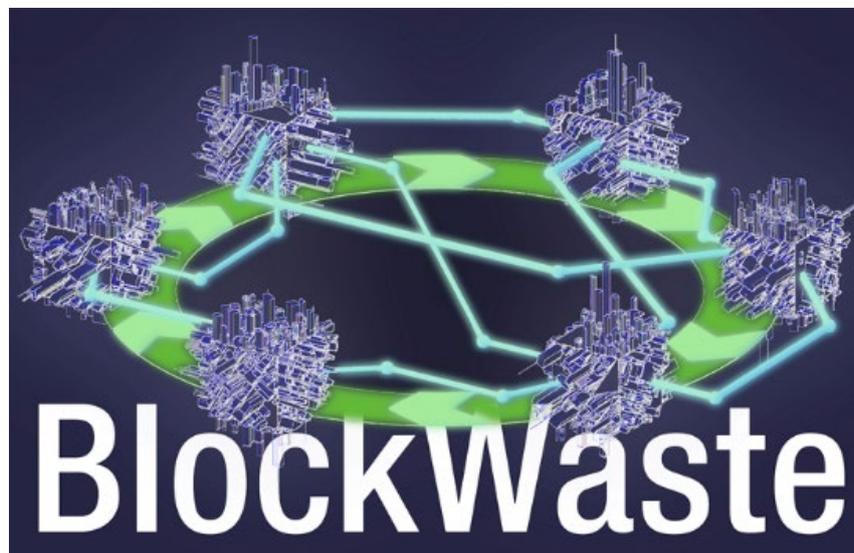


## O1.A3 Manuales de Estrategias de Economía Circular aplicadas a la Gestión de Residuos Municipales utilizando tecnología Blockchain

### *Manual 1: Gestión de residuos y economía circular*



### Descargo de responsabilidad

Este proyecto ha sido financiado con el apoyo de la Comisión Europea. Esta publicación solo refleja las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

## Hoja informativa de salida:

<b>Programa de financiación</b>	Programa Erasmus+ de la Unión Europea
<b>Financiación NA</b>	EL01 Fundación de Becas Estatales Griegas (IKY)
<b>Título completo del proyecto</b>	Formación innovadora basada en la tecnología Blockchain aplicada a la gestión de residuos — BlockWaste
<b>Campo</b>	KA2 — Cooperación para la innovación y el intercambio de buenas prácticas KA203 — Asociaciones estratégicas para la educación superior
<b>Número de proyecto</b>	2020-1-EL01-KA203-079154
<b>Duración del proyecto</b>	24 meses
<b>Fecha de inicio del proyecto</b>	01-10-2020
<b>Fecha de finalización del proyecto:</b>	30-09-2022

## Detalles de los resultados:

**Título de salida:** O1: Materiales de aprendizaje para Blockchain-MSW interdisciplinario

**Título de la tarea:** A3. Manuales de estrategias de economía circular aplicadas a la gestión de residuos municipales utilizando tecnología Blockchain

**Líder de salida:** NTUA

**Líder de la tarea:** Saxion UAS

**Autor(es):** Maria Menegaki, menegaki@metal.ntua.gr, Dimitris Damigos, damigos@metal.ntua.gr, Athanassios Mavrikos, mavrikos@metal.ntua.gr, Universidad Técnica Nacional de Atenas, Grecia, Viktoria Voronova, Universidad Tecnológica de Tallin, Estonia, Juana María Torrecilla, Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales, España

**Revisado por:** Rainer Lenz, rlenz@fh-bielefeld.de, Bielefeld UAS, Alemania, David Caparros Pérez, Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales, david.caparros@ctmarmol.es, España

## Control del documento

Versión del documento	Versión	Enmienda
V0.1	31/03/2022	Versión final — 29/04/2022

## Contenido

Resumen ejecutivo .....	v
1 Introducción .....	1
1.1 Breve descripción del proyecto .....	1
1.2 Objetivos y enfoque metodológico.....	2
2 Residuos sólidos municipales .....	3
2.1 Definición.....	3
2.2 Clasificación .....	4
2.3 Características de la corriente de MSW .....	4
2.3.1 Métodos de caracterización de los RSU .....	5
2.3.2 Materiales en MSW por peso .....	6
2.3.3 Variabilidad de la generación de MSW .....	9
2.4 MSW y el medio ambiente .....	12
2.4.1 Impactos medioambientales de MSW .....	14
2.4.2 Lixiviado y biogás .....	16
3 Estrategias de gestión de RSU existentes .....	19
3.1 Introducción a la gestión de MSW .....	19
3.2 Jerarquía de gestión de residuos .....	21
3.3 Principios comunes en la gestión de los RSU .....	22
3.4 Tratamiento de MSW .....	23
3.4.1 Vertederos .....	23
3.4.2 Incineración y recuperación de energía .....	24
3.4.3 Compostaje y biometanización.....	25
3.4.4 Reciclaje.....	27
4 Economía circular .....	28
4.1 El modelo lineal de producción y consumo .....	28
4.2 Economía circular: concepto, orígenes y principios.....	30
4.3 Retos y beneficios de los sistemas circulares.....	34
4.3.1 Desafíos .....	34
4.3.2 Beneficios .....	35
4.3.3 Estrategias transversales .....	37
4.3.4 Estrategias directas.....	38
5 Economía circular y gestión de RSU.....	41
5.1 Gestión de MSW en un CE .....	41

5.2	Políticas e instrumentos en la gestión de los RSU hacia la CE.....	42
5.3	Tecnologías digitales para una gestión circular de MSW.....	44
6	Referencias y fuentes para mayor lectura e información.....	47
6.1	Referencias.....	47
6.2	Otras fuentes.....	50

## Lista de tablas

Cuadro 1: Instrumentos políticos utilizados a escala europea, regional y nacional para la gestión de residuos .....	44
Cuadro 2: Principales áreas de digitalización en la gestión de RSU .....	45

## Lista de cifras

Figura 1: Generación de residuos municipales EU-27, 2005-2020 (Fuente: Eurostat, 2021)....	6
Figura 2: Composición global de los residuos (Fuente: Kaza et. al., 2018).....	7
Figura 3: Composición de los residuos por nivel de ingresos (Fuente: Kaza et. al., 2018). .....	8
Figura 4: Generación de residuos de hogares en la EU-27 en peso (en toneladas) (Fuente: Eurostat, 2022 — propio proceso de edición).....	9
Figura 5: Generación de residuos de hogares en la EU-27 en peso (en toneladas) y categoría (Fuente: Eurostat, 2022 — propio proceso de edición).....	9
Figura 6: Una instantánea de la evolución de los residuos sólidos durante las revoluciones industriales (Fuente: Mavropoulos y Nielsen, 2020). .....	12
Figura 7: Generación de residuos proyectada, por región (Fuente: <a href="https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html">https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html</a> ). .....	13
Figura 8: Tratamiento y eliminación global de residuos (Fuente: <a href="https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html">https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html</a> ). .....	14
Figura 9: El vertedero municipal de Dandora en Nairobi, Kenia (Fuente: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora_2.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora_2.jpg</a> ).....	15
Figura 10: Sección transversal típica de un vertedero sanitario moderno (Fuente: <a href="https://www.baltimorecountymd.gov/departments/publicworks/recycling/theresource/today-s-landfill-not-your-grandpa-s-dump">https://www.baltimorecountymd.gov/departments/publicworks/recycling/theresource/today-s-landfill-not-your-grandpa-s-dump</a> ). .....	16
Figura 11: Composición típica de lixiviados de vertederos irlandeses (Fuente: Kalyuzhnyi et al, 2003). .....	17
Figura 12: Modelo a largo plazo de la composición del gas de vertedero. Fase aeróbica I, fase ácida II, fase de metano inestable III, fase IV estable de metano, fase V a largo plazo, fase VI de infiltración de aire, fase VII de oxidación de metano, fase VIII de dióxido de carbono, fase IX (Fuente: Wagner et al, 2007).....	17
Figura 13: Gestión integrada de residuos: a Life Cycle Inventory (Adapted from Zbizinski et al., 2006). .....	20
Figura 14: Tasas de vertido de residuos municipales en los Estados miembros de la UE y otros países europeos (Fuente: EEE, 2021).....	21
Figura 15: La Jerarquía de Residuos. (Fuente: Directiva marco sobre residuos, 2008). .....	22
Figura 16: Un esquema típico de combustión de residuos sólidos municipales (Adapted from Worell & Vesilind, 2012).....	24
Figura 17: Proceso de digestión anaeróbica (Gráfico de Sara Tanigawa, EESI).....	26
Figura 18: Tasas de reciclaje en Europa por flujo de residuos (Fuente: EEE, 2022). .....	27
Figura 19: Consumo de materias primas (RMC) (Fuente: Oficina Europea de Medio Ambiente 2012). .....	28
Figura 20: Esquema de economía lineal (Fuente: BIMgreen 2019). .....	29

Figura 21: Esquema del modelo económico lineal (Fuente: Centro Tecnológico de Mármol y Piedra, 2018). .....	30
Figura 22: Esquema del modelo económico circular (Fuente: Centro Tecnológico de Mármol y Piedra, 2018). .....	31
Figura 23: Disociación abordada por la CE (Fuente: Oficina Europea de Medio Ambiente, 2015). .....	34
Figura 24: Resumen de la transición a la economía circular (Fuente: Caparrós-Pérez, D., 2017). .....	37
Figura 25: Un modelo simplificado de economía circular para materiales y energía (Fuente: EEE, 2017).....	41

## Lista de abreviaturas

Abreviatura	Definición
GRSU	Gestión de Residuos Sólidos Urbanos
CE	Economía circular
UE	Unión Europea
IoT	Internet de las Cosas

## Resumen ejecutivo

La gestión de residuos municipales está atravesando grandes cambios derivados de la evolución y los desafíos ambientales, económicos y políticos.

Para hacer frente a estos retos, las instituciones de la UE, los legisladores nacionales y las organizaciones de gestión de residuos han realizado esfuerzos considerables para crear marcos de regulación, clasificación, normalización y recomendaciones que armonicen y permitan mejoras medioambientales y económicas. Ha surgido un repertorio detallado de clasificación de residuos aceptado a escala de la UE que permite la gestión, el tratamiento, el seguimiento y la creación de valor en relación con los residuos.

Los flujos de residuos municipales también han experimentado cambios considerables con una tendencia a reducir el peso por unidad, más envases, más papel y más desechos electrónicos. Sin embargo, los residuos alimentarios y verdes siguen representando una gran parte (44 %) del volumen total de residuos municipales.

La generación de residuos municipales per cápita varía considerablemente en toda la UE, con una diferencia del 250 % entre los países que generan grandes volúmenes y los de bajo volumen. Aunque el aumento del volumen de residuos municipales es una preocupación importante en la UE, otras partes del mundo muestran un crecimiento aún más rápido, de modo que el impacto general de los residuos municipales ha tomado proporciones dramáticas, ya que el lixiviado y el metano representan las mayores amenazas para el agua limpia y el aire.

La gestión actual de residuos ha tratado de contrarrestar esta tendencia mediante la introducción de sistemas integrados de gestión de residuos basados en jerarquías de intervención como la pirámide de residuos que aseguran la reducción del impacto ambiental en los límites de viabilidad tecnológica, viabilidad económica y aceptabilidad social.

Los intentos de acelerar la búsqueda de soluciones a gran escala para el crecimiento del volumen de residuos han socavado la confianza en los modelos de gestión lineal de residuos y han puesto los modelos Circular Economy en el centro de atención de MWM. Sus beneficios se ven en el hecho de que privilegian la reutilización, la recuperación y el reciclaje sobre la eliminación, la incineración y el vertedero al reemplazar los flujos lineales de sustancias por ciclos circulares. Alejarse de una lógica de «tomar-hacer-deshacer» a una disociación del desarrollo económico y el impacto ambiental del uso de los recursos requerirá un cambio dramático no solo en la gestión de residuos sino en los procesos fundamentales de una economía. Esto requerirá y dará lugar a modelos circulares de salida, modelos de innovación circular y modelos de uso circular.

Una vez más, esto requerirá una acción política y una regulación decisivas, comenzando a nivel de la UE, pero también un cambio dramático en la mentalidad de una sociedad, transformando la idea de los residuos como un «problema» en residuos como un «recurso valioso». La gestión de los RSU tendrá que convertirse en una parte vital de la producción y el consumo circulares.

# 1 Introducción

## 1.1 Breve descripción del proyecto

El proyecto BlockWaste tiene como objetivo abordar la interoperabilidad entre la gestión de residuos y la tecnología blockchain y promover su tratamiento adecuado a través de la formación educativa, de modo que los datos recopilados se compartan dentro de un entorno seguro, donde no hay lugar para la incertidumbre y la desconfianza entre todas las partes involucradas. Para ello, los objetivos del proyecto BlockWaste son los siguientes:

- Realizar investigaciones sobre los residuos sólidos generados en las ciudades y cómo se gestionan, de modo que puedan utilizarse para crear una base de información de buenas prácticas, con el fin de reintroducir los residuos en la cadena de valor, promoviendo la idea de Ciudades Circulares Inteligentes.
- Identificar los beneficios de la tecnología Blockchain dentro del proceso de gestión de residuos sólidos municipales (MSWM).
- Crear un plan de estudio que permita la formación de docentes y profesionales de organizaciones y empresas del sector, en la superposición de los campos de Gestión de Residuos, Economía Circular y Tecnología Blockchain.
- Desarrollar una herramienta interactiva basada en la tecnología Blockchain, que permitirá poner en práctica la gestión de los datos obtenidos a partir de residuos urbanos, visualizando así la forma en que se implementan los datos en la Blockchain y permitiendo a los usuarios evaluar diferentes formas de gestión.

BlockWaste tiene como objetivo implementar nuevos contenidos educativos transnacionales con el objetivo de formar a sus estudiantes en los países socios y proporcionarles las habilidades básicas necesarias que les permitan actuar profesionalmente como futuros trabajadores del sector, agregando las competencias digitales requeridas por las empresas que están abrazando el proceso de transformación digital. En este sentido, el proyecto está dirigido a:

- Empresas y pymes, profesionales de TI, urbanismos y profesionales de la gestión de residuos.
- Universidades (profesores, estudiantes e investigadores).
- Organismos públicos.

El proyecto incluye cuatro salidas intelectuales de la siguiente manera:

- O1. Materiales de aprendizaje para Blockchain-MSW interdisciplinario
- O2. Plan de estudios común europeo sobre la aplicación de las tecnologías Blockchain a las estrategias de economía circular
- O3. Herramienta de aprendizaje electrónico basada en Blockchain-MSW centrada en la economía circular
- O4. BlockWaste Open Educational Resource (OER)

## 1.2 Objetivos y enfoque metodológico

Este documento presenta las principales definiciones y características de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), las prácticas de gestión, así como las Políticas e instrumentos en la gestión de RSU hacia CE.

## 2 Residuos sólidos municipales

### 2.1 Definición

En la Directiva 1999/31 de la UE sobre vertidos, los residuos sólidos municipales se definen como «residuos de los hogares, así como otros residuos que, debido a su naturaleza o composición, son similares a los residuos de los hogares». De conformidad con la Directiva 2018/851, los residuos municipales significan:

a) los residuos mezclados y los residuos recogidos por separado de los hogares, incluidos el papel y el cartón, el vidrio, los metales, los plásticos, los biorresiduos, la madera, los textiles, los envases, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, los residuos de pilas y acumuladores y los residuos voluminosos, incluidos los colchones y muebles;

B) los residuos mezclados y los residuos recogidos por separado procedentes de otras fuentes, cuando dichos residuos sean similares en su naturaleza y composición a los residuos de los hogares.

Los desechos municipales provienen de hogares, comercio y comercio, pequeñas empresas, edificios de oficinas e instituciones (escuelas, hospitales, edificios gubernamentales), y se recogen puerta a puerta a través de la recogida tradicional (residuos domésticos mixtos), con fracciones específicas recogidas por separado para las operaciones de recuperación (a través de la recogida puerta a puerta o mediante depósitos voluntarios). Este flujo de residuos también incluye los residuos de las mismas fuentes y similares en su naturaleza y composición, que son recogidos directamente por el sector privado (principalmente la recogida separada con fines de valorización) no en nombre de los municipios y los residuos procedentes de zonas rurales no atendidas por un servicio regular de residuos. Los residuos municipales no incluyen los residuos de la producción, la agricultura, la silvicultura, la pesca, los depósitos sépticos y la red y el tratamiento de aguas residuales, incluidos los lodos de depuradora, los vehículos al final de su vida útil o los residuos de construcción y demolición.

La definición antes mencionada se sigue en prácticamente todos los países socios. Es decir, en Alemania, los residuos sólidos municipales en los términos de la Ley de Economía Circular § 5.a se definen (KrWG2020) como cualquier residuo mixto o separado recogido de: i) los hogares particulares, especialmente el papel y el cartón, el vidrio, el metal, los plásticos, los productos orgánicos, la madera, los textiles, los envases, los aparatos eléctricos y electrónicos, las baterías, los residuos voluminosos, incluidos los colchones y los muebles, y ii) otras fuentes si estos residuos son comparables, por naturaleza y composición, a los residuos domésticos privados. En Grecia, según la Autoridad Estadística Helénica, la categoría de RSU incluye residuos domésticos y similares que se recogen a través del sistema de recogida municipal o a través de terceros. En Estonia (Ley de Residuos, §2,7), los residuos municipales incluyen los residuos de los hogares y los residuos producidos en el comercio, la prestación de servicios o en otros lugares, que debido a su composición o propiedades son similares a los residuos de los hogares. En los Países Bajos, los residuos municipales se definen como materiales de desecho domésticos: materiales de desecho procedentes de hogares particulares, excepto los componentes de ese residuo que hayan sido designados como residuos peligrosos.

Por último, en España los RSU se definen como residuos generados en los hogares como resultado de actividades domésticas y residuos similares generados en los servicios y la industria. También incluye los desechos generados en los hogares a partir de equipos

eléctricos y electrónicos, ropa, baterías, acumuladores, muebles y accesorios, así como desechos y escombros de pequeños trabajos de construcción y reparación en los hogares. Además, los residuos de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, zonas recreativas y playas, animales domésticos muertos y vehículos abandonados se consideran residuos domésticos (Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelo contaminado).

## 2.2 Clasificación

Los residuos municipales, según Eurostat (2017), se componen de las siguientes categorías:

A. Residuos recogidos por separado de los hogares:

- Papel y cartón
- Textiles
- Plásticos
- De vidrio
- Metales
- Materiales orgánicos de HH (residuos de cocina, residuos de jardín — compostaje casero no se considera).
- Residuos domésticos peligrosos (por ejemplo, disolventes gastados, ácidos, alcalinos, fotoquímicos, plaguicidas, aceites usados, pinturas, RAEE, baterías y acumuladores, detergentes, etc.)
- Otros residuos (por ejemplo, aceites y grasas comestibles, desperdicios de caucho, etc.)
- Residuos voluminosos

B. Residuos residuales:

- Residuos mixtos procedentes de hogares e instituciones similares, con excepción de las fracciones recogidas por separado.

C. Residuos de los servicios municipales:

- Materiales orgánicos de los servicios municipales
- Residuos de contenedores públicos y barridos callejeros
- Residuos de limpieza del mercado
- Residuos de cementerio

Prácticamente se sigue la misma clasificación en Alemania (Ley de Economía Circular, 2012, modificada 2020, KrWG2020), Grecia (Plan Nacional de Gestión de Residuos, Boletín Oficial 185/A/29-09-2020), Estonia (Ley de Residuos de 2004, modificada el 01.01.21), los Países Bajos (Plan Nacional de Gestión de Residuos 2017) y España (Ley 22/2011).

## 2.3 Características de la corriente de MSW

La caracterización de los residuos sólidos municipales (MSW) representa un instrumento importante para los gobiernos locales y los operadores de saneamiento a la hora de establecer y alcanzar objetivos de reciclaje y recuperación de residuos. Hacia esta dirección, realizar un

análisis completo de las características y composición de los residuos domésticos es un elemento importante en las estrategias nacionales, regionales y locales (Ciuta et. al., 2015).

