

Análisis de la gestión de residuos sólidos urbanos y la repercusión de las emisiones contaminantes en Europa

Aguirre Arrabal, Cristina (aguiarr@ceu.es)

García-Centeno, María Carmen (garcen@ceu.es)

Inchausti Tabuenca, Elena (inctab@ceu.es)

Rodríguez Sánchez, Sonia (sonia.rodriguezsanchez@ceu.es)

Departamento de Matemática y Ciencia de Datos

Universidad San Pablo-CEU, CEU University

RESUMEN

La cantidad de residuos sólidos en las áreas urbanas está incrementándose de forma acelerada, resultado del aumento de la población, los cambios en los patrones de consumo, el desarrollo económico y el aumento en los ingresos de los hogares. A medida que una sociedad consume más materiales, demanda más recursos y genera mayores cantidades de contaminantes y desechos. Este trabajo tiene como objetivo analizar estadísticamente las variables que tienen influencia en la generación de los residuos sólidos urbanos en los veintisiete países de la Unión Europea.

Ante un aumento de la población mundial y un ritmo de consumo imparable, las empresas deben aplicar la economía circular, ofreciendo productos sostenibles y recuperables, y los ciudadanos han de ayudar y deben ser conscientes de la importancia de reducir al mínimo la generación de residuos.

El residuo cero será imposible, pero su minimización si es posible. Es esencial cumplir con la jerarquía de residuos de la UE, que implica reducir al mínimo los efectos negativos de la generación y la gestión de los residuos y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos.

ABSTRACT

The amount of solid waste in urban areas is increasing rapidly, a result of population growth, changes in consumption patterns, economic development and increases in household income. As a society consumes more materials, it demands more resources and generates greater amounts of pollutants and waste. This work aims to statistically analyze the variables that influence the generation of urban solid waste in the twenty-seven countries of the European Union.

Faced with an increase in the world's population and an unstoppable rate of consumption, companies must apply the circular economy, offering sustainable and recoverable products, and citizens must help and must be aware of the importance of reducing waste generation to a minimum.

The zero residual will be impossible, but its minimization is possible. It is essential to comply with the EU waste hierarchy, which involves minimizing the negative effects of waste generation and management and improving efficiency in the use of resources.

Palabras claves:

Residuos; Reciclado; Emisiones; Contaminación; Índice de Desarrollo Humano.

Keywords:

Waste; Recycling; Emissions; Pollution; Human Development Index.

Área temática: Referencia A505

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

DRS	Debris Removal System (sistema de devolución de depósitos)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDH	Índice de Desarrollo Humano
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PIB	Producto Interior Bruto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
UE	Unión Europea
WTE	Waste-to-Energy (valorización energética)

1. INTRODUCCIÓN

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Comisión Europea en la Agenda 2030, marcan las líneas de trabajo de los países miembros para reducir el impacto medioambiental, como consecuencia de la producción de residuos sólidos urbanos, causada por el crecimiento económico y la mala gestión de estos. Los principales propósitos son: reducir la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción y reciclado, disminuir a la mitad el desperdicio de alimentos y aminorar el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando atención a la gestión de los residuos urbanos.

Se entiende por destino final de los residuos, al conjunto de operaciones encaminadas a su eliminación o al aprovechamiento de determinados recursos contenidos en ellos. Costa et. al (1995). Para lograr una gestión efectiva y ordenada de los residuos es importante conocer su tipología y composición, con la finalidad de poder identificarlos y ser claramente entendidos. Moreno et. al (2021).

El trabajo de Pires et. al (2010) realiza un exhaustivo análisis de la bibliografía editada hasta la fecha, así como de los modelos de reciclaje y tratamientos de residuos urbanos en la Unión Europea. Entre los diferentes tratamientos empleados se puede destacar:

- Tratamiento mecánico-biológico: es un proceso que combina la clasificación mecánica y la biológica. Primero, los residuos se someten a un proceso de separación mecánica, donde se separan los materiales reciclables y se eliminan los materiales no deseables. Después, los residuos restantes se someten a un proceso biológico donde se descomponen mediante microorganismos para producir biogás y compost. Es una buena opción para reducir la cantidad de residuos enviados a los vertederos, pero puede ser costoso de implementar. Este tratamiento no se considera directamente en la notificación de los datos de los países, sino que se notifican según las partes que van a los tratamientos finales (incineración, vertedero, reciclaje, y compostaje).

- Backfilling o relleno: es utilizar residuos adecuados para recuperar zonas excavadas, los residuos son utilizados como sustitutos de otros materiales. Eurostat (2011).

- Incineración sin recuperación de energía: es el proceso térmico que solo trata de reducir volumen y riesgo, emite y no obtiene valor. Parlamento Europeo (2005).

- Incineración con recuperación de energía: Este proceso consiste en quemar los residuos a altas temperaturas en una instalación especializada, conocida como incinerador. Los residuos se transforman en ceniza y gases, que se pueden recuperar como energía térmica. La incineración puede ser eficaz para reducir la cantidad de residuos y generar energía, pero puede producir emisiones de gases tóxicos y cenizas peligrosas. Necesita una alta inversión.

- Vertido controlado: en este proceso, los residuos se depositan en un vertedero especialmente diseñado para minimizar los impactos ambientales. Los residuos se compactan y se cubren con una capa de tierra para reducir los olores y prevenir la liberación de gases. El vertido controlado es una opción económica, pero puede ser dañino para el medio ambiente si no se gestiona adecuadamente. Se necesitan grandes superficies fuera de las ciudades y no aprovecha los recursos contenidos en los residuos.

- Compostaje: este proceso implica la descomposición biológica de residuos orgánicos para producir compost, un abono orgánico rico en nutrientes que se utiliza en la agricultura y jardinería. Los residuos orgánicos se mezclan con otros materiales, como hojas y ramas, y se mantienen en un ambiente cálido y húmedo para promover la descomposición, reduciendo el volumen y el peso del material. El compostaje es una opción respetuosa con el medio ambiente y produce un producto útil, pero no es adecuado para todos los tipos de residuos. Tchobanoglous et. al (1994).

- Reciclaje: este proceso de valorización tiene como objetivo la recuperación de materiales útiles, tanto de forma directa como indirecta, de los residuos sólidos urbanos (RSU), reduciendo la cantidad de residuos que se envían a los vertederos o incineradores. Este proceso comienza con la separación de los residuos en diferentes tipos de materiales, como papel, plástico, vidrio, metal, etc. Luego, los materiales reciclables se clasifican, se limpian y se preparan para su reutilización en la producción de nuevos productos.

