

Estudio sobre la situación en Navarra de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) y sus residuos (RAEE) en relación a las materias primas críticas



Centro Tecnológico Lurederra



Lurederra
centro tecnológico

ESTUDIO SOBRE LA SITUACIÓN EN NAVARRA DE LOS APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (AEE) Y SUS RESIDUOS (RAEE) EN RELACIÓN A LAS MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS

ÍNDICE

	Pág.
1. Introducción.....	3
2. Cadena de valor navarra de los AEE.....	3
3. Implicaciones del reglamento de ecodiseño y Pasaporte Digital de Productos en la cadena de valor.....	6
4. Primera estimación de la cantidad de materias primas críticas asociadas a la gestión de RAEE en Navarra.	9
5. Recuperación de materias primas críticas: caso real.....	20

1. Introducción.

Los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) son elementos ubicuos en la vida diaria, cuya presencia, además, muestra una tendencia en crecimiento continuo, debido a la creciente utilización de la tecnología en todos los aspectos de la vida cotidiana. Los cambios que los AEE están introduciendo en los hábitos de vida y consumo, deben ir acompañados de adaptaciones en los sistemas de gestión y tratamiento de sus residuos (RAEE), de modo que estos puedan ser reciclados de forma eficiente, recuperando y valorizando la gran variedad de materiales que presentan en su composición.

Aunque la variedad de AEE presentes en el mercado es extremadamente amplia, la complejidad de los mismos también está aumentando de forma notable, encontrándose cada vez un mayor número de componentes, fabricados en materiales diferentes. Esto reduce su vida útil y dificulta su reparación y su reutilización, así como el reciclaje de los RAEE, a lo que también contribuyen estrategias comerciales implementadas por los productores, como es el caso de la obsolescencia programada, que aumentan la tasa de renovación de los AEE, y, con ello, el volumen de residuos asociados a su producción y consumo. Además, se da la paradoja de que la producción de AEE requiere, cada vez más, de materias primas críticas, las cuales presentan un acceso muy limitado en el mercado y poseen un gran valor, materias que, al término de la vida útil de los AEE, resulta complicado y costoso recuperar. Más aun, la combinación de multitud de materiales (por ejemplo, tan solo una tapa frontal de una lavadora puede presentar hasta tres tipos de plásticos diferentes, que no pueden procesarse de forma conjunta ni separarse fácilmente), hace inviable, desde el punto de vista económico, el reciclaje de componentes que, con un diseño apropiado, resultarían reciclables al completo mediante procesos rentables.

De cara a implementar las medidas necesarias para paliar las problemáticas mencionadas asociadas a los AEE y sus residuos, resulta necesario disponer de una imagen clara de la introducción de AEE en el mercado, los RAEE generados y recogidos (así como las razones que explican la diferencia entre estos dos valores), y las posibilidades de valorización de los mismos, a través del reciclaje adecuado de sus componentes. El presente estudio se presenta como un primer paso encaminado a obtener dicha imagen, identificando la cadena de valor de los AEE y realizando una primera estimación de las materias primas críticas contenidas (y, por lo tanto, potencialmente recuperables) en los RAEE gestionados en Navarra anualmente, al tiempo que se presenta un primer esbozo de posibilidades hacia la regulación del mercado de los AEE, de cara a garantizar el derecho a la reparación y potenciar el ecodiseño, a través de modelos de pasaporte digital de producto.

2. Cadena de valor navarra de los AEE.

La de cadena de valor de los AEE y RAEE en Navarra, está compuesta por todos los agentes implicados en la puesta en el mercado de los AEE (productores, distribuidores y, finalmente, consumidores), por las empresas y entidades especializadas en su reparación para extender su vida útil, por las agencias encargadas de organizar y gestionar los sistemas de responsabilidad compartida entre productores, distribuidores y gestores de residuos (SCRAPs), por las entidades gestoras de RAEE (encargadas de su recogida y gestión hacia la reutilización o reciclaje de cada componente de los mismos de forma adecuada), y, en última instancia, por las empresas que llevan a cabo el reciclaje efectivo de cada uno de los diferentes materiales que componen los RAEE (vidrio, múltiples polímeros, metales...). Resulta imposible identificar de forma individual a todos los agentes de cada eslabón de la cadena de valor de los AEE, ya que, en determinadas etapas, el número de ellos que participa es demasiado elevado e imposible de cuantificar con precisión. Tal es el caso, por ejemplo, de la etapa de distribución: resulta imposible identificar la totalidad de establecimientos comerciales que distribuyen algún tipo de AEE. En el mismo sentido, resulta prácticamente imposible establecer el ecosistema de los RAEE en Navarra, debido a que los SCRAPs organizan la recogida de tal manera que una gran cantidad de los residuos que son gestionados en Navarra (cantidad que, además, es variable en cada gestor, y en cada fracción de recogida) provienen de otras regiones (como La Rioja, País Vasco, Cantabria e, incluso, Francia), al tiempo que otros residuos generados en Navarra, se destinan a gestores de otras comunidades. A pesar de estas dificultades, sí se puede obtener una visión general de dicho ecosistema, en el cual se pueden distinguir con precisión a los agentes de mayor peso específico en la cadena de valor.

