

Máster Universitario en Data Analytics for Business

Trabajo Final de Máster

UPF Barcelona School of Management

Predicción y Análisis del Reciclaje de *e-waste*: Tendencias y Factores Clave



Grupo número: 1.1

Leilani A [redacted] A [redacted]

Natalia C [redacted] L [redacted]

Maria Jose E [redacted] A [redacted]

Tutora: Alexandra A [redacted]

Junio 2025

Tabla de contenidos

1.	Introducción	1
2.	Propuesta	2
2.1.	Metodología General	2
2.2.	Recopilación y Selección de Datos	3
2.3.	Tratamiento y Transformación de los Datos	3
2.4.	Análisis Exploratorio de Datos (EDA)	8
2.5.	Análisis de Clústeres	8
2.6.	Modelado Predictivo (<i>Forecasting</i>)	11
3.	Resultados	14
3.1.	Estado Actual del Reciclaje (EDA)	14
3.2.	Segmentación de Países y Patrones de Comportamiento (<i>Clustering</i>)	18
3.3.	Predicción del reciclaje y generación de residuos electrónicos (<i>Forecasting</i>)	27
4.	Discusión	30
5.	Impacto Social	32
6.	Bibliografía	34
7.	Apéndices	35
7.1.	Apéndice 2: Código y datos	35

Resumen

Este trabajo analiza las dinámicas globales de generación y reciclaje de residuos electrónicos (*e-waste*) mediante técnicas avanzadas de análisis de datos. A partir de bases de datos oficiales y públicas, se aplicaron enfoques metodológicos que permiten caracterizar con mayor precisión los sistemas de gestión por país, categoría de producto y evolución temporal. Se utilizaron herramientas como el análisis exploratorio de datos (EDA), algoritmos de *clustering* (*K-Means* y *Dynamic Time Warping*), reducción de dimensionalidad (PCA) y modelos ARIMA para pronóstico.

El análisis permitió identificar clústeres de países con patrones similares en la gestión de residuos, diferenciados por el volumen total de residuos en toneladas, el consumo por persona y la distribución por categorías. También se detectaron trayectorias temporales diferenciadas en la evolución del reciclaje: algunos países presentan mejoras sostenidas y otros evidencian estancamiento o retroceso. Las proyecciones hasta 2028 indican un crecimiento constante en la generación de residuos electrónicos, sin un aumento proporcional en las tasas de reciclaje, lo que mantiene una brecha significativa entre lo que se genera y lo que se recupera. Esto resalta la necesidad de estrategias más eficaces, tanto a nivel de diseño de productos como de políticas públicas.

El estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, 12 y 13, al promover una gestión adecuada de residuos electrónicos que reduzca riesgos ambientales y sanitarios, promover prácticas responsables de producción y consumo, y contribuir a la mitigación del cambio climático mediante un uso más eficiente y sostenible de los recursos. Asimismo, se respetaron criterios éticos y legales en el tratamiento de datos, utilizando exclusivamente información pública y anonimizada.

Este trabajo no solo proporciona un diagnóstico sólido sobre la situación actual de los residuos electrónicos, sino que también constituye una base para decisiones políticas, estrategias empresariales y futuras investigaciones orientadas a una economía circular más efectiva.

Palabras clave: residuos electrónicos; clustering; predicción; sostenibilidad; series temporales.

1. Introducción

El crecimiento acelerado del consumo de dispositivos electrónicos ha generado una gran cantidad de residuos electrónicos (*e-waste*). Debido a sus ciclos de vida cada vez más cortos, estos dispositivos se desechan en grandes volúmenes y contienen sustancias tóxicas que afectan el medio ambiente y la salud pública. La gestión inadecuada de estos residuos ha agravado la situación, ya que muchos dispositivos terminan en vertederos sin tratamiento, contaminando el suelo, el agua y el aire.

Ante este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo y predictivo de la generación y el reciclaje de residuos electrónicos para identificar patrones de comportamiento entre países y estimar su evolución futura. Mediante técnicas como el análisis exploratorio, agrupamiento (*clustering*) y modelado predictivo (*forecasting*), se busca comprender qué países generan o reciclan más residuos, cómo varía su comportamiento en función del tipo de producto y del tiempo, qué similitudes existen entre ellos, y cuáles son las tendencias esperadas en los próximos años.

Este enfoque permitirá no solo evaluar el desempeño actual de los países, sino también anticipar dinámicas futuras y generar conocimiento útil para el diseño de políticas públicas más eficaces, sostenibles y adaptadas a las realidades específicas de cada región.

2. Propuesta

2.1 Metodología general

Este trabajo adopta un enfoque exploratorio, comparativo y predictivo basado en el análisis de datos abiertos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). El objetivo principal es analizar la gestión de residuos electrónicos (*e-waste*) en distintos países, identificando patrones comunes y proyectando su evolución futura mediante técnicas cuantitativas aplicadas a indicadores oficiales.

El análisis se estructuró en dos niveles principales. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis estructural por país, a partir de datos anuales agregados, considerando tanto valores en toneladas como en kilogramos por persona. Para este nivel, se aplicaron técnicas de aprendizaje no supervisado, específicamente *K-Means clustering*, con el objetivo de identificar perfiles comunes y caracterizar diferencias estructurales entre países en cuanto a la generación, recogida, reciclaje y productos puestos en el mercado. Aunque se analizaron las cuatro métricas, el enfoque principal del estudio se centró en la generación y el reciclaje de residuos electrónicos, por su mayor relevancia para evaluar el desempeño y la presión ambiental.

En segundo lugar, se desarrolló un análisis temporal con el propósito de examinar la evolución de los indicadores y detectar tendencias, mejoras o retrocesos. Para ello, se aplicaron técnicas de interpolación para el tratamiento de valores faltantes, métodos de reducción de dimensionalidad para facilitar la exploración de patrones evolutivos, y agrupamiento temporal para identificar similitudes entre países a lo largo del tiempo.

Todo el estudio se apoya en datos de acceso público y en técnicas reproducibles implementadas en Python, utilizando el entorno colaborativo Google Colab. Se emplearon bibliotecas especializadas como *pandas* y *numpy* para la manipulación de datos, *scikit-learn* para el análisis de *clustering*, y *matplotlib* y *plotly* para la visualización. La transparencia metodológica y la trazabilidad del proceso analítico fueron principios prioritarios durante todo el desarrollo técnico.

2.2 Recopilación y selección de datos

Durante la recopilación de datos, fue fundamental contar con fuentes confiables y consistentes que ofrecieran información precisa sobre los residuos electrónicos (*e-waste*) a nivel global. Para ello, se utilizó la base de datos publicada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), que proporciona registros anuales por país sobre productos puestos en el mercado, residuos recogidos, reciclados y generados. Estos datos están disponibles tanto en kilogramos por persona como en toneladas totales.

Aunque la base de datos contiene registros desde el año 2000 hasta 2023, se decidió centrar el análisis entre el periodo 2010-2023, debido a la mayor cobertura y consistencia de los datos en esos años.

2.3 Tratamiento y transformación de los datos

Antes de realizar el análisis exploratorio, fue necesario limpiar y transformar estructuralmente el conjunto de datos. El primer paso consistió en examinar la composición de la base descargada de la OCDE, que contiene 11.708 filas, 24 columnas e información de 43 países, incluida la región "European Union (27 countries from 01/02/2020)".

Manejo de columnas redundantes y selección de variables

Durante la fase de limpieza, se identificaron columnas completamente vacías como "Time period" y "Observation value", que resultaron ser columnas duplicadas de "OBS_VALUE" y "TIME_PERIOD", respectivamente. Estas columnas contienen el año y el valor observado por país y categoría de producto.

También se detectaron otros pares de columnas duplicadas, donde una presentaba la información con una descripción completa y la otra con un código. Por ejemplo, "Unit of measure" vs. "UNIT_MEASURE", o "Product categories" vs. "PRODUCT_CATEGORIES". La siguiente tabla ilustra estas redundancias:

Columna descriptiva	Valores	Columna codificada	Códigos
Unit of measure	Tonnes, Kilogrammes per person	UNIT_MEASURE	T, KG_PS
Product categories	Large equipment, Lamps, Photovoltaic panels, Temperature exchange equipment, Total, Small IT and telecommunication equipment, Screens and monitors, Small equipment	PRODUCT_CATEGORIES	EE_LE, EE_LMP, EE_LE_PVP, EE_TEE, EE6, EE_SITTE, EE_SME
Reference area	Netherlands, Canada, Japan	REF_AREA	NLD, CAN, JPN
Frequency of observation	Annual	FREQ	A
Measure	Products put on the market, Total waste generated, Waste collected, Recycling	MEASURE	MKT, GEN, COL, RCY
Observation status	Normal value	OBS_STATUS	A

Se identificaron además columnas duplicadas en formato numérico y textual, como “UNIT_MULT” y “Unit multiplier”. Por ejemplo, si la unidad era *Tonnes*, “UNIT_MULT” tenía valor 3, indicando que debía multiplicarse por 1.000. En cambio, si la unidad era *Kilogrammes per person*, el multiplicador era 0 (sin escalado). Un caso similar se dio con “DECIMALS” y “Decimals”, ambas indicando el uso de dos decimales.