Las ventajas del reciclaje de residuos urbanos son diversas. En primer lugar, ayuda a reducir la cantidad de residuos que se envían a los vertederos, lo que reduce los costos asociados con la gestión de residuos y disminuye el impacto ambiental de los vertederos. Además, el reciclaje ayuda a conservar los recursos naturales al evitar la necesidad de extraer nuevos materiales para la fabricación de productos. También reduce la cantidad de energía necesaria para producir nuevos productos, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Parlamento Europeo (2008).

Valorizar un residuo es optimizar sus propiedades o características para poder darle una utilidad o función concreta. Se trata de optimizar el tratamiento dado para obtener nuevas materias primas o generar energía. La valorización es el aprovechamiento de los residuos para reincorporarlos de nuevo al ciclo productivo con un impacto positivo en la salud o en el medioambiente o incluso generando beneficios económicos. La directiva europea 2008/98/CE del 19 de noviembre define el objetivo de la valorización como *“aquel que pueda servir con una finalidad útil a sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habría utilizado para cumplir*

una función particular”. En general, cualquier residuo no peligroso que sea susceptible de poder ser reciclado o recuperable en otro material, es valorizable.

A través del reciclaje, la recuperación, la reutilización o la conversión a energía es posible valorizar muchos residuos. La no valorización de los residuos hará que estos acaben en vertederos. En función del objetivo, la valorización se divide en dos tipos:

- valorización energética: transforma los residuos no aptos para el reciclaje en energía a través de la incineración.

- valorización de residuos: transforma en materias primas los residuos sólidos no peligrosos.

Los envases, el papel, el cartón o el vidrio pueden ser reciclados y la materia orgánica, mediante el compostaje o digestión aeróbica, también se puede valorizar.

En este trabajo, se plantea un análisis de la situación de los países de la UE y las variables que determinan el aumento de los residuos sólidos urbanos, comparando los países que a fecha de hoy han cumplido con las expectativas de la Comisión, observando el modelo que emplean para conseguir reducir las emisiones de agentes contaminantes y valorizar los residuos como fuente de energía.

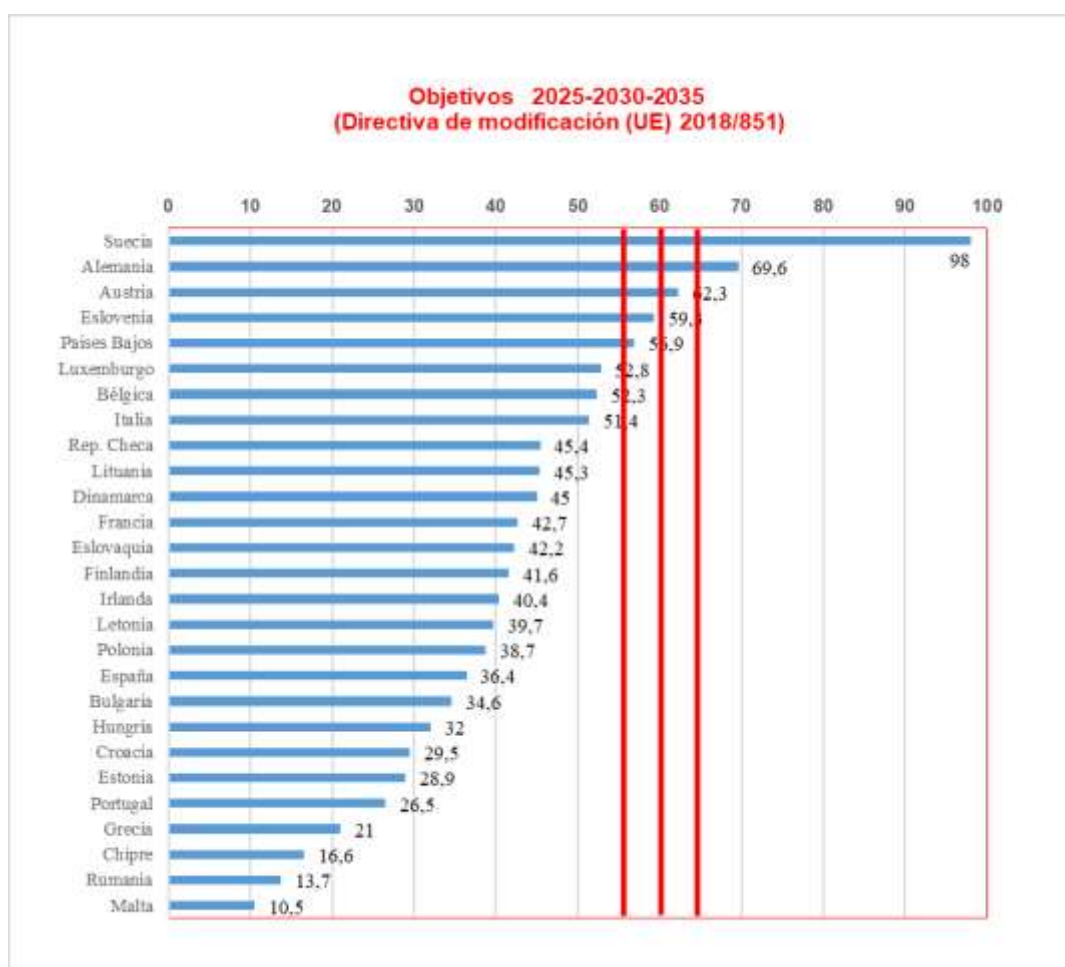
Después de esta introducción el trabajo se estructura de la siguiente forma. En el apartado siguiente se muestra el tratamiento de los residuos en los países de la Unión Europea. En el apartado tres se analizan las variables y datos que afectan a la generación de residuos en los países de la UE y los resultados del modelo estimado para explicar la influencia de diferentes variables en la generación de residuos y finalmente, se ofrecen las principales conclusiones.

2. TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS EN LOS PAÍSES DE LA UE

La directiva 2008/98/CE sobre los residuos establece un marco jurídico para el tratamiento de los residuos en la UE y prioriza de más a menos favorable las acciones a seguir: prevenir, reutilizar, reciclar, valorizar y eliminar.