En relación a las empresas productoras de AEE en Navarra, de acuerdo a la información aportada por el Ministerio de Industria y Turismo,¹ en Navarra se cuentan 74 centros productivos de AEE. Estos engloban todas las empresas que producen algún tipo de AEE, por lo que la variabilidad es más que amplia. Más complicado resulta establecer la proporción de la producción de estos centros, que termina en el mercado navarro, en relación a la cantidad que se exporta a otros mercados (tanto dentro como fuera de España). Extraer esta información de cada empresa, requeriría de un estudio pormenorizado de documentación aportada por cada una de ella, que queda fuera de las posibilidades del presente estudio. Igual sucede, tal y como se ha mencionado previamente, con la posibilidad de identificar a todos los distribuidores que introducen AEE en el mercado navarro, o que los exportan a otros mercados (por ejemplo, a través de ventas telemáticas).

Cada uno de los productores y distribuidores de AEE se encuentra asociado a un SCRAP, ya que, de acuerdo a la Ley 22/2011, deben responsabilizarse de la gestión de los residuos que generan, desde la recogida hasta el tratamiento y valorización, lo cual se hace a través de estos sistemas. Hay diez SCRAPs operativos en el ámbito de los AEE: AMBILAMP, ECOASIMELEC, ECOFIMÁTICA, ECORAEES, ECOLEC, ECOLUM, ECOTIC, ERP, REINICIA y SUNREUSE. A esto, se debe añadir los SIRAPs (sistemas individuales), creados para que un productor cumpla sus obligaciones de forma individual; en Navarra, operan Antonio López Garrido, S.A.; Atlantic Iberia SAU; Atmoss Electric Equipment SLU; Carpigiani Horeca, S.L.; Cuarzo Nova Projects S.L.; Draft Team, S.L.; EFFICOLD, S.A.; Electrobilsa 2000 S.L.; Frinco Iluminación, S.L.; Global Manufacturing and Trading Company; Grupo Prilux Iluminación S.L.; Gustavo Medina Rodríguez Distribuciones, S.L.U.; IGSE; Infiniton World Electronic S.L.; IBM; Intersales Spain, S.A.; ITV Ice Makers S.L.; Proxy Eurogroup; REFRIVAL S.A.; Threeline Technology, S.L.; Verifone; Virutex S.A.; y Viva Aqua. Cabe destacar que la cantidad de RAEE recogida por estos SIRAPs es muy inferior a la de los SCRAPs (aproximadamente 55 t de un total de 4.709 t en 2021, es decir, poco más del 1%). El funcionamiento propio de los SCRAPs, que integran productores y distribuidores de diversa procedencia y destinan los residuos recogidos a los centros de gestión que ellos mismos deciden, en función de acuerdos y convenios, hace muy complicado discriminar, dentro de los valores aportados por dichos SCRAPs al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico sobre su actividad en cada comunidad, qué cantidad de RAEE, de la recogida, ha sido realmente producida en la comunidad en la cual se gestiona, así como el destino final de estos RAEE, una vez preparados para su reciclaje. Para esto, sería necesario recabar más información por parte de los SCRAPs y los centros de gestión de RAEE, y un análisis minucioso de la misma.

En cuanto a la recogida de los RAEE, se debe considerar que el 53% de los mismos, en Navarra, se recoge directamente de distribuidores (al entregar el consumidor un aparato usado en el momento de adquirir uno nuevo), por lo que el papel de los SCRAPs para organizar esta recogida es fundamental. De la cantidad restante, el 26% se recoge a través de los puntos limpios (103 en la geografía navarra, aunque determinadas poblaciones hacen uso de puntos limpios de otras comunidades, debido a su carácter limítrofe con las mismas, caso de Cabredo, Genevilla, Marañón, Lapoblación- Meano, Urdax y Zugarramurdi), mientras que el 21% se recoge mediante el servicio de recogida puerta a puerta domiciliaria, cuyo principal exponente es Traperos de Emaús.