### 2.3.1 Métodos de caracterización de los RSU

Existen dos métodos principales para realizar un estudio de caracterización de residuos. El primero es un enfoque específico del lugar en el que se muestrean, clasifican y pesan los componentes individuales del flujo de residuos. Esta metodología es útil para definir un flujo de residuos local, especialmente si se toman grandes cantidades de muestras durante varias temporadas.

Los resultados del muestreo también aumentan el conjunto de conocimientos sobre las variaciones debidas a los cambios climáticos y estacionales, la densidad de población, las diferencias regionales, etc. Además, las cantidades de componentes de RSU como restos de alimentos y recortes de patio solo se pueden estimar a través de estudios de muestreo y pesaje.

Aunque este método es útil para definir un flujo de residuos local, la extrapolación de un número limitado de estudios puede producir una imagen sesgada o engañosa si, por ejemplo, se experimentaron circunstancias atípicas durante el muestreo. Estas circunstancias podrían incluir una estación inusualmente húmeda o seca, la entrega de algunos residuos inusuales durante el período de muestreo o errores en la metodología de muestreo. Cualquier error de este tipo se magnificará enormemente cuando se tomen un número limitado de muestras para representar todo el flujo de residuos de una comunidad durante un año. La ampliación de los errores podría ser aún más grave si se confiara un número limitado de muestras para hacer las estimaciones nacionales de RSU. Además, el muestreo extensivo sería prohibitivamente costoso para hacer las estimaciones nacionales. Una desventaja adicional de los estudios de muestreo es que no proporcionan información sobre las tendencias a menos que se realicen de manera coherente durante un largo período de tiempo (EPA, 1998).

El segundo método se llama «metodología de flujos materiales». La idea de esta metodología se desarrolló en la EPA a principios de la década de 1970. Esta metodología se basa en datos de producción (en peso) de los materiales y productos del flujo de residuos. Para estimar los datos de generación, se realizan ajustes específicos a los datos de producción para cada material y categoría de producto. Se realizan ajustes para las importaciones y exportaciones y para las desviaciones de RSU (por ejemplo, para materiales de construcción hechos de plástico y cartón que se convierten en escombros de construcción y demolición.) También se realizan ajustes para la vida útil de los productos. Finalmente, los restos de alimentos, los recortes de patio y una pequeña cantidad de desechos inorgánicos diversos se explican mediante la compilación de datos de una variedad de estudios de muestreo de residuos.

Un problema con la metodología de flujo de materiales es que los residuos de productos asociados con otros artículos en MSW (generalmente contenedores) no se tienen en cuenta. Estos residuos incluirían, por ejemplo, alimentos dejados en un frasco, detergente dejado en una caja o botella y pintura seca en una lata. Algunos desechos peligrosos domésticos (por ejemplo, pesticidas dejados en una lata) también se incluyen entre estos residuos de productos.

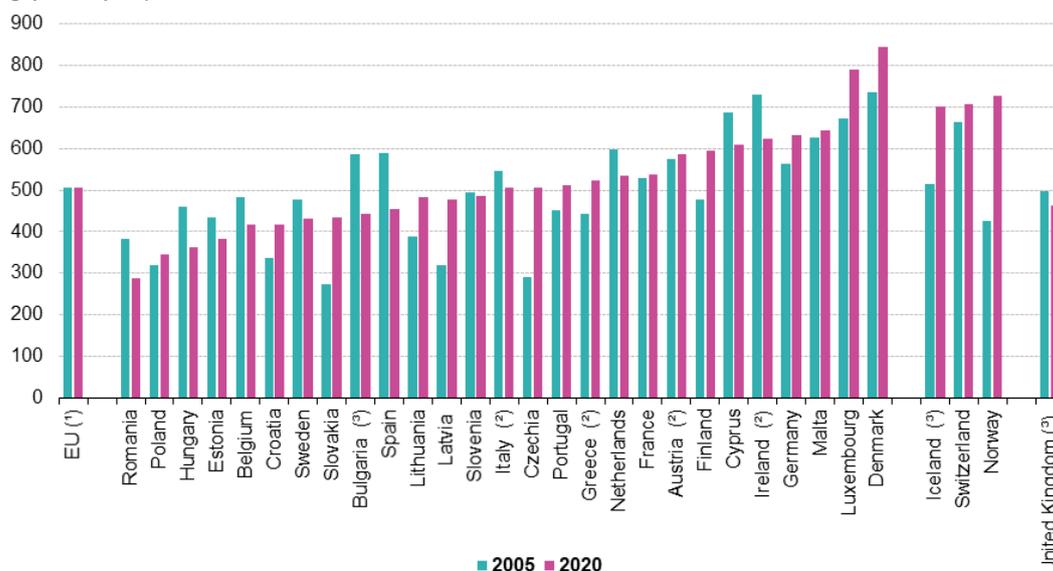
### 2.3.2 Materiales en MSW por peso

En 2018, el total de residuos generados en la EU-27 por todas las actividades económicas y los hogares ascendió a 2.337 millones de toneladas. En la Europa de los Veintisiete, los hogares aportaron el 8,2 % del total de residuos generados. Aunque los residuos municipales representan menos del 10 % del total de residuos generados en la UE, parece ser uno de los tipos de residuos más contaminantes, debido a su carácter complejo, debido a su composición, su distribución entre muchas fuentes de residuos y su relación con los patrones de consumo.

Para 2020, los totales de generación de residuos municipales varían considerablemente, desde 282 kg per cápita en Rumanía hasta 845 kg per cápita en Dinamarca, con una media de unos 500 kg en la EU-27. Las variaciones reflejan diferencias en los patrones de consumo y la riqueza económica, pero también dependen de cómo se recojan y gestionen los residuos municipales.

#### Municipal waste generated, 2005 and 2020

(kg per capita)



Note: Countries are ranked in increasing order by municipal waste generation in 2020.  
 (\*) Estimated.  
 (2) Ireland, Italy, Greece, Austria, 2019 data.  
 (3) Bulgaria, Iceland, United Kingdom 2018 data.



Figura 1: Generación de residuos municipales EU-27, 2005-2020 (Fuente: Eurostat, 2021).

En cuanto a los países socios, en 2019 Alemania tuvo la mayor generación de residuos municipales per cápita (es decir, 609), seguida de Grecia (524 kg) y los Países Bajos (508 kg). La generación de residuos municipales per cápita en España (476 kg) fue inferior a la media de la EU-27 (es decir, 502 kg). Estonia, como se mencionó anteriormente, produce mucho menos residuos (es decir, el 73,5 % de la media de la UE o 369 kg per cápita).

La composición de los residuos es la categorización de los tipos de materiales en los residuos sólidos municipales. A nivel internacional, la categoría de residuos más grande son los

alimentos y los residuos verdes, que representan el 44 % de los residuos mundiales (Figura 2). Los reciclables secos (plástico, papel y cartón, metal y vidrio) representan otro 38 por ciento de los residuos. La composición de los residuos varía considerablemente según el nivel de ingresos. El porcentaje de materia orgánica en los desechos disminuye a medida que aumentan los niveles de ingresos. Los bienes consumidos en los países de ingresos más altos incluyen más materiales como el papel y el plástico que en los países de ingresos más bajos (Figura 3). La granularidad de los datos para la composición de los residuos, como las cuentas detalladas de los residuos de caucho y madera, también aumenta según el nivel de ingresos (Kaza et. al., 2018).

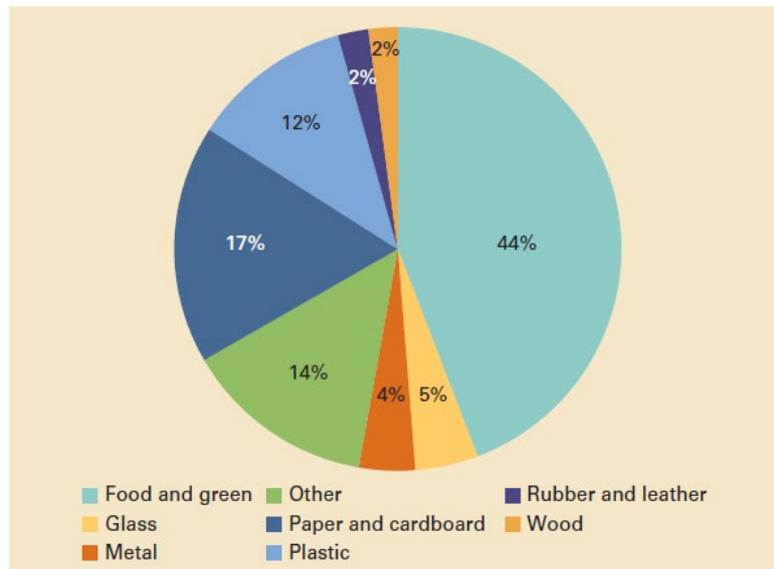


Figura 2: Composición global de los residuos (Fuente: Kaza et. al., 2018).

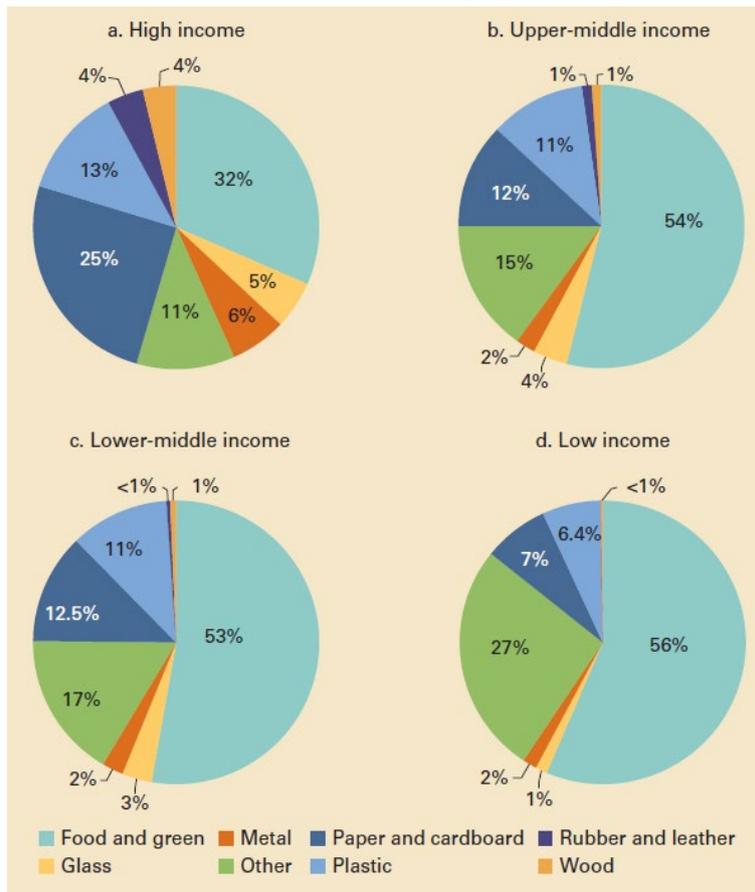


Figura 3: Composición de los residuos por nivel de ingresos (Fuente: Kaza et. al., 2018).

Las cantidades de los residuos totales (peligrosos y no peligrosos) generados por los hogares de la EU-27 se presentan en el gráfico 4.



Figura 4: Generación de residuos de hogares en la EU-27 en peso (en toneladas) (Fuente: Eurostat, 2022 — propio proceso de edición).

Las cantidades de categorías específicas de residuos recogidas en los hogares se presentan en la figura 5.

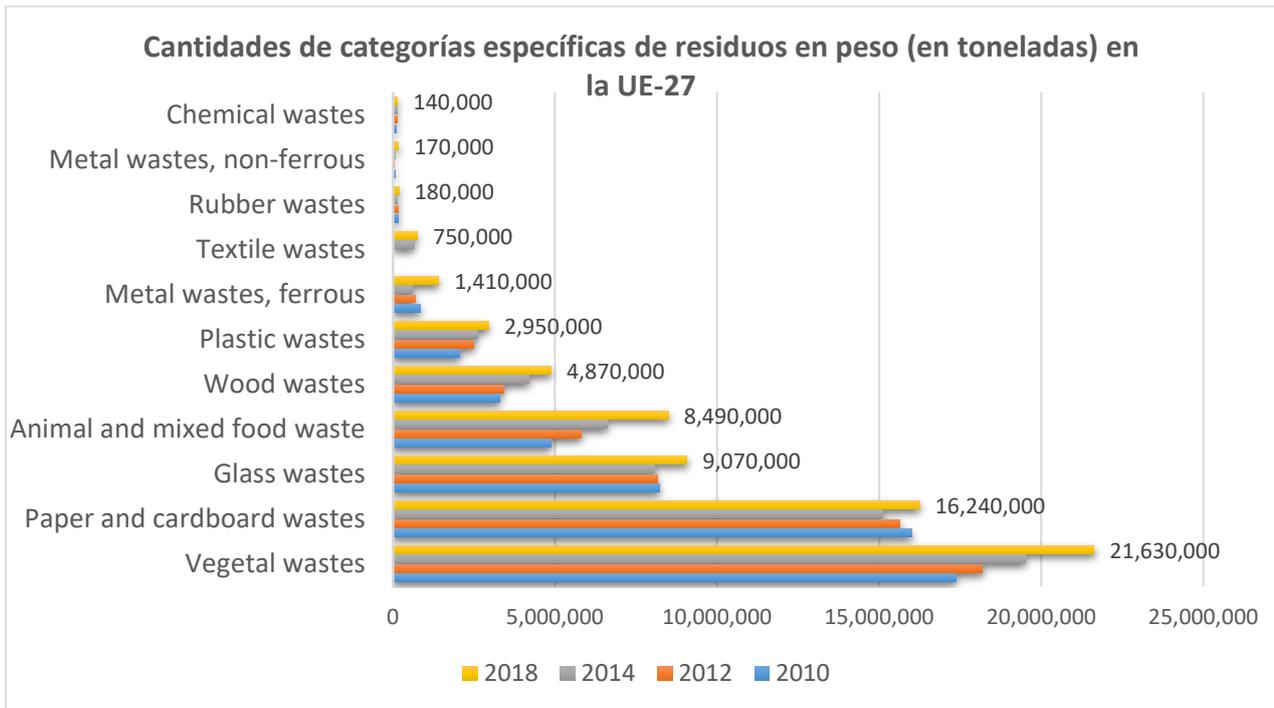


Figura 5: Generación de residuos de hogares en la EU-27 en peso (en toneladas) y categoría (Fuente: Eurostat, 2022 — propio proceso de edición).

### 2.3.3 Variabilidad de la generación de MSW

#### 2.3.3.1 Residuos comerciales vs. residenciales

En general, las personas son más conscientes de los desechos que provienen de sus propias casas, ya sean residencias unifamiliares, edificios de apartamentos u otras opciones residenciales. Sin embargo, también se generan grandes cantidades de desechos cuando las personas trabajan, compran, viajan, asisten a clases o participan en otras actividades. Estos últimos residuos se clasifican generalmente como comerciales. Para añadir a la confusión, los transportistas de residuos a menudo clasifican los residuos recogidos de edificios de apartamentos como comerciales, aunque la naturaleza de los residuos puede ser muy similar a la de las residencias unifamiliares (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

#### 2.3.3.2 Variación local/regional

Los gestores municipales de residuos sólidos generalmente coinciden en que hay variaciones en la cantidad y características de los RSU en todo el país, aunque no es fácil generalizar con ningún grado de fiabilidad. Sin embargo, se pueden hacer algunas observaciones basadas en la experiencia (ibid).

En primer lugar, hay cierto acuerdo en que los desechos residenciales varían menos de una ubicación a otra que los desechos comerciales (Hunt, 1990). Las personas de todo el país tienden a comprar los mismos tipos de bienes, ya sea que vivan en áreas rurales o urbanas o en diferentes climas. Las excepciones a esta generalización incluyen:

- *Recortes de patio.* Los recortes de patio tienden a ser mucho más abundantes en partes más cálidas y húmedas del país. Además, hay marcadas diferencias en cómo se gestionan los recortes de yarda.
- *Desperdicios de alimentos.* Los descartes de residuos de alimentos en RSU variarán de acuerdo con la prevalencia de los eliminadores de alimentos, lo que coloca los desechos de alimentos en el sistema de tratamiento de aguas residuales.
- *Los periódicos.* Los periódicos, que en su mayoría se descartan de las residencias, varían mucho en tamaño y, por lo tanto, contribuyen a las variaciones regionales y urbanas/rurales en la generación de RSU.

La generación de RSU en una localidad determinada estará fuertemente influenciada por la actividad comercial en la zona. Una concentración de edificios de oficinas producirá papeles de oficina y otros desechos. Centros comerciales, almacenes y fábricas generan grandes cantidades de contenedores corrugados y otros desechos también. Escuelas, hospitales, aeropuertos, estaciones de tren y autobús, hoteles y moteles, e instalaciones deportivas contribuyen al flujo de residuos comerciales. Por lo tanto, las ciudades pequeñas y las zonas rurales sin concentración de actividades comerciales normalmente generarán menos RSU por persona que las zonas urbanas.

#### 2.3.3.3 Variaciones estacionales

Otro fenómeno bien conocido en la gestión de residuos municipales son las variaciones estacionales en la generación de residuos. Los recortes de patio son generalmente la variable importante para la mayoría de las comunidades, con la limpieza estacional de patios y garajes que a menudo contribuyen a las semanas de máxima generación. Finales de primavera y otoño son períodos de generación pico en muchas comunidades, mientras que la generación de recortes de patio puede acercarse a cero en los meses de invierno en climas fríos. Las zonas turísticas también presentan variaciones estacionales dependiendo del tipo de vacaciones que ofrece cada zona.

#### 2.3.3.4 Cambios a lo largo del tiempo

La generación de residuos sólidos municipales presenta fluctuaciones en el tiempo entre diferentes materiales. La comprensión de este fenómeno es especialmente importante para hacer proyecciones de la generación de RSU y en la planificación de las instalaciones de gestión de residuos.

Algunos factores que tienden a aumentar la generación de MSW son:

- *Aumento de la población.* Obviamente, más personas usan y tiran más cosas.
- *Aumento de los niveles de riqueza.* Existe una correlación bastante fuerte entre la generación de RSU y la actividad económica, medida por el producto interior bruto (PIB) o el gasto en consumo personal (PCE). La generación de productos de papel y cartón es especialmente sensible a la actividad económica. Las razones son obvias: cuando los pedidos de mercancías bajan, se piden menos cajas y otros embalajes para el envío. Además, la publicidad en periódicos y revistas disminuye durante una recesión.

- *Cambios en los estilos de vida.* Los cambios en los estilos de vida están algo relacionados con la riqueza. Por ejemplo, las personas que viven solas, las familias con dos asalariados y las familias monoparentales tienden a comprar más alimentos preenvasados y a comer más, a menudo en establecimientos de comida rápida que usan envases desechables. También pueden hacer más compras a través de catálogos, lo que aumenta las cantidades de correo recibido y descartado en casa. Además, cada nuevo hogar, por pequeño que sea, debe tener algunos electrodomésticos y muebles.
- La explosión de las oportunidades de información y compras a través de las comunicaciones electrónicas en línea también está causando cambios en la generación de desechos. Por ejemplo, el número de lectores de periódicos está disminuyendo, pero las personas con computadoras en casa pueden generar más papel tipo oficina a medida que imprimen información y comunicaciones por correo electrónico.
- *Nuevos productos.* Los nuevos productos de un solo uso pueden aumentar las cantidades de MSW generadas. Los pañales desechables son un ejemplo de este fenómeno.

Mientras que con el tiempo la generación de MSW se ha incrementado, algunos factores tienden a disminuir la generación de MSW. Algunos de estos factores incluyen:

- *Rediseño de productos.* Algunos productos en MSW en realidad se han vuelto más ligeros a lo largo de los años. Los electrodomésticos como los refrigeradores son un ejemplo, debido en gran medida a los cambios en el aislamiento y el uso de plásticos más ligeros. Otro ejemplo son los neumáticos de goma, que no solo se han hecho más pequeños sino que duran más tiempo. El papel de prensa utilizado para publicar periódicos se ha hecho más ligero en peso, y a veces el tamaño de la página se ha reducido. Además, muchos tipos de envases han sido ligeros a lo largo de los años, a menudo para ahorrar en costos de transporte.