En 2020, según datos de Eurostat, Europa generó 225,7 millones de toneladas de residuos municipales (un 1% más que en el año anterior y un 14% más que en 1995). El reciclaje de materiales se mantuvo similar al año anterior, aumentando el tratamiento de compostaje, siendo 107 millones de toneladas las tratadas con ambos tratamientos. Los residuos depositados en vertederos fueron de 121 millones de toneladas (un 58 % menos que en el año 1995).

Gráfico 1. Porcentaje de reciclado Residuos Sólidos Urbanos incluido composting y aerobio (2020)



Fuente: Eurostat Municipal waste by waste management operations (env_wasmun).

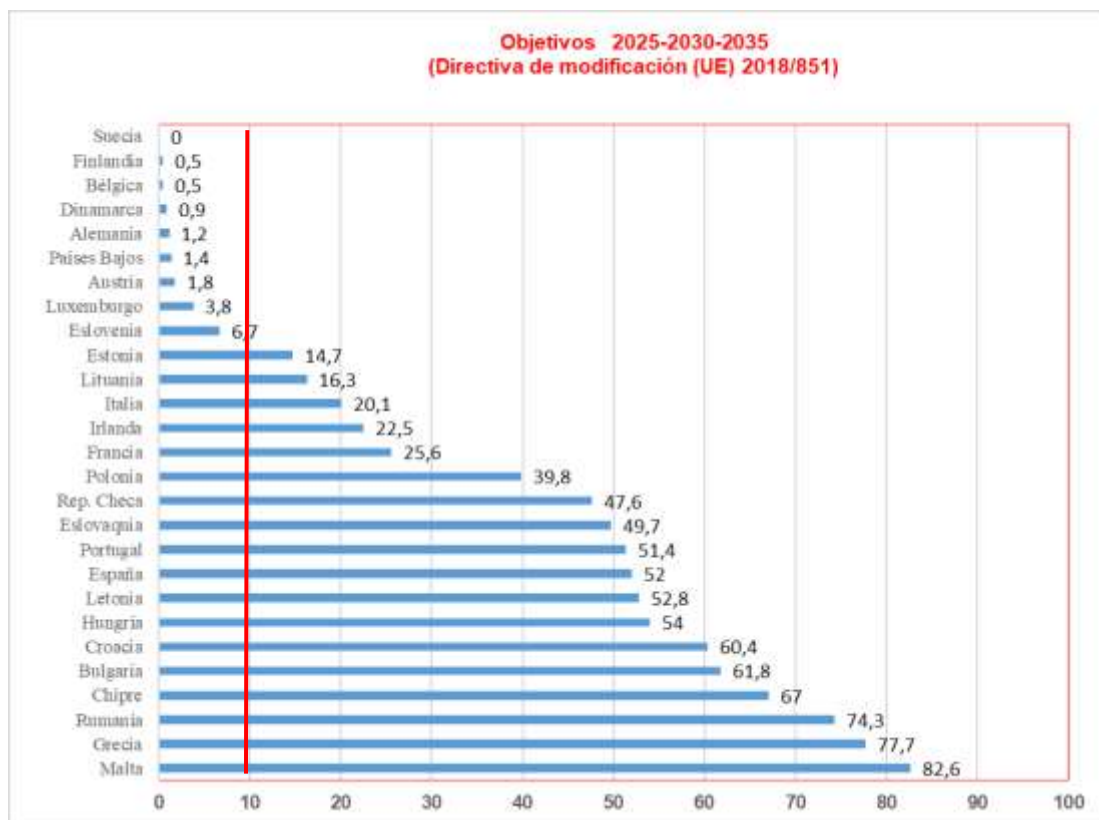
En este gráfico se puede observar el porcentaje del reciclado y compostaje de cada uno de los países de la UE junto con las barras verticales que indican los objetivos propuestos en la directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.

Solo cinco países (Suecia, Alemania, Austria, Eslovenia y Países Bajos) alcanzan en la actualidad los objetivos propuestos para 2025 del 55% de reciclado en el tratamiento de RSU, incluso Suecia y Alemania superan los marcados para 2030 (60%) y 2035 (65%).

Si observamos los porcentajes de los RSU depositados en vertederos en 2020 en la gráfica 2, se observa la Directiva 2018/851 que considera que el porcentaje de vertederos de todos los países debe ser inferior al 10%, ya que el depósito de los residuos genera sustancias contaminantes para el medio ambiente y la salud. En este caso son nueve los países que cumplen con la

normativa. (Suecia, Finlandia, Bélgica, Dinamarca, Alemania, Países Bajos, Austria, Luxemburgo y Eslovenia).

Gráfico 2. Porcentaje de vertederos Residuos Sólidos Urbanos (UE) (2020)



Fuente: Eurostat Municipal waste by waste management operations (env_wasmun).

La utilización del vertedero está muy ligada a la contaminación y a la generación de emisiones contaminantes. Son muchos los estudios científicos que han tratado esta relación. Leal Filho et. al (2017), realizan una revisión de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la gestión de residuos sólidos municipales en Europa. Los autores examinan los datos disponibles sobre la composición de los residuos, las prácticas de gestión de residuos y las emisiones de GEI en cada una de las fases del ciclo de vida de los residuos municipales, incluyendo la recogida, transporte, tratamiento y disposición final. El estudio concluye en que la gestión de RSU en Europa representa el 3% de las emisiones totales de GEI de la UE y que el envío de residuos a vertederos es el factor clave de estas emisiones, especialmente de metano, un gas de efecto invernadero muy contaminante. Establecen que este tratamiento debe ser reducido. Por otra parte, las tecnologías de tratamiento de residuos, como la incineración y el tratamiento mecánico-biológico, también generan emisiones de GEI, y en general, estas son menos intensivas

en carbono que los vertederos. La reducción, reutilización y reciclaje de residuos son estrategias importantes para reducir las emisiones de GEI asociadas con la gestión de residuos municipales.

Godwin. et. al (2018) aportan un modelo de estimaciones de las emisiones de GEI de los vertederos en Europa y destacan la importancia de implementar medidas para reducir estas emisiones. El estudio utiliza datos de emisiones de metano y dióxido de carbono de vertederos en diferentes países europeos y los incorpora en un modelo de emisiones.