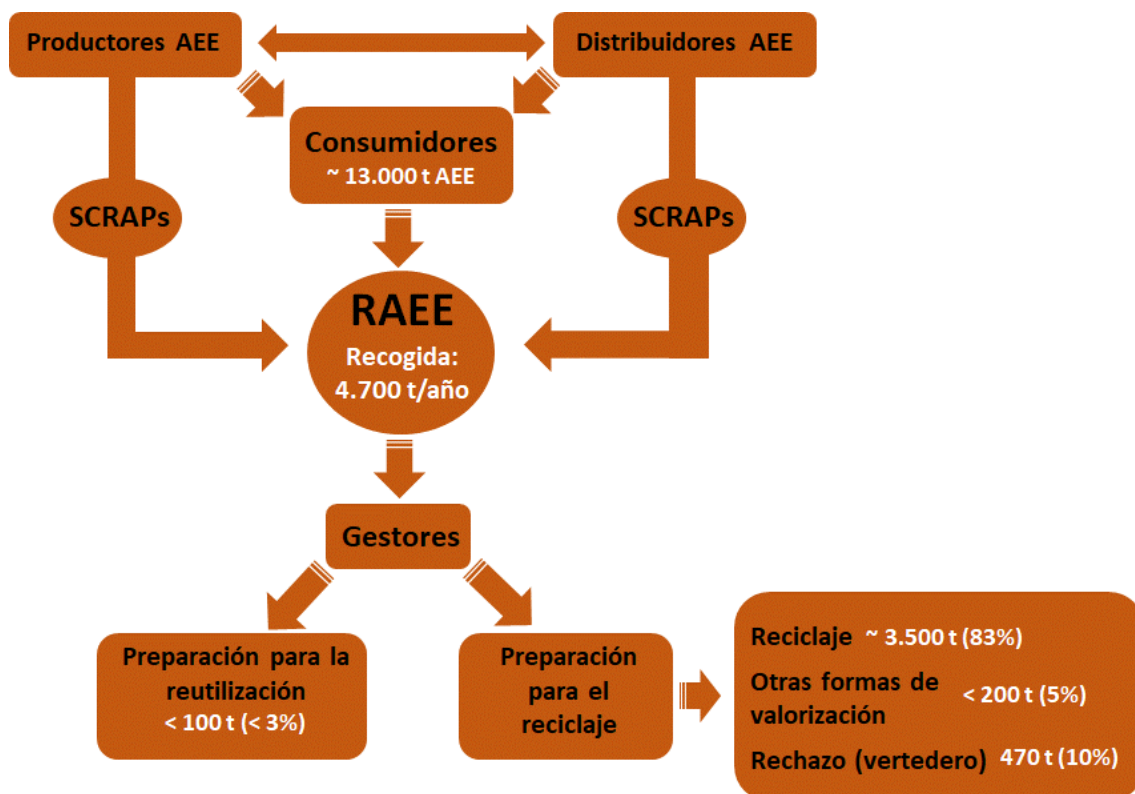
¹ <https://industria.gob.es/registros-industriales/RAEE/Consultas/Paginas/consultasPublicas.aspx>



Evolución de la recogida domiciliar de RAEE en Navarra (fuente: Oficina de Prevención de Residuos y de Impulso a la Economía Circular; Seguimiento al Plan de Residuos de Navarra 2017-2027).

Traperos de Emaús es también el responsable principal de la preparación para la reutilización de los RAEE recogidos, que, dentro de los preceptos de la economía circular, debería ser la estrategia prioritaria con la cual minimizar las implicaciones medioambientales de dichos residuos. Esta preparación para la reutilización alcanza al 2,6% de los RAEE generados (89 t en 2021).

Finalmente, el reciclaje de los RAEE se aborda de forma diferente, en función de la naturaleza del material que componga cada elemento (plásticos, vidrio, metales...). Una vez separado cada material de forma individual, estos se destinan a las plantas de reciclado correspondientes; cada gestor tiene acuerdos con plantas de reciclaje de los materiales necesarios, plantas que no necesariamente se encuentran en suelo navarro. La siguiente imagen resume la cadena de valor de los AEE y RAEE en Navarra.



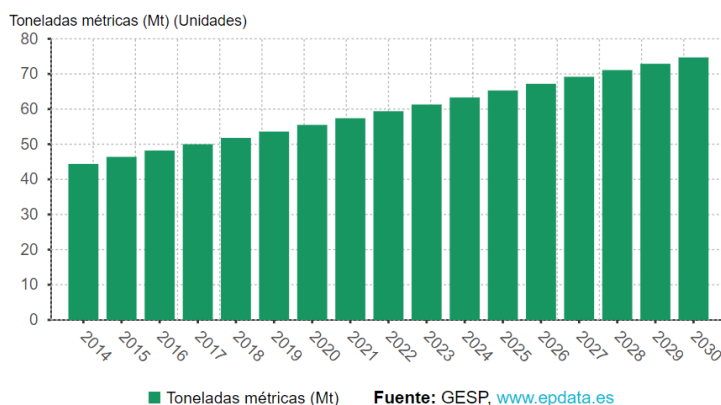
Cadena de valor de los AEE y RAEE en Navarra (datos correspondientes al ejercicio 2021).