Tras esta revisión, se conservaron 11 columnas esenciales:

“Reference area”, “REF_AREA”, “Frequency of observation”, “PRODUCT_CATEGORIES”, “Product categories”, “Unit of measure”, “Measure”,

“TIME_PERIOD”, “OBS_VALUE”, “UNIT_MULT” y “Unit multiplier”. Las demás columnas, como “STRUCTURE”, “STRUCTURE_ID”, “ACTION”, entre otras de metadatos, fueron eliminadas. Esto dejó una base compuesta por 8 variables categóricas nominales, 3 numéricas y una ordinal.

También se excluyó la región *European Union (27 countries from 01/02/2020)* para trabajar únicamente con 42 países individuales.

Creación de columna nueva

Se creó la columna “Transformed Obs Value”, que contiene los valores reales transformados de “OBS_VALUE”. Si la unidad era toneladas, el valor se multiplicó por 1.000; si era kilogramos por persona, se mantuvo igual.

Entendiendo la data y como las columnas interaccionan

Aunque el análisis se enfocó en la generación y el reciclaje, es importante comprender cómo interactúan las columnas “Measure” y “Product categories”, ya que permiten interpretar adecuadamente los datos.

La columna “Measure” incluye cuatro categorías:

- **Total Waste Generated:** Total de residuos generados, sin considerar su destino final.
- **Waste Collected:** Residuos colectados que después serán gestionados
- **Products put on the market:** Productos nuevos introducidos al mercado.
- **Recycling:** Residuos efectivamente reciclados tras ser recolectados.

La columna “Product categories” consiste de 9 categorías:

- **Total:** Total de residuos electrónicos
- **Temperature exchange equipment:** Refrigeradores, congeladores, aires acondicionados y bombas de calor.
- **Screens and monitors:** Equipos de televisión, monitores, laptops y tabletas.
- **Lamps:** Lámparas fluorescentes, de descarga de alta intensidad y lámparas LED.
- **Large equipment:** Lavadoras, secadoras, lavavajillas, estufas eléctricas.

- **Small equipment:** Aspiradoras, microondas, tostadoras, calculadoras, radios, dispositivos médicos, e instrumentos de monitoreo y control.
- **Small IT and telecommunication equipment:** Móviles, GPS, routers e impresoras.
- **Photovoltaic panel:** Paneles solares fotovoltaicos utilizados para generación de energía.
- **Large equipment excluding photovoltaic panels:** Equipos grandes excluyendo paneles fotovoltaicos.

Cada fila combina una medida y una categoría de producto. Por ejemplo, si la columna “Measure” indica *Total Waste Generated* y “Product categories” señala *Small equipment*, el valor observado representa la cantidad de residuos generados por pequeños aparatos en un país y año determinados.

En muchos casos, también se incluye una fila adicional en la columna “Product categories” con la categoría *Total*, que representa la suma agregada de las demás categorías para ese país, medida y año específicos. Sin embargo, se observó que en ciertos años y países no siempre existía una fila con la categoría *Total* en la columna “Product categories” para las diferentes medidas (*Total waste generated*, *Waste collected*, *Products put on the market* y *Recycling*). Esto podía impedir el conocimiento del valor total de las medidas.

En estos casos, dicho valor fue estimado mediante la suma de las categorías disponibles en “Product categories” para ese país y año. La suma consistió en: *Small equipment*, *Lamps*, *small IT and telecommunication equipment*, *Temperature exchange equipment* y *Screen and monitors*.

En algunos casos, no existía una fila con la categoría *Total* en la columna “Product categories” para ciertas combinaciones de país, año y medida. Para calcular ese total de forma manual, se sumaron las subcategorías disponibles, siguiendo una lógica

condicional. En la categoría *Large equipment* se incluye *Photovoltaic panels*, por lo tanto, si *Photovoltaic panels* estaba presente, se utilizaron en la suma *Large equipment excluding photovoltaic panels* y *Photovoltaic panels*, y no *Large equipment*, ya que incluir las tres generaría un doble conteo. En los casos donde no se incluía *Photovoltaic panels*, se sumaba directamente *Large equipment* con las demás categorías y se

descartaban *Large equipment excluding photovoltaic panels*. Este proceso fue automatizado mediante una función llamada *calculate_waste*, que se aplicó durante todo el análisis.

Estimación de Datos Faltantes

Por otro lado, al filtrar por medidas, se descubrió que de 42 países, sólo 22 países tienen un valor observado en la medida de *Total waste generated*. Es importante destacar que, incluso en esos 22 países, hay años donde el total generado no está disponible. Los países pueden brindar información sobre el total recolectado, reciclado o colocado en el mercado pero no sobre el total de residuos generados para un año en específico. Esta situación se presenta también en las otras medidas pero a menor tamaño, las demás medidas tienen datos para más de 36 países.

Tras una investigación, se encontró que es posible estimar el total de residuo generado con la fórmula:

$$Total\ waste\ generated = \frac{Waste\ collected}{Collection\ ratio}$$

Este cálculo permitió completar alguno de los datos faltantes y evitar interpretaciones sesgadas por falta de datos. El *collection ratio* se obtuvo de la fuente oficial globalewaste.org/country-sheets/, que proporciona la tasa de recolección (*collection rate*) por país para el periodo 2018–2022. A partir de esta información, se creó un diccionario con las tasas correspondientes a los países y años sin valores observados de residuos generados totales. El cálculo se aplicó tanto a los datos en toneladas como en kilogramos por persona.

Como resultado, se añadieron 236 filas nuevas al data frame. Al añadirlas, se especificó en las columnas, la medida y que la categoría del producto fuera *Total*. Para identificar los valores estimados, se creó un nuevo código *EE6_EST* en la columna “PRODUCT_CATEGORIES”.

Hay algunos países que todavía no muestran un valor observado para la medida de *Total waste generated*. Esto se debe a falta de datos tanto en *Waste collected* como en el *collection rate*, lo cual imposibilita la estimación.

2.4 Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

Con el objetivo de familiarizarse con la base de datos y comprender sus principales características, se llevó a cabo un análisis exploratorio de datos (EDA). Esta etapa permitió identificar patrones generales, detectar valores atípicos y evaluar la calidad de los datos disponibles.

Se utilizaron gráficos de líneas para visualizar tendencias temporales, mapas para representar la distribución geográfica y gráficos de barras para comparar el rendimiento en generación y reciclaje entre países. Dependiendo del enfoque de cada análisis, se trabajó tanto con toneladas como kilogramos por persona.

Aunque también se exploraron las variables de productos puestos en el mercado y residuos recogidos, el análisis descriptivo se centró principalmente en los residuos generados y reciclados. Esta etapa permitió responder preguntas clave como: ¿qué países reciclan más residuos electrónicos?, ¿cuáles generan más residuos por persona?, ¿cómo ha evolucionado la generación de *e-waste* a lo largo del tiempo?, ¿qué productos son más generados y reciclados? y ¿cuál es el porcentaje de reciclaje alcanzado por país o región?

2.5 Análisis de Clústeres

Como parte del análisis exploratorio, se aplicaron técnicas de agrupamiento no supervisado, en particular el algoritmo *K-Means*, con el objetivo de identificar patrones comunes en la gestión de residuos electrónicos entre distintos países. El agrupamiento o *clustering* permite clasificar países en función de su comportamiento ambiental, ayudando a detectar perfiles similares, señalar buenas prácticas y revelar oportunidades de mejora.

Este análisis se desarrolló en tres niveles complementarios: primero, considerando indicadores agregados por país y medida global (por ejemplo, generación y reciclaje total); segundo, desagregando por categorías específicas de producto (como pequeños electrodomésticos o paneles fotovoltaicos); y, finalmente, a través del agrupamiento de

series temporales para observar patrones en la evolución histórica de los residuos electrónicos en diferentes contextos nacionales.

Agrupamiento por País y Métrica Global

El primer enfoque de agrupamiento se centró en identificar similitudes entre países en cuanto a su nivel de generación y reciclaje de residuos electrónicos. Este análisis permitió detectar patrones comunes, destacar países con prácticas más consolidadas y señalar aquellos con oportunidades de mejora en sus sistemas de gestión.

Para ello, se filtraron las columnas relevantes (“Reference area”, “Measure”, “Unit of measure” y “Transformed Obs Value”) y se aplicó la función *calculate_waste* para obtener los totales por país y medida. Luego, se construyeron dos conjuntos de datos, uno en toneladas y otro en kilogramos por persona. Posteriormente, se aplicó una transformación tipo *pivot* para reorganizar los datos: cada fila representaba una combinación de país y año, y cada columna correspondía a una medida. Los valores nulos se imputaron como ceros, bajo el supuesto de ausencia de actividad registrada en la medida correspondiente.