Los resultados del estudio muestran que las emisiones de metano son la principal fuente de emisiones de GEI de los vertederos, y que los vertederos más grandes son responsables de la mayor parte de estas emisiones. Además, encontraron que las emisiones de GEI varían significativamente según el tipo de residuo depositado en el vertedero, así como las condiciones climáticas y geográficas del sitio. El estudio concluye que, aunque los vertederos son una fuente importante de emisiones de GEI, existen tecnologías de captura de gas y prácticas de gestión que pueden reducir significativamente estas emisiones. Además, el estudio sugiere que la reducción de las emisiones de GEI de los vertederos debe ser un componente clave de cualquier estrategia de reducción de emisiones a nivel nacional y europeo.

Según Hoornweg et. al (2016), Lu et. al (2018), Li et. al (2019), otro factor determinante es el Producto Interior Bruto (PIB) con una influencia directa e indirecta en la generación de residuos urbanos.

Directamente, se ha observado que el aumento del PIB en una región se asocia a un aumento en la cantidad de residuos urbanos generados. Esto se debe a que una economía en crecimiento conlleva un aumento del consumo de bienes y servicios, lo que a su vez genera más residuos. Cuanto más se consume, más desechos se generan. Cuando un país va aumentando su renta per cápita, la población va cambiando sus patrones de consumo y su estilo de vida, utiliza más alimentos procesados, usa más productos electrónicos y adopta un estilo de vida más “desechable”.

Por otro lado, indirectamente el PIB también puede influir en la generación de residuos urbanos a través de la inversión en infraestructuras y servicios públicos. Por ejemplo, las inversiones en sistemas de recolección, transporte y tratamiento de residuos son esenciales para gestionar adecuadamente los residuos urbanos y evitar la acumulación y la contaminación ambiental. Si un país o una región tienen un PIB alto, es más probable que se invierta en infraestructura y servicios públicos, lo que a su vez puede mejorar la gestión de los residuos urbanos.

Algunos estudios relacionan el Índice de Desarrollo Humano (IDH) con la generación de residuos. Moreira de Souza Santos et. al (2018).

Carvajal et. al (2022) concluye que la gestión mejorada de los residuos también ayuda a reducir los problemas de salud y medioambientales. Es importante reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (directamente al reducir las emisiones de los vertederos e indirectamente al reciclar materiales que de otro modo serían extraídos y procesados), así como evitar impactos negativos a nivel local. El deterioro del paisaje debido a vertederos, la contaminación local del agua y el aire, o tirar basura son los causantes del deterioro global. A su vez, la recolección deficiente o inadecuada es un desafío que está relacionado con casi todos los residuos sólidos urbanos.

La conciencia del consumidor es otro factor importante para aumentar las tasas de recolección de diferentes fracciones de desechos. También hay varios desafíos relacionados con la calidad de los materiales de desecho, como la heterogeneidad del material y la presencia de sustancias peligrosas que dificultan el reciclaje. Para algunos materiales, los desafíos tecnológicos también son razones importantes para las pérdidas, así como la falta de un mercado o la demanda de materiales reciclables. Se necesitan más esfuerzos para introducir sistemas eficientes para recolectar y clasificar los desechos. Además, es importante sensibilizar a los consumidores sobre cómo lograr mayores tasas de recolección. European Environment Agency (2019).

2.1. Cómo reciclan los RSU algunos países en Europa

No todos los países en Europa reciclan de la misma forma. Para poder entender un poco más el tratamiento de los residuos de estos países, vamos a destacar la forma de actuar de alguno de ellos. Por ejemplo:

- Suecia supera el 98% del reciclado en el tratamiento de residuos. Su población está muy comprometida con el cuidado de la naturaleza. Este país, además, importa alrededor de 800.000 toneladas de Reino Unido, Italia, Noruega, entre otros países, para abastecer a sus 32 estaciones (WTE) incineradoras para obtener energía y así calentar a casi 300.000 hogares. Es un país con una cultura muy respetuosa con el medio ambiente y a la vez muy eficiente, los ciudadanos separan todos los residuos: orgánicos, metales, pilas, vidrios de color, vidrios transparentes, plástico duro, plástico blando, cartón y Tetra Pak, papeles, periódicos y revistas, etc., que generan en su vida cotidiana. De todos los kilogramos de RSU que generan per cápita solo el 1% (4,5 kg. por año), no alcanza el reciclado o la reutilización. Además, tienen estaciones de reciclado por zonas residenciales, los vertederos son prácticamente inexistentes. Para Suecia los residuos no son basura sino riqueza. Estocolmo, su capital, una ciudad con crecimiento constante se plantea llegar al año 2040 a una huella de carbono positiva; en algunas zonas de la ciudad, un ciudadano cuando deposita sus residuos totalmente separados, por medio de un microchip en la bolsa, puede

saber de inmediato lo equivalente a energía que ha generado y en un futuro plazo, la idea es poder ser recompensado por hacerlo.

- Alemania fue el primer país de la UE que introdujo la responsabilidad del productor en la regulación de residuos de envases (1991), su sistema de separación de residuos es más complejo que el español y la recogida se financia con una tasa que pagan los ciudadanos. Actualmente es líder mundial en tecnologías relacionadas con la sostenibilidad y el tratamiento de residuos.

Alemania combina diferentes métodos para gestionar los residuos, según Zurita (2016), este país comenzó en la década de los 70 a clausurar los vertederos.

En el año 2030 Alemania tendrá un mercado tecnológico basado en la economía circular de alrededor de 32 millones de euros. En el año 2020 reciclaba el 69,6% de sus residuos y solamente enviaba a vertederos el 1,2%. Estos resultados los ha conseguido a través de un sistema de reciclaje muy avanzado con incentivos para las empresas y ciudadanos que reciclan, y una estricta regulación en vertederos. El éxito de la gestión de residuos de Alemania realmente se reduce a dos cosas: una política gubernamental fuerte y el compromiso de sus ciudadanos al reciclaje.

Los minoristas en Alemania están obligados a informar claramente, en los estantes de las tiendas, si los envases de bebidas son reutilizables o desechables. El objetivo es que el 80% de dichos envases sea con cartón. Implantaron un sistema de reembolso de depósitos (DRS), donde el ciudadano paga una cantidad extra en los envases que luego podrá recuperar una vez que esté consumido el producto y acuda con el plástico o la botella a la tienda o empresa, que tiene la obligación de proceder a la recogida y recuperación. Este sistema ha reflejado resultados muy eficaces en la gestión y en la reducción de los residuos, aplicando el principio de “*quien contamina paga*”.