3. Implicaciones del reglamento de ecodiseño y Pasaporte Digital de Productos en la cadena de valor.

El nivel de vida está aumentando en todo el mundo, y la gente posee más aparatos eléctricos y electrónicos. (AEE) que antes. Cafeteras, TV, ordenadores se encuentran en casi todos los hogares de Europa y un teléfono móvil en cada bolsillo. De media, se consumen más de 20 kg de AEE por persona. comercializar en la UE cada año, incluidos electrodomésticos (por ejemplo, lavadoras, aspiradoras, refrigeradores y congeladores) y Electrónica como ordenadores, televisores y móviles. Si a esto le sumamos la drástica reducción del ciclo de uso de los AEE debido sobre todo a la evolución de la tecnología (ciclos de innovación más breves) y la ya conocida obsolescencia programada, el incremento de los residuos procedentes de AEE es hasta 3 veces mayor que el crecimiento de cualquier otro residuo urbano, tal y como se puede apreciar en el gráfico adjunto.

Evolución de la generación de residuos electrónicos en el mundo

El dato incluye estimación entre 2020 y 2030



Por todo ello Europa plantea la inclusión de un sistema de trazabilidad para AEE que permita el seguimiento y localización de los mismos a lo largo de su ciclo de vida, es decir desde la producción hasta el reciclaje de materiales.

El 30 de marzo de 2022, la Comisión Europea propuso un paquete de medidas legislativas como parte del Pacto Verde Europeo y el Plan de Acción para la Economía Circular (PAEC). El paquete legislativo pretende que casi todos los bienes físicos de la UE, incluidos los productos de EE, sean más sostenibles, circulares y eficientes energéticamente a lo largo de su ciclo de vida.

Parte de la propuesta de Reglamento sobre diseño ecológico de productos sostenibles (COM/2022/142) y una medida clave del PECAM es la introducción de un Pasaporte Digital de Producto (DPP). El objetivo es sentar las bases para la introducción gradual de pasaportes de productos en al menos tres áreas de productos clave para 2024. Entre ellos figuran los textiles, la construcción, las baterías industriales y de vehículos eléctricos, y al menos una de las cadenas de valor identificadas más importantes en el PECAM, como la electrónica de consumo, los envases o los alimentos.

Así el PDP se establece como un conjunto de datos específicos de un producto que incluya la información definida en un acto delegado aplicable al producto en cuestión y al que se puede acceder digitalmente.

El **objetivo** de un pasaporte de producto es recopilar datos sobre un producto y su cadena de suministro y poner esta información a disposición de todas las partes interesadas, incluidos los consumidores, para que puedan comprender mejor los productos que utilizan y su impacto. De este modo se pretende acabar con la pérdida de información a lo largo de la cadena de valor, procesando y compartiendo la información relacionada con el producto entre las empresas de la cadena de suministro, las autoridades y los consumidores, asegurando la interoperabilidad de los PDP dentro y entre las cadenas de suministro.

Esta mayor disponibilidad y trazabilidad de los datos pretenden facilitar la transición a una economía circular, gracias al aporte de información relacionada con la sostenibilidad medioambiental de productos, la circularidad y las sustancias peligrosas. Los principales ámbitos en los que los pasaportes de productos pretenden marcar la diferencia son:

- **Producción sostenible**

Con un sistema de trazabilidad, los usuarios pueden obtener información sobre el contenido material de los productos, incluidos los minerales conflictivos y metales de tierras raras, y así identificar exactamente dónde se han producido y ensamblado diferentes componentes, como y bajo qué condiciones sociales. Proporcionar a compradores y consumidores información que les permite identificar y comprar productos sostenibles más fácilmente.

- **Mayor reutilización**

Un sistema de trazabilidad también puede proporcionar talleres de reparación, renovadores y restauradores con información sobre, por ejemplo, anteriores reparaciones, análisis de daños, producto y componente. Disponibilidad de repuestos e instrucciones de reparación. Con esa información, los productos pueden durar más y es más fácil encontrar nuevos usuarios para ellos.

- **Reciclaje de materiales mejorado**

Obteniendo más información y cada vez más precisa sobre qué materiales contiene un producto, se puede hacer una extracción más eficiente mejorando la clasificación y el pretratamiento de residuos en el reciclado al final de la vida del producto. Reducir los RAEE.

