una purga que se realiza continuamente. Los sólidos deben ser de naturaleza homogé

nea, lo cual obliga a tratamientos previos de trituración.

Productos de combustión

Del proceso de combustión se obtienen dos productos: las escorias recogidas a pie de horno y la corriente de gases de combustión que arrastra consigo cenizas volantes sólidas.

- **Escorias y cenizas:** Son fundamentalmente sales y óxidos de silicio, calcio, sodio, potasio, aluminio y metales pesados. Pesan entre el 25% y 35% de las basuras iniciales. Tienen carácter tóxico, sobre todo las cenizas volantes, pues contiene dioxinas y gran concentración de metales pesados.
- **Gases de combustión:** La corriente de gases de combustión contiene:
 - Monóxido de carbono procedente de las combustiones incompletas.
 - Metales pesados: mercurio, cadmio, plomo, arsénico, níquel, etc.
 - Gases de carácter ácido: HCl, HF, SO_x y NO_x.
 - Hidrocarburos inquemados y otros productos de combustión incompleta. Estos junto a los gases ácidos y por medio de la catálisis que proporcionan los metales pesados en las cenizas volantes pueden producir dioxinas y furanos.

Depuración de los gases de combustión y de partículas.

- **Depuración de partículas:** Forman parte de estas partículas las cenizas volantes y los finos arrastrados en el horno, los componentes condensados y los reactivos y productos de reacción formados como consecuencia de los compuestos empleados en equipos de depuración para otros contaminantes. Por ello, el método de retención depende tanto del tipo de horno como del sistema de depuración general. Para la depuración de las partículas se utilizan fundamentalmente los precipitadores electrostáticos y los filtros de mangas, aunque también se puede utilizar ciclones o filtros cerámicos.
- **Depuración de gases:** Hay una gran variedad de procesos atendiendo al fundamento fisicoquímico utilizado (absorción, adsorción, reducción química con o sin catalizador). La mayor parte de las veces se combinan diferentes procedimientos, pues cada uno de ellos es más efectivo para una distinta fracción de contaminantes gaseosos. La clasificación de los sistemas se hace atendiendo a la utilización del agua en seco, semiseco o húmedo. Los métodos seco y semiseco son más eficaces que el húmedo en la eliminación de partículas y compuestos orgánicos (dioxinas), sin embargo, depuran peor los gases ácidos. Los gases ácidos (HCl, HF, SO_x) se eliminan generalmente haciendo burbujear los gases en soluciones de lechada de cal Ca (OH)₂, o pulverizando con duchas la solución de cal. El mercurio se elimina con carbón activo (adsorción) o mediante el sulfuro de sodio (Na₂S) (absorción). Los óxidos de nitrógeno NO_x deben eliminarse de forma individual (mediante reducción a nitrógeno añadiendo amoníaco).

6.6.1 Tratamiento térmico avanzado (ATT)

A diferencia de las plantas de incineración convencionales, las tecnologías de tratamiento térmico avanzado, como la pirólisis y la gasificación, calientan los residuos a altas temperaturas en ambientes con baja presencia de oxígeno, para generar productos secundarios (gas, líquido y/o sólido) a partir de los cuales se puede generar energía.

Las principales diferencias técnicas entre Incineración y ATT son las siguientes resentan a continuación. (Affairs, 2013)

6.6.1.1 Pirólisis

A diferencia de la incineración, la pirólisis es la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, aunque es difícil de alcanzar en el caso de los RSU, ya que el oxígeno está presente en los residuos. Este proceso requiere una fuente de calor externa para mantener la temperatura requerida. Típicamente, se usan temperaturas más bajas, entre 300 y 850 °C. En general, los procesos de pirólisis tienden a trabajar con materias primas homogéneas y es por ello que hay muy pocas plantas de pirólisis a escala comercial que aceptan RSU por su característica heterogénea. Los productos producidos a partir de la pirólisis son un residuo sólido y un gas de síntesis. El residuo sólido (a veces descrito como un carbón) es una combinación de materiales no com

bustibles y carbono. El gas de síntesis es una mezcla de gases (los componentes combustibles incluyen monóxido de carbono, hidrógeno, metano y una amplia gama de otros compuestos orgánicos volátiles). Una proporción de estos puede condensarse para producir aceites, ceras y alquitranes.

6.6.1.2 Gasificación

La gasificación puede considerarse un proceso entre la pirólisis y la combustión, ya que implica la oxidación parcial de una sustancia por medio del agregado de cantidades limitadas de aire u oxígeno. Las temperaturas moderadas generalmente se encuentran por encima de los 750°C. El proceso es en gran parte exotérmico, pero puede requerirse algo de calor para inicializar y mantener el proceso de gasificación. Se obtiene así un gas de síntesis (syngas), el cual se puede utilizar como materia prima para la industria química (a través de algunos procesos de reformado), o como combustible para la producción de electricidad y/o calor. El gas de síntesis contiene CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, trazas de hidrocarburos superiores (etano y propano), gases inertes procedentes del agente de gasificación y diversos contaminantes.

Los desechos municipales sin procesar generalmente no son apropiados para la gasificación y, por lo general, requerirían alguna preparación mecánica y separación de vidrio, metales y materiales inertes (como escombros) antes de procesar los desechos restantes.

Además de los procesos descritos anteriormente también se aplican combinaciones de ellos como las tecnologías basadas en el plasma. La aplicación de sistemas basados en el plasma para la gestión de residuos es un concepto relativamente nuevo. La tecnología de plasma se ha expuesto como una tecnología limpia, con potencial para generar energía eléctrica y otros productos derivados tales como baldosas arquitectónicas o ladrillos para construcción, lo cual la hace económicamente rentable. La antorcha de plasma opera a muy altas temperaturas -entre 5000 y 10000 grados centígrados- y puede procesar toda clase de residuos a presión atmosférica. No produce cenizas porque a más de 5000 grados centígrados, todas las moléculas orgánicas son desintegradas y solo la mezcla de H₂ + CO permanece a altas temperaturas (Moustakas , Malamis, Haralambous , & Loizidou , 2008) (Leal-Quiros, 2004).

Algunos de los beneficios de utilizar la tecnología de plasma son que los componentes inorgánicos en los residuos se derriten y vitrifican en un residuo sólido vidrioso, como roca, que es altamente resistente a la lixiviación y los materiales orgánicos (plástico, papel, aceites, biomateriales, etc.) son convertidos en gases de síntesis (Syngas) con valor calorífico. El gas y los subproductos sólidos son potencialmente reciclables. Por otra parte, es un proceso caro, lo que convierte las consideraciones económicas en la barrera más fuerte para el uso de plasmas en el tratamiento de residuos. Esta tecnología es atractiva cuando el valor de los productos compensa los costos reales (Leal-Quiros, 2004).

6.6.2 Porcentaje de residuos enviados a incineración en Europa

En la Figura 16, se representa el porcentaje de residuos sólidos urbanos enviados a incineración en Europa en 2017.

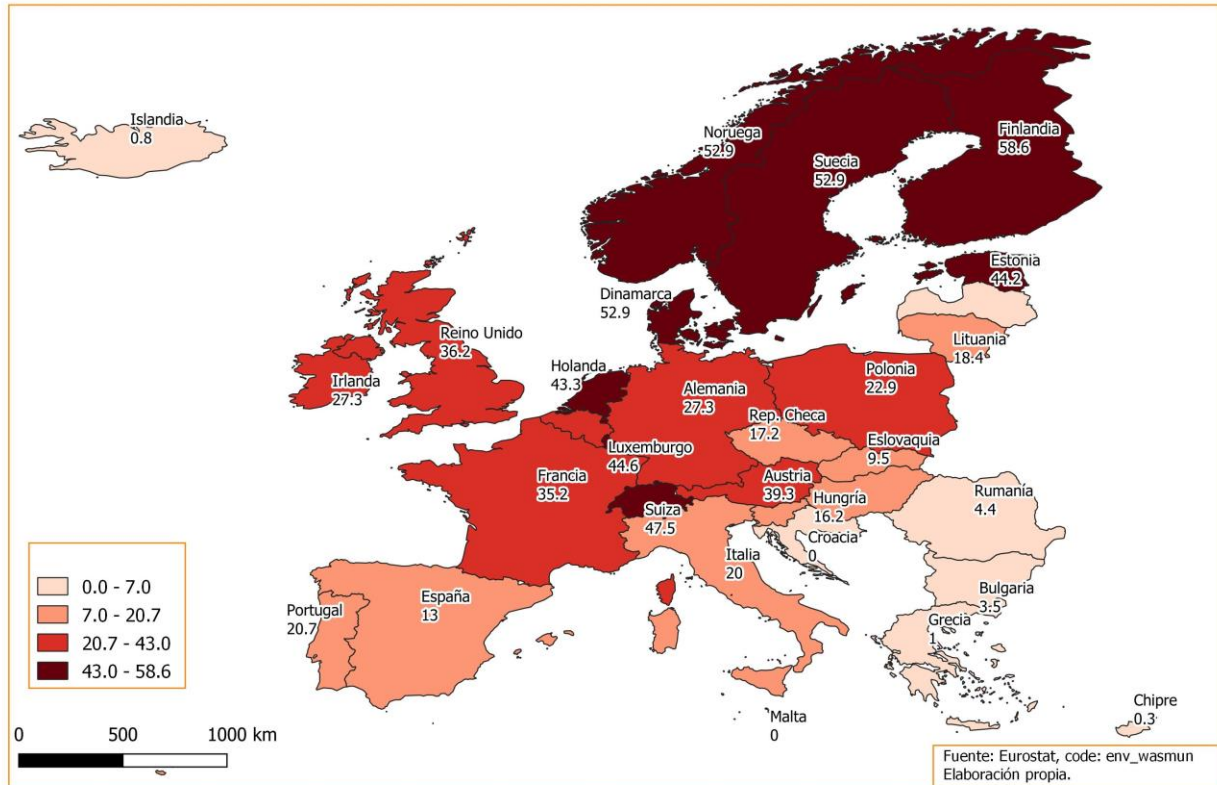


Figura 16. Porcentaje de residuos enviados a incineración UE, 2017

Los países del norte de Europa incineran más del 50% de sus residuos. Debido a la incapacidad de dichos países de alimentar por sí mismos a sus propias incineradoras, importan residuos de otros para amortizar sus costes. Así, por ejemplo, Dinamarca quema en sus plantas la basura que traen de países como Reino Unido, el mayor exportador, o Alemania.