- Eslovenia ya adoptó una política de cero residuos en 2014. Su capital, Liubliana, tiene un centro de tratamiento para *reducir, reutilizar y reciclar* (RCERO) construido en 2015 con una aportación del 61% de recursos provenientes de los fondos de cohesión de la UE. Es uno de los más grandes y modernos de la UE, donde prácticamente recicla todo lo generado en la ciudad y alrededores. Los eslovacos tienen multitud de puntos cercanos donde pueden depositar en contenedores, por colores, todos sus residuos perfectamente clasificados (orgánicos, basura mixta, embalaje, papel, plástico y vidrio). Estos contenedores son enviados a empresas recicladoras, excepto basura mixta y residuos orgánicos que son enviados a la planta (RCERO) antes descrita, que se encarga de separar y reciclar o convertir en compost. La planta es autosuficiente energéticamente y un ejemplo de sostenibilidad en sus alrededores. Además, es un centro modelo

que forma a grupos de estudiantes en sus prácticas y en la importancia del respeto al medio ambiente.

- Bélgica deja toda la responsabilidad en los municipios. Se basan en el principio de “*quien contamina paga*”, verter es mucho más caro que incinerar y a su vez más caro que reciclar. Da un apoyo fuerte a iniciativas e inversiones, mantiene prohibiciones e impuestos.

- Francia en 2018 inicia un proyecto para alcanzar la economía circular en el que simplifica los procesos de clasificación de residuos, crea incentivos para reutilizar o recuperar los biorresiduos y no ser mezclados con el resto de los residuos urbanos. Adapta su fiscalidad para que la valorización de residuos sea más económica que la eliminación.

En 2020 dicta la *ley anti-desperdicio* para una economía circular donde incorpora a la eliminación del plástico desechable, el índice de reparabilidad, que obliga a que el consumidor esté informado de si el producto que compra es reparable, difícil de reparar o no reparable. Prohíbe, como ejemplo, el exceso de envases de plástico para frutas y verduras con peso inferior 1,5 kg.

- Países Bajos elabora ya en 2017 su tercer plan de gestión de residuos (LAP3), 85 planes concretos sobre las estrategias a seguir con mínimos estándar establecidos para cada categoría específica de desecho. Uno de sus planes estratégicos es desarrollar nuevos métodos de producción y nuevos diseños en sus productos con opciones al reciclado.

- Italia tiene un problema con la acumulación de desechos que producen ciudades como Roma, donde actualmente y como consecuencia del cierre del que fue el mayor vertedero de Europa en 2013 (Malagrotta), prevé construir un gran incinerador que no estará en funcionamiento hasta 2026/27, y ha tenido que llegar a un acuerdo con el gobierno de Países Bajos para enviar 900 toneladas de residuos a la incineradora AEB en Ámsterdam, dónde ya incineran residuos de otros países. Esta solución no es óptima, pero en su conjunto evita grandes emisiones contaminantes al medio ambiente. Es la oportunidad para que Italia cambie sus vertederos por otros tratamientos menos contaminantes en un futuro inmediato.

Por otra parte, es necesario mencionar el comercio internacional de productos de desecho que ha crecido sustancialmente, el negocio intracomunitario mueve 67.777.867 toneladas de productos de desechos y la UE exporta 19.060.531 toneladas a sus socios fuera de sus fronteras; entre dichos países se encuentran China, Turquía, México, India, Tailandia, Malaysia, Pakistán, Vietnam, etc. países que se consideran refugios internacionales de contaminación o con baja regulación ambiental. Kellenberg (2012).

Por último, se analiza la situación de España comparada con los otros países de la UE, (véase gráficos 1 y 2) en los que se observa que el porcentaje de reciclaje es de un 36,4% y el

porcentaje de residuos en vertederos de un 52 %, datos que sitúan a España por debajo de la media, y por ello, se está realizando un gran esfuerzo para adaptarse a la Directiva 2018/851. Las medidas que se deben tomar para avanzar deben estar centradas en la reparabilidad y la durabilidad de los productos, en el reciclaje, en la prevención de los desperdicios y en la sensibilidad de las personas. El 10 de abril de 2022 entró en vigor en España la nueva Ley de residuos y suelos contaminantes para una economía circular cuyo objetivo es reducir al mínimo los efectos negativos de la generación y el tratamiento de los RSU. Esta ley establece en los títulos IV y V la "*responsabilidad ampliada del productor del producto*", es decir, establece que obligaciones debe tener el productor en cuanto al diseño del producto, al retorno y a la gestión del tratamiento y reducción de plásticos de un solo uso. El título VII desarrolla medidas fiscales para incentivar la economía circular, imponiendo un impuesto especial sobre los envases de plástico no reutilizables y un impuesto sobre el depósito de residuos en vertederos. Entre otros alcances prevé que desde 2023 los comercios minoristas de alimentación (superficie mayor de 400 m²) destinen el 20% de su superficie a productos sin embalaje primario. Uno de los aspectos más importantes de la nueva Ley es el cumplimiento de la recogida separada de residuos, en particular la de los biorresiduos de origen doméstico, y la prevención de los desperdicios alimentarios, separación de residuos textiles y aceites de cocina usados. En definitiva, esta nueva ley acomete por primera vez, desde un punto de vista integral, un marco regulatorio de la minimización y el tratamiento de los residuos. Carvajal et. al (2022).

3. ANÁLISIS DE DATOS

3.1. Variables objeto de estudio

Después del análisis realizado anteriormente, es adecuado estudiar cuáles son los principales factores o variables que están influyendo en la generación de residuos en los 27 países de la Unión Europea, en función de la información disponible, en el periodo muestral analizado (2010-2021). Para ello, se van a utilizar las siguientes variables explicativas:

- **Residuos Sólidos Urbanos:** se entiende por residuo cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse. Según el Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNRU) 2000-2006, en los RSU se incluyen todos los residuos producidos en domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, además de productos textiles y residuos de maderas de origen doméstico, así como aquellos generados en la limpieza de vías

públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas. Otros residuos no peligrosos procedentes del ámbito doméstico o comercial, como pueden ser las grasas vegetales, también son considerados residuos urbanos.