En definitiva, el pasaporte integrará en el propio producto la información ambiental con enfoque de ciclo de vida para contribuir a decisiones de clientes públicos y/o privados dirigidas a una sustitución o reducción de consumo de materiales, un mayor contenido en reciclados, una etapa de uso ambientalmente adecuada, una mayor durabilidad y una retención del valor del producto y de los materiales, facilitando la reutilización, reparación y reciclado.

Mientras avanza el despliegue del pasaporte digital de productos europeo se han lanzado algunas iniciativas regionales y desarrollado prototipo de PDP, tal y como se explica a continuación.

- 1) **Product Circularity Datasheet:** Desarrollada por el Gobierno de Luxemburgo pretende facilitar la estandarización de los datos. Esta iniciativa puesta en marcha en 2018 por el Ministerio de Economía de Luxemburgo en colaboración con fabricantes y plataformas multinacionales y regionales, aborda la dificultad a la que se enfrenta la industria y los consumidores para acceder a datos fiables sobre las propiedades circulares de un producto.

Product Circularity Data Sheet (PCDS) es una fuente básica de datos verificados que se puede utilizar para establecer el grado de circularidad de un producto e informar de dicha circularidad en función de sus parámetros de diseño y fabricación. El PCDS ofrece un formato estandarizado con datos fiables sin puntuación ni ranking de estos aspectos.

Los objetivos del PCDS son:

- Proporcionar datos básicos sobre la circularidad de un producto a todas las partes interesadas relevantes.
- Mejorar la eficiencia del intercambio de datos sobre circularidad en todas las cadenas de suministro.
- Fomentar la mejora del rendimiento del producto en términos de circularidad.

La estructura general del sistema PCDS está inspirada en el sistema MSDS (Hoja de datos de seguridad de materiales) que proporciona declaraciones estandarizadas para describir el uso seguro de productos/mezclas químicas.

El PCDS está organizado en cinco secciones principales, como se muestra a continuación, que describen las características clave de la circularidad del producto. Cada declaración está numerada

siguiendo la lógica de la estructura general del PCDS. Esta estructura facilitará la automatización de la creación y lectura de documentos. El documento PCDS también contiene la definición de términos específicos siguiendo las normas ISO/CEN y las regulaciones internacionales/UE.

Cada PCDS debe revisarse siempre que haya un cambio en la composición del producto o cuando esté disponible nueva información/regulaciones sobre las características circulares. El PCDS puede, por ejemplo, variar para el mismo producto fabricado en dos sitios diferentes si uno utiliza contenido reciclado y el otro no. Las propiedades físicas del producto pueden ser casi idénticas, pero la composición química difiere e impacta algunas declaraciones de PCDS. Por lo tanto, en tal caso se crearán dos PCDS distintos.

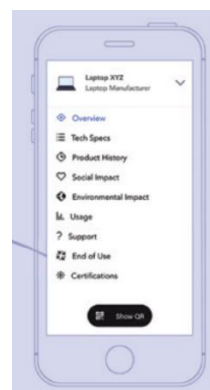
SECTIONS			STATEMENTS (EXAMPLES)
1		GENERAL INFORMATION	
2		COMPOSITION	THE PRODUCT CONTAINS > 75-95 % POST-CONSUMER RECYCLED CONTENT BY WEIGHT THE PRODUCT DOES NOT CONTAIN SUBSTANCES OF VERY HIGH CONCERN FROM THE REACH CANDIDATE LIST IN CONCENTRATION ABOVE 0.1% BY WEIGHT
3		DESIGNED FOR BETTER USE	THE PRODUCT CAN BE MAINTAINED & REPAIRED BY UNTRAINED PERSONNEL AT THE LOCATION OF THE PRODUCT USE
4		DESIGNED FOR DISSASSEMBLY	THE PRODUCT IS DESIGNED TO BE INSTALLED AND DEMOUNTED USING REVERSIBLE CONNECTORS
5		DESIGNED FOR RE-USE	THE PRODUCT IS DESIGNED FOR RE-USE AS-IS OR WITH MINIMAL MODIFICATION THE PRODUCT IS DESIGNED FOR COMPOSTING IN A HOME COMPOSTER

- 2) Keep Productos Eléctricos y Electrónicos (KEEP), un proyecto iniciado en 2018 y finalizado en junio 2021, en el que se evaluó un sistema de trazabilidad y se construyó un prototipo.

Para la trazabilidad, el sistema asigna a cada producto un identificador único, por ejemplo, un código de barras y/o código QR, que permite acceder y compartir la información que previamente se haya definido sobre el producto, por ejemplo, valores específicos e históricos sobre la producción, distribución, compra, reparaciones y servicios, reutilización y reciclaje. A continuación, se muestra la descripción general del prototipo con las partes que incluye y la información que contiene cada una de ellas.