Antes de aplicar el algoritmo *K-Means*, los conjuntos de datos fueron transformados. Primero, se eliminaron las columnas de país y año, ya que no aportaban valor al proceso de agrupamiento. Luego, en el conjunto de toneladas, se aplicó la transformación *log1p* para reducir la influencia de valores atípicos. Finalmente, en ambos conjuntos se normalizaron todas las variables utilizando *StandardScaler*, con el fin de asegurar que todas las medidas tuvieran el mismo peso en el análisis.

La elección del número óptimo de clústeres se realizó mediante dos métodos: el método del codo (*elbow method*), que identifica el punto a partir del cual añadir más grupos no mejora significativamente la compacidad de los clústeres; y el índice de silueta (*silhouette score*), que evalúa qué tan bien separados y coherentes son los clústeres. Una vez definido el valor de *k*, se aplicó análisis de componentes principales (*principal component analysis*, PCA) para reducir la dimensionalidad y facilitar la visualización, preservando la mayor variabilidad posible.

Agrupamiento por Categorías de Producto

El segundo análisis se enfocó en identificar similitudes entre países en función de las categorías específicas de producto que componen el flujo de residuos electrónicos. Esto permite entender no sólo cuánto reciclan o generan los países, sino también qué tipo de productos predominan en sus prácticas de gestión.

Se trabajó con las medidas de residuos generados y residuos reciclados, tanto en toneladas como en kilogramos por persona. Se excluyeron las categorías *Total* y *Large equipment excluding photovoltaic panels* para evitar doble conteo. En los casos donde un país reportaba datos para *Large equipment* y *Photovoltaic panels*, se ajustaron los valores restando los paneles fotovoltaicos para reflejar con mayor precisión la composición real de los residuos.

Los datos se organizaron mediante una transformación tipo *pivot*, en la que cada fila representa un país y cada columna, una categoría de producto. Los valores faltantes se imputaron con ceros, bajo la suposición de ausencia de actividad registrada. Posteriormente, al igual que en el análisis anterior, se aplicó la transformación *log1p* a los valores expresados en toneladas, y en ambos conjuntos se utilizó *StandardScaler* para estandarizar las variables.

Por último, se aplicó nuevamente el algoritmo *K-Means* y se determinó el número óptimo de clústeres mediante el método del codo y el índice de silueta. Finalmente, se utilizó análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad y facilitar la visualización de los grupos formados.

Clustering de Series Temporales

El tercer análisis se centró en agrupar países según la evolución temporal de la generación y el reciclaje de residuos electrónicos, con el objetivo de identificar trayectorias comunes y comparar sus tendencias a lo largo del tiempo. Se trabajó exclusivamente con las métricas de generación y reciclaje, tanto en toneladas como en kilogramos por persona, durante el periodo 2018–2023, etapa en la que los datos presentaban mayor coherencia, cobertura y comparabilidad.

Los datos se reorganizaron nuevamente mediante una transformación tipo *pivot*, donde cada fila representa un país y cada columna un año. Para abordar la presencia de valores faltantes, se aplicó una interpolación lineal en ambas direcciones, lo que permitió completar las trayectorias temporales de manera coherente.

Las series fueron estandarizadas utilizando *TimeSeriesScalerMeanVariance()* de la biblioteca *tslearn*, que ajusta cada serie individual para tener media cero y varianza uno. Esto garantiza que el agrupamiento se base en la forma de la evolución temporal, y no en sus niveles absolutos.

Como medida de similitud entre países se utilizó *Dynamic Time Warping* (DTW), una métrica que permite comparar series temporales con diferentes ritmos de cambio, alineando trayectorias similares aunque ocurran en momentos distintos. Para realizar el agrupamiento, se aplicó el algoritmo *TimeSeriesKMeans*, configurado con DTW como distancia.

La selección del número óptimo de clústeres también se basó en el método del codo y el índice de silueta, adaptados al contexto de series temporales. Esta técnica permitió identificar grupos de países que no solo presentan niveles similares de generación o reciclaje, sino también trayectorias convergentes o divergentes a lo largo del tiempo.

2.6 Modelado predictivo (*Forecasting*)

Con el objetivo de anticipar tendencias y aportar evidencia útil para la toma de decisiones, se aplicaron técnicas de modelado predictivo basadas en series temporales. Se desarrollaron dos modelos globales, ambos enfocados en la medida de toneladas: uno para predecir la evolución del reciclaje y otro para estimar la generación de residuos electrónicos a nivel mundial.

Predicción global de residuos reciclados

Para proyectar la evolución futura del reciclaje global de residuos electrónicos, se desarrolló un modelo ARIMA a partir de los datos del período 2010–2023. Como primer paso, se analizaron las propiedades de la serie temporal: nivel, tendencia, estacionalidad, ciclos y ruido. Se observó una tendencia creciente con ciertas

fluctuaciones, pero sin estacionalidad evidente, lo cual era esperable al tratarse de datos anuales.

Dado que se trataba de una serie univariada, no estacional y de frecuencia anual, se optó por emplear modelos ARIMA (p,d,q), priorizando configuraciones simples debido al número limitado de observaciones (14 años), a fin de evitar el sobreajuste. La prueba de *Dickey-Fuller aumentada* (ADF) confirmó la estacionariedad de la serie, por lo que se estableció $d = 0$. Los gráficos de autocorrelación (*Autocorrelation Function*, ACF) y autocorrelación parcial (*Partial Autocorrelation Function*, PACF) no mostraron rezagos significativos, lo que llevó a proponer un modelo inicial ARIMA(0,0,0), equivalente a un modelo de media constante, con AIC = 279.25 y BIC = 280.53.

Aunque la función *auto_arima* sugirió como mejor opción un ARIMA(1,0,1), este modelo presentó advertencias de inestabilidad (matriz de covarianza casi singular), coeficientes no significativos y un leve incremento en AIC = 279.84 y BIC = 282.40. Se exploraron también alternativas como ARIMA(2,0,0), que presentó coeficientes no significativos y un ajuste levemente inferior (AIC = 280.46; BIC = 283.02).

Debido a que las diferencias entre modelos eran pequeñas y ninguno presentaba problemas graves de heterocedasticidad, autocorrelación ni violación de normalidad en los residuos, se incorporó una validación fuera de muestra utilizando los últimos tres años (2021–2023). Se calcularon métricas como MSE, RMSE y MAE.

El modelo ARIMA(1,0,1) tuvo el peor desempeño (MSE = 14.354.092,87; RMSE = 3.788,68; MAE = 3.491,71). El ARIMA(0,0,0), a pesar de ser el más simple y con mejor AIC/BIC, obtuvo resultados intermedios (MSE = 14.149.992,54; RMSE = 3.761,65; MAE = 3.260,63). Por su parte, el modelo ARIMA(2,0,0), aunque con coeficientes no significativos, ofreció el mejor rendimiento predictivo (MSE = 13.108.645,18; RMSE = 3.620,59; MAE = 3.064,51), y fue por tanto seleccionado como el más adecuado para proyectar el reciclaje global entre 2024 y 2028.

Predicción global de residuos generados

Para garantizar comparabilidad con la predicción del reciclaje, se utilizaron los mismos países en la proyección de residuos generados. Se excluyó el año 2023 por su baja

cobertura (solo 6 países), lo que redujo la muestra a 13 observaciones (2010–2022). La serie mostraba una tendencia general al alza, sin estacionalidad, y se optó nuevamente por modelos ARIMA simples.

La prueba ADF confirmó estacionariedad ($d=0$) y los gráficos de ACF y PACF no mostraron rezagos significativos, por lo que se seleccionó inicialmente un modelo ARIMA(0,0,0), que presentó un AIC = 474.275 y un BIC = 475.405. Sin embargo, el modelo ARIMA(0,1,0) ofreció una mejora significativa (AIC = 423.580; BIC = 424.065). No obstante, al asumir que los cambios entre años son completamente aleatorios, este modelo podría resultar demasiado simple para captar adecuadamente la evolución de la serie. El modelo ARIMA(0,2,0) mejoró aún más el ajuste (AIC = 400.32; BIC = 400.72), pero la prueba de *Ljung-Box* ($p = 0.02$) evidenció autocorrelación en los residuos.

Se probaron modelos más complejos para corregir esta deficiencia. El ARIMA(1,2,0) redujo el AIC = 394.628 y BIC = 395.424, presentó residuos normales y homocedásticos (p -valor Jarque-Bera = 0.52; p -valor heterocedasticidad = 0.82), y el coeficiente AR fue significativo. No obstante, se reportó una advertencia sobre la matriz de covarianza. Por su parte, el modelo ARIMA(0,2,1) ofreció el mejor ajuste (AIC = 390.09; BIC = 390.88), pero mantuvo autocorrelación en los residuos (p -valor *Ljung-Box* = 0.03), y el coeficiente MA no fue significativo, lo que indica que tampoco captura completamente la estructura temporal.