- Índice de Desarrollo Humano: es un indicador creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), cuya finalidad es determinar el nivel de desarrollo que tienen los países del mundo. Es una medida resumida del promedio de las dimensiones clave del desarrollo humano: una vida larga y saludable, tener conocimientos y tener un nivel de vida digno. El IDH es la media geométrica de índices normalizados para cada una de las tres dimensiones.
- Reciclado: comprende toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno (Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008).
- Vertederos: según el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO), un vertedero es una instalación de eliminación de residuos mediante su depósito subterráneo o en superficie, por períodos de tiempo superiores a los considerados para el almacenamiento temporal. Por tanto, se incluyen también las instalaciones internas de eliminación de residuos, es decir, los vertederos en que un productor elimina sus residuos en el lugar donde se producen.
- Población: indica el total de personas que residen en ese país en un momento dado.
- PIB per cápita: medida económica que se calcula dividiendo el Producto Interno Bruto de un país entre su población total. Herramienta útil para evaluar el nivel de bienestar económico y el estándar de vida de los habitantes de un país.
- Industrial: se ha creado una variable dummy (Industria) con el fin de poder determinar si los países con mayor tejido industrial provocan un mayor número de residuos sólidos urbanos. Dicha variable es dicotómica, y toma valor 1 en los países más industrializados de la Unión europea y cero para el resto.

$$\text{Industrial} = \begin{cases} 1 & \text{si el país es de los más industrializados de la UE} \\ 0 & \text{para el resto de los países de la UE} \end{cases}$$

3.2. Análisis descriptivo de las variables

El análisis de los principales estadísticos descriptivos de las variables proporciona información útil de su comportamiento en el periodo muestral analizado. Las tablas 1 y 2 muestran, respectivamente, los valores obtenidos para dichos estadísticos y la matriz de correlaciones entre las variables explicativas, la cual es importante para comprobar que no existe problemas de multicolinealidad en el modelo planteado.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables

Variables	Mínimo	Máximo	Media	Std. Error	Coef. Variación Pearson	Coef. Asimetría	Exceso Curtosis
Residuos	302,00	834,00	542,70	134,45	0,25	0,56	-0,21
IDH	0,80	0,95	0,89	0,04	0,05	-0,44	-0,38
Reciclado	10,50	69,60	39,76	14,36	0,36	-0,13	-0,19
Vertederos	0,40	83,00	33,18	27,41	0,83	0,23	-1,43
Población	516.100	83.155.031	16.555.836,89	21.840.177,84	1,32	1,81	2,80
PIBpc	6.950,00	84.490,00	28.182,22	18.000,59	0,64	1,50	2,72

Fuente de datos: Datos obtenidos a partir de Eurostat env_wasmun.

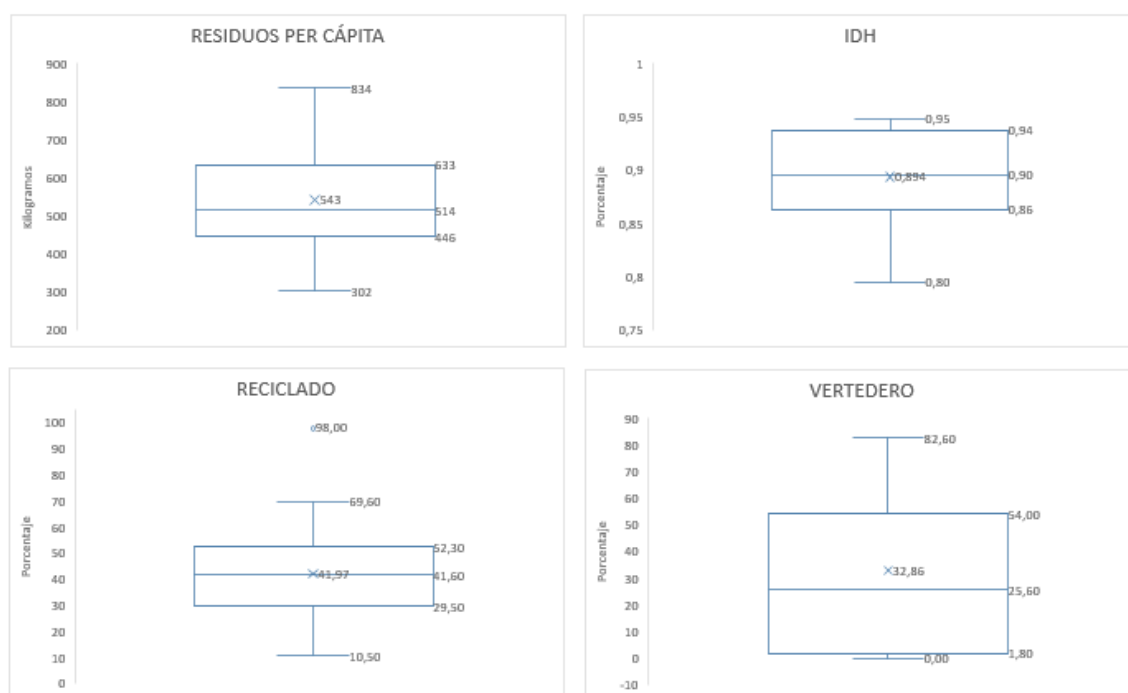
En función de los resultados obtenidos para los principales estadísticos descriptivos (véase Tabla 1) se puede afirmar que las variables residuos, IDH y reciclado tienen una media representativa y el resto de las variables, con un coeficiente de variación de Pearson elevado, muestran la existencia de una mayor dispersión entre los datos, lo que implica una menor representatividad de la media correspondiente a estas variables. Por ejemplo, los vertederos con un coeficiente de variación de 0,83 o la población de 1,32.

Además, la mayoría de las variables presentan asimetría positiva (excepto en IDH y reciclado), lo que implica que existen más países que superan la media. Además, todas presentan distribuciones platicúrticas (excepto población y PIBpc que son leptocúrticas). Se matiza que la

variable vertederos tiene un coeficiente de curtosis de -1,43, lo que implica que existen más países con vertederos concentrados en los extremos y menos alrededor de la media.

Gráficamente, dichos datos se pueden ver en el gráfico 3, donde se recogen los diagramas de caja y bigotes de las variables de los RSU estudiados para el año 2021. Destaca Suecia con 98 Kg de reciclado por habitante y 0% en vertederos.