Se destacan países como Grecia donde la incineración de residuos es casi inexistente, en dicho país el vertedero sigue siendo la mayor opción de gestión de residuos, al ser también la más barata. Debido al elevado coste de la incineración de residuos, se puede observar en el mapa que aquellos países con mejores economías son también aquellos con mayores tasas de incineración, y a la inversa, aquellos países con peores economías suelen optar por sistemas más baratos.

Actualmente Irlanda incinera el 27,3% de sus residuos y España el 13%. En los gráficos siguientes se presenta la evolución de la tasa de incineración de residuos en Irlanda y en España.

6.6.3 Evolución del porcentaje de residuos incinerados en Irlanda y España

En la figura 17 se representa la evolución que ha presentado Irlanda y España en la tasa de incineración de residuos desde el año 2000 hasta el 2017.

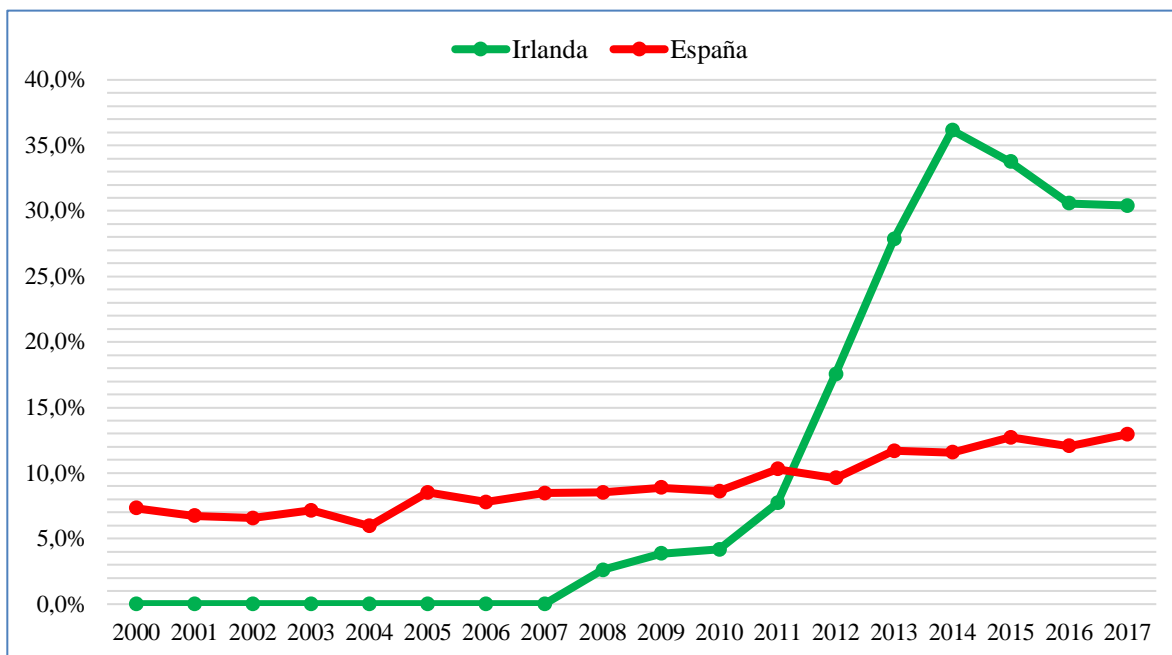


Figura 17. Evolución del porcentaje de residuos incinerados en Irlanda y España.

Como se observa en la Figura 17, la incineración de RSU es un elemento relativamente nuevo en la gestión de residuos en Irlanda ya que este proceso solo comenzó a usarse a un nivel notable después de 2007. La adopción del gravamen en 2002 sobre los residuos destinados a vertederos pudo haber sido un factor determinante en la planificación de las instalaciones de incineración de residuos, que entraron en funcionamiento por primera vez después de 2007, según la Agencia Europea del Medio Ambiente.

El aumento del impuesto de residuos destinados a vertederos a partir de 2008 puede ser uno de los motivos que desencadenaron el incremento del porcentaje de los residuos incinerados, y para 2010 cuando dicho impuesto se situó en 30 euros por tonelada, se observa un fuerte incremento desde el 4% en dicho año hasta un máximo de 36% en 2014. A partir de dicho año, empieza a reducirse el porcentaje de residuos incinerados; dicha reducción se debe a la aplicación del gravamen sobre la incineración de residuos, para favorecer otros métodos como el reciclaje o compostaje. Irlanda tiene actualmente tres incineradoras de residuos, localizadas en Meath, Cork y Dublín.

En España actualmente existen 11 incineradoras en funcionamiento en 7 Comunidades Autónomas, localizadas en Palma de Mallorca, Tenerife, Girona, Lleida, Tarragona, 2 en Barcelona, Coruña, Bilbao, Madrid y Melilla y una en proyecto en Donosti (Guipúzcoa). En este país, la evolución de la tasa de incineración de RSU es discreta desde el 7% en 2000 al 13% actualmente, es decir, la incineración como gestión de residuos es una opción minoritaria en España comparado con la media europea.

A pesar de que la incineración genera controversia como gestión de residuos, no solo por la contaminación causante, sino también porque las fracciones con mayor poder calorífico son también aquellas con mayor potencial para el reciclaje, como el caso de los plásticos. Se observa en el gráfico que, al comparar Irlanda con España, cuánto menos residuos se incineran, más se envían a vertederos, lo cual es la opción menos deseable, como se verá más adelante,

6.7 Compostaje

El compostaje, también es una forma de reciclaje, en este caso, a través de la degradación de la materia orgánica presente en los RSU. Es un proceso aerobio que se debe llevar a cabo en condiciones óptimas controladas de humedad, temperatura y aireación para transformar los residuos orgánicos biodegradables en un producto conocido como compost, que posteriormente se podrá utilizar como acondicionador del suelo y/o fertilizante orgánico.

La calidad del compost depende directamente de la composición de los RSU y más concretamente de la riqueza

za en productos orgánicos. De forma negativa influye la presencia de plásticos, vidrios y en general, productos no fermentables. Dado que las basuras urbanas o residuos urbanos contienen gran cantidad de productos no fermentables, la primera operación previa al compostaje es la eliminación de la mayor cantidad posible de estos productos inertes, y si se tratan cantidades importantes de residuos y dependiendo de las características de los materiales, se necesitan una etapa de posttratamiento para ajustar el producto. Las etapas de posttratamiento pueden tener distintas finalidades: fraccionar según granulometría, separar según posibles usos, mezclar con otros productos para mejorar alguna de sus características. (Gobierno de España)

En la Figura 18 se representa el esquema básico del proceso de compostaje.

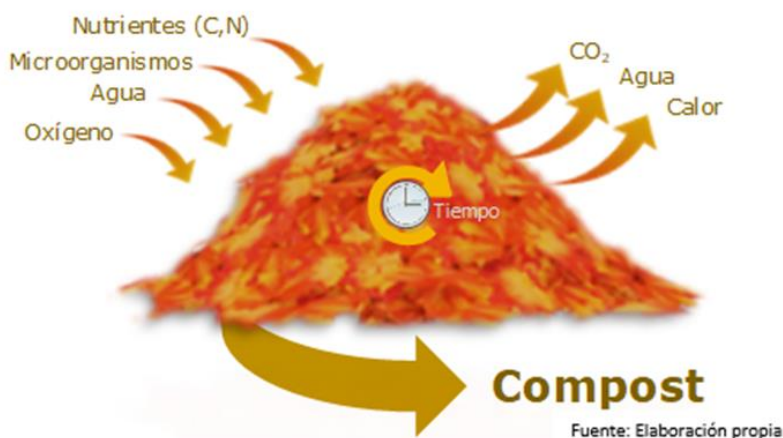


Figura 18. Esquema compostaje

Los principales objetivos del compostaje son (Fuentes- Romero)

- Higienización de la materia orgánica mediante la destrucción de patógenos.
- Reducción de olores en el producto final por la estabilización de la materia orgánica.
- Reducción de masa y volumen de la materia original debido a la reducción del contenido de agua y a la pérdida de materia seca, principalmente en forma de CO₂
- Estabilización y homogenización de la materia orgánica permitiendo su uso agrícola.