Los desechos plásticos han atraído mucha atención recientemente, especialmente los flujos de plástico de un solo uso, principalmente debido a los hallazgos masivos de investigación sobre los impactos de la contaminación plástica en los océanos<sup>1</sup>. La UE puso en marcha su estrategia en materia de plástico en 2018, con el objetivo de garantizar que todos los envases de plástico sean reutilizables o reciclables para 2030. También pide que el 90 % de todas las botellas de plástico se reciclen para 2025. Se espera que esta estrategia transforme la forma en que los productos de plástico se diseñan, utilizan, producen y reciclan en la UE (Mavropoulos y Nielsen, 2020)<sup>2</sup>.

- *Sustitución de materiales.* Especialmente en el embalaje, ha habido una tendencia a sustituir los materiales más ligeros en muchas aplicaciones. Por lo tanto, las latas de aluminio han reemplazado las latas de acero en los envases de bebidas y las botellas de plástico se han sustituido por vidrio. Esto se refleja en la disminución o «plana» generación de envases de acero y vidrio, mientras que el aluminio y los plásticos han mostrado un rápido crecimiento. Los plásticos también han sustituido el papel en muchas aplicaciones. Por ejemplo, a pesar de que la generación de envases de papel ha crecido en general, la

<sup>1</sup>Davies, S. La Gran Crisis de Manejo de Caballo de 1894 | Stephen Davies <https://fee.org/articles/the-great-horse-manure-crisis-of-1894/> (consultado el 13 de febrero de 2020)

<sup>2</sup> Mavropoulos A., y Nielsen A.W., 2020, Industria 4.0 y Economía Circular: ¿Hacia un futuro sin desperdicio o un planeta derrochador?Wiley, ISBN: 978-1-119-69927-9

generación de bolsas y sacos de papel ha disminuido, principalmente debido a un mayor uso de bolsas de plástico, que son mucho más ligeras.

La Figura 6 presenta la naturaleza cambiante de los residuos a medida que el mundo pasa de una revolución industrial a otra.

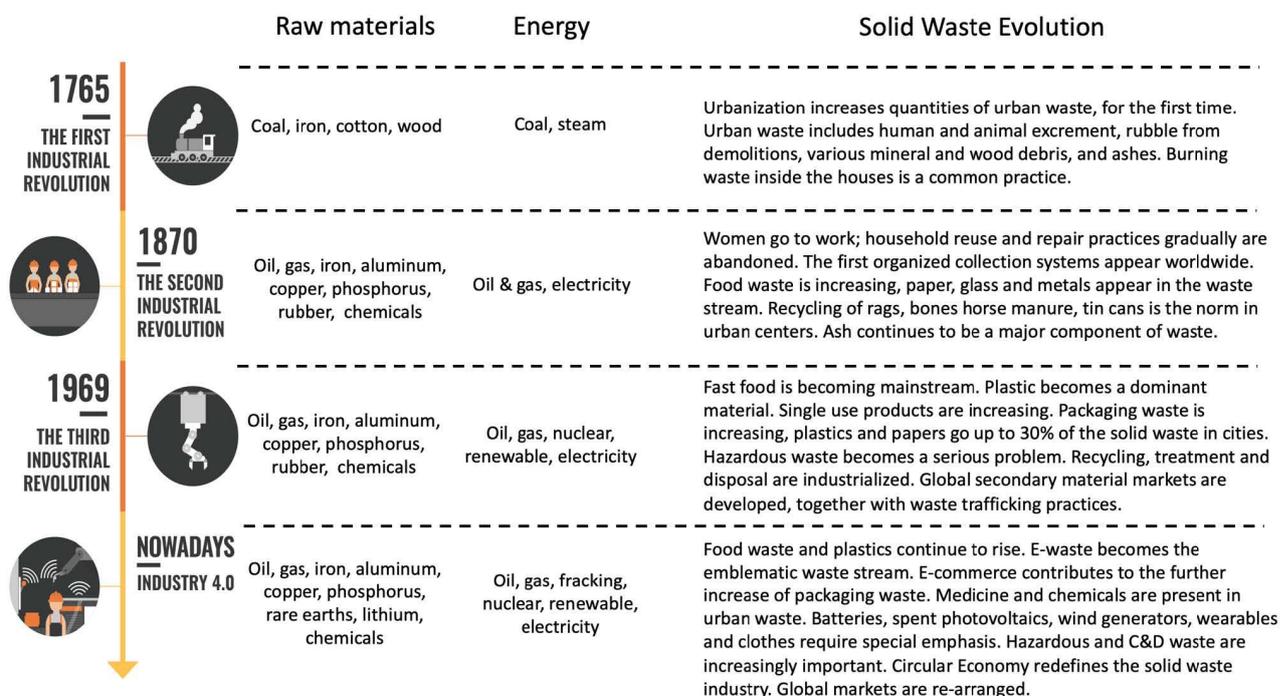


Figura 6: Una instantánea de la evolución de los residuos sólidos durante las revoluciones industriales (Fuente: Mavropoulos y Nielsen, 2020).

## 2.4 MSW y el medio ambiente

Los residuos sólidos municipales (MSW, por sus siglas en inglés), más comúnmente conocidos como basura o basura, consisten en artículos cotidianos que las personas usan y luego desechan, como embalaje de productos, recortes de césped, muebles, ropa, botellas, restos de alimentos, periódicos, electrodomésticos, pintura y baterías. Las fuentes de MSW son hogares, escuelas, hospitales y empresas<sup>3</sup>.

Según el Banco Mundial<sup>4</sup>, el mundo genera anualmente 2.010 millones de toneladas de residuos sólidos municipales, con estimaciones conservadoras calculando que al menos el 33 % de esta cifra no se gestiona de manera ambientalmente segura. En todo el mundo, los desechos generados por persona por día promedian 0,74 kilogramos, pero varían ampliamente, de 0,11 a 4,54 kilogramos. Aunque solo representan el 16 % de la población mundial, los países de altos ingresos generan alrededor del 34 %, o 683 millones de toneladas, de los desechos del mundo. En cuanto al futuro, los pronósticos esperan que las cantidades de residuos crezcan a 3.400 millones de toneladas para 2050, más del doble del crecimiento

<sup>3</sup><https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/>

<sup>4</sup>[https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)

de la población durante el mismo período (Fig. 7). En general, existe una correlación positiva entre la generación de residuos y el nivel de ingresos. Se proyecta que la generación diaria de desechos per cápita en los países de altos ingresos aumentará en un 19 % para 2050, en comparación con los países de ingresos bajos y medianos, donde se espera que aumente en aproximadamente un 40 % o más.

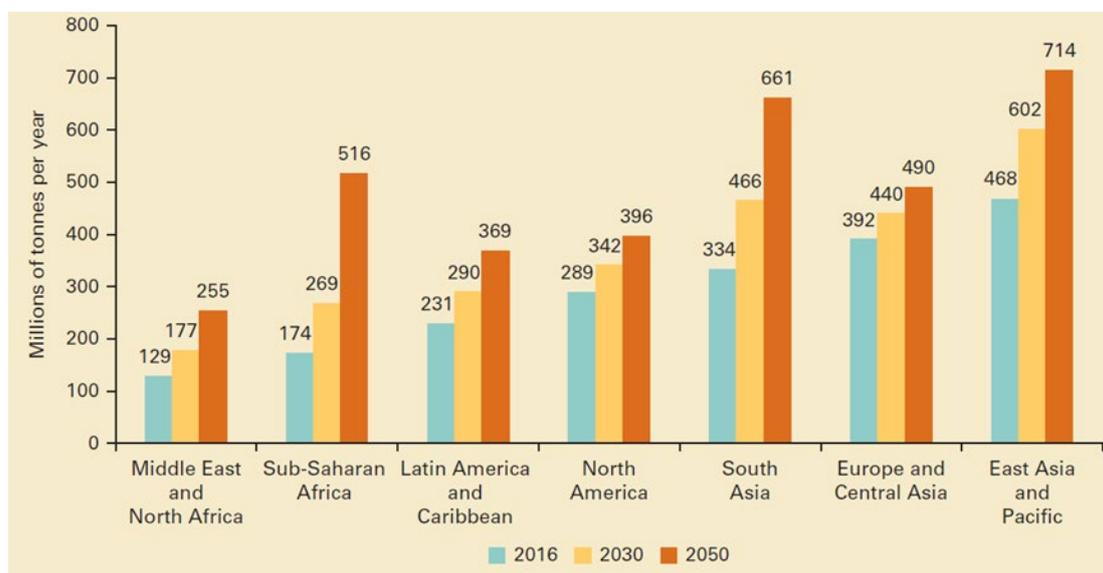


Figura 7: Generación de residuos proyectada, por región (Fuente: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)).

Una vez generado, los MSW deben gestionarse a través de la reutilización, el reciclaje, el almacenamiento, el tratamiento o la eliminación. A escala mundial, la mayoría de los residuos se vierten actualmente o se eliminan en algún tipo de vertedero. Aproximadamente el 37 % de los residuos se eliminan en algún tipo de vertedero, el 8 % de los cuales se eliminan en vertederos sanitarios con sistemas de recogida de gas en vertederos. Los vertederos no controlados representan alrededor del 31 % de los residuos, el 19 % se recupera mediante el reciclaje y el compostaje, y el 11 % se incinera para su eliminación final (Fig. 8). La eliminación o el tratamiento adecuados de residuos, como vertederos controlados o instalaciones más rigurosas, se encuentran casi exclusivamente en los países de ingresos medios y altos. En general, los países de bajos ingresos dependen del dumping abierto (Fig. 9): El 93 % de los desechos se vierten en países de bajos ingresos y solo el 2 % en los países de altos ingresos. La incineración se utiliza principalmente en países de alta capacidad, altos ingresos y con limitaciones de tierra<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>[https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)

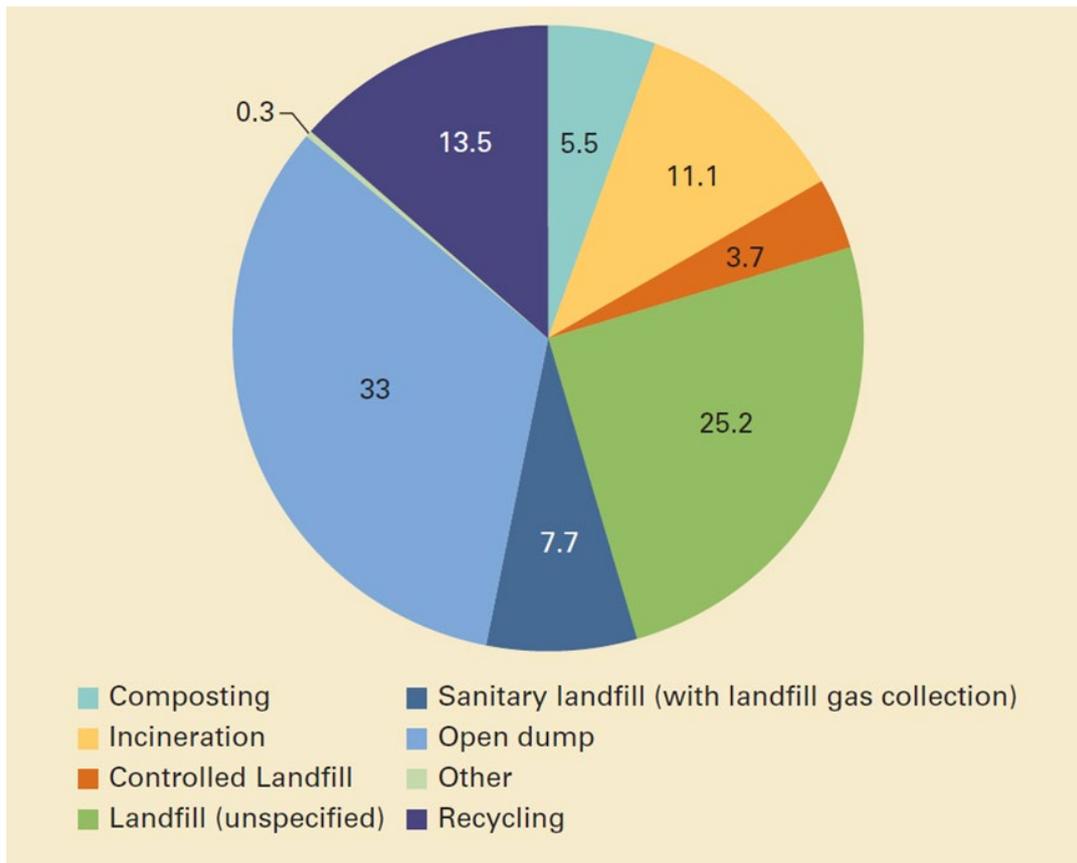


Figura 8: Tratamiento y eliminación global de residuos (Fuente: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)).

#### 2.4.1 Impactos medioambientales de MSW

La gestión de residuos sólidos es un problema universal que afecta a cada persona en el mundo. La eliminación inadecuada puede conducir a resultados adversos para la salud, por ejemplo, a través de la contaminación del agua, el suelo y el aire. Los desechos peligrosos o el tratamiento inseguro de residuos, como la quema abierta, pueden dañar directamente a los trabajadores de residuos u otras personas involucradas en la quema de residuos y las comunidades vecinas. Los grupos vulnerables, como los niños, corren un mayor riesgo de sufrir resultados adversos para la salud<sup>6</sup>. Los residuos mal gestionados están contaminando los océanos del mundo, obstruyendo los drenajes y causando inundaciones, transmitiendo enfermedades a través de la reproducción de vectores, aumentando los problemas respiratorios a través de partículas transportadas por el aire por la quema de desechos, dañando a los animales que consumen desechos sin saberlo, y afectando el desarrollo económico<sup>7</sup>.

Alrededor de 54 millones de toneladas de desechos electrónicos, como televisores, computadoras y teléfonos, se crean anualmente (datos de 2019) con un aumento esperado a

<sup>6</sup>[https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who\\_compendium\\_chapter4\\_v2\\_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc\\_5](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who_compendium_chapter4_v2_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc_5)

<sup>7</sup><https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>

75 millones de toneladas para 2030. En 2019, solo se documentó que el 17 % de los desechos electrónicos se recolectaban y reciclaban adecuadamente. La exposición a desechos electrónicos administrados incorrectamente y sus componentes puede causar múltiples impactos adversos para la salud y el desarrollo, especialmente en niños pequeños<sup>6</sup>.



Figura 9: El vertedero municipal de Dandora en Nairobi, Kenia (Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora\\_2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora_2.jpg))

En general, los residuos sólidos municipales contienen diversos contaminantes y sustancias peligrosas. Una especie de vertedero es el principal método de residuos sólidos municipales en todo el mundo<sup>8</sup>. Sin ignorar la importancia de la segregación de fuentes de residuos, por ejemplo, para evitar la eliminación de baterías u otros materiales peligrosos en un vertedero, las dos preocupaciones ambientales más apremiantes con respecto a los vertederos son el lixiviado y el gas metano (Fig. 10).

---

<sup>8</sup>Mavropoulos, A., (2015). Pérdida de salud: el trágico caso de los vertederos, ISWA (disponible at:[https://www.researchgate.net/publication/281774422\\_Wasted\\_Health\\_the\\_tragic\\_case\\_of\\_dump\\_sites](https://www.researchgate.net/publication/281774422_Wasted_Health_the_tragic_case_of_dump_sites))



Figura 10: Sección transversal típica de un vertedero sanitario moderno (Fuente: <https://www.baltimorecountymd.gov/departments/publicworks/recycling/theresource/today-s-landfill-not-your-grandpa-s-dump>).

## 2.4.2 Lixiviado y biogás

El lixiviado, un líquido producido por el agua de precipitación que pasa a través del volumen de residuos en los vertederos, puede contener altos niveles de amoníaco (Fig. 11). Cuando el amoníaco se abre paso en los ecosistemas, se nitrifica para producir nitrato. Este nitrato puede entonces causar eutrofización, o una falta de oxígeno debido al aumento del crecimiento de la vida vegetal, en fuentes de agua cercanas. La eutrofización crea «zonas muertas» donde los animales no pueden sobrevivir debido a la falta de oxígeno. Junto con el amoníaco, el lixiviado contiene toxinas como el mercurio debido a la presencia de materiales peligrosos en los vertederos<sup>9</sup>. El gas metano se libera a medida que la masa orgánica en los vertederos se descompone (Fig. 12). El metano es 84 veces más efectivo para absorber el calor del sol que el dióxido de carbono, lo que lo convierte en uno de los gases de efecto invernadero más potentes y un gran contribuyente al cambio climático. Junto con el metano, los vertederos también producen dióxido de carbono y vapor de agua, y pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y compuestos orgánicos no metánicos. Estos gases también pueden contribuir al cambio climático y crear esmog si no se controla<sup>7</sup>.

<sup>9</sup><https://www.colorado.edu/ecenter/2021/04/15/hidden-damage-landfills>

Parameters	Overall values		Overall range	
	Median	Mean	Minimum	Maximum
pH value	7.1	7.2	6.4	8.0
Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	7,180	7,789	503	19,200
Alkalinity (as $\text{CaCO}_3$ )	3,580	3,438	176	8,840
COD (mg/l)	954	3,078	<10	33,700
BOD <sub>20</sub> (mg/l)	360	>834	4.5	>4,800
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	270	>798	<0.5	>4,800
TOC (mg/l)	306	717	2.8	<5,690
Fatty acids (as C) (mg/l)	5	248	<5	3,025
Kjeldahl-N (mg/l)	510	518	1	1,820
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	453	491	<0.2	1,700
Nitrate-N (mg/l)	0.7	2.4	<0.2	32.8
Nitrite-N (mg/l)	<0.1	0.2	<0.1	1.4
Sulphate (mg/l)	70	136	<5	739
Chloride (mg/l)	1,140	1,256	27	3,410
Phosphate (mg/l)	1.1	3.0	<0.1	15.8
Sodium (mg/l)	688	904	12	3,000

\* National Waste Database (1998)

Figura 11: Composición típica de lixiviados de vertederos irlandeses (Fuente: Kalyuzhnyi et al, 2003).

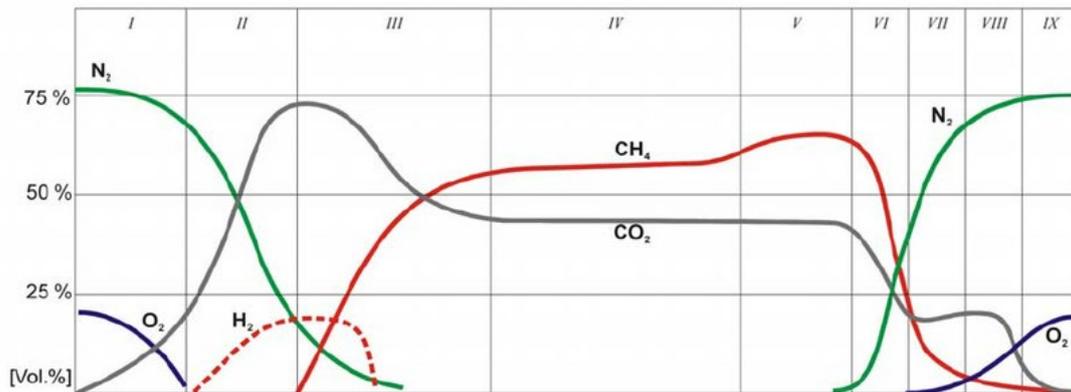


Figura 12: Modelo a largo plazo de la composición del gas de vertedero. Fase aeróbica I, fase ácida II, fase de metano inestable III, fase IV estable de metano, fase V a largo plazo, fase VI de infiltración de aire, fase VII de oxidación de metano, fase VIII de dióxido de carbono, fase aire IX (Fuente: Wagner et al, 2007).

Además, los vertederos también pueden asociarse con impactos sociales. Las emisiones de los vertederos representan una amenaza para la salud de quienes viven y trabajan en los vertederos. Los grandes vertederos, en promedio, disminuyen el valor de los terrenos adyacentes a él en un 12,9 %. Finalmente, los vertederos traen riesgos como olores, humo, ruido, insectos y contaminación del suministro de agua<sup>7</sup>.