Para seleccionar el modelo final, se realizó una validación fuera de muestra con los últimos tres años del periodo (2020–2022), calculando métricas de error (MSE, RMSE y MAE). El modelo ARIMA(0,2,0) mostró el peor desempeño, mientras que el ARIMA(0,2,1) obtuvo los mejores resultados predictivos (MSE = 81.498.706.694,85; RMSE = 285.479,78; MAE = 265.071,51). A pesar de sus limitaciones, este último fue seleccionado para proyectar la generación global de residuos electrónicos entre 2024 y 2028, por su mayor capacidad de ajuste y predicción.

3. Resultados

3.1 Estado actual del reciclaje (EDA)

Para comprender el punto de partida en la gestión de residuos electrónicos a nivel global, se realizó un análisis exploratorio de datos (EDA) que abarcó tanto los residuos generados (en toneladas totales y en kilogramos por habitante) como los reciclados. Este análisis permite identificar tendencias generales, diferencias regionales y comportamientos particulares por categoría de producto, ofreciendo un punto de partida fundamental para detectar desigualdades y oportunidades de mejora.

Generación de residuos electrónicos: comparativa por país y por persona

Para comenzar el análisis, se realizó una primera comparación utilizando la medida en toneladas totales. Esta medida permite detectar los países con mayor contribución agregada a la generación de *e-waste*, independientemente de su población.

Como era de esperarse, los países más grandes o industrializados son quienes más residuos electrónicos generan. Estados Unidos lidera con aproximadamente 35.57 millones de toneladas acumuladas entre 2010 y 2023, seguido por Japón (32.55 millones). En contraste, países como Islandia, Malta o Luxemburgo presentan cantidades mucho menores, lo que responde principalmente a su tamaño poblacional y nivel de industrialización.

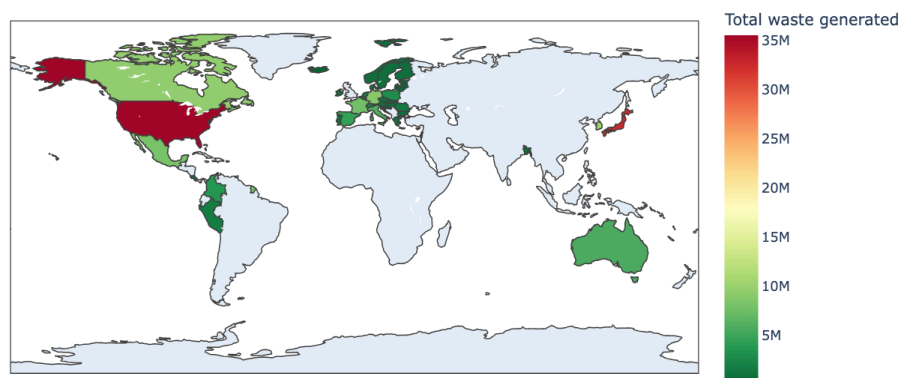


Figura 1: Total de residuos electrónicos generados por país (Toneladas)

Para una visión más equitativa, se calculó la generación de residuos por persona. Al ajustar por población, los resultados cambian significativamente. Suiza lidera esta métrica con 301.3 kg por persona, seguida de Canadá (262.9 kg) y Japón (256.6 kg). En contraste, países como Bangladesh, Perú y Hungría se sitúan por debajo de los 65 kg por persona. Esta diferencia refleja no solo desigualdades en el acceso y consumo de tecnologías, sino también en la capacidad de gestionar adecuadamente los residuos generados.

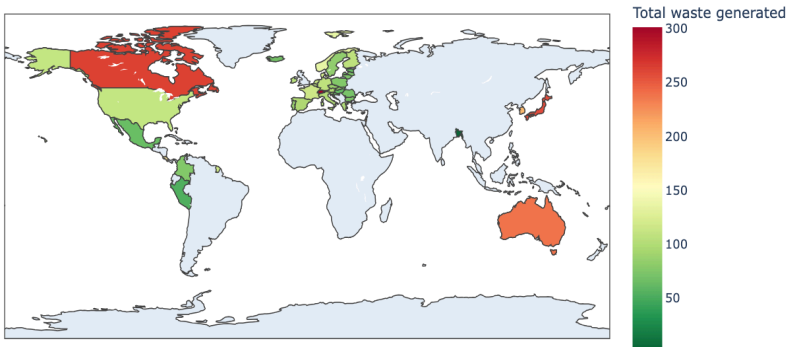


Figura 2. Total de residuos electrónicos generados por persona (Kg)

Reciclaje por persona y tasas de eficiencia

En el caso del reciclaje, se optó por utilizar exclusivamente los valores expresados en kilogramos por persona, ya que este enfoque permite realizar comparaciones más justas y significativas entre países. En esta medida, Suiza vuelve a destacar con el mayor valor acumulado de reciclaje por persona, con más de 200 kg reciclados por habitante, junto a países como Estados Unidos, Corea del Sur y Noruega. Por el contrario, Colombia, Costa Rica o Rumanía muestran valores considerablemente más bajos, lo que puede sugerir la necesidad de fortalecer infraestructuras o políticas de gestión de *e-waste*.

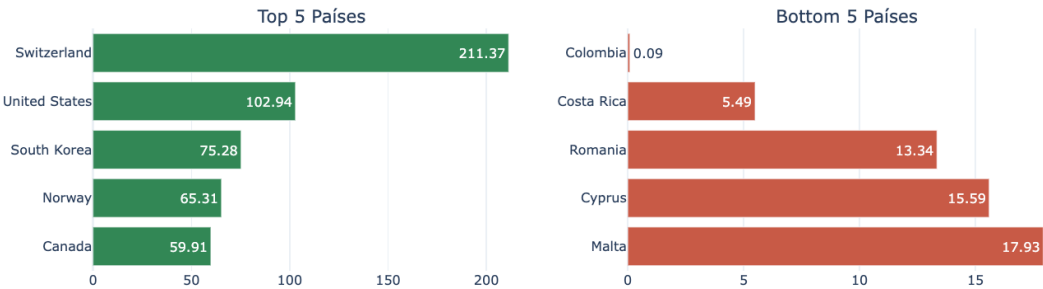


Figura 3. Total reciclado por país y por persona (Kg)

Además, se calculó la tasa promedio de reciclaje para el período 2010–2023, entendida como la proporción entre residuos reciclados y recogidos. Este indicador resume la eficiencia operativa de los sistemas nacionales de gestión de *e-waste*. Las tasas observadas varían entre el 67.0 % y el 100.0 %, destacando países como Estados Unidos, Suiza y Canadá en el extremo superior. No obstante, es importante señalar que los valores cercanos al 100.0 % no necesariamente reflejan una eficiencia perfecta, sino que pueden estar influenciados por prácticas administrativas de reporte (como contabilizar únicamente el residuo efectivamente tratado) o por limitaciones en la trazabilidad de otros destinos como la exportación, el almacenamiento o la incineración. Por ello, estos valores deben interpretarse con perspectiva, considerando también el contexto institucional y los mecanismos de seguimiento disponibles en cada país.

En contraste, países como Bélgica (67.0%), Malta (69.3 %) o los Países Bajos (71.8 %) presentan tasas más moderadas, lo que podría deberse tanto a pérdidas reales en el proceso de tratamiento como a una mayor rigurosidad en el reporte de datos, al registrar con más detalle los residuos que no son finalmente reciclados. Estas diferencias refuerzan la necesidad de evaluar no solo la cantidad de residuos gestionados, sino también la efectividad y trazabilidad de su tratamiento, como parte de una estrategia integral de sostenibilidad.

Reciclaje y generación por categoría de producto

Para entender qué productos representan los mayores desafíos en la gestión de *e-waste*, se analizó la generación y el reciclaje acumulado por categoría (en toneladas).

Los pequeños aparatos eléctricos lideran el reciclaje total con más de 12 millones de toneladas. Le siguen los equipos de intercambio de temperatura (como aires acondicionados y refrigeradores), así como los equipos grandes (excluyendo paneles fotovoltaicos). Las categorías con menor volumen reciclado son las lámparas y los paneles fotovoltaicos.

Esta situación se explica por el ciclo de vida corto de los pequeños aparatos, su bajo valor de reventa y su alta frecuencia de descarte. Productos como tostadoras, radios o juguetes electrónicos suelen reemplazarse con facilidad, y muchas veces no se identifican como residuos electrónicos, lo que dificulta su correcta recolección. Aunque

son una de las categorías más generadas, su volumen reciclado es relativamente bajo, lo que evidencia barreras técnicas y logísticas que limitan su recuperación efectiva.