Las variables más importantes que afectan al sistema de compostaje se clasifican en dos tipos, parámetros de seguimiento del proceso y parámetros relativos a la naturaleza del sustrato (Rodrigo-Illari, Rodrigo-Clavero , & Fernández-González, 2014):

Parámetros de seguimiento del proceso: Deben ser seguidos y controlados a lo largo del proceso para que se sitúen entre los valores adecuados y así cada fase se desarrolle adecuadamente (UDC) (EcuRed).

Temperatura: El calor producido en el proceso de compostaje se debe a la oxidación de la materia orgánica presente en los RSU como consecuencia de la actividad microbiana lo que se traduce en una elevación de la temperatura. Existe cuatro rangos de temperatura en el proceso de compostaje: mesofílica (30-45°C), termofílica (45-75°C), enfriamiento y maduración.

- Mesófila: El proceso empieza a temperatura ambiente, pero la temperatura sube rápidamente debido a la actividad metabólica de los microorganismos mesofílicos alcanzando los 40°C. Se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.
- Termófila: los microorganismos mesofílicos son sustituidos por los termofílicos, estos transforman el nitrógeno en amoníaco y se alcaliniza el pH del medio. La temperatura sube por acción de la fermentación hasta alcanzar valores de 60 a 70° C. Esta fase también recibe el nombre de higienización ya que el calor generado se destruyan los microorganismos patógenos. Se produce liberación de amoníaco y el pH asciende.

- **Enfriamiento:** una vez que los nutrientes y energía comienzan a escasear, la actividad de los microorganismos termofílicos disminuye, provocando el descenso de la temperatura y la reaparición de microorganismos mesofílicos. Estos dominan el proceso hasta que toda la energía sea utilizada.
- **Maduración:** La temperatura y el pH se estabilizan y el compost, dependiendo del sistema de compostaje, la climatología y los materiales, estará maduro en un periodo comprendido entre 3 y 9 meses.

Humedad: La presencia de humedad es fundamental para que el proceso de compostaje se de en condiciones óptimas, los valores de humedad deben estar comprendidos entre 40-65% para facilitar el transporte de nutrientes y microorganismos.

Aireación: Es importante la correcta aireación de los residuos debido a que mejora progresivamente la mezcla de los componentes del sustrato, reduce el tamaño de partícula y homogeniza el material, lo que redistribuye los microorganismos, el agua y los nutrientes, mientras que expone nuevas superficies a la colonización microbiana.

Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato: Deben ser medidos y adecuados para que sus valores sean los correctos, fundamentalmente al inicio del proceso (EcuRed).

Tamaño de la partícula: Un menor tamaño de partícula facilita la velocidad de las reacciones ocurridas en el proceso de compostaje aerobio, pero también pueden dificultar el paso de aire, el tamaño de partícula ideal es entre 5 y 6 cm.

Relación Carbono/Nitrógeno: El carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica. Por ello, para obtener un compost de buena calidad es importante que exista una relación equilibrada entre estos elementos en el sustrato utilizado para el compostaje. Teóricamente, una relación C/N comprendida entre 25 y 35 es la adecuada. Si la relación C/N es muy elevada (> 40), disminuye la actividad biológica y el proceso se detiene, si es muy baja (< 20) no afecta al proceso de compostaje, pero se producen pérdidas considerables de nitrógeno en forma de amoníaco.

Todas estas variables están influenciadas por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar, la técnica de compostaje, la manera en que se desarrolla la operación y por la interacción entre ellas. Actualmente se hace necesario el control tanto del proceso de producción como del producto final para garantizar una óptima calidad y mínimos costes.

Sistemas de compostaje

Los sistemas de compostaje se diferencian por la forma de incorporación del aire, el control de la temperatura, la mezcla o el volteo del material y la duración del proceso. La selección del sistema dependerá de las necesidades, los recursos disponibles y las condiciones ambientales, entre otros factores. En la Figura 19 se presenta un resumen de algunos de los sistemas de compostaje que se pueden encontrar:

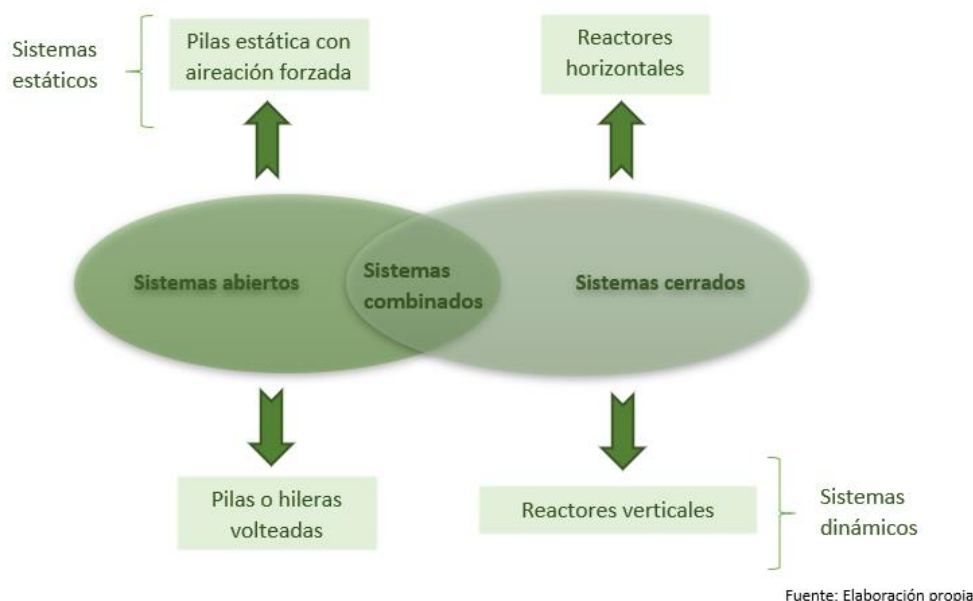


Figura 19. Sistemas de compostaje

Sistemas abiertos

Los sistemas abiertos son los más utilizados por su sencillez, viabilidad técnica y económica. Consisten en colocar los sustratos a compostar en pilas (pueden estar al aire libre o en el interior de una nave) y se distinguen dos sistemas fundamentales, los de pila o hileras volteadas y los de pila estática con aireación forzada (Tortosa, 2015).

– Pilas o hileras volteadas: Es un sistema dinámico y uno de los más sencillos y más económicos. Consiste en colocar los desechos orgánicos en hileras de aproximadamente dos metros de altura, la anchura de la base la fija el equipo que se va a utilizar para voltear los residuos. La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que se desea realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 6 - 10 días. Normalmente se realizan controles automáticos de temperatura, humedad y oxígeno para determinar el momento óptimo para efectuar el volteo.

– Pilas estáticas con aireación forzada: sistema estático en el que el material es apilado de igual forma que en el sistema anterior, pero una vez formada la pila de compostaje éste no se moverá del sitio de forma que se realiza la aireación de la mezcla mediante un sistema de ventiladores. Al controlar el aire mecánicamente, este proceso permite el uso de pilas más grandes. Para el compostaje bajo este método, se construye una cámara de aire que consiste en una red de tuberías perforadas, generalmente de plástico, donde uno o varios ventiladores, unidos a las tuberías, se encargan de inyectar o extraer el aire. Las alturas de las pilas son aproximadamente de 2 a 2,5 m. Un termopar colocado dentro de la pila funciona junto con el soplador para controlar la temperatura y la concentración de oxígeno dentro de la pila.

– Sistemas combinados: En este caso la masa a fermentar se coloca encima de tubos perforados, por el que el aire puede entrar a la pila por convección, puesto que dentro de la pila el aire está más caliente y, por lo tanto, menos denso que el aire exterior. La forma y tamaño óptimo de la pila depende del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila.

En las pilas estáticas, ya sea con volteos o sin ellos cobra gran importancia el tamaño de las pilas, por un lado, para permitir una correcta aireación y por otro para que no haya excesivas pérdidas de calor.

Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados permiten un mayor control de los distintos parámetros del proceso en la mayor parte de los casos, así como un menor tiempo de residencia y la posibilidad de realizar un proceso continuo, pero presentan como mayor inconveniente los elevados costes de inversión de las instalaciones.

En los reactores se desarrolla principalmente la fase de descomposición del proceso para posteriormente dejar madurar el material en el exterior del reactor. Los reactores utilizados en este sistema pueden ser verticales u horizontales (Atalia, Buha, Bhavsar, & Shah, 2015).

– Reactores verticales. Los reactores de flujo vertical suelen tener alturas superiores a los 4 m y pueden ser continuos o discontinuos. Los reactores discontinuos contienen, a diferentes alturas pilas de 2-3 m con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores.

– Reactores horizontales. Los reactores de flujo horizontal se dividen entre aquellos que poseen un depósito rotatorio, los que poseen un depósito de geometría variable con un dispositivo de agitación o los que no poseen un sistema de agitación y permanecen estáticos.

Una de las principales ventajas de estos sistemas es que reducen considerablemente las superficies de compostaje y logran un mejor control de los parámetros de fermentación y de los olores. Además, aunque requieren costes de instalación superiores a los sistemas abiertos, presentan la ventaja de ser más rápidos.

Estos sistemas generalmente incluyen disposiciones para la aireación, la mezcla, el control de la temperatura y la contención de olores mediante biofiltro de compost y una recirculación de los lixiviados.

Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica también es un proceso de conversión biológica que, al igual que el compostaje, se basa en la descomposición de la materia orgánica presente en los RSU, como consecuencia de una serie de interacciones metabólicas entre varios grupos de microorganismos, que descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno para liberar un gas rico en metano, conocido como biogás, que se puede quemar para la generación de calor y electricidad, y un producto sólido conocido como digestato que se puede utilizar como abono debido a su alto contenido en nutrientes.

La digestión anaeróbica ocurre en tres etapas, hidrólisis / licuefacción, acidogénesis y metanogénesis. En la primera etapa de hidrólisis, o licuefacción, las bacterias fermentativas convierten la materia orgánica compleja insoluble, como la celulosa, en moléculas solubles como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. En la segunda etapa, las bacterias acetogénicas, también conocidas como formadores de ácido, convierten los productos de la primera fase en ácidos orgánicos simples, dióxido de carbono e hidrógeno. Finalmente, el tercer grupo de bacterias, metanogénicas, convierte H_2 , CO_2 y acetato, a CH_4 . La digestión anaeróbica se lleva a cabo en digestores grandes que se mantienen a temperaturas que oscilan entre $30^\circ C$ y $65^\circ C$ (Themelis, 2002).

El proceso en conjunto ocurre en cuatro etapas: pretratamiento, digestión de residuos, recuperación de gases y tratamiento de residuos.

El pretratamiento implica la separación de materiales no digeribles y la trituración. La separación asegura la eliminación de materiales indeseables o reciclables como vidrio, metales, piedras, etc. Dentro del digestor, la alimentación se diluye para lograr el contenido de sólidos deseado y permanece en el digestor durante un tiempo de retención designado. Para la dilución, se puede utilizar agua, lodos de depuradora o líquido recirculado desde el efluente del digestor. Por lo general, se requiere un intercambiador de calor para mantener la temperatura en el recipiente de digestión. El biogás obtenido se lava para obtener gas de calidad de tubería. En caso de tratamiento de residuos, el efluente del digestor se deshidrata y el líquido se recicla para su uso en la dilución de la alimentación entrante. Los biosólidos se curan aeróbicamente para obtener un producto de compost. El gas obtenido comprende metano, dióxido de carbono, algunos gases inertes y compuestos de azufre (Global Methane Initiative, 2014).

6.7.1 Porcentaje de residuos enviados a compostaje y digestión en Europa

En la Figura 20 se representa el porcentaje de residuos urbanos enviados a compostaje y digestión en Europa.

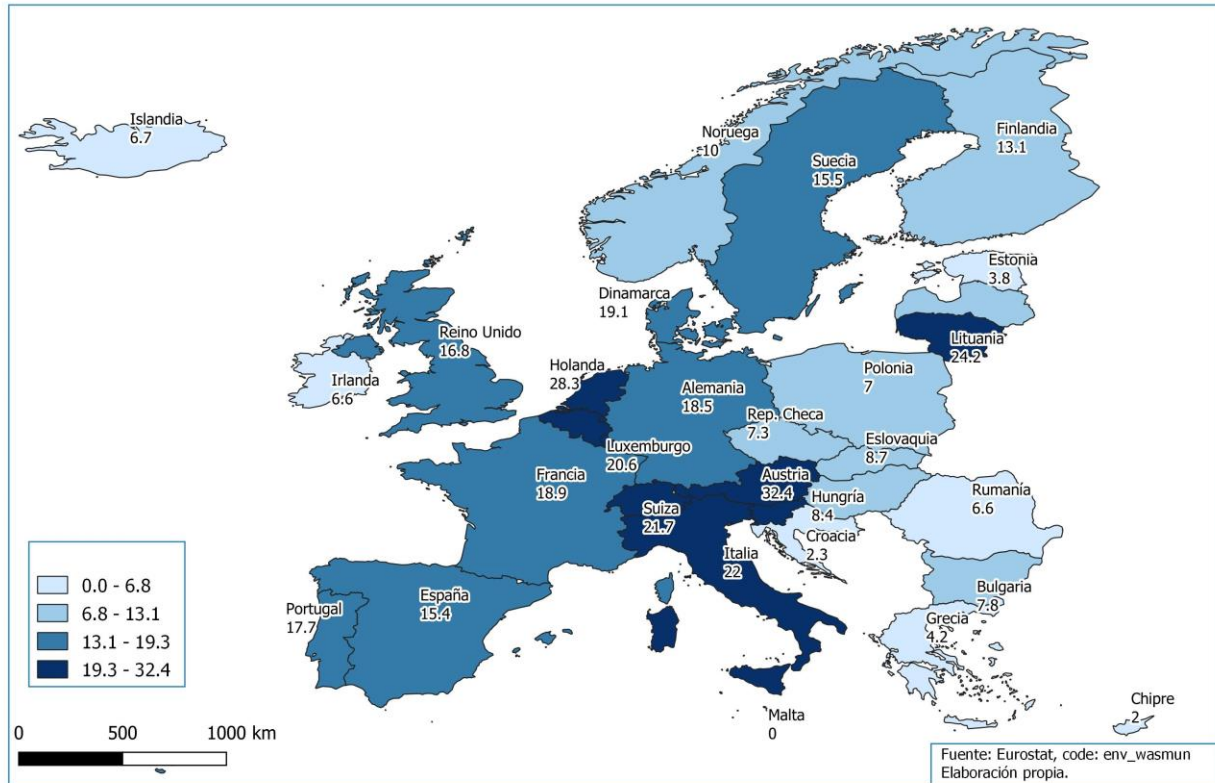


Figura 20. Porcentaje de residuos compostados UE, 2017

Austria con un 32,4% es el país que más residuos destina a compostaje, le siguen Holanda (28,3%), Italia (22%), Suiza (21,7%) y Lituania (24,2%). Es importante señalar que algunos países pueden presentar menores tasas de compostaje, y aun así, destacar en la gestión eficiente de sus residuos, como es el caso de Noruega (10%), Suecia (15,5%) y Finlandia (13,1%) que apenas hacen uso de vertederos, prefiriendo rutas alternativas como el reciclaje y la incineración. Los países que menos compostan sus residuos son Polonia (7%), Eslovaquia (8,7%), Estonia (3,8%) República Checa (7,3%), Bulgaria (7,8%) Croacia (2,3%), Rumania y Irlanda con un 6,6%. En España (15,4%), Portugal (17,7%) y Francia (18,9%) el compostaje y reciclaje compiten de cerca, con una variación entre ellos que no supera el 5%.

Actualmente el compostaje en Irlanda no supera el 7%, una cifra muy inferior a España que composta casi el 16% de sus residuos. En el siguiente gráfico se muestra la evolución de ambos países desde 2000 hasta 2017 en el compostaje de residuos.

6.7.2 Evolución del porcentaje de residuos compostados en Irlanda y España

En la Figura 21 se representa la evolución que han presentado Irlanda y España en el compostaje desde 2000 hasta 2017.

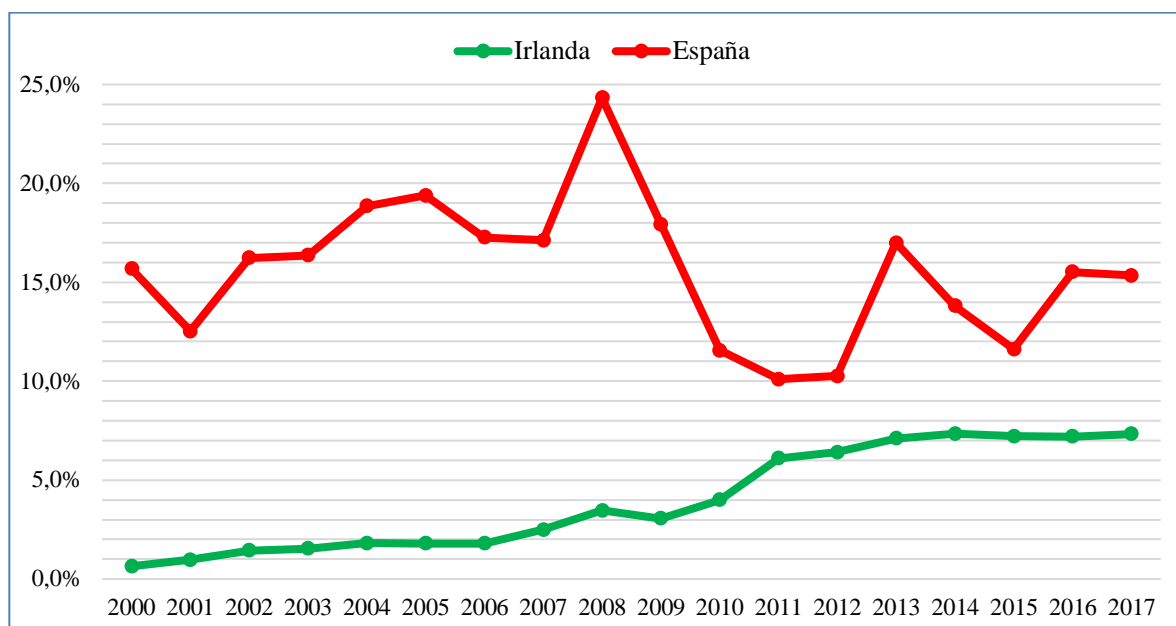


Figura 21. Evolución porcentaje de residuos compostados en Irlanda y España

El porcentaje de residuos compostados en Irlanda ha progresado lentamente desde 2000. El ligero incremento que se produjo después de 2010, desde 4% al 6% en 2011, se debe a las regulaciones sobre desperdicios de alimentos (comerciales y domésticos) adoptadas ese mismo año, las cuales han tenido un impacto positivo en el aumento de la cantidad de desperdicio municipal aceptado para el compostaje / digestión anaeróbica. A pesar del fuerte crecimiento, los desechos orgánicos siguen siendo poco utilizados en Irlanda.