Otra estrategia común para hacer frente a los RSU es la incineración. La incineración reduce las cantidades de residuos sólidos (hasta el 70 %) y los volúmenes (hasta el 90 %) para vertederos, mientras que al mismo tiempo matan patógenos. Sin embargo, estas ventajas se

compensan con las emisiones de óxidos de carbono, óxidos de azufre, partículas, metales pesados y otros contaminantes procedentes de los incineradores. Por lo general, para cada tonelada de RSU que se incinera, se producen entre 15 y 40 kg de residuos peligrosos, lo que requiere un tratamiento adicional<sup>10</sup>. Hoy en día, los incineradores utilizan controles avanzados de contaminación del aire y pueden incluir tecnologías que eliminan el 99 % de las dioxinas y furanos emitidos por la incineración<sup>11</sup>. Además, la incineración con recuperación de energía puede generar un ahorro neto en las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la incineración de RSU a granel, aunque la solidez de esta opción depende fundamentalmente de la fuente de energía sustituida<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup><https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-018-0175-y>

<sup>11</sup><https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-reducing-waste/municipal-solid/environment.html>

<sup>12</sup>[https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate\\_change\\_xsum.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate_change_xsum.pdf)

## 3 Estrategias de gestión de RSU existentes

### 3.1 Introducción a la gestión de MSW

La cantidad de desechos aumenta en todo el mundo como resultado del auge de la población, el crecimiento económico, la rápida urbanización y el aumento de los niveles de vida humana.

Los residuos también son un problema para todos los países europeos y su cantidad sigue aumentando. Los residuos sólidos municipales representan aproximadamente el 10 % del total de residuos generados en Europa (Eurostat, 2022). Sin embargo, la recogida y gestión de RSU es una tarea difícil debido a la composición mixta de residuos, la distribución entre muchas fuentes y la dependencia de los patrones de consumo.

En 2020 se recogieron más de 225 millones de toneladas de RSU en la UE, una media de 505 kg per cápita (Eurostat, 2022). La recogida de RSU varía considerablemente de un país a otro y se sitúa entre 282 kg/capita en Rumanía y 845 kg/capita en Dinamarca (Eurostat, 2022). Estas variaciones reflejan diferencias en los patrones de consumo y la riqueza económica, pero también dependen del enfoque nacional para la recogida y el tratamiento de residuos. En general, en los países con mayores niveles de PIB la generación de residuos también tiende a aumentar, aunque en estos países se utilizan procesos de gestión de residuos más avanzados (STOA, 2017).

La mala gestión de los RSU provoca graves problemas de contaminación, como la contaminación del agua, el suelo y la atmósfera, los impactos negativos en la salud humana y su contribución al cambio climático. Históricamente, los MSW generalmente se eliminaban en vertederos o se incineraban. Ambos métodos tienen serios inconvenientes debido a la lixiviación de toxinas de los vertederos o la contaminación del aire por la incineración. Las tecnologías modernas de eliminación han reducido el potencial de contaminación ambiental, sin embargo, la política de residuos de la UE tiene por objeto establecer una economía circular, en la que los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible y donde la eliminación de residuos y la incineración sean las opciones menos preferibles de gestión de residuos.

Hoy en día, la gestión de RSU requiere un enfoque complejo para maximizar la eficiencia de los recursos y promover soluciones técnicamente apropiadas, económicamente viables y socialmente aceptables para los problemas de gestión de residuos. Así, se ha desarrollado el concepto de Gestión Integrada de Residuos (IWM).

IWM consolida los flujos de residuos, la recogida, el transporte, el procesamiento y la eliminación de residuos en un complejo sistema de gestión de residuos. Cada sistema IWM es único y combina una combinación de técnicas de gestión de residuos para tratar los diferentes tipos de residuos de manera que sean ambiental, financiera y socialmente sostenibles. La generación de residuos y los datos de gestión desempeñan un papel importante en IWM. El conocimiento sobre las diferentes tecnologías y sus impactos adversos en el medio ambiente, así como la estimación de la cantidad y la composición de los residuos generados, junto con las proyecciones de crecimiento de la población, ayudan a los gobiernos locales a seleccionar las tecnologías adecuadas de recogida y tratamiento de residuos y a planificar las demandas futuras (Sharma y Jain, 2020). La selección de las técnicas adecuadas de tratamiento de residuos IWM se basa en los principios de la jerarquía de residuos.

Para evaluar el desempeño ambiental y económico de los sistemas IWM se utilizan herramientas como el Inventario del Ciclo de Vida (LCI, por sus siglas en inglés).

La multiplicidad de la tarea y el número de supuestos preliminares se muestran en la Figura 13. Life Cycle Inventory investiga diferentes vías de flujo de residuos y su transformación, junto con los impactos ambientales que lo acompañan.

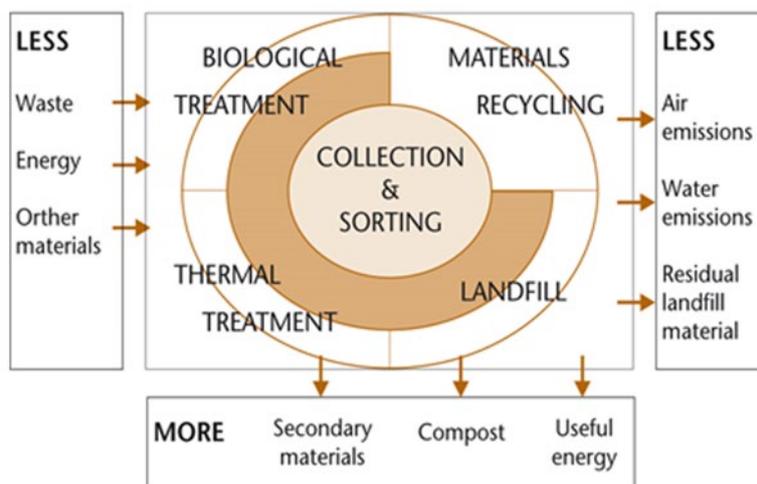


Figura 13: Gestión integrada de residuos: a Life Cycle Inventory (Adapted from Zbizinski et al., 2006).

Un objetivo clave de la política de residuos de la UE es aumentar la eficiencia de la gestión de residuos y reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos. En conjunto, la cantidad de residuos eliminados en vertederos ha disminuido en Europa (en 2018 fue un 7,6 % menos que en 2010), aunque la cantidad total de residuos generados siguió aumentando. En el caso de los residuos MSW y similares, se ha reducido un 51 % entre 2010 y 2018 para desviar los residuos del vertedero (EEE, 2021). Sin embargo, de conformidad con la Directiva de vertidos de la UE, los Estados miembros deben reducir la cantidad de residuos municipales enviados a vertederos al 10 % o menos de la cantidad total de residuos municipales generados para 2035. En 2019, solo nueve Estados miembros habían alcanzado este objetivo (Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Alemania, Luxemburgo, los Países Bajos, Eslovenia y Suecia), así como Noruega, y varios de estos países incineraron una cantidad considerable de residuos municipales (figura 14).

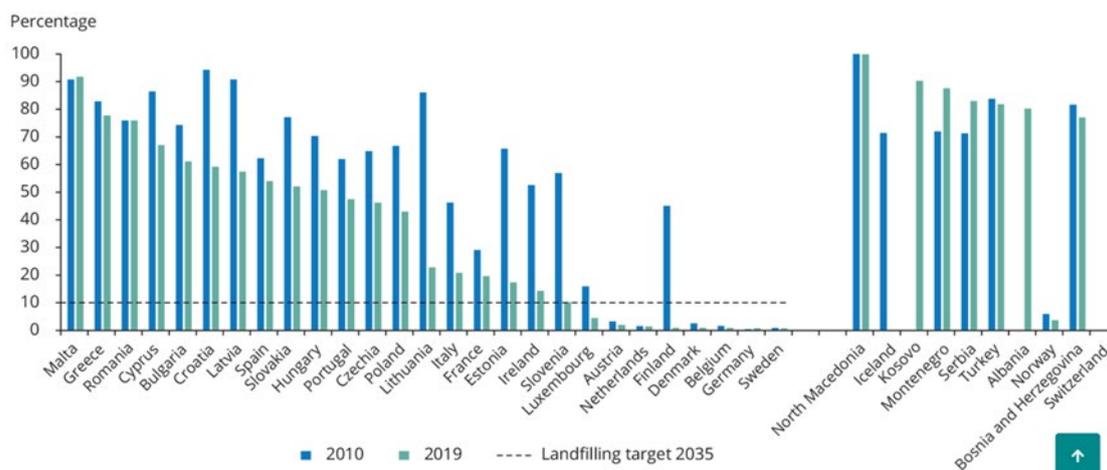


Figura 14: Tasas de vertido de residuos municipales en los Estados miembros de la UE y otros países europeos (Fuente: EEE, 2021).

Las políticas de residuos que han demostrado ser exitosas en la reducción de los vertederos incluyen impuestos a los vertederos. Dentro de los Estados miembros de la UE, solo Chipre, Alemania, Croacia y Malta (así como Noruega) no tienen un impuesto sobre los vertederos. Los tipos impositivos varían considerablemente entre los Estados miembros, de 5 EUR/t en Lituania a más de 100 EUR/t en Bélgica (CEWEP, 2021). Existe cierta correlación entre el impuesto a los vertederos y los vertederos, con un patrón claro de bajos niveles de vertederos, ya que el impuesto sobre los vertederos tiende a aumentar (STOA, 2017).

Otras medidas políticas importantes, que contribuyen a cambiar la jerarquía de residuos, incluyen la prohibición del vertido de residuos municipales biodegradables o los residuos municipales no tratados previamente, los sistemas obligatorios de recogida separada para el reciclado de residuos municipales o el apoyo económico para establecer infraestructuras de recogida y reciclado de residuos. Por ejemplo, Alemania logró alcanzar una de las tasas más altas de reciclaje de residuos municipales en Europa sin tener ningún impuesto sobre los vertederos, pero con una combinación de otros instrumentos políticos y financieros.

Algunos países también están imponiendo impuestos a la incineración de residuos. Para un análisis más detallado, los lectores interesados se refieren a BlockWaste entregable «O1.A1— [Estudio comparativo de las regulaciones de gestión de residuos sólidos municipales \(MSW\) en cada país](#)».

### 3.2 Jerarquía de gestión de residuos

El sistema de jerarquía de residuos en cinco etapas fue introducido por primera vez por la Directiva marco de residuos de la UE (Directiva 2008/98/CE) y ha sido ampliamente utilizado como clave para tomar decisiones sobre la gestión de residuos a nivel local, nacional e internacional (Figura 15).

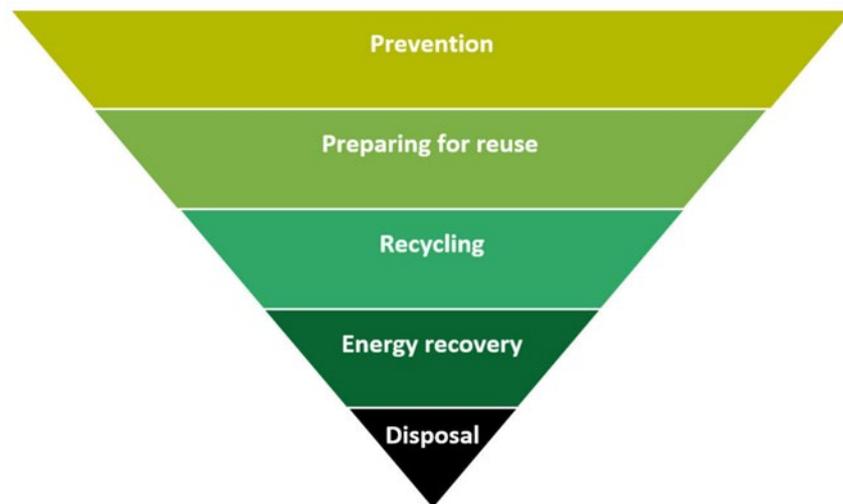


Figura 15: La Jerarquía de Residuos. (Fuente: Directiva marco sobre residuos, 2008).

La Jerarquía de Residuos ilustra el impacto ambiental de los diferentes métodos de gestión de residuos y tiene implicaciones en la sostenibilidad de la gobernanza de los residuos.

La prevención de residuos está en la parte superior de la jerarquía de residuos. Cuando se crean residuos, se da prioridad a su preparación para su reutilización, luego al reciclado (incluido el compostaje), luego a otra recuperación (por ejemplo, la recuperación de energía), mientras que la eliminación de residuos a través de vertederos es la última opción. La legislación de la UE en materia de residuos también tiene objetivos específicos para aumentar el reciclado de flujos de residuos específicos, como equipos electrónicos, automóviles, baterías, construcción, demolición, residuos municipales y de envases, así como reducir el vertido de residuos biodegradables (Comisión Europea, 2022).

### 3.3 Principios comunes en la gestión de los RSU

La gestión moderna de MSW se basa en varios principios:

#### **Eficiencia de los recursos**

La eficiencia de los recursos significa la reducción del impacto ambiental de la producción y el consumo de bienes, desde la extracción final de la materia prima hasta el último uso y eliminación. Desde la perspectiva de la gestión de residuos, significa que la creación de residuos no es solo un problema ambiental, sino también una pérdida económica. Por lo tanto, el principio de RSU consiste en cambiar los patrones de producción y consumo para producir menos residuos, al tiempo que se utilizan todos los residuos creados como recurso. Este enfoque también se refleja en la Jerarquía de Residuos: evitar la generación de residuos como tal, utilizar los residuos como nuevo recurso y minimizar la cantidad de residuos eliminados en vertederos. La eficiencia de los recursos en la gestión de residuos también está relacionada con los principios de la economía circular, donde los insumos de recursos, las emisiones y las fugas de energía se minimizan optimizando todos los procesos y la generación de residuos se reduce al mínimo absoluto.

**«Quien contamina paga» y «Responsabilidad ampliada del productor»**

«Quien contamina paga» es un principio simple que significa que quienes producen contaminación son responsables de ella y deben pagar para evitar daños a la salud humana o al medio ambiente. En la gestión de residuos, el principio de «quien contamina paga» se refiere al requisito de que un generador de residuos pague por la eliminación adecuada de materiales no recuperables. El régimen de responsabilidad ampliada del productor es un método práctico para aplicar el principio de «quien contamina paga». Se aplica, por ejemplo, para RAEE, vehículos, baterías, residuos de envases, residuos agrícolas. Para la recogida de botellas este sistema incluye el sistema de devolución de depósitos.

**Principio de «Pagar como lanzas» (PAYT):** Este modelo valora la eliminación de los residuos en función de la cantidad por unidad de material de desecho, en lugar de basarse en una tarifa a tanto alzado. Este incentivo económico está bien establecido en algunos Estados miembros y tiene un impacto significativo en el comportamiento de las personas.

### 3.4 Tratamiento de MSW

#### 3.4.1 Vertederos

La eliminación de residuos, según la jerarquía de residuos, es una de las opciones menos preferidas hoy en día. La colocación de residuos sólidos en la tierra se llama vertimiento o vertimiento (Worell & Vesilind, 2012), que fue uno de los métodos originales casi para todas las comunidades del interior hasta 1960-s. A finales de 1960, los países desarrollados comenzaron a utilizar soluciones de ingeniería para verter los desechos, lo que conduce al desarrollo de vertederos sanitarios. El vertedero sanitario incluye revestimientos de fondo, sistemas de recogida de lixiviados, tratamiento de lixiviados, recogida de gases, tratamiento de gas, cubiertas finales y sistemas de control de aire y agua (EREF, 2022). En un vertedero, la degradación de los residuos se produce en función de los complejos procesos químicos, físicos y biológicos. Estos procesos están influenciados por las condiciones ambientales (como la temperatura, el pH, la presencia de toxinas, el contenido de humedad y el potencial de reducción de la oxidación). Como resultado de estos procesos, los residuos se degradan o transforman. La tasa de degradación también depende de la composición de los residuos y conduce a la generación de gases lixiviados y de vertederos.

El lixiviado se genera a partir de la percolación del agua a través de los residuos después de la colocación y también incluye la humedad retenida en los residuos antes de su eliminación (EREF, 2022). La calidad del lixiviado dependiendo de la composición de los residuos sólidos, las tasas de precipitación, la hidrología del sitio, la compactación, el diseño de la cubierta, la edad de los residuos, los procedimientos de muestreo, la interacción del lixiviado con el medio ambiente y el diseño y operación de vertederos (Worell & Vesilind, 2012). Después de la recogida, el lixiviado debe tratarse en su lugar o enviarse al alcantarillado municipal para un tratamiento posterior.

El gas de vertedero producido durante la descomposición biológica de residuos sólidos municipales (MSW). Los modelos matemáticos e informáticos pueden predecir la composición del gas de vertedero, que se basa principalmente en la composición de los residuos depositados en vertederos y el contenido de humedad.

La Unión Europea trata de limitar la cantidad de residuos enviados al vertedero en un mínimo. La principal ley que entró en vigor en 1999 fue la Directiva sobre vertidos. La Directiva sobre

vertidos establece requisitos operativos estrictos para los vertederos con el objetivo de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente (CE, 2022).

### 3.4.2 Incineración y recuperación de energía

La mayor parte de MSW es combustible y se puede quemar con recuperación de energía en instalaciones de incineración de quemaduras masivas para reducir el volumen de residuos. Estos combustibles tienen un área de almacenamiento de residuos sólidos para almacenar y clasificar los residuos entrantes, una grúa para cargar los residuos en el bloque de combustión, una cámara de combustión compuesta por rejillas de fondo, el sistema de recuperación de calor de las tuberías, en la que el agua se convierte en vapor, el sistema de manejo de cenizas y el sistema de control de la contaminación del aire, que incluyen depuradores y filtros de bolsas para la eliminación de cenizas volantes y partículas.

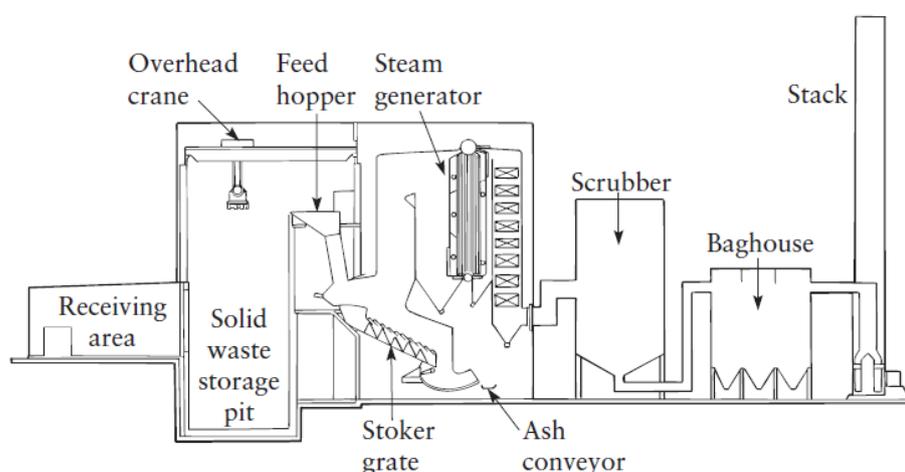


Figura 16: Un esquema típico de combustión de residuos sólidos municipales (Adapted from Worell & Vesilind, 2012).

Los residuos a la energía (WtE) o energía a partir de residuos (EfW) se definen como un proceso de quema de residuos con recuperación de energía. Los principales tipos de procesos WtE incluyen:

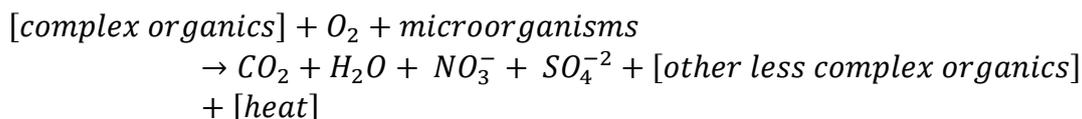
- coincineración de residuos en instalaciones de combustión (por ejemplo, centrales eléctricas) y en la producción de cemento y cal;
- incineración de residuos y coincineración en instalaciones específicas;
- digestión anaeróbica de residuos biodegradables
- producción de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos derivados de residuos, y
- otros procesos, incluida la incineración indirecta tras una fase de pirólisis o gasificación;

En cuanto a la Comisión Europea COM(2017)34, sobre el papel de los residuos en energía en la economía circular, solo la digestión anaeróbica con la producción de biogás se posiciona como opción de reciclaje según la jerarquía de residuos. Todos los demás tipos de procesos WtE están relacionados principalmente con la opción de recuperación. La incineración y la coincineración con una recuperación de energía limitada se colocan en la parte inferior de la

jerarquía bajo la opción de eliminación junto con el vertido de residuos. El proceso de quema abierto se desalienta en la Unión Europea debido a los problemas asociados con la alta contaminación del aire.