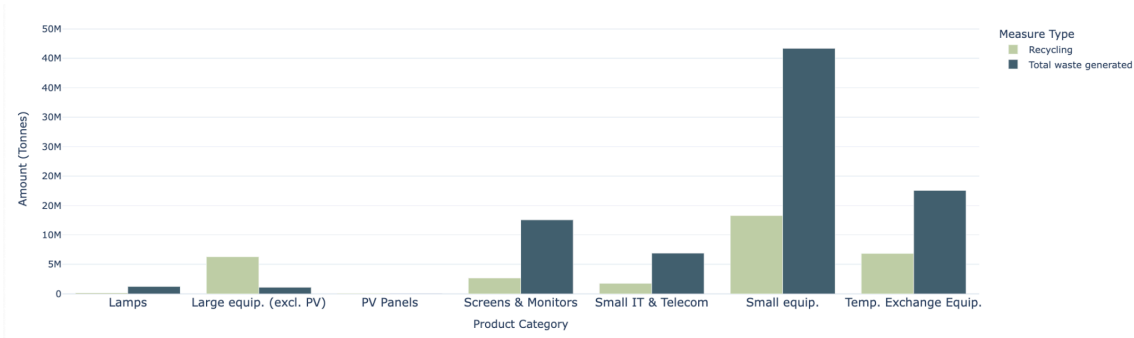


Figura 4. Comparación de residuos generados y reciclados por categoría (Toneladas)

Evolución global de la generación y el reciclaje

Entre 2010 y 2023, la generación global de residuos electrónicos mostró una tendencia creciente, impulsada principalmente por el aumento del consumo tecnológico y la corta vida útil de muchos dispositivos. Aunque el volumen reciclado también ha aumentado, la brecha entre generación y reciclaje sigue siendo amplia. La Figura 5 ilustra cómo, a pesar de ciertos avances en la capacidad de tratamiento, millones de toneladas de *e-waste* continúan sin gestionarse adecuadamente cada año. Esto refleja una falta de alineación entre las dinámicas de consumo y los sistemas de recuperación, con implicaciones tanto ambientales como económicas. En los últimos años, esta distancia se ha mantenido e incluso ampliado, lo que evidencia la necesidad de fortalecer los sistemas de recolección, clasificación y tratamiento a nivel global.

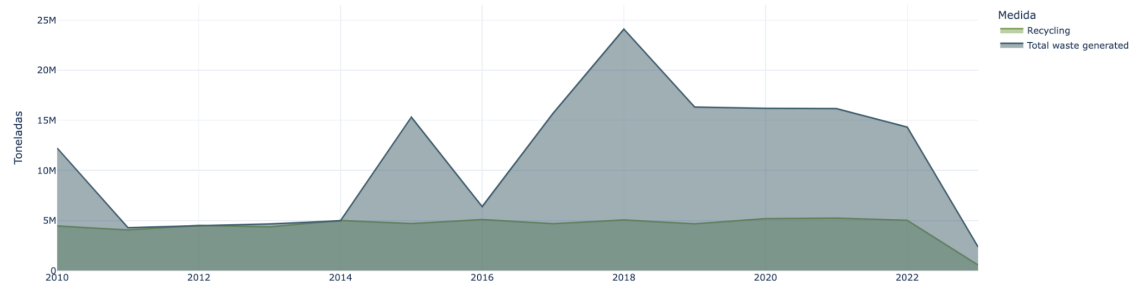


Figura 5. Evolución Global de la Gestión de Residuos Electrónicos

3.2 Segmentación de países y patrones de comportamiento (*Clustering*)

Para identificar patrones comunes entre países en cuanto a la generación y gestión de residuos electrónicos, se aplicaron técnicas de agrupamiento no supervisado (*clustering*). Este enfoque permitió detectar grupos de países con características similares y analizar cómo varían según los niveles de generación y reciclaje, las categorías de producto o su evolución a lo largo del tiempo.

Agrupaciones generales por país: residuos generados y reciclados

Como primer paso, se construyeron agrupaciones generales para identificar patrones comunes entre países en relación con su generación y reciclaje de residuos electrónicos, expresadas tanto en toneladas como en kilogramos por persona. Esta doble perspectiva permite comparar países no solo por su volumen total de residuos, sino también considerando su población, lo que ofrece una visión más ajustada a sus contextos socioeconómicos.

Se aplicó un análisis de clústeres utilizando la técnica de *K-Means clustering*. La selección del número óptimo de clústeres se basó en dos criterios: el método del codo (*elbow method*) y el índice de silueta (*Silhouette Score*). En el caso de los datos expresados en toneladas, el valor óptimo fue $k = 5$, ya que ofrecía un equilibrio adecuado entre separación y simplicidad. Para los datos por persona, el valor óptimo fue $k = 2$, dado que el índice de silueta alcanzaba su punto máximo y descendía significativamente a partir de ese punto.

En el análisis realizado con datos en toneladas, se identificaron cinco grupos con perfiles bien diferenciados. El Clúster 1 reúne a países con altos niveles tanto de generación como de reciclaje de residuos electrónicos, incluyendo a Canadá, Francia, Alemania, Italia, Japón, Polonia, Corea del Sur, España, Suiza y Estados Unidos. Estos países comparten un alto grado de industrialización y estructuras de gestión relativamente avanzadas.

El Clúster 2 está compuesto por países pequeños como Chipre, Estonia, Islandia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta y Eslovenia. Aunque su volumen total de residuos es limitado, muestran patrones similares entre sí, probablemente debido a

factores como su tamaño poblacional y su integración en marcos normativos regionales, como los europeos.

En el Clúster 3 se ubican Australia, Bangladesh, Israel, México y Perú. Estos países presentan niveles de reciclaje bajos combinados con volúmenes moderados o altos de generación, lo que podría indicar limitaciones en su capacidad de tratamiento o una menor trazabilidad de sus procesos.

El Clúster 4 está compuesto únicamente por Liechtenstein, cuyo perfil lo distancia del resto de países, posiblemente debido a su tamaño extremadamente reducido y a particularidades administrativas.

Finalmente, el Clúster 5 incluye un conjunto amplio y diverso de países europeos y latinoamericanos, entre ellos Austria, Bélgica, Bulgaria, Colombia, Costa Rica, Croacia, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Grecia, Hungría, Irlanda, Países Bajos, Noruega, Portugal, Rumanía, Eslovaquia y Suecia. Este grupo se caracteriza por niveles moderados tanto en generación como en reciclaje, con sistemas de gestión activos pero con variaciones importantes en su eficiencia.

Cuando se consideran los datos por persona, el análisis muestra una segmentación mucho más marcada. El Clúster 1 incluye a la gran mayoría de países, con niveles bajos o moderados tanto en generación como en reciclaje por habitante. A pesar de su diversidad geográfica y económica, este grupo presenta una variabilidad interna relativamente baja, lo que sugiere cierta consistencia en sus prácticas de consumo y gestión, o bien limitaciones estructurales compartidas.

Por otro lado, el Clúster 2 está compuesto únicamente por Suiza y Estados Unidos, que se destacan por sus elevados niveles de reciclaje por persona. Estos dos países se separan claramente del resto por su capacidad efectiva de reciclaje, infraestructura de recuperación y volumen de residuos tratados por habitante, lo que los convierte en casos atípicos dentro del sistema global.

La comparación entre las agrupaciones obtenidas a partir de las toneladas totales y los datos por persona muestra cómo la elección de la métrica incide directamente en la

interpretación de los patrones. Mientras que países como Suiza o Estados Unidos se mantienen destacados en ambos enfoques, otros presentan diferencias significativas al ajustar por población. Por ejemplo, México o Colombia se ubican entre los clústeres con menor desempeño absoluto, pero su posición relativa mejora al analizar los datos por persona, lo que evidencia la necesidad de ajustar los indicadores según el objetivo del análisis.

Agrupaciones por categoría de producto: diferencias estructurales en el reciclaje y la generación

Además de analizar diferencias entre países según el total de residuos generados o reciclados, se exploraron los patrones asociados según el tipo de residuo electrónico (equipos grandes y pequeños, lámparas, paneles fotovoltaicos, entre otros). Este enfoque ayuda a entender no sólo qué países reciclan más, sino también qué tipo de productos predominan en sus flujos de *e-waste* y cómo varía su capacidad de gestión según la categoría.

Para ello, se aplicó nuevamente la técnica de *K-Means*, en sus dos escalas: toneladas totales y kilogramos por persona. La selección del número óptimo de grupos se basó en el método del codo y el índice de silueta.

En el caso del reciclaje expresado en toneladas, el valor óptimo de agrupación fue $k = 2$. El Clúster 1 está conformado por Austria, Bélgica, Bulgaria, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Rumanía, Eslovaquia, España, Suecia y Suiza. Estos países presentan sistemas de reciclaje más robustos y diversificados, con políticas consolidadas y una mayor capacidad para procesar distintas categorías de productos.