Se puede observar un aumento notable en 2008 en España, que impulsó el compostaje de RSU al 25%, pero desafortunadamente, esta tendencia dinámica se suspendió en los años siguientes, reduciendo el porcentaje de residuos compostados cada año, y alcanzando valores mínimos del 10% en 2011 y 2012. En los años siguientes el compostaje volvió a sus tasas anteriores a 2008 y permaneció prácticamente sin cambios.

6.8 Reciclaje

De acuerdo con Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), el reciclaje es el proceso en el que se produce la transformación de los residuos sólidos desechados con cambios en su estado físico, fisicoquímico o biológico, con el fin de atribuir características a los residuos para que se conviertan nuevamente en materia prima o producto, de modo que se extiende su vida útil. Forma parte de las tres "R": reciclaje, reutilización y reducción. Dado que el reciclaje consiste en reprocesar un artículo, es diferente de la reutilización, donde el artículo solo se usa para otra función, y la reducción, que es reducir el consumo de ciertos productos.

No todos los materiales existentes son reciclables, y entre los residuos que sí lo son se destacan el plástico, papel, vidrio y metal, cuyo proceso de reciclaje se muestra esquematizado en la Figura 22.

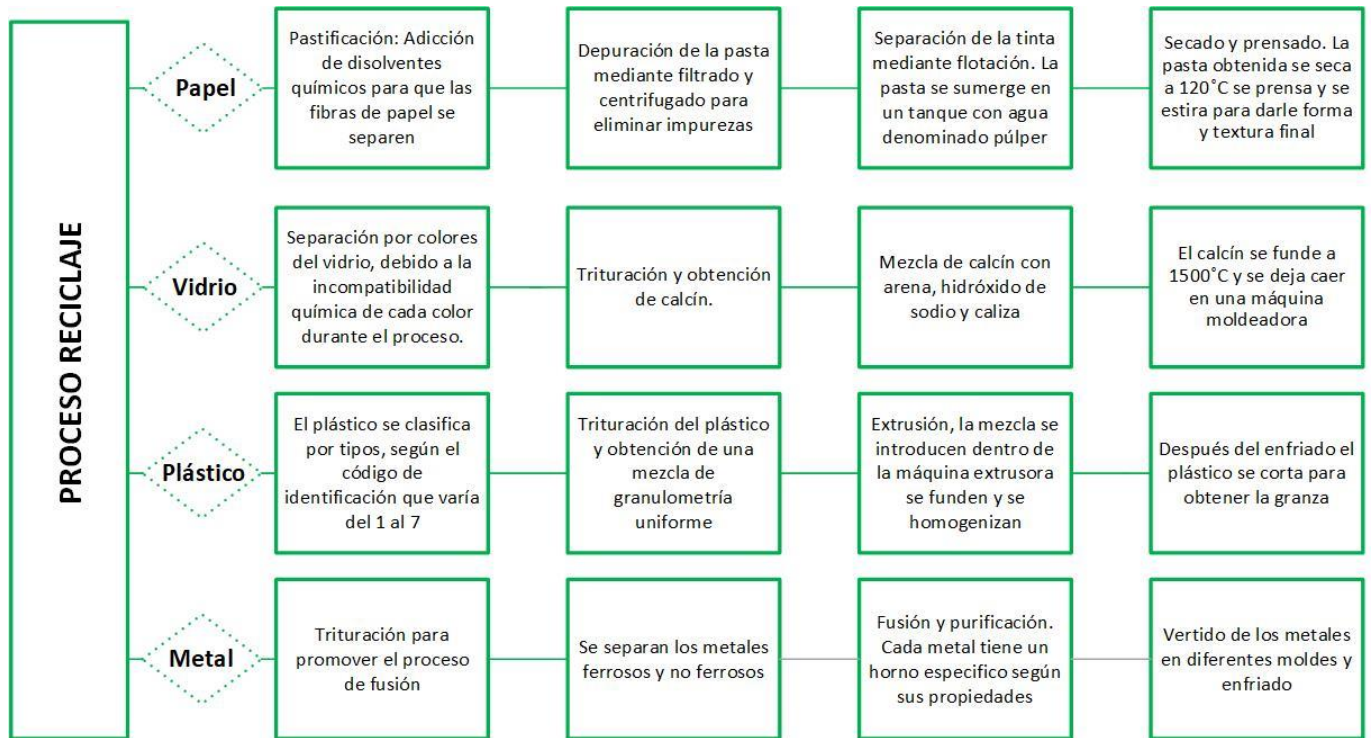


Figura 22. Proceso de reciclaje

Para el reciclaje del vidrio se aprovecha el 100% de la materia prima, es decir, por cada tonelada de vidrio desechado se obtiene una tonelada de vidrio reciclado. Además, el vidrio se puede reciclar indefinidamente ya que su estructura no se deteriora cuando se vuelve a procesar.

Los residuos de papel de mayor calidad producen productos reciclados de mejor calidad. Por lo tanto, el papel blanco se puede convertir en más papel blanco reciclado de alta calidad. Sin embargo, una combinación de periódicos viejos, papel de oficina, y cartón normalmente se puede usar solo para fabricar productos de papel de peor calidad. Los residuos de papel generalmente están cubiertos de tinta, que debe eliminarse antes de que el papel pueda reciclarse. El uso de lejía para eliminar la tinta del papel puede ser dañino para el medio ambiente y produce residuos de tinta tóxicos que deben eliminarse. Entonces, aunque reciclar papel tiene muchos beneficios, también conlleva costos ambientales.

Para el plástico, existen tres formas de reciclaje. El reciclaje primario es la conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original. El reciclaje secundario convierte el plástico en artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original, y el reciclaje terciario consiste en la degradación del polímero a compuestos químicos básicos, lo que involucra un cambio químico además de un cambio físico.

Los metales se clasifican en las instalaciones de reciclaje en ferrosos y no ferrosos. De los metales ferrosos el acero es el material más reciclado del mundo, incluso más que el aluminio, el plástico y el vidrio sumados. El aluminio es el metal no férreo más recuperado de todos; su recuperación supone un elevado ahorro de energía y materias primas. Además, el aluminio que se recupera conserva gran cantidad de sus propiedades y se puede reciclar indefinidamente.

Existen otras fracciones de residuos sólidos urbanos que también pueden ser sometidas a reciclaje como los residuos electrónicos, cuyo reciclaje consiste en desmontar y descontaminar las sustancias peligrosas y la recuperación de materiales como plásticos, metales o vidrio para su posterior reciclado. Y los residuos de construcción que involucra una primera fase de preclasificación de materiales, trituración y clasificación final del producto de salida. Hasta el 80% de los residuos de construcción y demolición admitidos pueden ser sometidos al proceso de valorización.

Los desechos no reciclables pueden usarse como fuente de combustible para la generación de electricidad.

6.8.1 Porcentaje de residuos enviados a reciclaje en Europa

En la Figura 23 se visualiza el porcentaje de residuos que fueron reciclados en Europa en el año 2017.