### 3.4.3 Compostaje y biometanización

El compostaje puede definirse como un proceso de degradación del material orgánico en presencia de los microorganismos al agua, dióxido de carbono y biomasa microbiana. En el compostaje, los microorganismos convierten materiales orgánicos en un producto valioso llamado «humus». La reacción básica es la siguiente (Worell & Vesilind, 2012):



El compostaje se produce principalmente en cuatro fases:

- Fase inicial** mesófila — En la fase inicial mesófila, las bacterias que descomponen la materia orgánica comienzan a reproducirse intensamente, la masa compostable se calienta y el pH disminuye.
- Fase** termófila — Durante la fase termófila, durante la cual la temperatura sube a 60-70.°C, la mayoría de los patógenos, plagas y parásitos en los desechos se matan y se destruyen las semillas de maleza.
- Fase de maduración mesofílica** — En la fase de maduración mesofílica, la temperatura se mantiene en 35-55.°C y comienza a disminuir debido al agotamiento de nutrientes. El contenido de compuestos persistentes disminuye con el tiempo.
- Refrigeración y después de la fase de maduración** — Durante las fases de enfriamiento y maduración, la actividad microbiológica se reduce aún más. La temperatura ya no supera los 40.°C incluso cuando se mezcla el compost. Las lombrices de tierra aparecen en el compost. Durante la post-maduración, el compost madura y se forma el «humus» más valioso.

Los principales sistemas de compostaje incluyen (Atalia et al., 2015):

- Ventanas abiertas: consiste en colocar una mezcla de materiales de desecho orgánicos en pilas largas y estrechas.
- Pila estática aireada: los desechos orgánicos se colocan en una pila que se airea al forzar el aire a través de las tuberías perforadas a intervalos regulares.
- En el compostaje de recipientes — el compostaje ocurre en diferentes reactores. Estos sistemas generalmente incluyen disposiciones para la aireación, mezcla, control de temperatura y contención de olores.
- Vermicompostaje — actividad combinada de microorganismos y lombrices de tierra.
- Biomineralización — Los nutrientes en forma de minerales solubles se utilizan que son absorbidos por el sistema radicular de suelo fértil bien mineralizado compost.

#### Biometanización

Degradación anaeróbica de la materia orgánica (sin oxígeno) llamada también biometanización. Los principales productos finales incluyen metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>), pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y algunos otros (Worell & Vesilind, 2012).

El proceso de digestión anaeróbica se puede describir en tres fases:

- Hidrólisis, es decir, las bacterias descomponen los compuestos orgánicos moleculares altos en compuestos moleculares bajos (monómeros).
- Acidogénesis, bacterias acetogénicas convertidas en la primera fase aparecieron productos degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono e hidrógeno.
- La metanogénesis, las bacterias convierten los ácidos orgánicos y alcoholes en ácido acético e hidrógeno molecular. Al final de esta fase, el metano se genera a partir de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

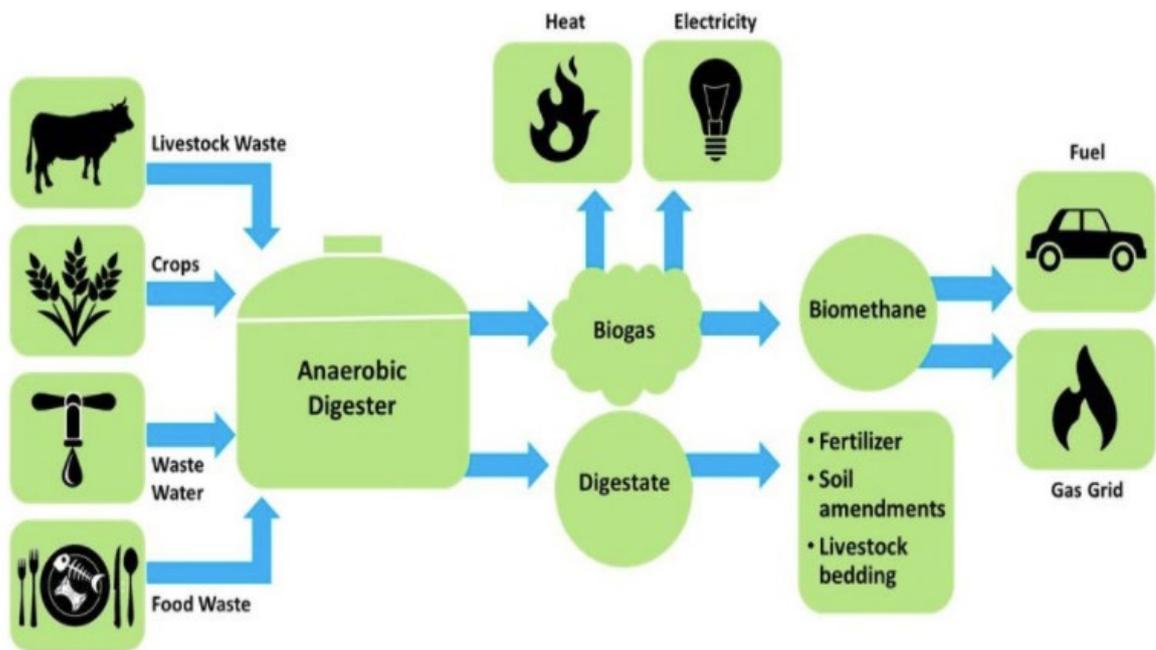


Figura 17: Proceso de digestión anaeróbica (Gráfico de Sara Tanigawa, EESI).

La principal materia prima para el proceso de digestión anaeróbica incluye los residuos de alimentos, los residuos de ganado, los residuos de cultivos y los lodos de depuradora de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

El biogás producido se puede utilizar en operaciones combinadas de calor y energía (CHP), o el biogás simplemente se puede convertir en electricidad utilizando un motor de combustión, una pila de combustible o una turbina de gas. Además, se puede modificar a gas natural renovable (RNG), o biometano mediante la eliminación de dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases traza. RNG se puede inyectar en la red de gas natural existente (incluidos los gasoductos) y se puede utilizar indistintamente con el gas natural convencional (EESI, 2017). Al igual que el gas natural convencional, el RNG se puede utilizar como combustible para vehículos después de convertirlo en gas natural comprimido (GNC) o gas natural licuado (GNL).

### 3.4.4 Reciclaje

El principio principal de la gestión de residuos en la UE para prevenir, reutilizar o reciclar la generación de RSU, siguiendo el principio de economía circular y minimizar los efectos negativos del uso de los recursos primarios, sustituyéndolos por materiales secundarios (EEE, 2022).

De conformidad con la Directiva marco sobre residuos 2008/98/CE, se entiende por reciclado cualquier operación de valorización mediante la cual los residuos se transforman en productos, materiales o sustancias, ya sea para fines originales o de otro tipo. Incluye el reprocesamiento de material orgánico, pero no incluye la recuperación de energía y el reprocesamiento en materiales que se utilizarán como combustibles o para operaciones de relleno. En Europa, la tendencia al reciclaje de diferentes flujos de residuos se cultiva en los últimos 10 años (Figura 18).

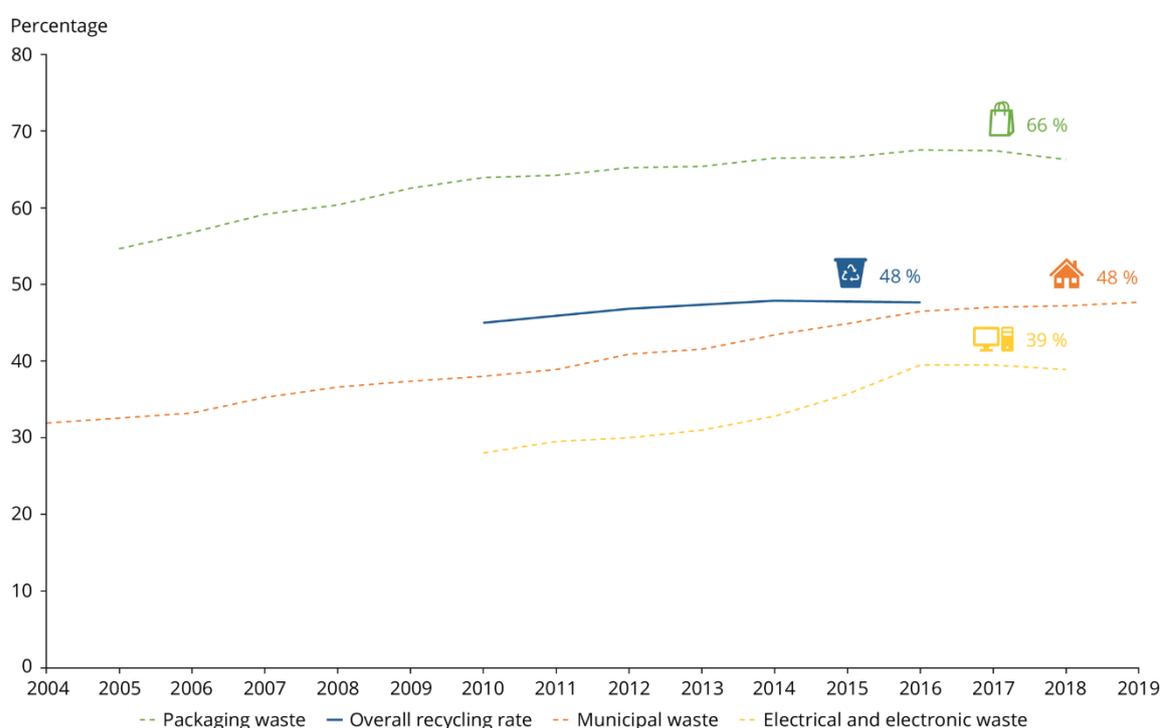


Figura 18: Tasas de reciclaje en Europa por flujo de residuos (Fuente: EEE, 2022).

## 4 Economía circular

### 4.1 El modelo lineal de producción y consumo

El crecimiento de la población obliga a modificar los sistemas de gestión que se han llevado a cabo hasta ahora. La población de la UE ha crecido en casi cien millones de personas desde la década de 1970. Este hecho tiene consecuencias directas en la generación de residuos: más población, más residuos. A pesar de los esfuerzos nacionales y de la UE, la cantidad de residuos generados no disminuye. La generación de residuos de todas las actividades económicas de la UE asciende a 2 500 millones de toneladas al año, y cada ciudadano produce en promedio media tonelada de residuos municipales.

Según la Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, los residuos municipales constituyen aproximadamente el 7-10 % del total de residuos generados en la Unión Europea.

Sin embargo, este flujo de residuos es uno de los más complejos de gestionar, y la forma en que se gestiona generalmente da una buena indicación de la calidad del sistema general de gestión de residuos de un país.

El consumo total de recursos de la UE, medido en términos de masa, se muestra en la figura 19.

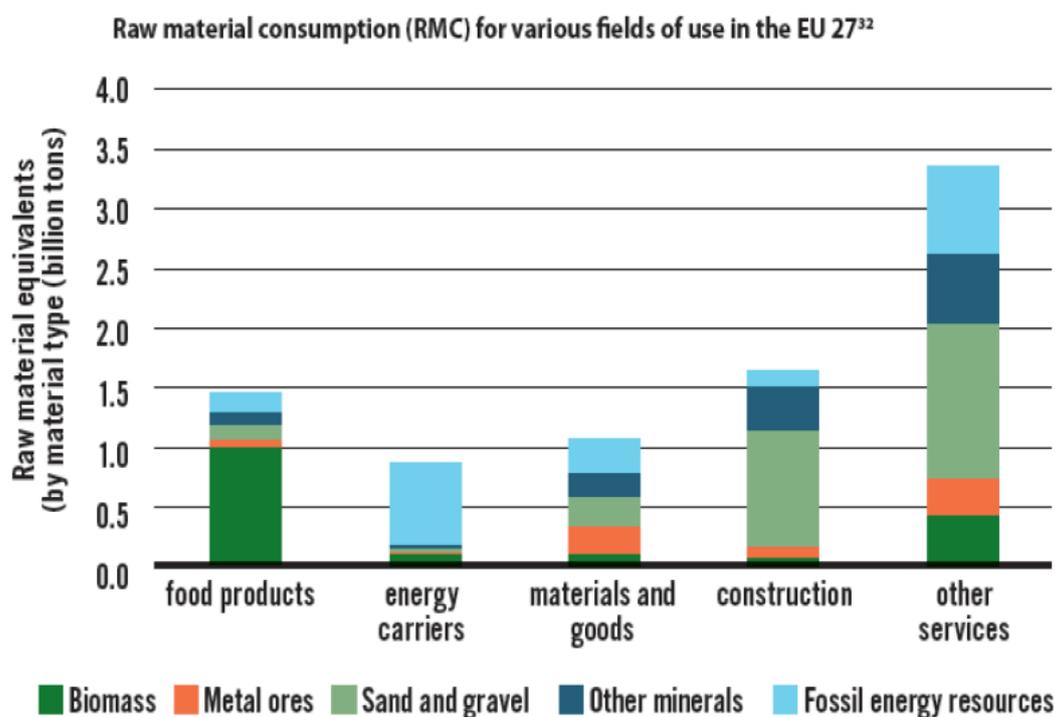


Figura 19: Consumo de materias primas (RMC) (Fuente: Oficina Europea de Medio Ambiente 2012).

La economía lineal tradicional, basada en el «take-make-dispose», y el consumo de grandes cantidades de energía y materias primas baratas que son fáciles de abastecer, ha sido el

elemento fundamental del desarrollo social e industrial, y ha generado niveles de crecimiento sin precedentes en la historia de la humanidad.

El modelo económico lineal tradicional se caracteriza principalmente por:

- Recursos baratos y fáciles de obtener.
- Combustibles fósiles.
- Extracción-Producción-Uso-Disposición.
- Sobreexplotación de materias primas.
- Alto volumen de residuos generados.



Figura 20: Esquema de economía lineal (Fuente: BIMgreen 2019).

En términos de cuestiones ambientales, el modelo lineal conlleva diferentes impactos que afectan a los recursos, el consumo y la producción.

**Recursos** relacionados:

- Gran cantidad de residuos.
- Sistemas de explotación tradicionales.
- Uso único de materias primas (solo una vez).
- Explotación incontrolada sin diseño previo.
- Alto impacto ambiental.
- Agotamiento de los recursos naturales y combustibles fósiles.

**Relacionados** con el consumo:

- Consumo incontrolado.
- No se reutiliza el producto.

**Producción** relacionada:

- Baja eficiencia de recursos y energía.
- Modelos de negocio tradicionales.

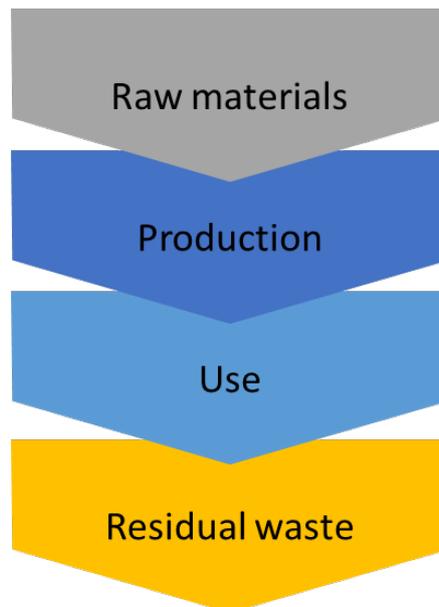


Figura 21: Esquema del modelo económico lineal (Fuente: Centro Tecnológico de Mármol y Piedra, 2018).

La economía lineal «take-make-dispose» está llegando a sus límites:

- Depende de grandes cantidades de materiales y energía baratos y de fácil acceso.
- 2025: El crecimiento de la población mundial (1.1bn) y el crecimiento de la clase media (3 mil millones):
  - 24 % mayor consumo de alimentos.
  - 47 % más de embalaje.
  - 41 % más de materiales al final de su vida útil (residuos).
- Los desafíos relacionados con los recursos para las empresas y las economías también crecen:
  - La presión sobre los recursos naturales se intensifica.
  - Reciclaje bajo y pobre -> Incapaz de mantener el stock de materiales de calidad.
  - Mayor volatilidad de precios-> mayor incertidumbre de inversión empresarial.
  - Los precios de las materias primas aumentaron un 150 % durante el período 2002-2010 (metales, alimentos y productos no alimentarios procedentes de la agricultura).

## 4.2 Economía circular: concepto, orígenes y principios

La economía planetaria está bloqueada en un sistema en el que todo, desde la economía productiva y la contratación, hasta la regulación y el comportamiento de las personas, favorece el modelo lineal de producción, distribución y consumo. Sin embargo, este bloqueo es cada vez más débil debido a la presión ejercida por la aparición de poderosas tendencias disruptivas. Es necesario aprovechar esta combinación favorable de factores económicos, tecnológicos y sociales para acelerar la transición hacia una economía circular, restaurativa y regenerativa, en la que los productos, subproductos y residuos se mantengan dentro del ciclo productivo el mayor tiempo posible, buscando su reutilización una y otra vez.

En una economía circular, los fabricantes diseñan productos para ser reutilizables. Por ejemplo, los dispositivos eléctricos están diseñados de tal manera que son más fáciles de reparar. Los productos y materias primas también se reutilizan tanto como sea posible. Por ejemplo, reciclando plástico en pellets para fabricar nuevos productos de plástico. En una economía circular, tratamos nuestro entorno de manera responsable. Por ejemplo, previniendo la basura en las calles o en el entorno natural.

Una economía circular funciona de acuerdo con el enfoque 3R de «Reducir, reutilizar y reciclar». La extracción de materiales se reduce, cuando es posible, mediante el uso de menos material, los productos están hechos de piezas y materiales reutilizados y, después de desechar un producto, los materiales y las piezas se reciclan. En una economía circular, el valor se crea centrándose en la retención de valor. Al mantener un flujo de material lo más puro posible durante la cadena de valor completa, se retiene el valor de este material. Los flujos de materiales puros se pueden utilizar varias veces para proporcionar una cierta funcionalidad o servicio, mientras que solo hacen una inversión.



Figura 22: Esquema del modelo económico circular (Fuente: Centro Tecnológico de Mármol y Piedra, 2018).

En una economía circular, se mejora la sostenibilidad mejorando la ecoefectividad del sistema. Esto significa que, además de minimizar el impacto negativo del sistema, se pone el foco en maximizar el impacto positivo del sistema mediante innovaciones radicales y cambios en el sistema.

En una economía circular, se pretende que la reutilización sea lo más alta posible. Una corriente residual debe reutilizarse para una función que es igual (reutilización funcional) o de un valor más alto (upcycling) que la función inicial de la corriente de material.

Esto asegura que el valor del material sea retenido o mejorado. Por ejemplo, el concreto se puede moler en granos que se utilizan para crear una pared similar a la anterior, o incluso un elemento constructivo más fuerte.

Economía circular: un nuevo concepto se caracteriza principalmente por:

- Distinción entre círculos técnicos y biológicos.
- Diseño circular.
  - Productos modulares, flujos de material más puros, desmontaje más fácil.
- Cada vez más personas que viven en áreas urbanas hacen que compartir, reparar y reciclar sea más fácil.
- Modelos de negocio innovadores: desde la propiedad hasta los sistemas de servicio basados en el rendimiento y el acceso.
- Competencias y tecnologías básicas a lo largo de ciclos y cascadas inversas: Etiquetas RFID para facilitar la identificación y el reciclaje; Impresión 3D para piezas de repuesto.