Gráfico 3. Diagrama de cajas y bigotes de las variables de los Países de UE (27) (2021)



Fuente de datos: Datos obtenidos a partir de Eurostat env.wasmun.

Por otro lado, el análisis de la matriz de correlaciones entre las variables (véase Tabla 2) muestra que no existen problemas graves de multicolinealidad, ya que las correlaciones entre las variables no son muy elevadas.

Tabla 2. Matriz de correlaciones de las variables explicativas del modelo

	Residuos	IDH	Reciclado	Vertederos	Población	PIBpc
Residuos	1,000					
IDH	0,139	1,000				
Reciclado	0,470	-0,050	1,000			
Vertederos	-0,405	0,074	-0,797	1,000		
Población	-0,227	-0,080	0,343	-0,144	1,000	
PIBpc	0,441	0,070	0,360	-0,556	-0,063	1,000

Fuente de datos: Datos obtenidos a partir de Eurostat env_wasmun.

3.3. Modelo empírico

Para poder establecer cuáles son las variables (de las anteriormente descritas) que más están contribuyendo en el aumento de los residuos se ha planteado, estimado y validado un modelo de regresión para todos los países de la Unión Europea de la siguiente forma:

$$y_i = \alpha_i + \beta x_i + u_i; \quad u_i \sim N(0, \sigma^2), \quad \text{Cov}(u_i, u_j) = 0 \quad \forall i \neq j \quad (1)$$

Donde,

Y_i , representa los residuos sólidos urbanos generados; α_i la constante del modelo; x_i cada una de las variables explicativas; β los coeficientes del modelo; u_i las perturbaciones aleatorias del modelo, que se supone idénticamente distribuidas con media cero, varianza constante e incorrelacionadas.

Los resultados de la estimación del modelo (véase Tabla 3), muestra que el modelo estimado es bastante fiable, ya que los residuos no son muy elevados (véase gráfico 4) y la capacidad explicativa del mismo es elevada (R^2 es igual a 0.84).

Respecto de los resultados obtenidos, comentar que existe un nivel medio constante, significativo y positivo para todos los países de la Unión Europea. Además, entre las variables que más están contribuyendo a incrementar el nivel medio de residuos son los vertederos (se puede considerar significativa al 10%), el porcentaje de reciclado y el PIBpc.

Respecto del porcentaje de reciclado se esperaría que cuanto mayor sea menor debería de ser el porcentaje de residuos generados. Sin embargo, los resultados estimados muestran que no es así, aproximadamente por cada 1% que aumente el reciclado, el promedio de residuos aumentaría en un 0,8% (*ceteris paribus*).

El PIBpc es la variable que más influencia está ejerciendo en el crecimiento de los residuos, ya que, según los resultados obtenidos un aumento del PIBpc del 1% implicaría que el promedio de los residuos aumentaría aproximadamente un 17%, (*ceteris paribus*).

Por otro lado, si analizamos la variable industrial (variable dummy que toma valor 1 para los países más industrializados de la Unión Europea y 0 en el resto de los casos), se puede observar que el nivel medio de los residuos de los países industrializados es aproximadamente un 25% mayor que los menos industrializados.

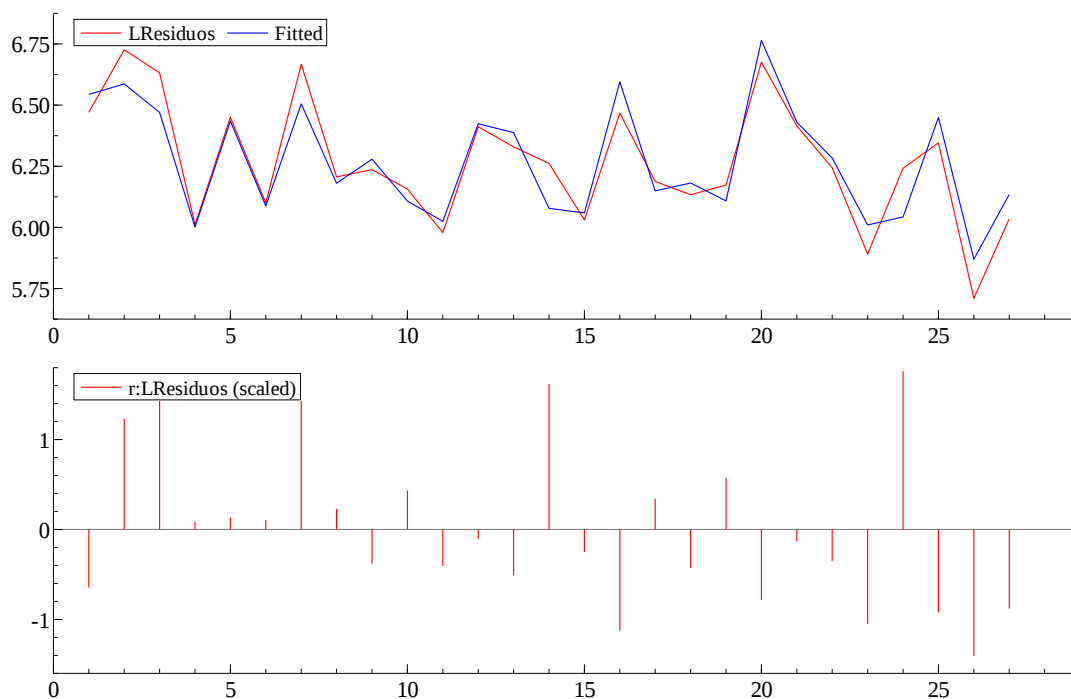
En un principio se esperaría que a medida que se incrementa la población el porcentaje de residuos aumentaría. Sin embargo, según los resultados obtenidos se observa que un incremento en la población del 1% implicaría una disminución de los residuos del 4% (*ceteris paribus*). Esto puede que sea debido a la concienciación cada vez mayor existente por el reciclaje y la disminución de los residuos generados.

Finalmente, el índice de desarrollo humano no es estadísticamente significativo.