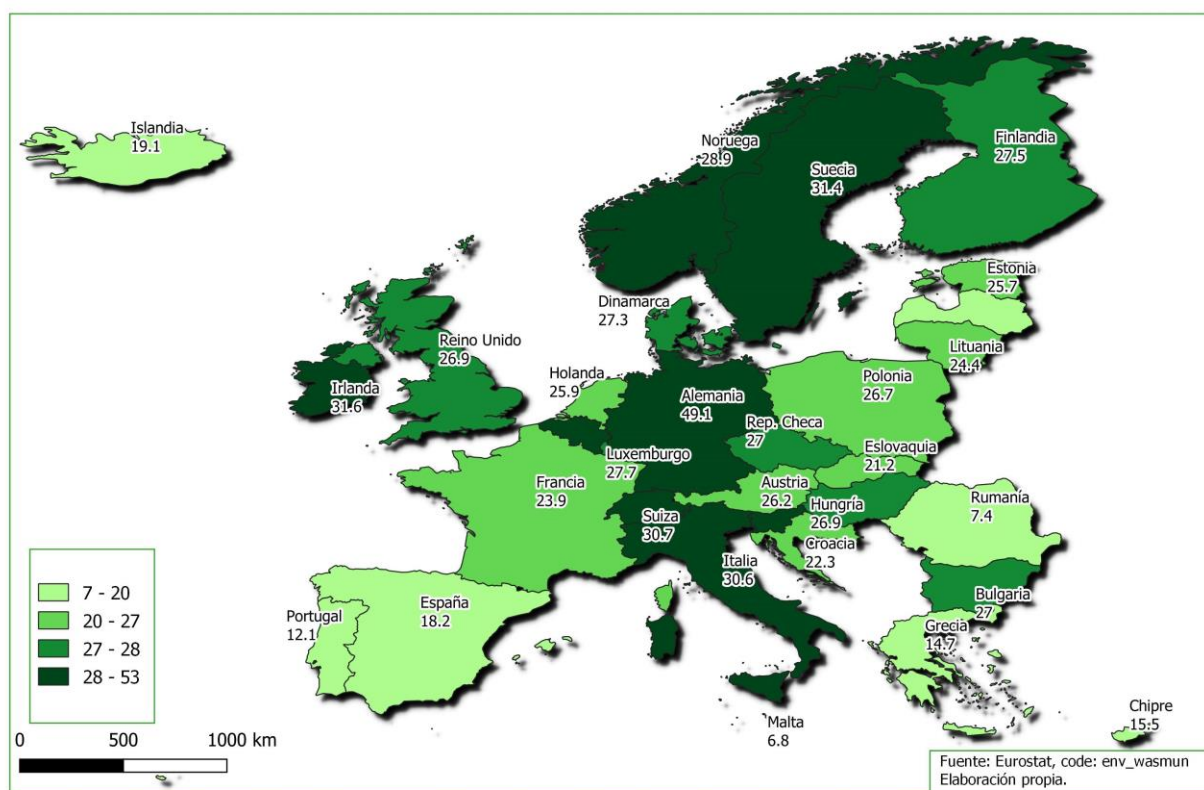


Figura 23. Porcentaje de reciclaje en UE, 2017

Como es de esperar, aquellos países con las tasas de reciclaje más bajas son también los que más residuos envían a vertederos. El porcentaje de residuos reciclados en Grecia, Portugal, España y Rumania no llega al 20%. También se puede encontrar una combinación entre reciclaje e incineración, como es el caso de Noruega, Suecia y Finlandia que destacan en ambos procesos de gestionar sus residuos. Los países como Francia, Reino Unido, Luxemburgo o Austria destinan más residuos a incineración que a reciclaje o vertederos. El reciclaje y el compostaje de los residuos municipales en conjunto representaron más del 50% de los residuos tratados en Alemania (67,6%), Austria (58,6%), Países Bajos, (54,2%), Suiza (52,4%) e Italia (52,6%).

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente los países que están obteniendo mejores resultados en términos de reciclaje cuentan con una gama más amplia de medidas e instrumentos que los de menor rendimiento. Las medidas han incluido la prohibición de vertederos, recogida selectiva obligatoria de tipos de residuos municipales e instrumentos económicos, como los impuestos a los vertederos e incineración y las tarifas de recolección de residuos que fomentan el reciclaje (como los planes de pago por uso); por ejemplo, Irlanda que ha implementado el sistema de pago por uso obtiene mejores resultados en reciclaje que España. Otros factores que también pueden contribuir a las altas tasas de reciclaje en los países incluyen altos niveles de conciencia ambiental nacional, así como la implementación efectiva de la legislación de gestión de residuos por parte del país. En la Figura 24 se muestra la evolución del reciclaje en Irlanda y España.

6.8.2 Evolución del porcentaje de residuos enviados a reciclaje en Irlanda y España

La Figura 24 muestra una representación de la tasa de reciclaje en Irlanda y España, desde 2000 hasta 2017.

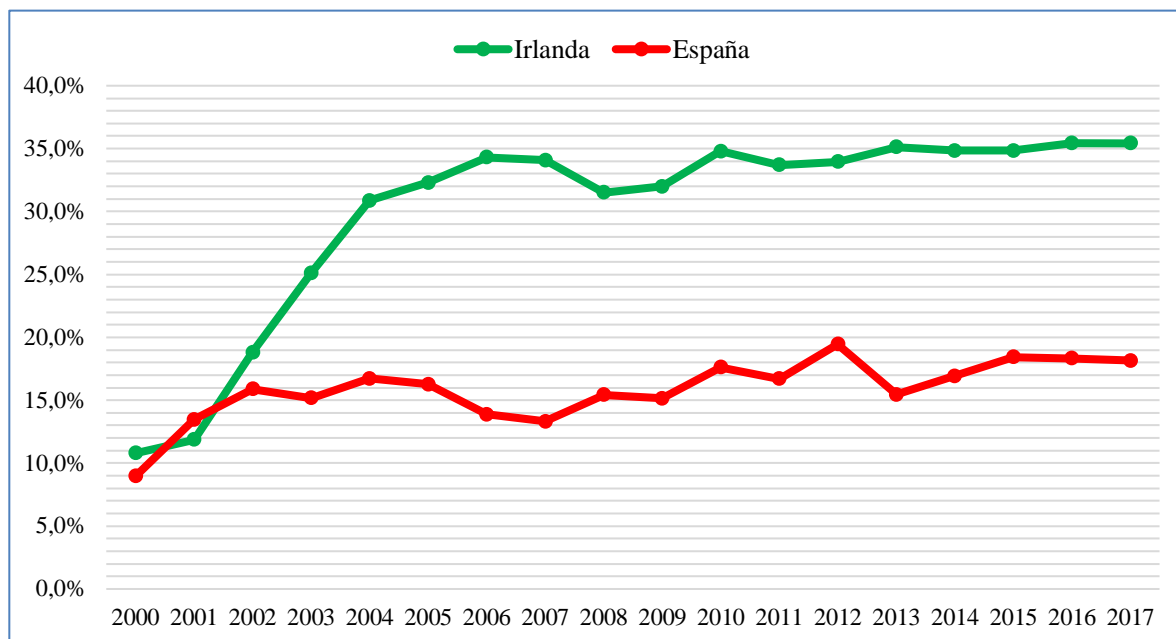


Figura 24. Evolución del porcentaje de residuos reciclados en Irlanda y España

En 2017, Irlanda con un 31,6% recicla casi el doble que España con 18,2%. En el corto periodo 2001-2004, la tasa de reciclaje en Irlanda varía desde 10,8% hasta situarse por encima del 30%. Esto parece deberse a que en el año 2001 se inicia la aplicación del gravamen por tonelada de residuos enviados a vertederos. Ello obliga a buscar alternativas como el reciclaje. Por otra parte, las demás variaciones encontradas se deben más a las diferencias en la generación de residuos que a otras causas.

En España el aumento repentino del reciclaje observado entre 2001 y 2002 podría atribuirse a la aplicación del primer Plan Nacional de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos y a la rápida adopción de las medidas que este introdujo. Sin embargo, los años posteriores el desarrollo del reciclaje se detuvo significativamente y solo hubo pequeñas variaciones en las tasas de reciclaje anuales, siempre permaneciendo en el rango de 15-20%.

7 PRONÓSTICOS EN EL RECICLAJE DE RSU EN EUROPA, IRLANDA Y ESPAÑA

Con el fin de evaluar las perspectivas para los países que cumplen el objetivo de reciclaje del 50% para 2020 y 55% para 2025, (véase Figura 6), se han desarrollado dos escenarios, optimista y pesimista.

Se debe tener en cuenta que los escenarios analizados son muy simplistas y no tienen en cuenta ninguna medida política planificada. Los resultados se obtienen analizando la tendencia de los últimos años, según los datos que proporciona Eurostat, mediante el programa Statgraphics. Este proporciona el modelo que siguen estos datos y devuelve tanto el pronóstico como los límites inferiores y superiores con un nivel de confianza de 95%. Por tanto, los resultados deben interpretarse solo como una indicación aproximada y una evaluación del riesgo de alcanzar o no los objetivos marcados.

7.1 Pronóstico Irlanda

Al analizar la tendencia que ha seguido Irlanda en el reciclaje desde 2000, se obtienen los resultados presentados en la Figura 25. Según el modelo sugerido por el programa, Irlanda tendría una tasa de reciclaje en 2020 del 42%, para el caso más optimista alcanzaría el 47% y para el caso más pesimista el 37%. Para 2025, Irlanda no sólo no habría mejorado su reciclaje, sino que este desciende un punto porcentual, el caso más optimista proporciona una tasa de 48% y el más pesimista de 34%. La Figura 25 representa la evolución y estimación del reciclaje de residuos proporcionados por el programa Statgraphics. En dicha figura también se representan los escenarios optimista y pesimista.