Las principales características de la Economía Circular son las siguientes:

- Mejorar el rendimiento económico al tiempo que se reduce el uso de los recursos.
- Luchar contra el cambio climático y reducir los impactos ambientales del uso de los recursos.
- Pasar de los combustibles fósiles al uso de energía procedente de fuentes renovables.
- Reutilización y reparación: encontrar una segunda vida para productos deteriorados.
- Hacer uso energético de residuos que no se pueden reciclar.
- Preservar y mejorar el capital natural para lograr la resiliencia a través de la diversidad.
- Optimizar el uso de los recursos y fomentar el uso de materiales de base biológica.

Hay algunos conceptos que son necesarios para la implementación del modelo de economía circular:

- **Concepto ecológico:** Considera los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.
- **Ecología industrial y territorial:** El establecimiento de un modo de organización industrial en el mismo territorio caracterizado por una gestión optimizada de las existencias y flujos de materiales, energía y servicios.
- **La economía de la «funcionalidad»:** Privilegiar el uso contra la posesión, la venta de un servicio frente a un bien.
- **El segundo uso:** Reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no correspondan a las necesidades iniciales de los consumidores.
- **La reutilización:** Reutilizar ciertos residuos o partes de ellos, que todavía pueden funcionar para el desarrollo de nuevos productos.
- **Reparación:** Encuentra una segunda vida a los productos dañados.
- **Reciclaje:** Aproveche los materiales que se encuentran en los residuos.
- **Valorización:** Aprovecha los residuos energéticos que no se pueden reciclar.

La economía circular surge de la escasez cada vez más evidente de recursos, la creciente demanda de materias primas y el hecho de que algunas de ellas son finitas, lo que lleva a la dependencia de terceros países.

Otra razón del auge de la economía circular es el impacto que tiene en el medio ambiente. La extracción y el uso de materias primas significa un aumento del consumo de energía y un aumento de las emisiones contaminantes.

La economía circular es beneficiosa tanto para el medio ambiente como para las sociedades, ya que es una forma de preservar y optimizar el uso de los recursos, promoviendo la eficiencia del sistema.

Los principios y los resultados declarados a través de la implementación de una economía circular son:

- Mantener siempre los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor.
- Controlar las existencias de materiales finitos y equilibrar los flujos de recursos renovables.
- Disociar el desarrollo económico mundial del consumo finito de recursos.

#### **Ventajas de la economía circular:**

La economía circular tiene muchas ventajas. La reducción de residuos y la reutilización de materiales se traducen en ahorros significativos, al tiempo que se reducen las emisiones anuales de gases de efecto invernadero.

Los consumidores también se benefician de productos más duraderos, lo que significa un mayor ahorro y una mayor calidad de vida.

#### **Desventajas de la economía circular:**

Lograr una economía circular y reducir el uso de los recursos a su vez significa limitar el consumo de energía y reducir la producción de residuos. Para muchos, esta reorientación de la productividad global es difícil de lograr.

Uno de los problemas a los que hay que hacer frente es que algunos productos son difíciles de reciclar, porque quienes los diseñan no valoran la gestión de residuos. Por otro lado, este modelo requiere una intensa colaboración interempresarial, que muchas empresas no están dispuestas a asumir.

Disociación del desarrollo económico, el consumo de recursos y el impacto ambiental:

The two-level 'decoupling' addressed by the European Commission's Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources (2006)

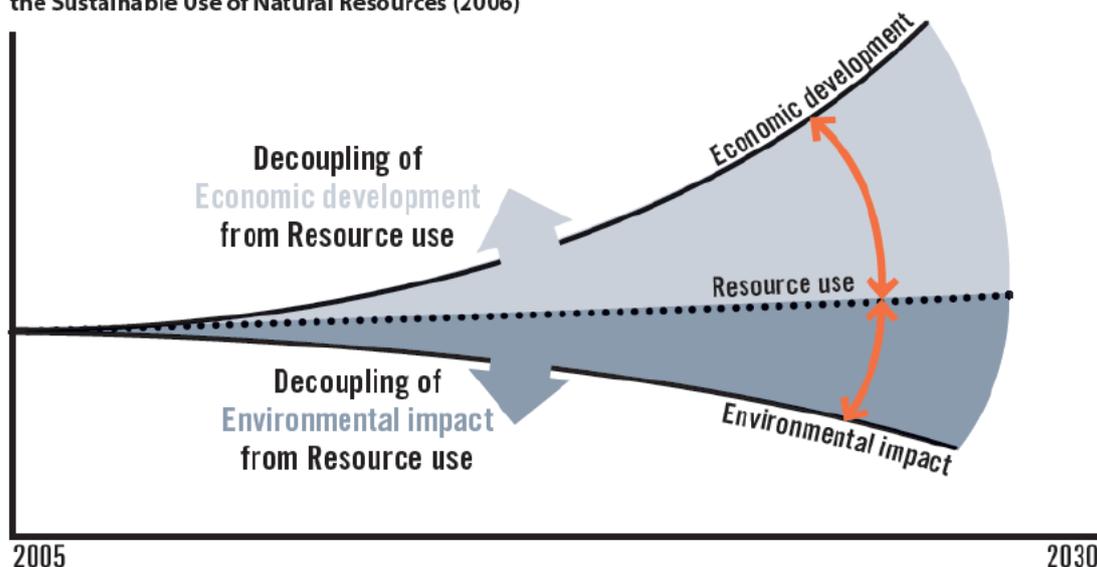


Figura 23: Disociación abordada por la CE (Fuente: Oficina Europea de Medio Ambiente, 2015).

Uno de los principios fundamentales que sustentan la economía circular es el **diseño**. Diseño en todas las etapas o aspectos del ciclo de vida de los productos.

#### Diseño y materiales:

- Evite los metales pesados como cadmio, plomo y sustancias peligrosas (RoHS).
- Utilización de materiales reciclados (metales, etc.).
- Reciclabilidad y recuperabilidad.
- Reducción de peso (desmaterialización).

#### Diseño, durabilidad y reparación:

- Diseño modular, componente estándar, fácil de reparar y de actualizar.
- Fácil de desmontar con herramientas comunes.
- Lista de materiales (BoM).
- Monomateriales y pocos materiales diferentes.

#### Diseño para el final de la vida útil:

- Evite las sustancias que hacen que el reciclaje sea costoso/problemático.
- Recogida de productos + organizar flujos de residuos para evitar el descenso del ciclo.
- Reutilización de componentes.

## 4.3 Retos y beneficios de los sistemas circulares

### 4.3.1 Desafíos

Actualmente, se hace cada vez más claro que la economía lineal ya no es un modelo sostenible dentro de los límites de nuestro planeta. Las desventajas de la economía lineal describen la

urgencia de un modelo alternativo, que puede interpretarse como oportunidades para la economía circular. Las principales desventajas de una economía lineal se encuentran en la falta de soluciones para la creciente escasez de materiales, el aumento de la contaminación, el aumento de la demanda de materiales y la creciente demanda de productos responsables.

En una economía lineal, la incertidumbre sobre la disponibilidad material crece. Esta incertidumbre se basa en el hecho de que el planeta tiene un número finito de materiales y su disponibilidad depende de varios mecanismos. Esta incertidumbre se llena con un aumento de las fluctuaciones de precios, el crecimiento de las industrias que dependen de materiales críticos, la interconexión de productos y procesos y el desarrollo geopolítico.

#### *Degradación de los ecosistemas*

Siguiendo el modelo lineal de 'take-make-dispose' conduce a la creación de residuos. Durante los procesos de producción y debido a la eliminación de productos se generan grandes flujos de material que no se utilizan sino que se queman o dejan en un vertedero de basura. Esto eventualmente conducirá a un exceso de montañas materiales inutilizables que sobrecargan los ecosistemas. Esto garantiza que el ecosistema se vea obstaculizado en la prestación de servicios esenciales del ecosistema (como proporcionar alimentos, materiales de construcción y refugio, y el procesamiento de nutrientes).

#### *Disminución de la vida útil de los productos*

En los últimos años, la vida de los productos disminuyó drásticamente. Esta es una de las fuerzas impulsoras detrás del creciente consumo de material en el mundo occidental. La vida útil de los productos sigue disminuyendo, por un proceso de retroalimentación positiva: Los consumidores quieren nuevos productos con más frecuencia y están utilizando sus productos «viejos» durante un período más corto. Esto se traduce en una menor necesidad de productos de calidad que se pueden utilizar a largo plazo, lo que estimula a los consumidores a comprar nuevos productos aún más rápido.

### 4.3.2 Beneficios

Una economía circular es un sistema económico donde los productos y servicios se comercializan en bucles cerrados o «ciclos». Una economía circular se caracteriza como una economía, que es regenerativa, por diseño, con el objetivo de retener el mayor valor posible de productos, piezas y materiales. Esto significa que el objetivo debe ser crear un sistema que permita la larga vida, la reutilización óptima, la renovación, la remanufactura y el reciclaje de productos y materiales.

#### *Bucles de cierre*

En la economía circular, los ciclos de materiales se cierran siguiendo el ejemplo de los ecosistemas naturales: Se eliminan sustancias tóxicas, no hay residuos porque todos los flujos residuales son valiosos como recurso, los productos se recuperan después de su uso para su reparación y refabricación para reutilizar los productos una segunda, tercera o cuarta vez y los flujos residuales se separan en un ciclo biológico y técnico.

#### *Pensamiento del sistema*

La economía circular pide pensamiento sistémico. Todos los actores (empresas, personas, organismos) forman parte de una red en la que las acciones de un actor afectan a otros

actores. En la economía circular, esto se considera en los procesos de toma de decisiones al incluir las consecuencias tanto a corto como a largo plazo de una decisión, teniendo en cuenta el impacto de la cadena de valor completa y con el objetivo de crear un sistema más resiliente, que sea eficaz a todas las escalas.

#### *Disociación del crecimiento económico*

El objetivo de una economía circular es desacoplar el crecimiento económico en el consumo de recursos centrándose en la retención de valor. Para asegurar los ecosistemas y el capital natural del que dependemos, más que el capital financiero es de valor.

El capital social y el capital natural también juegan un papel en la estabilidad de nuestros sistemas. En la economía circular, estos valores se reflejan en los costos de los productos y servicios. La energía necesaria para alimentar este ciclo debe ser renovable por naturaleza.

Se proponen varias estrategias para lograr la transición de la economía lineal a la circular:

#### **Estrategias transversales**

- B) Normativa.
- R&T&D.

#### **Estrategias directas**

- Gestión de residuos.
- Actores económicos.
- Los consumidores.

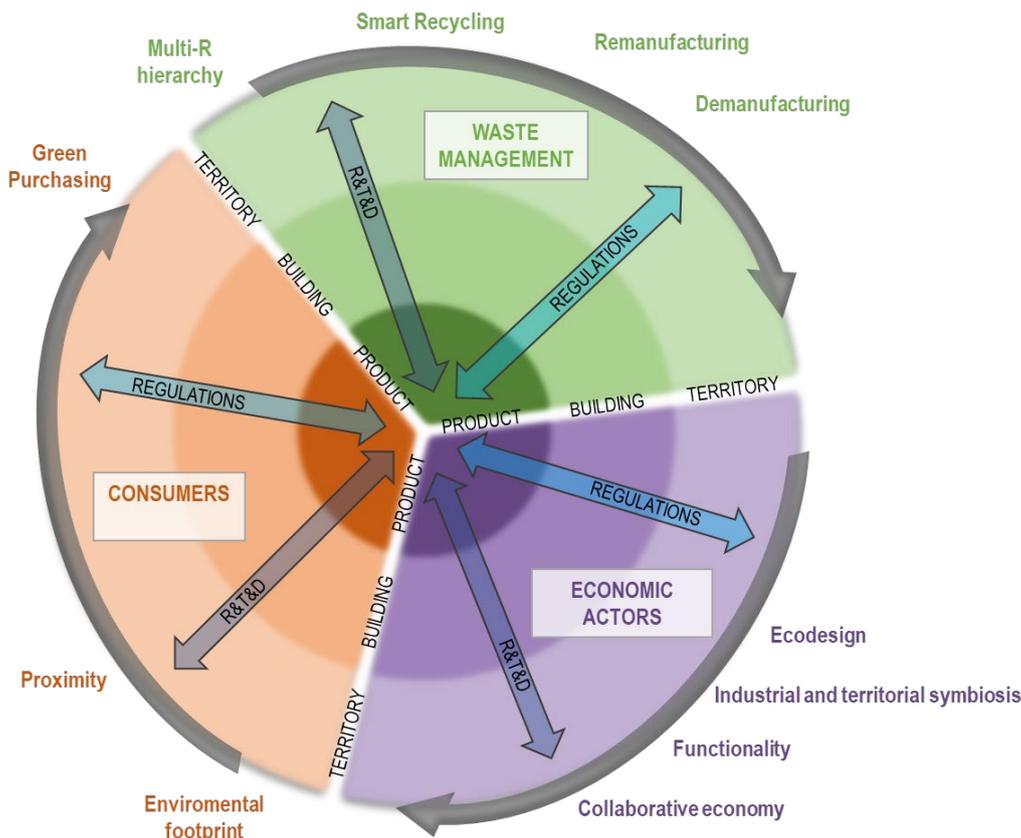


Figura 24: Resumen de la transición a la economía circular (Fuente: Caparrós-Pérez, D., 2017).

#### 4.3.3 Estrategias transversales

En 2015, la Comisión Europea adoptó el Plan de Acción de la UE para la Economía Circular (diciembre de 2015) con el objetivo de señalar las diferentes medidas (hasta un total de 54) sobre las que la Comisión Europea estima que es necesario actuar en los próximos 5 años para avanzar en la economía circular. En esta dirección, la Comisión identificó cinco ámbitos prioritarios (plásticos, residuos alimentarios, materias primas críticas, construcción y demolición, biomasa y bioproductos), a través de las siguientes Comunicaciones:

— COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES.

Hacia una economía circular: Un programa de cero residuos para Europa/\* COM/2014/0398 final \*/

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52014DC0398>

— Comunicación DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES (COM/2015/0614 final).

Cerrar el bucle: un plan de acción de la UE para la economía circular.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614&qid=1524124780099>

— Informe DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES (COM/2017/033 final).

Sobre la aplicación de la acción para la economía circular

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0033&qid=1524125695611>

— COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. COMUNICACIÓN N.º 29, 2018. MARCO DE SEGUIMIENTO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR; COM N.º 29.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A29%3AFIN>

— COMISIÓN DE COMUNIDADES EUROPEAS. COMUNICACIÓN N.º 98, 2020. UN NUEVO PLAN DE ACCIÓN PARA UNA ECONOMÍA CIRCULAR PARA UNA EUROPA MÁS LIMPIA Y COMPETITIVA.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Además, numerosas iniciativas europeas promueven la circularidad a través de convocatorias de propuestas y programas. La Comisión Europea adoptó el nuevo Plan de Acción para la Economía Circular (PACE) en marzo de 2020. Es uno de los principales componentes del Pacto Verde Europeo, la nueva agenda europea para el crecimiento sostenible. La transición de la UE a una economía circular reducirá la presión sobre los recursos naturales y creará crecimiento sostenible y empleo. También es un requisito previo para alcanzar el objetivo de neutralidad climática de la UE para 2050 y para detener la pérdida de biodiversidad.

El nuevo Plan de Acción anuncia iniciativas a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos. Se centra en la forma en que se diseñan los productos, promueve los procesos de la economía circular, fomenta el consumo sostenible y pretende garantizar la prevención de los residuos y el mantenimiento de los recursos utilizados en la economía de la UE durante el mayor tiempo posible. El Plan de Acción introduce medidas legislativas y no legislativas dirigidas a ámbitos en los que la acción a escala de la UE aporta un valor añadido real.

#### 4.3.4 Estrategias directas

Entre los conscientes de todos los agentes involucrados en el proceso, se identifican tres categorías de modelos de negocio circulares:

- Modelos de salida circulares.
- Modelos de Innovación Circular.
- Modelos de uso circular.

##### 4.3.4.1 *Gestión de residuos*

###### *Modelos de salida circular*

Estos modelos de negocio se centran en la producción y el valor añadido de la fase posterior al uso de un producto. En estos modelos de negocio, los ingresos se generan a través de la transformación de productos después del uso en nuevos productos o recursos útiles para agregar valor, reducir costos o reducir el desperdicio. El desarrollo de la logística inversa es esencial para este modelo.

Ejemplos de modelos de negocio en esta categoría incluyen:

- Proveedor de material recapturado: Vende materiales y componentes recapturados para ser utilizados en lugar de material virgen o reciclado.
- Reacondicionar y mantener: Reacondiciona y mantiene productos usados para venderlos.
- Instalación de reciclaje: Transforma los residuos en materias primas. Se pueden crear ingresos adicionales a través de un trabajo pionero en tecnología de reciclaje.
- Proveedor de recuperación: Proporciona sistemas de recogida y servicios de recogida para recuperar recursos útiles de productos o subproductos desechados;
- Ciclo de vida del soporte: Vende consumibles, repuestos y complementos para apoyar el ciclo de vida de los productos de larga duración.

#### 4.3.4.2 Agentes económicos

##### *Modelos de Innovación Circular*

Los modelos de innovación circular se centran en la fase de desarrollo de un producto. Los productos están diseñados para durar más tiempo y son fáciles de mantener, reparar, actualizar, reacondicionar, remanufacturar o reciclar. Además, se desarrollan y obtienen nuevos materiales, por ejemplo, materiales de base biológica o totalmente reciclables.

Ejemplos de modelos de negocio en esta categoría incluyen:

- Diseño del producto: Proporciona productos que están diseñados para que sean de larga y útil vida o sean fáciles de mantener, reparar, actualizar, reacondicionar o remanufacturar.
- Diseño del proceso: Desarrolla procesos que aumentan el potencial de reutilización y reciclabilidad de productos, subproductos y flujos de residuos industriales y de otro tipo.
- Suministros circulares: Proporciona materiales de entrada como energía renovable, de base biológica, materiales menos intensivos en recursos o totalmente reciclables.

#### 4.3.4.3 Consumidores

##### *Modelos de uso circular*

Estos modelos de negocio se centran en la fase de uso mediante el uso óptimo del producto y el mantenimiento de un valor añadido. Estos modelos de negocio permiten conservar la propiedad del producto (por ejemplo, mediante el mantenimiento de un producto en lugar de venderlo) y asumir la responsabilidad del producto a lo largo de su vida útil (por ejemplo, a través de servicios de mantenimiento o complementos para prolongar la vida útil de un producto).

Ejemplos de modelos de negocio en esta categoría incluyen:

- Producto-como-servicio: Ofrece rendimiento del producto en lugar del producto en sí mismo a través de una combinación de productos y servicios. La propiedad del producto es conservada por el proveedor de servicios.
- Vender y recomprar: Vende un producto sobre la base de que se volverá a comprar después de un período.
- Plataformas de intercambio (proveedor de acceso): Permite una mayor tasa de utilización de los productos al habilitar u ofrecer uso compartido, acceso o propiedad.

- Extensión de la vida útil: Extiende la vida útil de los productos y componentes a través de la reparación, el mantenimiento o la actualización.
- Instalación de rastreo: Prestación de servicios para facilitar el rastreo, la comercialización y el comercio de materias primas secundarias.