El Clúster 2, reúne a Canadá, Colombia, Costa Rica, Croacia, Chipre, Estonia, Islandia, Japón, Letonia, Liechtenstein, Lituania, Luxemburgo, Malta, Eslovenia y Estados Unidos, y presenta un perfil diferente: aunque algunos de ellos alcanzan altos

volúmenes de reciclaje, tienden a concentrarse en categorías como grandes electrodomésticos, con menor presencia en aparatos de consumo personal o tecnologías

emergentes. Este patrón podría reflejar brechas normativas o cobertura parcial en los programas de reciclaje.

Al analizar el reciclaje por persona, el número óptimo de clústeres fue $k = 4$. El Clúster 1, que incluye a Bélgica, Alemania e Italia, se caracteriza por una gestión equilibrada y madura del reciclaje electrónico en distintas categorías. Estos países presentan valores medios-altos en residuos reciclados por habitante, tanto en grandes equipos como en pequeños aparatos, con una presencia también significativa en tipos de productos menos comunes como los paneles fotovoltaicos. La diversificación y consistencia entre categorías sugiere la existencia de políticas avanzadas, infraestructuras amplias y una participación estable de la población en las prácticas de reciclaje.

El Clúster 2 agrupa a Canadá, Colombia, Costa Rica, Croacia, Chipre, Estonia, Grecia, Hungría, Japón, Letonia, Lituania, Malta, Portugal, Rumanía, Eslovaquia, Eslovenia y España. Este conjunto de países presenta niveles de reciclaje modestos y relativamente homogéneos en la mayoría de categorías. Los valores registrados son bajos incluso en categorías como los equipos grandes y pequeños, y casi inexistentes en productos menos comunes como los paneles fotovoltaicos o el equipamiento informático. Esta situación sugiere una cobertura limitada y menor desarrollo en infraestructuras o programas de reciclaje especializados, con oportunidades claras de mejora tanto a nivel normativo como operativo.

El Clúster 3 está formado por Austria, Bulgaria, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Islandia, Irlanda, Liechtenstein, Luxemburgo, Países Bajos, Noruega, Polonia, Suecia y Estados Unidos. Estos países presentan volúmenes elevados de reciclaje, especialmente en categorías como los equipos grandes y pequeños. Aunque la presencia en residuos más recientes o especializados, como los paneles fotovoltaicos, aún es limitada, el conjunto muestra un perfil avanzado con coberturas amplias y consistentes en la mayoría de categorías. Se trata de sistemas consolidados, con estructuras de reciclaje robustas, alta capacidad instalada y una cultura ambiental desarrollada. Representan, en gran medida, el núcleo de países líderes en la gestión moderna de residuos electrónicos.

Finalmente, Suiza conforma por sí sola el Clúster 4, lo que reafirma su posición destacada en reciclaje. Presenta un perfil especializado, con altos niveles en categorías relacionadas con el consumo doméstico y tecnológico personal, como pequeños aparatos, equipamiento informático y equipos de intercambio de temperatura. Esta configuración sugiere un enfoque nacional centrado en ciertos tipos de residuos, posiblemente reflejo de una estrategia focalizada en productos de uso cotidiano.

En cuanto a la generación total en toneladas, el número óptimo de clústeres fue $k = 4$. El Clúster 1 incluye a Dinamarca, Finlandia, Hungría, Países Bajos, Portugal y España, que presentan volúmenes intermedios y estructuras de generación más equilibradas. Estos países destacan por una generación desarrollada en productos como paneles fotovoltaicos y pequeños aparatos, lo que refleja sistemas tecnológicos maduros, diversidad de consumo y capacidades avanzadas de reporte e infraestructura.

El Clúster 2 está compuesto únicamente por Estados Unidos, cuya magnitud en la generación total de residuos electrónicos lo sitúa en una categoría propia. Refleja una potencia de consumo masivo, pero con limitaciones en el detalle de reporte en ciertas categorías. Representa un perfil singular con un impacto ambiental elevado y concentrado.

En el Clúster 3 se ubican Australia, Canadá, Colombia, Costa Rica, Israel, Japón, México, Perú, Corea del Sur y Suiza, con volúmenes elevados, especialmente en categorías tradicionales como pequeños electrodomésticos, equipos informáticos y de intercambio de temperatura, pero realidades económicas y poblacionales distintas. Este perfil sugiere sistemas de consumo tecnológico activos pero con cobertura parcial, posiblemente asociada a diferencias en la infraestructura de reporte o en la madurez de sus políticas de clasificación y seguimiento.

Por último, Chipre, Islandia y Luxemburgo integran el Clúster 4, representado por países con volúmenes bajos de generación en todas las categorías de residuos electrónicos. Se trata de economías pequeñas, con mercados tecnológicos más reducidos y patrones de consumo más moderados, posiblemente asociados a menores niveles de digitalización o a ciclos de renovación tecnológica más largos.

Al analizar la generación por persona, el número óptimo de clústeres fue $k = 5$. El Clúster 1 incluye a Colombia, Costa Rica, Chipre, Hungría, Islandia, Israel, Luxemburgo, México, Perú y España. Estos países presentan niveles bajos o moderados de generación por habitante, con un perfil que sugiere patrones de consumo más restringidos o una integración tecnológica menos intensiva.

En el Clúster 2 se encuentran Australia, Canadá, Japón y Suiza, caracterizados por altos niveles de generación por persona, particularmente en categorías tradicionales como pequeños aparatos eléctricos y equipos de intercambio de temperatura. Sin embargo, su presencia es mucho más limitada en nuevas categorías como los paneles fotovoltaicos o las lámparas, lo que sugiere un enfoque aún centrado en productos convencionales.

El Clúster 3 está formado por Dinamarca, Finlandia, Países Bajos y Corea del Sur, países que combinan altos niveles de generación con una cobertura amplia en distintas categorías de residuos. Además de destacar en grandes y pequeños aparatos, muestran una presencia significativa en otros tipos de productos como paneles fotovoltaicos y equipos de intercambio de temperatura. Este perfil sugiere sistemas de gestión sólidos, apoyados en tecnologías modernas de clasificación y tratamiento, así como en políticas que promueven la diversificación y eficiencia del reciclaje electrónico.

Estados Unidos conforma por sí solo el Clúster 4, reflejando un perfil de generación intensiva por habitante, altamente concentrado en categorías como grandes y pequeños aparatos. Esta concentración podría estar vinculada a una priorización política en el tratamiento de ciertos residuos, a las particularidades del mercado de consumo o a limitaciones en los mecanismos de recolección y reporte de otras categorías. Este patrón sugiere un enfoque de gestión específico, con implicaciones relevantes tanto en términos de impacto ambiental como de eficiencia estructural.

Finalmente, el Clúster 5 está compuesto únicamente por Portugal, cuyo comportamiento no se alinea claramente con los demás grupos. Presenta niveles destacados en categorías tradicionales, y muestra una presencia notable en residuos emergentes como los paneles fotovoltaicos. Esta combinación podría estar asociada a políticas nacionales específicas, una mayor adopción de tecnologías renovables o a un sistema de clasificación más detallado.

Estos resultados refuerzan la importancia de tener en cuenta las diferencias entre categorías de producto. Mientras que los residuos provenientes de pequeños aparatos son los más frecuentes, también presentan mayores dificultades para su recuperación. En cambio, los equipos grandes o industriales, aunque menos numerosos, tienden a ser más fáciles de recolectar y tratar.

Agrupaciones por evolución temporal: dinámicas de reciclaje y generación

Con el objetivo de identificar patrones dinámicos en la evolución de la generación y el reciclaje de residuos electrónicos a lo largo del tiempo, se aplicaron técnicas de agrupamiento de series temporales desde 2018 en adelante debido a mejoras significativas en la calidad y cobertura de los datos. A diferencia del análisis por país y medida presentado en la sección anterior, este enfoque permite observar cómo han variado los niveles de generación y reciclaje a lo largo del tiempo, capturando tendencias y posibles cambios estructurales entre países.

La selección del número óptimo de clústeres se determinó mediante el índice de silueta, aplicado por separado a los datos expresados en toneladas y en kilogramos por persona, tanto para residuos generados como reciclados. Para realizar el agrupamiento temporal, se utilizó el algoritmo *Dynamic Time Warping* (DTW) como medida de similitud entre las series.

Para el análisis de reciclaje medido en toneladas, el número óptimo de clústeres determinado mediante el índice de silueta fue $k = 2$, lo que permitió agrupar a los países según la similitud de sus trayectorias temporales. El Clúster 1 está compuesto por una combinación de economías europeas centrales y orientales, junto con países asiáticos y latinoamericanos con marcos institucionales diversos. Este grupo incluye tanto países con sistemas consolidados de gestión de residuos, como otros con estructuras en desarrollo o expansión. En general, comparten un compromiso creciente con la infraestructura de reciclaje y políticas ambientales activas. El Clúster 2, en cambio, agrupa principalmente a países del norte y occidente de Europa, junto con naciones más pequeñas. Se trata, en su mayoría, de economías avanzadas con alto nivel de ingresos, marcos regulatorios consolidados y larga trayectoria en políticas ambientales.