Irlanda: Modelo estimación ARIMA (0,2,1) con constante			
	Pronóstico	Límite inferior	Límite superior
2018	41,6	37,8	45,4
2019	42,1	37,4	46,7
Objetivo 2020	42,4	37,4	47,3
2021	42,5	37,5	47,4
2022	42,4	37,5	47,4
2023	42,3	37,0	47,5
2024	41,9	36,0	47,8
Objetivo 2025	41,4	34,3	48,4

Tabla 3. Modelos de estimación Irlanda

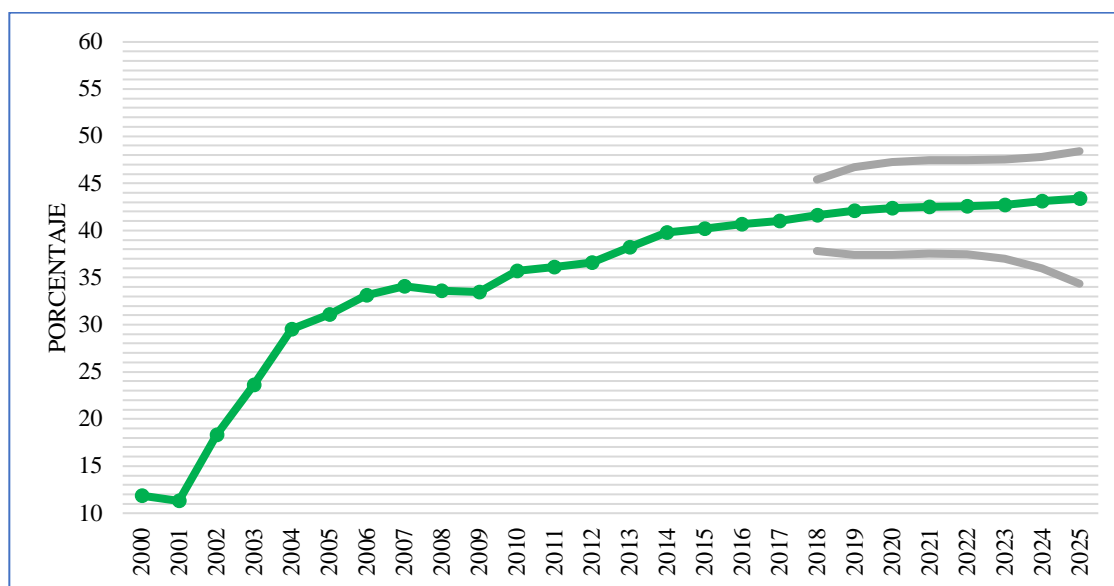


Figura 25. Evolución y estimación del reciclaje en Irlanda.

La tasa de reciclaje en Irlanda ha permanecido sin apenas variaciones en los últimos años, y siguiendo esa tendencia Irlanda no alcanzaría los objetivos marcados para 2020, situándose ocho puntos porcentuales por debajo de dicho objetivo y a 14 puntos de distancia del objetivo 2025.

Si la tasa de reciclaje hubiera seguido la tendencia del periodo 2001-2007 probablemente Irlanda podría haber cumplido con los objetivos impuestos. En 2001 la tasa de reciclaje fue de 12,8%, para 2007 se situaba en 36,6%, las medidas impuestas consiguieron aumentar la tasa de reciclaje en algo más de 23 puntos porcentuales en seis años. Después de 2007 la tasa de reciclaje permanece prácticamente constante y los incrementos observados son puntuales y mínimos con variaciones de apenas dos puntos de un año a otro; desde dicho año hasta 2017, la tasa de reciclaje solo ha mejorado en ocho puntos porcentuales.

Irlanda se sitúa en 2019 con 42% de residuos reciclados y compostados, parece poco probable que alcance los objetivos de 2020, y alcanzar los objetivos de 2025 desafía a Irlanda, aún en el escenario más optimista.

7.2 Pronóstico España

Al analizar la tendencia que ha seguido España en el reciclaje desde 2000, se obtienen los resultados presentados en la Figura 26. Según el modelo presentado por el programa, España tendría una tasa de reciclaje en 2020 de 33%, para el caso más optimista alcanzaría el 41% y para el caso más pesimista tan solo el 25%. Para 2025, España solo habría conseguido incrementar su tasa de reciclaje en un 2%, si sigue la tendencia de los últimos años, el caso más optimista proporciona una tasa de 45% y el más pesimista de 25%. La Figura 27 representa la evolución y estimación del reciclaje de residuos proporcionados por el programa Statgraphics. En dicha figura también se representan los escenarios optimista y pesimista.

España: Modelo estimación ARIMA (1,1,2) con constante			
	Pronóstico	Límite inferior	Límite superior
2018	32,7	25,1	40,2
2019	32,7	24,7	40,8
Objetivo 2020	33,1	24,9	41,2
2021	33,5	25,1	41,9
2022	34,0	25,2	42,7
2023	34,4	25,3	43,5
2024	34,9	25,4	44,3
Objetivo 2025	35,3	25,6	45,1

Tabla 4. Modelos de estimación en España

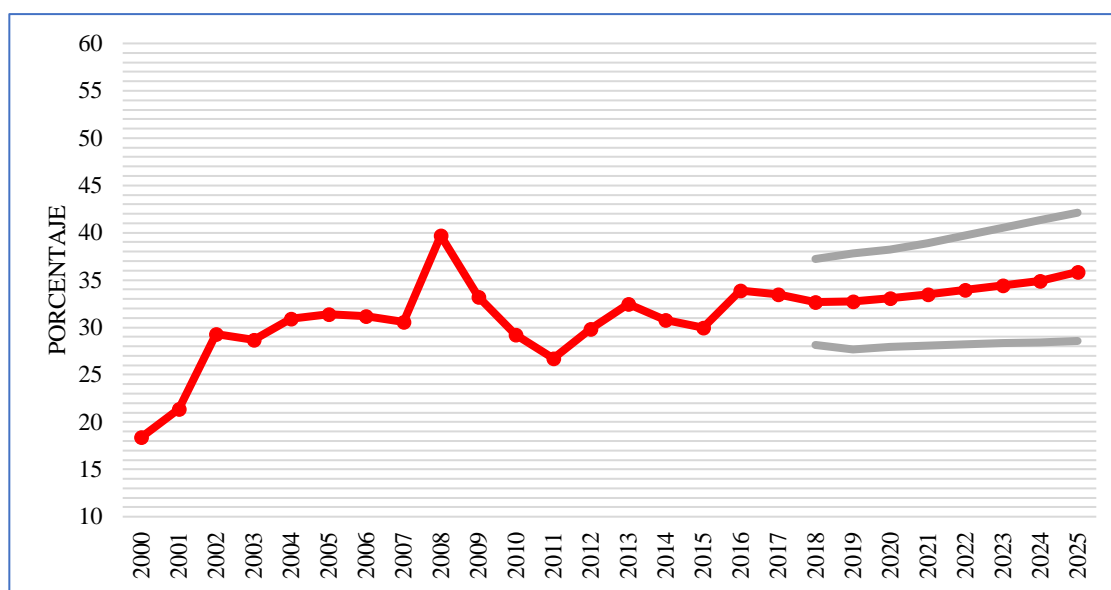


Figura 26. Evolución y estimación del reciclaje en España

En los últimos años, la tasa de reciclaje ha permanecido sin apenas variaciones, si España sigue esta tendencia ni siquiera en el escenario más optimista alcanzaría los objetivos impuestos por la directiva para el reciclaje 2020 y tampoco alcanzaría el objetivo de 2025, situándose a casi 10 puntos porcentuales en dicho escenario.

Sería muy probable que España cumpliera el objetivo del 55% de la Directiva marco sobre residuos si el desarrollo futuro del reciclaje siguiera la tendencia de los años 2011-2013, donde se produjo cada año un aumento de la tasa de reciclaje de dos puntos porcentuales. Si hubiera mantenido dicha tendencia, actualmente España podría tener una tasa de reciclaje en 2019 de aproximadamente el 45% y para 2025 de 56%; en dicho escenario, no hubiese sido posible cumplir con el objetivo del 50% de residuos reciclados para 2020, pero sí hubiera alcanzado el objetivo de 2025.

En cualquier caso, en 2019 España se sitúa con 33% de residuos reciclados y compostados, pese a los esfuerzos que pueda hacer actualmente, parece improbable que alcance los objetivos de 2020 y deberá hacer un esfuerzo extraordinario para alcanzar el objetivo de reciclaje de la Direc Marco de Residuos para 2025.

7.3 Pronóstico Europa

Como último análisis se muestran en la siguiente Figura 27, los países que sí cumplirán con los objetivos de 2020, los cuales serían Eslovenia, Alemania, Austria, Italia, Bélgica, Países bajos, Suiza, Suecia, Luxemburgo, Dinamarca y Lituania. Para el objetivo 2025, todos los países mencionados anteriormente lo cumplirían, además de Reino Unido, que se sumaría a la lista.