#### 4.3.4.4 *Objetivos finales*

Se promoverán las siguientes acciones hacia la transición hacia una economía circular:

- Avanzar en la **reducción del uso de recursos naturales no renovables**, reutilizando en el ciclo productivo los materiales contenidos en los residuos como materias primas secundarias si se garantiza la salud de las personas y la protección del medio ambiente.
- Promover el **análisis del ciclo de vida** de los productos y la incorporación de criterios de diseño ecológico, reduciendo la introducción de sustancias nocivas en su fabricación, facilitando la reparabilidad de los bienes producidos, prolongando su vida útil y posibilitando su recuperación al final de esta.
- Fomentar la **aplicación efectiva del principio de jerarquía de residuos**, promover la prevención de su generación, fomentar la reutilización, reforzar el reciclado y promover su trazabilidad.
- Promover directrices que **augmenten la innovación y la eficiencia general de los procesos productivos**, mediante la adopción de medidas como la implementación de sistemas de gestión ambiental.
- Promover formas innovadoras de **consumo sostenible**, incluidos productos y servicios sostenibles, así como el uso de infraestructuras y servicios digitales.
- Promover un modelo de **consumo responsable**, basado en la transparencia de la información sobre las características de los bienes y servicios, su duración y eficiencia energética, utilizando medidas como el uso de la etiqueta ecológica.
- Facilitar y promover la creación de canales adecuados para facilitar el **intercambio de información** y la coordinación con las administraciones, la comunidad científica y tecnológica y los agentes económicos y sociales, para crear sinergias que favorezcan la transición.
- Difundir **la importancia de pasar de la economía lineal a una economía circular**, promoviendo la transparencia de los procesos, la sensibilización y sensibilización de los ciudadanos.
- Fomentar el uso de **indicadores comunes, transparentes y accesibles** que permitan conocer el grado de implementación de la economía circular.
- Promover la incorporación de **indicadores de impacto social y ambiental** derivados del funcionamiento de las empresas, para evaluar más allá de los beneficios económicos generados en ellas, debido a su compromiso con la economía circular.

## 5 Economía circular y gestión de RSU

### 5.1 Gestión de MSW en un CE

Hasta ahora, el modelo económico actual de producción y consumo sigue siendo lineal, es decir, los recursos se extraen, procesan, utilizan y, en su mayor parte, al final de su vida útil, normalmente se eliminan mediante incineración o vertederos. En consecuencia, los materiales se retiran de la circulación y se destruyen, incluso si la utilización térmica produce al menos energía (Hollins et al., 2017). En este sentido, la gestión de los residuos sólidos municipales es una parte importante del plan de la UE para la transformación hacia una economía circular (CE).

El desafío clave en CE es establecer la percepción de que los residuos no deben considerarse como un «problema» sino como un «recurso valioso». La idea fundamental es mantener los materiales y productos durante el mayor tiempo posible y lo más alto posible en el sistema de producción y consumo basado en «...*compartir, arrendar, reutilizar, reparar, reacondicionar y reciclar, en un bucle (casi) cerrado...*» (Bourguignon, 2016). Para lograr esa perspectiva, la gestión de MSW en un CE tendrá que convertirse en una parte integral de un modelo circular de producción y consumo, como se muestra en la Figura 25.

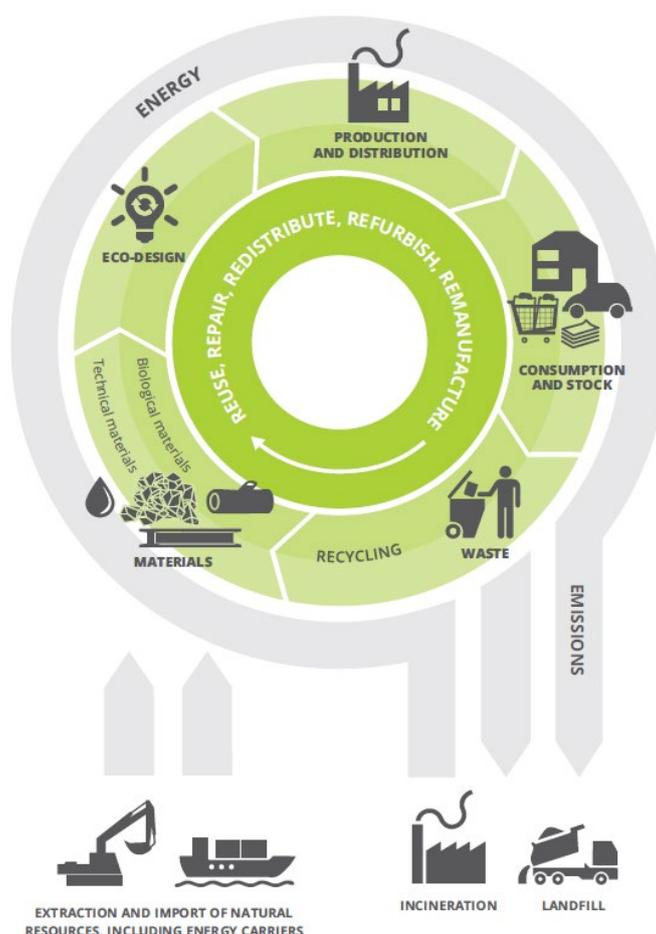


Figura 25: Un modelo simplificado de economía circular para materiales y energía (Fuente: EEE, 2017).

En consonancia con los principios de la CE, la base de la gestión de residuos de la UE, de acuerdo con la Directiva marco sobre residuos, es la «jerarquía de residuos» de cinco etapas, que establece un orden de preferencia para la gestión y eliminación de residuos.

La prevención de residuos se ha establecido como una prioridad, con la reducción como prioridad, a través de la jerarquía de residuos, después de extender la vida útil de recursos valiosos a través de la reutilización, reparación, renovación o remanufactura es fundamental para promover la CE. Debe superarse el bloqueo de infraestructura, especialmente si la demanda de generación y reciclaje de energía compite con priorizar la reutilización, la reparación y la renovación (Hollins et al., 2017). Sin embargo, CE no puede existir sin mercados funcionales de materiales secundarios, aunque hoy en día los materiales vírgenes en muchos casos son más baratos que los recuperados (Silva Filho et al., 2021). La introducción de la jerarquía de residuos cambió la gestión de residuos desde el procesamiento de materiales de gran volumen, de bajo valor a materiales de bajo volumen y de alto valor (Berg et al., 2020).

## 5.2 Políticas e instrumentos en la gestión de los RSU hacia la CE

Sobre la base del trabajo realizado desde 2015, la Comisión Europea adoptó un nuevo Plan de Acción para la Economía Circular, el 11 de marzo de 2020, que incluye medidas que abarcan todo el ciclo, desde la producción y el consumo hasta la gestión de residuos y el mercado de materias primas secundarias. En cuanto a la gestión de residuos, la atención se centra en evitar por completo los residuos y transformarlos en un mercado de alta calidad y buen funcionamiento de las materias primas secundarias. En este sentido, el Plan de Acción establece un modelo armonizado a escala de la UE para la recogida selectiva de residuos y el etiquetado y propone medidas para minimizar las exportaciones de residuos de la UE y hacer frente a los traslados ilegales.

El Plan de Acción incluye cuatro acciones legislativas que introducen nuevos objetivos de gestión de residuos en relación con la reutilización, el reciclado y el vertido, el refuerzo de las disposiciones sobre prevención de residuos y la ampliación de la responsabilidad del productor, y la racionalización de las definiciones, las obligaciones de notificación y los métodos de cálculo de los objetivos.

Los actos legislativos más importantes y recientes<sup>13</sup> relacionados con la gestión de los RSU y la CE son los siguientes:

- Com(2020) 798/3, Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a las pilas y baterías y a los residuos de pilas y baterías, por el que se deroga la Directiva 2006/66/CE y se modifica el Reglamento (UE) 2019/1020
- COM/2020/98 final, Un nuevo plan de acción para la economía circular para una Europa más limpia y competitiva, Comunicación de la Comisión al Parlamento

---

<sup>13</sup>Cabe señalar que existen ciertas diferencias entre las directivas, reglamentos, decisiones y recomendaciones de la UE ([https://europa.eu/european-union/law/legal-acts\\_en](https://europa.eu/european-union/law/legal-acts_en)). La mayor parte de la legislación de la UE con respecto a la economía circular y los RSU consiste en Directivas y ofrece mucho margen para que los Estados miembros nacionales de la UE cumplan el objetivo y la velocidad de aplicación dejando la «transposición» a los legisladores nacionales.

Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones

- Reglamento Delegado (UE) 2020/2174 de la Comisión, de 19 de octubre de 2020, por el que se modifican los anexos IC, III, IIIA, IV, V, VII y VIII del Reglamento (CE) n.º 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a los traslados de residuos
- Directiva 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 medio ambiente
- Directiva 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases
- Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE relativa a los residuos
- Directiva 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 2018/849 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican las Directivas 2000/53/CE relativas a los vehículos al final de su vida útil, 2006/66/CE relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores, y 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
- Com(2017) 34 final, *El papel de los residuos en energía en la economía circular*, Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones

Sobre la base de las últimas Directivas y sus modificaciones, se ha fijado el siguiente calendario:

- Recogida separada de biorresiduos antes del 31/12/2023 y de textiles y residuos peligrosos de los hogares antes del 1/1/2025
- Preparación para la reutilización y el reciclado de residuos municipales hasta un mínimo del 55 % en peso para 2025, el 60 % para 2030 y el 65 % para 2035, respectivamente.
- Reciclado de residuos de envases de al menos un 65 % para el 31 de diciembre de 2025 y un 70 % para el 31/12/2030
- Reducir los vertederos a un máximo del 10 % de los residuos municipales generados para 2035
- Prohibición del vertido de residuos aptos para el reciclado efectiva a partir de 2030
- Tasa de reciclado por material para 2025: Plásticos: EL 50 %; De madera: EL 25 %; Metales ferrosos: 70 %; De aluminio: EL 50 %; De vidrio: 70 %; Papel y cartón: 75 %
- Tasa de reciclado por material de aquí a 2030: Plásticos: 55 %, madera: 30 %, metales ferrosos: 80 %, aluminio: 60 %, vidrio: 75 %, Papel y cartón: 85 %
- Recogida separada de botellas de plástico de hasta 3 lt, para lograr un 90 % de reciclado para 2029 con un objetivo provisional del 77 % para 2025. Estas botellas deben contener al menos un 25 % de plásticos reciclados como materia prima para 2025 (para botellas de PET) y un 30 % para 2030 (para todas las botellas).

Para alcanzar los objetivos mencionados, se utilizan diversos instrumentos a escala europea, regional y nacional (cuadro 1).

Cuadro 1: Instrumentos políticos utilizados a escala europea, regional y nacional para la gestión de residuos

<b>Instrumento de política</b>	<b>Ejemplos de gestión de residuos</b>
<i>Legislación</i>	<p>Directivas y reglamentos utilizados para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● establecer objetivos y requisitos de notificación para flujos de residuos individuales                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● (por ejemplo, objetivos de reciclado y objetivos de reducción de vertederos)</li> <li>● establecer regímenes de responsabilidad ampliada del productor</li> <li>● establecer instrumentos económicos</li> <li>● fomentar la mejora del diseño ecológico</li> </ul> </li> </ul>
<i>Incentivos económicos</i>	Inversión en infraestructuras de recogida de residuos apoyadas por el Fondo de Cohesión, financiación para I+D e innovación
<i>Instrumentos basados en el mercado</i>	Impuestos de vertederos y tasas de entrada, impuestos y tasas de incineración, impuestos sobre bolsas de plástico; Esquemas de pago a medida que lanzas (PAYT)
<i>Requisitos de información</i>	Información sobre el reciclado de los consumidores sobre envases, notificación voluntaria de la producción de residuos y fijación de objetivos por parte de las empresas
<i>Herramientas voluntarias</i>	Campañas de sensibilización para el público, compromisos voluntarios de la industria, diseño de productos y etiquetado (por ejemplo, a través de la etiqueta ecológica de la UE) suministro de información sobre buenas prácticas, iniciativas dirigidas por las empresas

Para un análisis más detallado, los lectores interesados se refieren a BlockWaste entregable «O1.A1— [Estudio comparativo de las regulaciones de gestión de residuos sólidos municipales \(MSW\) en cada país](#)».

### 5.3 Tecnologías digitales para una gestión circular de MSW

La transición del sector de gestión de RSU a la CE sin duda requerirá la aplicación de tecnologías de Industria 4.0, que complementarán o, en algunos casos, sustituirán tecnologías y procesos actualmente en uso (Mastos et al., 2021). Hoy en día, varias tecnologías relacionadas principalmente con la recuperación de los flujos de materiales están bien citadas. Por ejemplo, las tecnologías de clasificación mecánica, por ejemplo, pantallas de tambores, separadores permanentes de corriente magnética y electromagnética, tanques de flotación, sensores de rayos X e infrarrojos infrarrojos o infrarrojos cercanos (NIR), etc., se utilizan en plantas de tratamiento biológico mecánico (MBT) para hacer frente a los residuos mixtos con el fin de separar los materiales técnicos y la fase biológica y limitar la cantidad residual que queda para su eliminación en vertederos. En función de su configuración, las plantas MBT pueden proporcionar el rendimiento de reciclaje, recuperación y desvío biodegradable

requerido. Tecnologías de clasificación similares se utilizan en envases ligeros y plantas de clasificación de plástico. Las plantas de envasado ligeras pueden clasificar y clasificar diferentes tipos de residuos de envases que se han recogido como flujos de reciclaje mezclados y las plantas de clasificación de plástico pueden clasificar diferentes tipos y grados de polímero plástico (Hollins et al., 2017). Además de la separación, existen tecnologías de reciclaje bien establecidas para el procesamiento y reciclaje de materiales técnicos como vidrio, aluminio, acero e incluso plástico (principalmente PET y HDPE). Por ejemplo, en el caso de los plásticos se suele emplear el reciclaje mecánico, mientras que las tecnologías que son más sofisticadas emergen para eliminar contaminantes y permitir que el plástico recuperado se convierta en polímeros de grado alimentario (Hollins et al., 2017). Finalmente, existen diversas tecnologías para generar valor (en un sentido más general) a partir de biorresiduos, como la digestión anaeróbica, el compostaje y la valorización (aunque muchas de las tecnologías para la valorización de residuos están surgiendo y actualmente no se utilizan a gran escala). Sin embargo, cabe señalar que, independientemente de las tecnologías utilizadas, la mejora de los objetivos CE, tanto cualitativo como cuantitativo, requiere, en mayor o menor medida, la recogida separada de los flujos de residuos. Esta es la razón por la cual la legislación pertinente enfatiza y exige la recogida separada.

Se espera<sup>que</sup> la 4ª Revolución Industrial (Industria 4.0) contribuya de muchas maneras a una mejor gestión de los RSU en el contexto de la CE. Berg et al. (2020) identificó tres áreas principales de digitalización en la gestión de RSU: comunicación, recogida de residuos y procesos internos (Tabla 2).

*Cuadro 2: Principales áreas de digitalización en la gestión de RSU*

Comunicación	Recogida de residuos	Procesos internos
Sitios web	Vehículos equipados con sensores	Facturación
Aplicaciones móviles	Planificación de rutas	Contabilidad
Integración en otros servicios	Planificación de recursos	Controlando
Aplicaciones de redes sociales de terceros	Seguimiento de inventario	Proceso de pedidos
	Documentación	Documentación

(Fuente: Berg et al., 2020)

Berg et al. (2020) argumentan que la industria de residuos se verá afectada principalmente por seis tecnologías digitales:

- Robótica: permitirá producir flujos de residuos de alta pureza y facilitará el proceso de recogida y la logística involucrada en el manejo de residuos.
- Internet de las cosas (IoT): mejorará la logística a través de contenedores y contenedores compatibles con sensores, el procesamiento electrónico de la documentación y la creación de redes de camiones de residuos.
- Computación en la nube: Puede ayudar en el almacenamiento y procesamiento de datos de sensores o soluciones de software para las tareas de gestión, recopilación, administración y documentación.

- Inteligencia artificial y redes neuronales: AI y NN pueden proporcionar soluciones en la clasificación de aplicaciones mediante el uso de reconocimiento de imágenes, vehículos autónomos y robots de barrido, en optimización de la recogida de residuos, en servicios de atención al cliente, en servicios de información ciudadana, etc.
- Análisis de datos: apoya la disposición de los vehículos de recogida de residuos, la evaluación de los datos de los sensores para las plantas de clasificación automatizadas, el control de las instalaciones de incineración de residuos, el registro de las cantidades de residuos y los flujos de materiales, etc.
- Tecnología de contabilidad distribuida («Blockchain»): facilitará el rastreo de los flujos de materiales y la transmisión de datos sobre materiales y productos en la cadena de suministro, ya que el ciclo de vida de un producto se almacenará en Blockchain.

Mavropoulos y Nilsen (2020) mencionan que la revolución digital ya ha transformado la gestión de residuos, al menos en cierta medida. Por ejemplo, en los últimos años, los rastreadores GPS proporcionan información logística en tiempo real sobre camiones y contenedores de residuos. Los sensores miden las cantidades de residuos dentro de contenedores y contenedores, creando nuevas oportunidades para la optimización de rutas. Robots, escáneres y algoritmos de reconocimiento óptico están encontrando su camino en instalaciones automatizadas de clasificación MSW. Newton (2021) señala que las innovaciones de la Industria 4.0 aportan importantes mejoras en el sector de gestión de residuos mediante la identificación de fuentes y patrones de residuos, al mantener la infraestructura de residuos en condiciones óptimas y al reducir el consumo de energía, entre otros, a través de sensores IoT y algoritmos de análisis de datos. Jamrozik (2019) ofrece un ejemplo de la ciudad de Nueva York, donde los contenedores alimentados por IoT con monitoreo y notificaciones en tiempo real lograron aumentar la capacidad total de basura en casi un 200 % y, al mismo tiempo, reducir la frecuencia de recolección por contenedor en un 50 %.

## 6 Referencias y fuentes para mayor lectura e información

### 6.1 Referencias

- Atalia K.R., Buha D.M., Bhavsar K.A., Shah N.K., (2015). A Review on Composting of Municipal Solid Waste (en inglés). Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT). e-ISSN: 2319-2402,p- ISSN: 2319-2399.Volumen 9, número 5 Ver. Yo (mayo. 2015), PP. 20-29. ¿POR QUÉ? 10.9790/2402-095 12029
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P.p, Le Blevenec, K., Vrancken, K. (2020). Gestión digital de residuos, Informe Eionet — ETC/WMGGE 2020/4, Centro Temático Europeo Residuos y Materiales en una Economía Verde, Mol, Bélgica.
- Bourguignon, D. (2016). Cerrando el bucle: Nuevo paquete de economía circular. Servicio de Estudios del Parlamento Europeo (EPRS), información al Parlamento Europeo. ([https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS\\_BRI%282016%29573899\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI%282016%29573899_EN.pdf))Accedida el 30 de septiembre de 2021
- Caparrós-Pérez D. (2017). Viabilidad para generar territorios sostenibles. Aplicación ecoeficiente de materiales y sistemas de construcción en desarrollo urbano y rehabilitación.
- CEWEP, (2021). Resumen de los impuestos y prohibiciones de los vertederos en los Estados miembros de la UE. Disponible en: <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2021/10/Landfill-taxes-and-bans-overview.pdf>
- Ciuta, S., Apostol, T. & Rusu, Valentin. (2015). Caracterización del flujo de MSW urbano y rural para la mejora de la colección separada. B) Sostenibilidad. 7. 916-931. 10.3390/su7010916. ([https://www.researchgate.net/publication/271528610\\_Urban\\_and\\_Rural\\_MSW\\_Stream\\_Characterization\\_for\\_Separate\\_Collection\\_Improvement](https://www.researchgate.net/publication/271528610_Urban_and_Rural_MSW_Stream_Characterization_for_Separate_Collection_Improvement)) Acceso a septiembre de 2021.
- Davies, S. La Gran Crisis de Manejo de Caballo de 1894 | Stephen Davies <https://fee.org/articles/the-great-horse-manure-crisis-of-1894/> (consultado el 13 de febrero de 2020)
- CE, (2022). Residuos de vertederos. Disponible en: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/landfill-waste\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/landfill-waste_en)
- EEE, (2021). Desviación de residuos de vertederos en Europa. Agencia Europea de Medio Ambiente. Disponible en:<https://www.eea.europa.eu/ims/diversion-of-waste-from-landfill>
- EEE, (2022). Reciclaje de residuos en Europa. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/ims/waste-recycling-in-europe>
- EESI, (2017). Ficha informativa Biogás: Conversión de Residuos en Energía. Disponible en: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy>
- EREF, (2022). Introducción al vertedero municipal de residuos sólidos. Disponible en: <https://erefdn.org/introduction-municipal-solid-waste-landfilling-2/>

Ergene Şentürk, D., & Alp, E. (2016). Planificación para el cierre de vertederos no controlados en Turquía para reducir los impactos ambientales, gestión de residuos e investigación: la revista de la Asociación Internacional de Residuos Sólidos y Limpieza Pública, ISWA, 34(11), 1173-1183, <https://doi.org/10.1177/0734242X16665915>.