Tabla 3. Resultados del modelo estimado para los Residuos

	Coefficient	Std.Error	t-value	t-prob	Part.R^2
Constant	4.584	0.8991	5.10	0.0001	0.5652
IDH	0.08558	0.5609	0.153	0.8803	0.0012
Reciclado	0.008568	- 0.0028	3.02	0.0068	0.3129
Vertederos	0.003169	0.0017	1.85	0.0794	0.1459
LPoblación	-0.04200	0.0184	-2.28	0.0340	0.2058
LPIBpc	0.1706	0.0650	2.62	0.0162	0.2562
Industrial	0.2599	0.0598	4.35	0.0003	0.4857
sigma	0.113283	RSS		0.256661578	
R^2	0.842211	F(6,20) =	17.79	[0.000]**	
Adj.R^2	0.794874	log-likelihood		24.5424	
no. of observations	27	no. of parameters		7	
mean(LResiduos)	6.26645	se(LResiduos)		0.250124	
Normality test:	Chi^2(2) =	3.1383	[0.2082]		
Hetero test:	F(11,15) =	1.2737	[0.3249]		
RESET23 test:	F(2,18) =	0.98648	[0.3922]		

Gráfico 4. Ajuste del modelo estimado y residuos



4. CONCLUSIONES

El crecimiento económico de los países analizados de la Unión Europea está dando lugar a una producción cada vez mayor de residuos sólidos urbanos. El análisis realizado en este trabajo muestra la existencia de asimetrías entre los países en la gestión de los residuos generados, ya que mientras que países como Suecia es uno de los que más conciencia tiene en el tratamiento de estos residuos, otros países no están tan avanzados en la gestión de los mismos. De esta forma, para una gestión efectiva y ordenada de los residuos, fundamentalmente, por parte de aquellos países menos avanzados en la gestión de residuos, será necesario realizar un análisis que les permita conocer su tipología y composición, con el fin de poder identificarlos y distribuidos para su correcto reciclaje.

Se puede destacar que, de todos los países analizados, solo cinco (Suecia, Alemania, Austria, Eslovenia y Países Bajos) alcanzan en la actualidad los Objetivos de Desarrollo sostenible propuestos para 2025 del 55% de reciclado en el tratamiento de RSU. Mientras que, por el contrario, entre los países que se encuentran en la peor situación para conseguir dichos objetivos son: Portugal, Grecia, Rumanía, Chipre y Malta.

En este contexto, destacar que España se sitúa por debajo de la media de los países europeos en materia de reciclaje y con un porcentaje muy elevado de residuos depositados en vertederos.

Finalmente, los resultados del modelo estimado muestran que mientras que el índice de desarrollo humano no es estadísticamente significativo, otras variables talos como los vertederos, el porcentaje de reciclado y el PIB per cápita son las que más están contribuyendo a incrementar el nivel medio de residuos. Además, el nivel medio de los residuos de los países industrializados es aproximadamente un 25% mayor que los menos industrializados.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banco Mundial. (2018). Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos. WB:
<https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-wastemanagement>.
- Banco Mundial (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development © Washington, DC: World Bank.
<http://hdl.handle.net/10986/30317>.
- Carvajal Romero, H., Teijeiro Álvarez, M., & García Álvarez, M. T. (2022). Análisis de la gestión de los residuos sólidos urbanos en Europa. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), pp. 402-415.
- Costa, A. S., Pires, A. y Madeira Martinho, G. (1995). *Managing municipal solid waste in developing countries*. John Wiley & Sons.
- Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018.
<https://www.boe.es/doue/2018/150/L00109-00140.pdf>. Fecha de consulta (9/03/2024).
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, <https://boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-82319>. Fecha de consulta (9/03/2024).
- European Environment Agency (2019). Reducing loss of resources from waste management is key to strengthening the circular economy in Europe.
<https://www.eea.europa.eu/themes/waste/wastemanagement/reducing-loss-of-resources-from>
- European Environment Agency (2024). Accelerating the circular economy in Europe. Accelerating the circular economy in Europe. European Environment Agency (europa.eu).
- Eurostat. (2022). Estadísticas sobre residuos. Municipal waste by waste management operations (env_wasmun)
https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/env_wasmun_esms.htm
- Godwin, J. M., Bonilla, G. H. S., Meneses, M. y Conesa, J. A. (2018). Greenhouse gas emissions from landfills in Europe: A modeling approach. *Waste Management & Research*. pp. 295-301.
- Green, W.H. (2020). *Econometric Analysis*, Eighth Edition, Pearson-prentice Hall.
- Gujarati, D.N. (2003). *Econometría*. Mc Graw Hill, 4º Edición, México.

- Hoornweg, D. A., Bhada-Tata, P. y Kennedy, C. (2016). Environment: Waste production must peak this century. *Nature*, 529 (7587), pp. 23-25.
- Kellenberg, D. (2013). Trading wastes. *Journal of Environmental Economics and Man*
Journal of Environmental Economics and Management. pp. 68-87.
- Leal Filho, A. M., Salvia, A. L., y Fröhling, M. (2017). Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Europe: A review. *Waste Management & Research*. pp. 535-550.
- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. BOE núm. 85, de 9 de abril de 2022, <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>
- Li, J., Liu, H., Chen, Y., Zhang, Y., y Pan, X. (2019). Exploring the relationship between economic development and e-waste generation: Evidence from the panel data analysis of 184 countries. *Journal of Cleaner Production*, 222, pp.56-65.
- Lu, L., Li, Z., Wang, Y., y Wu, J. (2018). Household solid waste generation and composition in different urban settings. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(2), pp.1112-1122.
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. <https://www.miteco.gob.es/>. Fecha de consulta (22/02/2024).
- Moreira de Souza Santos, G., Fernandes, E. M., y Gomes de Almeida, C. M. (2018). Municipal Solid Waste Management in Urban Areas: The Case of Brazil and Its Link with the Human Development Index. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 25(5), pp. 398-406.
- Moreno, K., Freire, G., & Caisa, D. (2021). Cadena desu ministros verde: Análisis estratégico de la gestión de residuos sólidos en Pelileo-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 27, pp. 293-308.
- Oficina Europea de estadística. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/indicators>. Fecha de consulta (20/01/2024).
- Organización para la cooperación y el desarrollo económico. <https://www.oecd.org/>. Fecha de consulta (27/01/2024).
- Pires A, Madeira Martinho, G, y Chang, N. (2010) Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1994). Integrated solid waste management issues. McGraw-Hill.

- Wooldridge, J.M. (2005). Introducción a la econometría. Un enfoque moderno. Thompson, 2º Edición, Madrid.
- Zurita, A. (2016). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Cooperación Alemana.