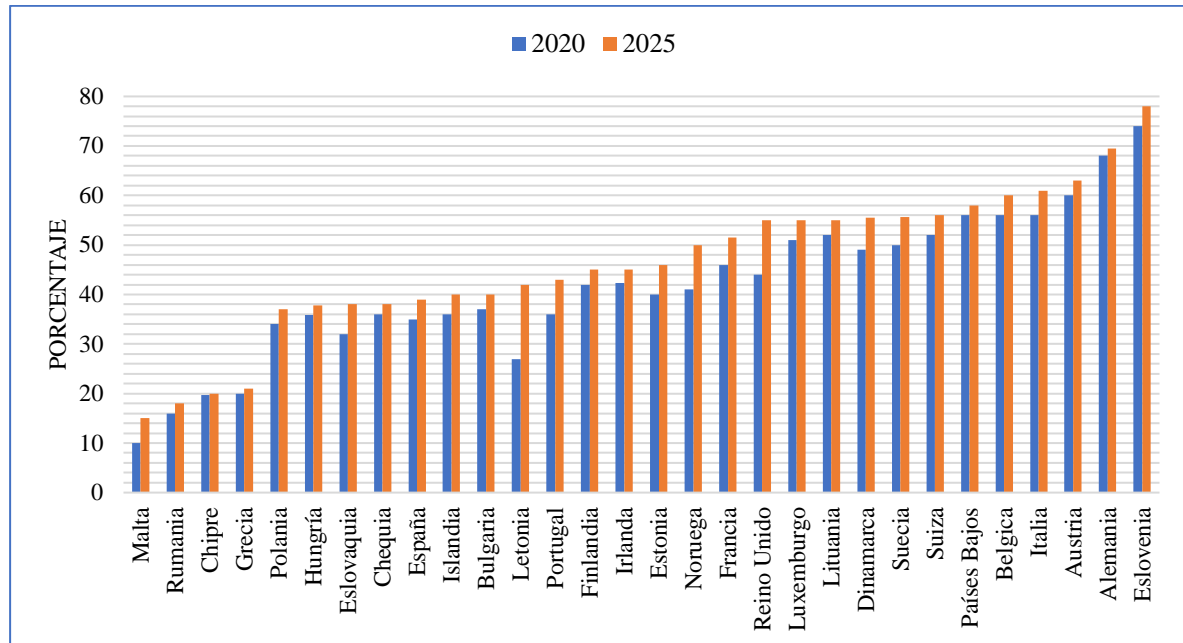


Figura 27. Previsiones para los países Miembros, objetivos 2020 y 2025

8 CONCLUSIONES

Es interesante observar que incluso en los escenarios más pesimistas de Irlanda, este país obtiene mejores resultados que el pronóstico de España, y tampoco se situaría muy lejos del pronóstico más optimista. Los motivos que llevan a Irlanda obtener mejores tasas de reciclaje que España son diversos. El estudio analizado en este trabajo lleva a concluir que la ley impuesta en Irlanda del pago por tonelada de residuos llevados a vertederos, y el posterior impuesto aplicado a los residuos incinerados, impulsó otras medidas de gestión de residuos, entre ellas el reciclaje.

Irlanda se encuentra en camino de situarse entre los países que reciclan el 50% de sus residuos, España necesita aplicar fuertes medidas para situarse en la media europea.

9 REFERENCIAS

- Atalia, K., Buha, D., Bhavsar, K., & Shah, N. (2015). A Review on Composting of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* .
- Affairs, D. f. (2013). *Incineration of municipal solid waste*.
- Autor. (2012). Este es el ejemplo de una cita. *Tesis Doctoral*, 2(13).
- Autor, O. (2001). Otra cita distinta. *revista*, pág. 12.
- Banco Mundial. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Bonafè , S. (2018). *Circular economy package: Four legislative proposals on waste*.
- Comisión Europea. (2000). *La UE apuesta por la gestión de residuos*.
- Commission, C. a. (2018). *The Operation of the Household Waste Collection Market*.
- Diario de Navarra*. (18 de 03 de 2019). Obtenido de <https://www.diariodenavarra.es/noticias/navarra/2019/03/18/pamplona-segunda-capital-todo-pais-que-mas-vidrio-recicla-por-habitante-640118-300.html>
- Diputación De Granada*. (s.f.). Obtenido de <http://a21-granada.org/red-gramas/residuos/index.php/14-prestacion-del-servicio/91-recogida-area>
- EcuRed*. (s.f.). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Compostaje>
- Engineers Journal*. (14 de 06 de 2016). Obtenido de <http://www.engineersjournal.ie/2016/06/14/irish-manufacturers-association/>
- EPA, Ireland. (2000). *Landfill Manuals: Landfill Site Design*.
- Fuentes- Romero, J. (s.f.). Obtenido de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/educacion_ambiental/EducamIV/publicaciones/rua05.pdf
- Global Methane Initiative* . (14 de 03 de 2014). Obtenido de <https://www.globalmethane.org/documents/news-item-438/16-Frankiewicz-GMI-Notes.pdf>
- Gobierno de España. (s.f.). Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-compostaje.aspx>
- hogan , P. (2012). *A Resource Opportunity: Waste Management Policy in Ireland*.
- Hughes, K., Christy, D., & Heimlich, J. (2005). *Landfill Types and Liner Systems*.
- Leal-Quiros, E. (2004). Plasma processing of municipal solid waste. *Brazilian Journal of Physics*.
- Madrid, A. t. (2017). *Ranking Tributario de los Municipios Españoles*.
- Marmara University*. (19 de 03 de 2012). Obtenido de <http://mebig.marmara.edu.tr/Enve330/Chapter4.pdf>
- Meegoda, J., Hettiarachchi, H., & Hettiaratchi, J. (2016). Landfill Design and Operation. En *Sustainable Solid Waste Management* (pág. 577).
- Moustakas , k., Malamis, S., Haralambous , K., & Loizidou , M. (2008). *Analysis of results from the operation of a pilot plasma gasification/vitrification unit for optimizing its performance*.
- Nagarajappa, D., & Rashmi, B. (2015). *Engineering Landfill Design for Municipal Solid Waste Managememt, Bangalore*.
- Organización de Consumidores y Usuarios*. (13 de 06 de 2018). Obtenido de <https://www.ocu.org/consumo-familia/derechos-consumidor/noticias/tasas-basura>

-
- lamento Europeo. (2018). *Circular economy package: Four legislative proposals on waste*.
- Piergiorgio , M. (02 de 04 de 2019). Obtenido de <https://www.lavanguardia.com/economia/20190402/461409314053/industria-manufacturera-europa-caida-datos-estancamiento.html>
- Reale Seguros. (19 de 09 de 2018). Obtenido de <https://blog.reale.es/tasa-de-basuras-que-es/>
- Residuos Profesional. (17 de 07 de 2018). Obtenido de <https://www.residuosprofesional.com/tasas-residuos-objetivos-reciclaje/>
- Revertia. (24 de 08 de 2010). Obtenido de <https://revertia.com/es/%C2%BFque-son-los-sistemas-integrados-de-gestion/>
- Rodrigo-Ilarri, J., Rodrigo-Clavero , M., & Fernández-González, J. (2014). Alternativas de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos. *IndustriaAmbiente*.
- Romero, A. S. (s.f.). *Incineración de Residuos Sólidos Urbanos*.
- Secretaría Desarrollo Social. (s.f.). Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap5.pdf>
- Sthiannopkao, S., & Hung , M. W. (2013). *Handling e-waste in developed and developing countries: Initiatives, practices, and consequences*.
- Themelis, N. (2002). *Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes*.
- Tortosa, G. (10 de 02 de 2015). *Compostando Ciencia*. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>
- UDC, F. d. (s.f.). *Grupo de Gestión de Residuos*. Obtenido de <https://proyectogestionderesiduos.wordpress.com/2009/12/15/etapas-del-proceso-de-compostaje/>
- Van , M. C., & Van , K. V. (01 de 12 de 2007). *Waste Management World*. Obtenido de <https://waste-management-world.com/a/integrated-waste-management>

ANEXO. DATOS EUROSTAT

En este anexo, se presenta los datos obtenidos de Eurostat para la generación y tratamiento de residuos. A partir de estos datos se han realizado los mapas y gráficos presentados en este estudio.

2017 (Kg per cápita)					
Países	Generación	Vertedero	Incineración	Reciclaje	Compostaje
Unión Europea - 28	486	113	131	144	81
Bélgica	410	4	173	139	81
Bulgaria	435	269	15	117	34
Chequia	344	167	59	93	25
Dinamarca	781	7	413	213	149
Alemania	633	6	173	311	117
Estonia	390	75	165	96	14
Irlanda	583	150	170	198	41
Grecia	504	403	5	74	21
España	463	248	60	84	71
Francia	514	111	181	123	97
Croacia	416	301	0	89	9
Italia	489	114	89	136	98
Chipre	637	482	2	91	12
Letonia	438	119	11	73	29
Lituania	455	149	83	110	109
Luxemburgo	607	42	271	168	125
Hungría	385	186	62	103	32
Malta	604	520	0	38	0
Países Bajos	513	7	222	133	145
Austria	570	12	221	147	182
Polonia	315	132	72	84	22
Portugal	487	230	96	56	82
Rumania	272	192	12	20	18
Eslovenia	471	48	36	199	73
Eslovaquia	378	229	36	80	33
Finlandia	510	5	299	140	67
Suecia	452	2	239	142	70
Reino Unido	468	79	170	126	79
Islandia	656	416	5	125	44
Noruega	748	26	396	216	75
Suiza	706	0	335	217	153

Tabla 5. Datos sobre generación y tratamiento en Europa

Vertederos (Kg per cápita)																		
Países	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Irlanda	550	536	500	476	447	441	464	458	432	380	328	293	223	160	115	130	149	150
España	334	360	355	360	304	288	353	344	285	314	318	305	284	253	259	261	251	248

Tabla 6. Kg per cápita de residuos enviados a vertederos en Irlanda y España

Incineración (Kg per cápita)																		
Países	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Irlanda	0	0	0	0	0	0	0	0	18	24	24	43	93	145	192	187	170	170
España	36	36	38	42	31	44	46	49	47	48	44	50	45	53	52	58	56	60

Tabla 7. Kg per cápita de residuos enviados a incineración en Irlanda y España

Compostaje (Kg per cápita)																		
Países	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Irlanda	4	6	9	10	12	12	13	18	24	19	23	34	34	37	39	40	40	41
España	77	66	94	96	98	100	102	99	134	97	59	49	48	77	62	53	72	71

Tabla 8. Kg per cápita de residuos enviados a compostaje en Irlanda y España

Reciclaje (Kg per cápita)																		
Países	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Irlanda	67	73	118	163	205	216	249	246	218	199	200	188	180	183	185	193	197	198
España	44	72	92	89	87	84	82	77	85	82	90	81	91	70	76	84	85	84

Tabla 9. Kg per cápita de residuos enviados a reciclaje en Irlanda y España