La información del prototipo se divide en varias categorías:

Descripción general



Presenta información básica sobre el producto, así como un recibo digital e Información de garantía.

Especificaciones técnicas

Especificaciones técnicas detalladas para el producto.

Historia del producto

Una línea de tiempo que muestra eventos importantes durante la vida útil del producto desde producción hasta el final de su vida útil.

Materiales

Lista detallada de los materiales que contiene el producto.

Partes

Listado con piezas del producto, destacando las piezas más valiosas. Posibilidad de pedir repuestos.

Proveedores

Información sobre la cadena de suministro del producto.

Impacto social

Parámetros de impacto social como responsabilidad corporativa, salarios de fábrica y tiempo de trabajo.

Impacto medioambiental

Resumen de las condiciones ambientales del producto. Impacto incluyendo huella de carbono, energía eficiencia y contenido reciclado.

Uso

Estadísticas sobre cómo se utiliza el producto.

Apoyo/Servicio

Soporte de producto, como resolución de problemas. Guías, guías de reparación y solicitudes de servicio.

Fin de uso

Información sobre el valor de reventa del producto y cómo encontrar el coleccionista más cercano.

Certificaciones y Cumplimientos

Listado con todas las certificaciones del producto y cumplimientos.

4. Primera estimación de la cantidad de materias primas críticas asociadas a la gestión de RAEE en Navarra.

El presente estudio se basará en la definición de materia prima crítica propuesta por la Comisión Europea para la redacción del “Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece un marco para garantizar el suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales y se modifican los Reglamentos (UE) 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 y (UE) 2019/1020”,² de 16 de marzo de 2023, texto de referencia en la actualidad en lo relativo a la categorización, suministro y recuperación de este tipo de materiales. En dicho reglamento, se especifica que las materias primas críticas, divididas en fundamentales y estratégicas, de las cuales la UE quiere asegurar un suministro seguro y sostenible para su industria, son las siguientes:

a) Materias primas fundamentales:

- Antimonio (Sb)
- Arsénico (As)
- Bauxita
- Barita
- Berilio (Be)

² https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en

- Bismuto (Bi)
- Boro (B)
- Cobalto (Co)
- Carbón de coque
- Cobre (Cu)
- Feldespato
- Fluorita
- Galio (Ga)
- Germanio (Ge)
- Hafnio (Hf)
- Helio (He)
- Tierras raras pesadas
- Tierras raras ligeras
- Litio (Li)
- Magnesio (Mg)
- Manganeseo (Mn)
- Grafito natural
- Níquel (calidad de batería) (Ni)
- Niobio (Nb)
- Fosforita
- Fósforo (P)
- Metales del grupo del platino
- Escandio (Sc)
- Silicio metálico (Si)
- Estroncio (Sr)
- Tántalo (Ta)
- Metal de titanio (Ti)
- Wolframio (W)
- Vanadio (V)

b) Materias primas estratégicas:

- Bismuto (Bi)
- Boro (calidad de metalurgia) (B)
- Cobalto (Co)
- Cobre (Cu)
- Galio (Ga)
- Germanio (Ge)
- Litio (calidad de batería) (Li)
- Metal de magnesio (Mg)
- Magnesio (calidad de batería) (Mg)
- Grafito natural (calidad de batería)
- Níquel (calidad de batería) (Ni)
- Metales del grupo del platino
- Tierras raras para imanes (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm y Ce)
- Silicio metálico (Si)
- Metal de titanio (Ti)
- Wolframio (W)

Las materias primas estratégicas, como se ve en el listado, son una selección de las fundamentales. Según la normativa, la importancia estratégica se determina sobre la base de lo pertinente que sea una materia prima para las transiciones ecológica y digital, así como para las aplicaciones en los ámbitos de la defensa y el espacio, teniendo en cuenta; a) el número de tecnologías estratégicas que utilizan la

materia prima como insumo; b) la cantidad de la materia prima necesaria para la fabricación de las tecnologías estratégicas pertinentes; y c) la demanda mundial prevista de las tecnologías estratégicas pertinentes.

Algunas de estas materias primas están más presentes que otras en los AEE, y, por lo tanto, tienen un mayor potencial de recuperación de los RAEE. En este sentido, las materias primas críticas que más frecuentemente se pueden encontrar en los RAEE, resultando viable su recuperación, son los siguientes:

- Li, Co, Ni, Mn, grafito: presentes en las baterías de Li (en teléfonos móviles, tabletas y equipos similares).
- In: a partir del ITO (óxido de indio y estaño) que contienen las pantallas de cristal líquido (LCDs). Este elemento también se encuentra en paneles solares que basan su conversión en el material conocido como CIGS (combinación de Cu, In, Ga y Se), aunque su proporción es escasa, y este tipo de paneles, en comparación con los de Si, minoritarios.
- Si, metales del grupo del Pt: presentes en los circuitos impresos (PCBs) con los que se lleva a cabo el control electrónico interno de la práctica totalidad de los aparatos eléctricos. El Si es también uno de los componentes fundamentales de la mayor parte de los paneles solares puestos en el mercado, en los cuales supone una importante proporción en peso.
- Nd: contenido en los imanes que forman parte de los dispositivos de almacenamiento (discos duros), tanto de ordenadores y tablets como externos (Hard Disk Drives o HDDs). Estos imanes contienen también el resto de tierras raras (Pr, Tb, Dy, Gd, Sm y Ce), aunque en cantidades menores. También está presente en los dispositivos tipo notebook, que funcionan de forma similar a los discos duros, aunque en menor proporción.
- Cu: el Cu se puede considerar un material ubicuo en los RAEE, debido a su uso como conductor en todo tipo de conexiones eléctricas, circuitos y baterías. Además, cumple un papel funcional en los paneles solares de CIGS.
- Y, Eu: el ytrio, tierra rara englobada dentro del grupo de las materias primas críticas fundamentales, está presente en los tubos catódicos de las pantallas de tipo CRT. Se da la paradoja de que estas pantallas suponen, actualmente, una entrada minoritaria en el mercado, ya que han sido completamente desplazadas por las pantallas planas, pero la recogida de los mismos al término de su vida útil hace que supongan una proporción nada desdeñable del total de los RAEE gestionados.

El contenido en cada una de estas materias primas es muy variable, así como los porcentajes de recuperación, que dependen de las tecnologías implicadas, por lo que es de esperar que, aquellos porcentajes que son más bajos, se vean mejorados en un futuro. Además, algunas de estas materias primas críticas están presentes de otros RAEE, además de los mencionados, pero una proporción tan baja, que impide una recuperación de los mismos de un modo viable. Sin embargo, el adecuado procesamiento de los RAEE permite considerar estos como un depósito de materias primas críticas, que puede ser empleado como fuente de suministro para la industria, dentro de las estrategias de la economía circular. Para ello, se debe tener una estimación de las cantidades de materias primas críticas contenidas en dichos RAEE, que depende tanto de la cantidad recogida de estos, como de su propio contenido en materias primas críticas. No obstante, resulta complicado estimar la cantidad de materias primas críticas disponibles en forma de RAEE, ya que la cantidad total de estos que se recoge, se divide en categorías ("Anexo III. Categorías y subcategorías de AEE incluidos en el ámbito de aplicación del real decreto a partir del 15 de agosto de 2018"),³ de modo que los elementos que contienen materias primas críticas (baterías, LCDs...), se encuentran en AEE de diferentes categorías, siendo difícil correlacionar la cantidad de RAEE de cada categoría, con el peso relativo que, en dicha cantidad, suponen los elementos que contienen materias primas críticas. Para llevar a cabo esta estimación dentro del contexto navarro, se ha hecho uso de la información facilitada por ECOINTEGRA y Traperos de Emaús, principales gestores de RAEE en el contexto navarro, así como los datos de recogidas de RAEE en España y en Navarra

³ Real Decreto 110/2015, de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

contenida en los informes anuales de 2021 del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD).

Para llevar a cabo la estimación mencionada, se han considerado los elementos de los AEE en los cuales se encuentran las materias primas críticas (baterías, paneles solares de silicio, paneles solares de película delgada, LCDs, imanes de HDDs y PCBs), calculando la cantidad de los mismos que se recupera de las diferentes categorías de RAEE, y extrapolando de dicha cantidad, el contenido en materias primas críticas. Obviamente, esto son estimaciones basadas en contenidos medios, por lo que se debe asumir un grado de variabilidad.

Los datos de cantidad de RAEE recogida anualmente, necesarios para la estimación de materias primas críticas contenidas en dichos residuos, se muestran en las siguientes tablas.⁴

En primer lugar, se muestra el total de RAEE recogidos en España y en Navarra, junto al objetivo planteado y el cumplimiento alcanzado de dicho objetivo.

RECOGIDA RAEE	TOTAL NAVARRA	TOTAL ESPAÑA
OBJETIVO (t)	7.815,03	553.397,36
RECOGIDO (t)	4.709,10	372.337,79
CUMPLIMIENTO	60,26%	67,28
kg / habitante	7,272	7,85

Recogida de RAEE a nivel estatal y navarro, junto a los objetivos planteados y su grado de cumplimiento.