A partir de estos grupos, se analizaron las tendencias individuales mediante regresión lineal y el test de *Mann-Kendall*. Algunas economías, como Italia, Polonia, Bulgaria, Bélgica y Corea del Sur, mostraron un crecimiento sostenido y estadísticamente significativo en sus volúmenes anuales reciclados. En contraste, países como Suecia, Croacia e Islandia presentaron tendencias descendentes. Por su parte, Alemania, Francia y Japón mantuvieron trayectorias relativamente estables, sin cambios significativos. Este análisis permitió identificar patrones diferenciados entre países y constituyó un punto de partida para interpretar sus dinámicas de gestión de residuos.

En el caso del reciclaje por persona, el número óptimo de clústeres fue $k = 2$. El Clúster 1 agrupa principalmente a países con sistemas de reciclaje más maduros. El Clúster 1 está integrado por una mezcla de economías europeas de tamaño medio, junto con países asiáticos y americanos con distintos niveles de desarrollo institucional. Este grupo incluye tanto naciones con sistemas de reciclaje maduros, como otras con marcos en consolidación. En conjunto, se caracterizan por avances sostenidos en políticas ambientales y una creciente concienciación sobre la gestión responsable de residuos a nivel individual. El Clúster 2, por su parte, agrupa principalmente a países del norte y occidente de Europa, así como algunas economías pequeñas y altamente desarrolladas. Estas naciones suelen presentar niveles históricamente elevados de generación por persona y estructuras regulatorias consolidadas, aunque sus trayectorias recientes en reciclaje por persona muestran una mayor heterogeneidad, incluyendo estancamientos o leves retrocesos en algunos casos.

A partir de estos agrupamientos, se analizaron nuevamente las tendencias individuales. Algunos países, como Italia, Polonia, Corea del Sur y Bélgica, mostraron un crecimiento sostenido y estadísticamente significativo en sus niveles de reciclaje por persona. En contraste, economías como Suecia, Canadá, Croacia e Islandia presentaron tendencias descendentes. Otros países, entre ellos Alemania, Francia, Japón y Austria, mantuvieron comportamientos relativamente estables, sin variaciones significativas a lo largo del período.

En cuanto a la generación total en toneladas, el número óptimo de clústeres fue $k = 2$. El Clúster 1 está compuesto por una amplia diversidad de países, que incluye tanto economías emergentes como desarrolladas. A pesar de sus diferencias en tamaño,

ingresos y estructura económica, estos países comparten un patrón de crecimiento sostenido en la generación de residuos electrónicos, impulsado por el aumento del consumo tecnológico y la expansión de sus mercados internos. El Clúster 2, por su parte, agrupa principalmente a países europeos, muchos de ellos con altos niveles de ingreso y trayectorias consolidadas en producción y consumo. Este grupo se caracteriza por niveles históricamente elevados de generación por persona, pero con patrones más estables o incluso en leve desaceleración en los últimos años, lo que puede reflejar políticas de eficiencia, madurez en el ciclo de vida de los productos electrónicos o cambios en los hábitos de consumo.

Con base en estos agrupamientos, se examinaron las trayectorias país por país. Algunos países, como Australia, Italia, Japón, Perú y Corea del Sur presentaron tendencias significativamente crecientes en la generación de residuos electrónicos por persona. En cambio, economías como Finlandia, Luxemburgo, Noruega y Suecia mantuvieron trayectorias estables, mientras que Portugal e Islandia mostraron descensos en el período analizado.

En cuanto a la generación total de residuos por persona, el número óptimo de clústeres fue nuevamente $k = 2$. El Clúster 1 agrupa una diversidad de países, tanto industrializados como en desarrollo. A pesar de sus diferencias estructurales, estos países reflejan una expansión sostenida de los sistemas de producción, consumo y uso de dispositivos electrónicos. Por su parte, el Clúster 2 está compuesto por países cuya estructura de consumo muestra un crecimiento sutil a nivel individual. Esto puede deberse a factores como menores niveles de ingreso, diferente grado de acceso a tecnologías electrónicas o enfoques más racionalizados en el uso de recursos. También incluye algunas economías desarrolladas con modelos de consumo más eficientes o regulaciones orientadas a la reducción de residuos.

A partir de estos agrupamientos, se exploraron nuevamente las tendencias individuales de varios países, como Italia, Canadá, Grecia, México, Japón y Corea del Sur, que presentaron un crecimiento en sus niveles de generación por persona. En contraste, Islandia y Portugal mostraron trayectorias descendentes, mientras que otras como España, Croacia y Dinamarca, mantuvieron niveles relativamente estables a lo largo del tiempo.

Los análisis realizados evidencian que la generación y el reciclaje de residuos electrónicos no evolucionan necesariamente en paralelo. Mientras que el aumento en la generación suele ser generalizado, el progreso en reciclaje es más desigual, condicionado por factores estructurales, normativos y culturales. La combinación de agrupamientos generales y temporales ofrece una visión complementaria, lo que permitió identificar tanto perfiles nacionales estables, como detectar trayectorias de mejora o retroceso. Por ejemplo, países como Italia y Corea del Sur no sobresalen en el agrupamiento general, pero muestran mejoras sostenidas en reciclaje, mientras que Suecia o Islandia, bien posicionados a nivel general, presentan tendencias decrecientes. Esta perspectiva integrada es clave para diseñar políticas más ajustadas a las necesidades y capacidades de cada país.

3.3 Predicción del reciclaje y generación de residuos electrónicos (*Forecasting*)

Con el objetivo de anticipar el comportamiento futuro del sistema global de gestión de residuos electrónicos, se desarrollaron modelos de predicción por separado para dos variables clave: la cantidad de residuos reciclados y la cantidad de residuos generados, ambas medidas en toneladas. El análisis temporal permite observar si las tendencias registradas desde 2010 apuntan hacia una mejora, un estancamiento o un deterioro en los próximos años, ofreciendo información útil para la planificación de políticas públicas a nivel internacional.

Predicción global de residuos reciclados

Para la predicción del volumen total de residuos electrónicos reciclados a nivel mundial, se utilizó un modelo ARIMA entrenado con datos del período 2010–2023. Tras evaluar distintas configuraciones, se optó por ARIMA(2,0,0) por su buen ajuste y capacidad predictiva sobre la serie histórica.



Figura 6. Predicción Global de Residuos Electrónicos Reciclados (Toneladas)

La proyección generada abarca el intervalo 2024–2028. Los resultados muestran una leve caída en los volúmenes reciclados durante 2025 y 2026, con un mínimo estimado en 2026, seguido de una recuperación progresiva a partir de 2027. Este comportamiento indica una evolución no lineal y alerta sobre el riesgo de estancamiento temporal si no se refuerzan las capacidades globales de reciclaje.

Estos resultados refuerzan la necesidad de acciones estratégicas para consolidar una mejora sostenida en el reciclaje de residuos electrónicos. Sin acciones concretas, el avance podría ser irregular, con momentos de progreso seguidos por estancamientos.

Predicción global de residuos generados

Para predecir el volumen total de residuos electrónicos generados a nivel mundial, se utilizó un modelo ARIMA entrenado con datos del período 2010–2022. Debido a la falta de información completa en 2023, se excluyó ese año para evitar sesgos. Además, se incluyeron únicamente los países con registros anuales tanto de generación como de reciclaje, garantizando así una base homogénea para el análisis. Tras comparar distintas configuraciones, el modelo que mostró el mejor desempeño predictivo fue ARIMA(0,2,1). Esta configuración permitió capturar adecuadamente la dinámica de la serie temporal, incluyendo su tendencia subyacente.

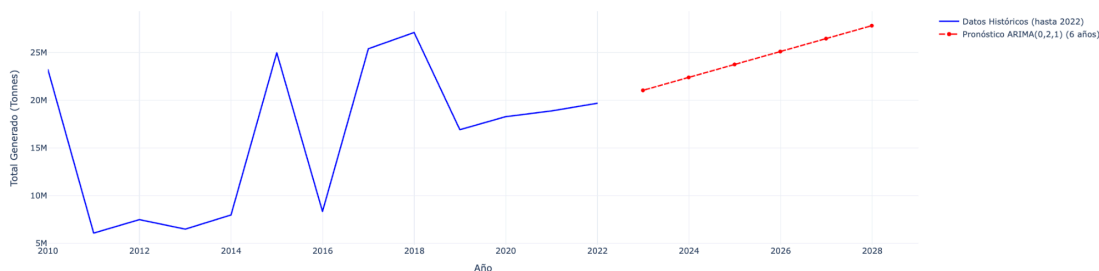


Figura 7. Predicción Global de Residuos Electrónicos Generados (Toneladas)

La proyección para el período 2023–2028 muestra un aumento sostenido en la generación de residuos electrónicos, sin señales de estabilización en el corto plazo. Esta tendencia, ya presente en los datos históricos, resalta la necesidad urgente de políticas de prevención, rediseño de productos y enfoques de economía circular orientados a reducir los residuos desde su origen.