Comisión Europea COM(2017) 34. El papel de los residuos en energía en la economía circular. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN#footnote17>

Comisión Europea, (2022). Prevención y gestión de residuos. Disponible en: [https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index_en.htm)

Agencia Europea de Medio Ambiente (2017). Circular por diseño. Productos en la economía circular. Informe de la AEMA n.º 6/2017, Copenhague (<https://www.eea.europa.eu/publications/circular-by-design>) Accedido el 29 de septiembre de 2021

Unión Europea, Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj>)

Unión Europea, 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 residuos (Texto pertinente a efectos del EEE) (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>)

Eurostat (2021). Estadísticas de Residuos Municipales. ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)) Accedida el 20 de enero de 2022.

Eurostat (2022). Generación de residuos por categoría de residuos, peligrosidad y actividad de la NACE Rev. 2 ([http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env\\_wasgen](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env_wasgen)) [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env\\_wasgen](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env_wasgen)) Accedida el 29 de enero de 2022.

Eurostat, (2022). Estadísticas de residuos municipales. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)

Hollins, O., Lee, P., Sims, E., Bertham, O., Symington, H., Bell, N., Pfaltzgraff, L., y Sjögren, P. (2017). Hacia una economía circular — Gestión de residuos en la UE. Parlamento Europeo. ([https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/581913/EPRS\\_STU%282017%29581913\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/581913/EPRS_STU%282017%29581913_EN.pdf)) Accedido el 29 de septiembre de 2021

Hunt, R. G., et al., (1990). Estimaciones del volumen de MSW y componentes seleccionados en latas de basura y vertederos. Franklin Associates, Ltd., con The Garbage Project for the Council for Solid Waste Solutions.

Jamrozik, N. (2019). Gestión inteligente de residuos (<https://medium.com/@NadJam/smart-waste-management-17db1bd5bc6b#:>) Accedida el 16 de noviembre de 2021

- Kalyuzhnyi, Sergey & Epov, A & Sormunen, Kai & Kettunen, R & Rintala, Jukka & Privalenko, V & Nozhevnikova, Alla & Pender, S & Colleran, E. (2003). Evaluación del estado actual de los vertederos operativos y cerrados en Rusia, Finlandia e Irlanda en relación con la contaminación del agua y las emisiones de metano. *Ciencia y tecnología del agua: una revista de la Asociación Internacional de Investigación de la Contaminación del Agua*. 48. 37-44 (<https://iwaponline.com/wst/article-abstract/48/4/37/10950/Evaluation-of-the-current-status-of-operating-and?redirectedFrom=fulltext>).
- Kaza S., Yao, L., Perinaz Bhada-Tata, P. y Van Woerden, F. (2018). *Qué desperdicio 2.0. Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta 2050*. Grupo del Banco Mundial. (<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>) Accedido el 15 de septiembre de 2021.
- Klundert, A. van de, Anschutz, J. (2001) *Gestión integrada de desechos sostenibles — el concepto*. Gouda, 2001, 44 p.
- Mastos, T. D., Nizamis, A., Terzi, S., Gkortzis, D., Papadopoulos, A., Tsagkalidis, N., Ioannidis, D., Votis, K. y Tzovaras, D. (2021). Introducción de una aplicación de una solución industrial 4.0 para la gestión circular de la cadena de suministro. *Journal of Cleaner Production*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126886>
- Mavropoulos, A., (2015). Pérdida de salud: el trágico caso de los vertederos, ISWA ([https://www.researchgate.net/publication/281774422\\_Wasted\\_Health\\_the\\_tragic\\_case\\_of\\_dumpsites](https://www.researchgate.net/publication/281774422_Wasted_Health_the_tragic_case_of_dumpsites)). Consultado el 25 de enero de 2022.
- Mavropoulos, A. y Nilsen, A.W. (2020). *Industria 4.0 y Economía Circular: ¿Hacia un futuro sin desperdicio o un planeta derrochador?* International Solid Waste Association Series, Wiley, Nueva York, págs. 448.
- Newton, E. (2021). ¿Cómo está la industria 4.0 optimizando la industria de residuos? *The IOT Magazine* (<https://theiotmagazine.com/how-is-industry-4-0-optimizing-the-waste-industry-bfd4d35770f4>) Accedido el 15 de diciembre de 2021
- Shaoli De, Biswajit Debnath, (2016). Prevalencia de riesgos para la salud asociados con la eliminación de residuos sólidos: un estudio de caso de Kolkata, India, *Procedia Environmental Sciences*, Volumen 35, pp.201-208, ISSN 1878-0296, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.081>.
- Sharma, K.D. y Jain, S. (2020), "Generación, composición y gestión de residuos sólidos municipales: el escenario global", *Social Responsibility Journal*, vol. 16 N.º 6, págs. 917-948. <https://doi.org/10.1108/SRJ-06-2019-0210>
- Silva Filho, C. RV, Appelqvist, B. y Woolridge, A. (2021). El futuro del sector de la gestión de residuos: tendencias, oportunidades y desafíos para la década 2021-2030. *Asociación Internacional de Residuos Sólidos — ISWA*. (<https://www.iswa.org/wp-content/uploads/2021/10/ISWA-The-Future-of-Waste-Management-1.pdf>) Accedido el 15 de noviembre de 2021
- STOA, (2017). *Hacia una economía circular — Gestión de residuos en la UE. Evaluación de opciones científicas y tecnológicas*. EPRS/Servicio de Estudios del Parlamento Europeo. 140 pp. doi: 10.2861/978568

- Tamiru, A. (2001). El impacto de la eliminación incontrolada de residuos en la calidad de las aguas superficiales en Addis Abeba, Etiopía, SINET: Ethiopian Journal of Science, vol. 24 N.º 1, <https://doi.org/10.4314/sinet.v24i1.18177>
- Tchobanoglous, G. y Kreith, F. (2002). Manual de Gestión de Residuos Sólidos. 2da Edición, Manuales de McGraw Hill. En Nueva York.
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (1998). Caracterización de los residuos sólidos municipales en los Estados Unidos: Actualización de 1997, Oficina Municipal e Industrial de Residuos Sólidos, Informe N.º EPA530-R-98-007.
- Vinti G, Bauza V, Clasen T, Medlicott K, Tudor T, Zurbrügg C, Vaccari M., (2021). Gestión de Residuos Sólidos Municipales y Resultados Adversos de Salud: Una revisión sistemática. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(8):4331. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084331>.
- Wagner, Jean-Frank & Rettenberger, G & Reinert, P. (2007). Tecnología moderna de vertederos — comportamiento de vertederos de residuos pretratados mecánico-biológicos, Procedimientos Cerdeña 2007, 11.º Simposio Internacional de Gestión de Residuos y Residuos, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia, 1-5 de octubre de 2007 ([https://www.researchgate.net/publication/267996591\\_MODERN\\_LANDFILL\\_TECHNOLOGY\\_-\\_LANDFILL\\_BEHAVIOR\\_OF\\_MECHANICAL-\\_BIOLOGICAL\\_PRE-TREATED\\_WASTE](https://www.researchgate.net/publication/267996591_MODERN_LANDFILL_TECHNOLOGY_-_LANDFILL_BEHAVIOR_OF_MECHANICAL-_BIOLOGICAL_PRE-TREATED_WASTE)).
- Warell, W.A. & Vesilind, P.A., (2012). Ingeniería de residuos sólidos segunda edición. Cengage Learning (en inglés). ISBN-13: 978-1-4390-6215-9.
- Directiva marco sobre residuos (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, relativa a los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (Texto pertinente a efectos del EEE). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
- Zbicinski, I., Stavenuiter, J., Kozłowska, B., van de Coevering, H., (2006). Diseño del producto y evaluación del ciclo de vida. The Baltic University Press © 2006. Impreso por Nina Tryckeri, Uppsala 2006. ISBN 91-975526-2-3
- Ziraba, A.K., Haregu, T.N. & Mberu, B., (2016). Un examen y un marco para comprender los posibles efectos de la mala gestión de los desechos sólidos en la salud de los países en desarrollo. Arch Public Health 74, 55, <https://doi.org/10.1186/s13690-016-0166-4>.

## 6.2 Otras fuentes

### Vídeos

Seminario web: Introducción a la gestión inteligente de residuos | WasteHero:

<https://www.youtube.com/channel/UCbKk5uAsVfRmkJLOg0DsdXQ>

Economía circular y gestión de residuos sólidos:

<https://www.youtube.com/watch?v=1UePkisQqJs>

Economía circular en la gestión de residuos:

<https://www.youtube.com/watch?v=fpDrUwd1uq4>

¿Puede una economía circular hacer obsoleta la basura?:

[https://www.youtube.com/watch?v=JgcWmE\\_2T6Q](https://www.youtube.com/watch?v=JgcWmE_2T6Q)

Hacia una economía circular: gestión de residuos en la UE:

[https://www.youtube.com/watch?v=8pxM0\\_uRzbE](https://www.youtube.com/watch?v=8pxM0_uRzbE)

Gestión de residuos y economía circular en POLIMI (Parte 1):

[https://www.youtube.com/watch?v=yQJOKEJhQc&list=RDCMUcOKtBGblWkIkE-Klf-S0Fvg&start\\_radio=1&rv=yQJOKEJhQc&t=36](https://www.youtube.com/watch?v=yQJOKEJhQc&list=RDCMUcOKtBGblWkIkE-Klf-S0Fvg&start_radio=1&rv=yQJOKEJhQc&t=36)

Gestión de residuos 4.0 y tendencias tecnológicas: medición de residuos impulsada por la IA:

<https://www.youtube.com/watch?v=H95YRZydijg>

Robots de reciclaje — Las empresas recurren a los robots para ayudar a ordenar reciclables y

residuos — Robotics de residuos: <https://www.youtube.com/watch?v=QbKA9uNgzYQ>

Red de Innovación en Robótica e IA | Uso de RAI para apoyar la gestión de residuos:

<https://www.youtube.com/watch?v=YI62S5BU178>

Estudio de caso: Gestión de residuos basada en IoT para la ciudad inteligente de Santander:

<https://www.youtube.com/watch?v=lmk9kMO4MsY>

Un nuevo sistema de gestión de residuos inteligentes basado en IOT e IA:

<https://www.youtube.com/watch?v=WVWycisdIA>

Impacto ambiental del lixiviado en vertederos:

<https://www.youtube.com/watch?v=QYBvntdO6YM>

¿Cómo funciona un vertedero?

<https://www.youtube.com/watch?v=n8KdoMYWnE> de <https://www.youtube.com/watch?v=n8KdoMYWnE>

Aprenda los principios de la generación de gas de vertedero:

<https://www.youtube.com/watch?v=p-CQqXf5N4E>

Cómo se drenan los gases y líquidos de los vertederos:

[https://www.youtube.com/watch?v=QHWxQgbmo\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=QHWxQgbmo_k)

Ventajas y desventajas de la incineración de residuos:

<https://www.youtube.com/watch?v=6vzcbgBAewU>

Impactos y limitaciones del reciclaje:

<https://www.youtube.com/watch?v=1biGAcRIM3I>

Qué desperdicio 2.0: Todo lo que debe saber sobre la gestión de residuos sólidos:

<https://www.youtube.com/watch?v=1CSm4GG2VrU>

¿Por qué no quemamos nuestra basura?:

<https://www.youtube.com/watch?v=OPVUrO-7SM> de <https://www.youtube.com/watch?v=OPVUrO-7SM>

Video sobre la Jerarquía de Residuos:

<https://www.youtube.com/watch?v=LaT07IeDVR4>

Breve introducción a los vertederos:

<https://youtu.be/2Ot2C4FKzts>

Descomposición de productos orgánicos en un vertedero:

<https://youtu.be/A2J74wxQ9-4>

Lixiviación del vertedero:

<https://youtu.be/C-j1jGB8CiM>

Gas de vertedero:

<https://youtu.be/8z7lbX5CSQo>

Residuos a la energía — explicación del proceso:

<https://youtu.be/DROZUstnsnw>

Residuos a la energía: Dentro de la planta de SYSAV en Malmo, Suecia:

[https://youtu.be/l8\\_i1gU3gRg](https://youtu.be/l8_i1gU3gRg)

Proceso de conversión de la pirólisis de residuos a energía:

<https://youtu.be/7P5WF53Kfdl>

Residuos a la Energía por Gasificación Avanzada:

<https://youtu.be/vVvCEkKxWs0>

Conferencia «RDF de residuos sólidos municipales» de Dirk Lechtenberg:

<https://youtu.be/MwT3lepTFag>

Tratamiento de residuos orgánicos (18videos) disponible:

[https://youtube.com/playlist?list=PLNG\\_YQG6XtkXxCFHJCy2APfkxYJwsrRrj](https://youtube.com/playlist?list=PLNG_YQG6XtkXxCFHJCy2APfkxYJwsrRrj)

Reciclaje de residuos municipales:

<https://youtu.be/bxF3-wdxUKk>

Modelo de economía lineal:

<https://youtu.be/eETqWSDwCh4>

Explicando la economía circular y cómo la sociedad puede repensar el progreso | Animated

Video Essay: <https://youtu.be/zCRKvDyyHml>

Economía circular: Más allá del reciclaje:

<https://youtu.be/eOgXtJ5kGk>

¿Qué es un modelo económico lineal?

[https://youtu.be/q\\_6GalOImPc](https://youtu.be/q_6GalOImPc)

Definición de la economía lineal vs circular:

[https://youtu.be/ff\\_H07BrJOE](https://youtu.be/ff_H07BrJOE)

Cómo pasar de una economía lineal a una economía circular:

<https://youtu.be/ECHiWnSvklo>

## Políticas, legislación e instrumentos de la UE

Plan de acción para la economía circular:

[https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en)

Residuos y reciclaje: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling_en)

Directiva marco sobre residuos: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en)

Cierre del ciclo — Plan de acción de la UE para la economía circular COM/2015/0614 final: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>

Marco de seguimiento de la economía circular: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/indicators/monitoring-framework>

Comisión Europea. Comisión de las Comunidades Europeas. Comunicación N.º 398, 2014. Hacia una economía circular: Un programa de cero residuos para Europa; Com n.º 398; Comisión Europea: Bruselas, Bélgica, 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52014DC0398>

Comisión Europea. Comisión de las Comunidades Europeas. Comunicación N.º 614, 2015. Cierre del Plan de Acción de la UE para la Economía Circular; No lo sé. 614; Comisión Europea: Bruselas, Bélgica, 2015. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>

Comisión Europea. Informe DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES (COM/2017/033 final) — Sobre la aplicación de la Acción para la Economía Circular, 2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0033&qid=1524125695611>

Comisión Europea. Comisión de las Comunidades Europeas. Comunicación N.º 29, 2018. Marco de seguimiento de la economía circular; Com n.º 29; Comisión Europea: Bruselas, Bélgica, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A29%3AFIN>

Comisión Europea. Comisión de las Comunidades Europeas. Comunicación N.º 98, 2020. Un nuevo plan de acción para la economía circular para una Europa más limpia y más competitiva; Com n.º 98; Comisión Europea: Bruselas, Bélgica, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Comisión Europea. Ley de Residuos. [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-law\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-law_en)

Estudio sobre la modelización de los impactos económicos y ambientales del consumo de materias primas:

[https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource\\_efficiency/pdf/RMC.pdf](https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/RMC.pdf)

## Libros/Papeles/Informes

Berg, H., Bendix, P., Jansen, M., Le Blévenec, K., Bottermann, P., Magnus-Melgar, M., Pohjalainen, E. y Wahlström, M. (2021). Liberar el potencial de la Industria 4.0 para

reducir el impacto ambiental de la producción, Informe Eionet — — ETC/WMGE 2021/5, Centro Europeo de Temas Residuos y Materiales en una Economía Verde, Mol, Bélgica. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/unlocking-the-potential-of-industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production/@@download/file/Final%20for%20website.pdf>

Agencia Europea de Medio Ambiente — EEE (2016). Gestión de residuos municipales en los países europeos. Agencia Europea de Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste>

Agencia Europea de Medio Ambiente (2016). Más de la eficiencia menos material de los recursos en Europa. Resumen 2015 de las políticas, instrumentos y objetivos en 32 países, informe de la AEMA, n.º 10/2016. <https://www.eea.europa.eu/publications/more-from-less>

Agencia Europea de Medio Ambiente — EEE (2020). Gestión de residuos. Agencia Europea de Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/waste-management>

Agencia Europea de Medio Ambiente — EEE (2020). Reciclaje de residuos municipales. Agencia Europea de Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/recycling-of-municipal-waste>

Oficina Europea de Medio Ambiente — EEB (2018). Hacia un marco de política de productos de la UE que contribuya a la economía circular. <https://eeb.org/publications/79/resource-efficiency/89942/briefing-on-the-eu-product-policy-framework.pdf>

ISWA (2019). Cómo la Industria 4.0 transforma el sector de residuos, Asociación Internacional de Residuos Sólidos. [https://www.pac.gr/bcm/uploads/ind\\_4-0\\_final\\_compressed\\_web.pdf](https://www.pac.gr/bcm/uploads/ind_4-0_final_compressed_web.pdf)

Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible — WBCSD (2018). Riesgos lineales. [https://docs.wbcsd.org/2018/06/linear\\_risk\\_report.pdf](https://docs.wbcsd.org/2018/06/linear_risk_report.pdf)

### Otras fuentes

<https://www.epa.gov/landfills/municipal-solid-waste-landfills#whatis>

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000Q3ZF.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976%20Thru%201980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C76THRU80%5CTXT%5C00000004%5C2000Q3ZF.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1>

[https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/msw\\_infographic\\_jan2021-sm.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/msw_infographic_jan2021-sm.pdf)

<https://www.eea.europa.eu/soer/2015/countries-comparison/waste>

<https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

[https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/challenges\\_to\\_the\\_solid\\_waste\\_sector.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/challenges_to_the_solid_waste_sector.html)

[https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)

<https://www.iswa.org/climate-change-and-waste-management/?v=f214a7d42e0d>

<https://www.colorado.edu/ecenter/2021/04/15/hidden-damage-landfills>

<https://www.epa.gov/report-environment/wastes>

[https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate\\_change\\_xsum.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate_change_xsum.pdf)

<https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-018-0175-y>

Organización Mundial de la Salud (2021). Residuos sólidos. En: Compendio de la OMS y otras orientaciones de las Naciones Unidas sobre salud y medio ambiente, Ginebra. (plazo [de https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who\\_compendium\\_chapter4\\_v2\\_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc\\_5](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who_compendium_chapter4_v2_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc_5) ). Consultado el 26 de enero de 2022.

Residuos municipales generados en los países de la UE (kg/capita) en 2005 y 2020

[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/policy-context>

«Generation Awake» — la campaña de sensibilización de la Comisión Europea sobre la eficiencia de los recursos:

[https://ec.europa.eu/environment/generationawake/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/generationawake/index_en.htm)

Ejemplo de Sistema de Depósitos en Estonia: <https://eestipandipakend.ee/en/how-does-the-deposit-system-work/>

Fundación de Investigación y Educación Ambiental (EREF) — Introducción al vertedero municipal de residuos sólidos: <https://erefdn.org/introduction-municipal-solid-waste-landfilling-2/>

Portal EIONET — Evaluación de la capacidad de incineración de residuos y de los traslados de residuos en Europa: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/assessment-of-waste-incineration-capacity-and-waste-shipments-in-europe>

Springer Link — Estado y oportunidades para la recuperación energética de residuos sólidos municipales en Europa: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12649-018-0297-7>

Biorresiduos en Europa - <https://www.compostnetwork.info/policy/biowaste-in-europe/>

El caso para aumentar el reciclaje: Estimación del potencial de reciclaje en Europa: <https://www.eea.europa.eu/publications/the-case-for-increasing-recycling>

Límites del reciclaje 2020: <https://trinomics.eu/project/2119-limits-of-recycling/>

Gestión integrada de residuos para una ciudad inteligente:

<https://www.classcentral.com/course/youtube-integrated-waste-management-for-a-smart-city-47757/classroom>