En conjunto, las predicciones realizadas evidencian una brecha persistente entre la generación y el reciclaje de residuos electrónicos, la cual podría ampliarse en los próximos años si no se fortalecen las capacidades globales de recuperación y tratamiento. Mientras la generación presenta una proyección de crecimiento sostenido, el reciclaje muestra una evolución más lenta y limitada, sin señales de convergencia con el volumen de residuos generados. Estos hallazgos resaltan la urgencia de avanzar hacia políticas integradas que no solo promuevan el reciclaje, sino que también aborden las causas estructurales del crecimiento exponencial en la generación de residuos. La anticipación de estas tendencias ofrece una base analítica sólida para orientar decisiones estratégicas en materia ambiental y tecnológica a nivel global.

4. Discusión

La principal contribución de este trabajo consiste en ofrecer una comprensión integral y multifacética de las complejas dinámicas de la gestión de residuos electrónicos a nivel global. A través de una combinación integrada de análisis exploratorio de datos (EDA), técnicas de agrupamiento como *K-Means* y DTW para series temporales, y modelos de predicción basados en ARIMA, hemos logrado ir más allá de las cifras agregadas para revelar patrones de comportamiento específicos entre países, identificar la evolución en la gestión por categorías de productos y proyectar tendencias futuras cruciales para la generación y el reciclaje de *e-waste*.

Los hallazgos revelan una desigualdad inherente en la generación y gestión de residuos electrónicos. Mientras que los países industrializados suelen generar volúmenes totales masivos de residuos electrónicos, el análisis por persona revela realidades contrastantes: un país con alto consumo individual no necesariamente tiene un sistema de reciclaje eficiente, y, al mismo tiempo, algunos países con consumo moderado por persona logran tasas de reciclaje destacadas. Esta diferenciación es clave, ya que sugiere que las estrategias deben adaptarse no sólo al volumen total, sino también a la densidad de consumo y a la capacidad de gestión de cada país. Además, el análisis por categoría de producto subraya que, aunque los pequeños aparatos son los más generados, también son los más difíciles de recuperar, lo que implica desafíos logísticos y técnicos significativos para alcanzar una economía circular plena.

Las tendencias históricas y las proyecciones futuras refuerzan la urgencia de intervenciones estratégicas. La identificación de países con trayectorias de reciclaje crecientes (como Italia, Polonia y Corea del Sur) ofrece modelos de éxito que pueden servir de referencia. En contraste, los descensos observados en otros países requieren una interpretación más cuidadosa: en el caso de Suecia, la reducción podría reflejar un estancamiento tras haber alcanzado niveles históricamente altos de reciclaje, o bien dificultades asociadas a nuevas categorías de residuos más complejas de gestionar. Por otro lado, Canadá muestra una caída más marcada, lo que podría indicar una pérdida de capacidad o eficacia en sus sistemas de gestión. Estos contrastes evidencian que el

progreso en materia de reciclaje no es lineal ni garantizado, y que incluso países con sistemas avanzados pueden enfrentar retrocesos o desafíos emergentes.

Más allá de estos casos individuales, las proyecciones globales muestran un panorama preocupante: se espera que la generación de residuos electrónicos continúe aumentando de forma sostenida, sin señales de estabilización. Aunque el reciclaje global muestra una leve recuperación tras una caída temporal, su ritmo de mejora es insuficiente para cerrar la creciente brecha con la generación. El análisis por clústeres temporales confirma esta preocupación: incluso en países con sistemas maduros, las trayectorias de reciclaje tienden a ser estables o apenas ascendentes. Esto implica que millones de toneladas de materiales seguirán perdiéndose o siendo gestionados de forma inadecuada si no se adoptan medidas más efectivas.

A partir de los resultados de este estudio, se abren varias líneas futuras de investigación. En primer lugar, es crucial mejorar la calidad y granularidad de los datos a nivel global, ya que las limitaciones en el reporte y la trazabilidad fueron evidentes en varias etapas del análisis, lo que afecta potencialmente la precisión de las proyecciones y la interpretación de eficiencias. Una segunda línea podría enfocarse en profundizar en los factores socioeconómicos y regulatorios que impulsan las tendencias de generación y reciclaje en los países con desempeños destacados o deficientes, lo que permitiría replicar buenas prácticas y diseñar estrategias más específicas. Finalmente, sería valioso explorar el impacto de nuevas tecnologías y enfoques de economía circular en la reducción de residuos desde su origen y en la mejora de los procesos de recuperación.

5. Impacto Social

Este proyecto se alinea con tres de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, reflejando un compromiso con un futuro más equitativo y ambientalmente responsable. El crecimiento constante de los residuos electrónicos y su contenido tóxico (como plomo y mercurio), hacen urgente el desarrollo de soluciones innovadoras, eficaces y basadas en evidencia para implementar procesos especializados de reciclaje y manejo adecuado.

ODS 12: Producción y consumo responsables es el objetivo más directamente impactado. Este ODS promueve la reducción de desechos y una gestión sostenible a lo largo del ciclo de vida de los productos. En el contexto de los residuos electrónicos, se estima que la generación global alcanzará los 74.7 millones de toneladas para 2030, según proyecciones citadas por Ahirwar y Tripathi (2021). En este escenario, fomentar el reciclaje y la reutilización se vuelve esencial. Los hallazgos de este estudio destacan la creciente brecha entre generación y reciclaje, enfatizando la necesidad de fortalecer políticas públicas, invertir en infraestructura de reciclaje y fomentar prácticas de economía circular. Además, el conocimiento generado puede facilitar la toma de decisiones informadas y promover cambios en los hábitos de consumo tecnológico.

El proyecto también contribuye al ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, al evidenciar cómo una gestión adecuada de estos residuos es un componente vital para la habitabilidad y sostenibilidad de los entornos urbanos y rurales. La presencia de metales y sustancias tóxicas en los electrónicos hace que su gestión inadecuada pueda provocar la contaminación del suelo, el aire y el agua (Ahirwar & Tripathi, 2021), lo cual representa un riesgo directo para la salud pública en las comunidades. La OMS (2024) advierte que la exposición prolongada a los residuos electrónicos, especialmente en contextos de reciclaje informal, representa un riesgo significativo para la salud infantil y de los trabajadores. En este sentido, los resultados de este estudio pueden ser utilizados por organismos gubernamentales, empresas tecnológicas y organizaciones ambientales para desarrollar estrategias de reciclaje más efectivas y sostenibles.

Finalmente, este trabajo se vincula con el ODS 13: Acción por el clima, que promueve medidas urgentes para combatir el cambio climático. La fabricación de dispositivos

electrónicos genera una gran huella de carbono debido al uso intensivo de energía y a la demanda de materias primas. Como señala SMV (2024), el reciclaje de dispositivos electrónicos puede contribuir a reducir la necesidad de extraer nuevos recursos, lo que a su vez disminuye el consumo energético y las emisiones asociadas a su fabricación. Una mala gestión de residuos electrónicos puede significar que los productos terminen incinerados, lo que libera contaminantes atmosféricos y gases que contribuyen directamente al cambio climático. Al fomentar prácticas de reciclaje más eficaces mediante el análisis de tendencias y predicciones, este proyecto contribuye a los esfuerzos globales orientados a mitigar el cambio climático y sus efectos.

En cuanto a las consideraciones éticas y legales sobre la privacidad de datos, este proyecto se desarrolló íntegramente con datos agregados y de acceso público, procedentes de fuentes oficiales sobre generación y reciclaje de residuos electrónicos. No se empleó información personal, sensible ni identificable, por lo que normativas como el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) de la Unión Europea no es aplicable. Sin embargo, se mantuvo un compromiso firme con la transparencia metodológica y la integridad en el tratamiento y la comunicación de datos, garantizando que los resultados fueran objetivos, reproducibles y útiles para la toma de decisiones con impacto social y ambiental positivo.

6. Bibliografía

- Ahirwar, R., & Tripathi, A. K. (2021). E-waste management: A review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100409>
- Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S., ... & Wagner, M. (2024). *Observatorio Internacional sobre Residuos Electrónicos 2024*. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), International Telecommunication Union (ITU).
<https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024>
- Country sheets. (s. f.). <https://globalewaste.org/country-sheets/>
- SMV. (2024, October 10). *¿Qué puedes hacer con tus dispositivos viejos?* SMV Gestión Residuos En Valencia Y Toda España.
<https://www.smv.es/reciclaje-de-residuos-electronicos/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (s.f.). *Explorador de datos sobre residuos electrónicos*. OCDE. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://data-explorer.oecd.org>
- World Health Organization: WHO. (2024, October 1). *Electronic waste (e-waste)*.
[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-\(e-waste\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste))

7. Apéndices

7.1 Apéndice 1: Código y datos



Los datos utilizados están disponibles en el siguiente archivo:
[OECD_EWaste_March2025.csv](#)