Tal y como se puede ver, el objetivo de recogida de RAEE en Navarra se sitúa en el 1,41% del objetivo total para España, mientras que el dato real se sitúa ligeramente por debajo de este valor, de modo que, en Navarra, en 2021, se recogió el 1,26% de la totalidad de RAEE de España. Estos datos son coherentes con la distribución de población estatal y regional (según datos de Eurostat para 2021): Navarra, con 649.946 habitantes, supone el 1,37% de la población total de España (47,42 millones de habitantes).

La siguiente tabla contiene los datos de recogida de RAEE, dividida por fracciones (correspondientes a las categorías de AEE incluidas en el RD 110/2015), y según su origen (doméstico o profesional), así como el total, de cada categoría y absoluto. También se indican los objetivos de recogida, y el grado de cumplimiento de dichos objetivos; se puede comprobar que, actualmente, la recogida es inferior al 70% de la cantidad planteada como objetivo.

⁴ Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: “Informe anual de los productores de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE)” (septiembre 2022).

FRACCIONES	RAEE RECOGIDOS			OBJETIVOS MÍNIMOS			GRADO DE CUMPLIMIENTO OBJETIVOS		
	DOMÉSTICOS	PROFESIONALES	TOTAL	DOMÉSTICOS	PROFESIONALES	TOTAL	DOMÉSTICOS	PROFESIONALES	TOTAL
(1) Aparatos de intercambio de temperatura	84.987,07	6.851,10	91.838,17	107.341,49	14.463,03	121.804,51	79,17%	47,37%	75,40%
(2) Monitores, pantallas y aparatos con pantallas de superf. > 100 cm ²	26.147,51	778,153	26.925,67	29.264,65	2.311,99	31.576,64	89,35%	33,66%	85,27%
(3) Lámparas	2.956,92	-	2.956,92	3.244,26	-	3.244,26	91,14%	-	91,14%
(4) Grandes aparatos (con una dimensión exterior > 50 cm)	150.900,02	29.473,25	180.373,27	184.338,46	44.864,08	229.202,55	81,86%	57,84%	77,16%
(5) Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior > 50 cm)	47.125,80	7.367,59	54.493,39	66.930,06	12.062,75	78.992,81	70,41%	64,70%	69,54%
(6) Aparatos de informática y telecom. peq. (dimensión < 50 cm)	13.577,01	490,118	14.067,13	17.702,96	-	17.702,96	76,69%	-	76,99%
(7) Paneles fotovoltaicos grandes (una dimensión exterior > 50 cm)	-	1.683,26	1.683,26	0	70.873,64	70.873,64	-	2,38%	2,38%
TOTAL	325.694,33	46.643,46	372.337,79	408.821,87	144.575,49	553.397,36	79,67%	32,26%	67,28%

Recogida de RAEE en España, dividida por fracciones, junto a los objetivos planteados y su grado de cumplimiento.

El desglose de recogida por fracciones exclusivo de Navarra es necesario para estimar la cantidad de materias primas críticas contenida en dichas fracciones, pero no está disponible en los registros del MITERD. Por ello, se ha aplicado un factor de corrección de 0,0126 (1,26%) sobre los datos de la tabla anterior, corrección equivalente a la observada en la proporción de recogidas totales, y similar a la relación entre la población navarra y la total en España. Se espera que esta corrección resulte bastante orientativa en el desglose por fracciones, al no haber datos que apunten hacia desviaciones relevantes en alguna de las fracciones. La siguiente tabla muestra el resultado de aplicar dicha corrección sobre los RAEE recogidos en España, sin considerar ni los objetivos ni su grado de cumplimiento, que no son relevantes de cara a la estimación de la cantidad de materias primas críticas.

FRACCIONES	RAEE RECOGIDOS (t)		
	DOMÉSTICOS	PROFESIONALES	TOTAL
(1) Aparatos de intercambio de temperatura	1.070,84	86,32	1.157,16
(2) Monitores, pantallas y aparatos con pantallas de superf. > 100 cm ²	329,46	9,80	339,26
(3) Lámparas	37,26	-	37,26
(4) Grandes aparatos (con una dimensión exterior > 50 cm)	1.901,34	371,36	2.272,70
(5) Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior > 50 cm)	593,79	92,83	686,62
(6) Aparatos de informática y telecom. peq. (dimensión < 50 cm)	171,07	6,18	177,25
(7) Paneles fotovoltaicos grandes (una dimensión exterior > 50 cm)	-	21,21	21,21
TOTAL (t)	4.103,75	587,71	4.691,46

Extrapolación de la recogida de RAEE en Navarra, dividida por fracciones, a partir de los datos totales de España.

Estas cantidades de RAEE serán las que se empleen en la estimación de la cantidad de materias primas críticas asociadas a la gestión de RAEE en Navarra. A continuación, se detalla dicha estimación, según la información expuesta anteriormente (materias primas críticas presentes en AEE y cantidad de RAEE recogida anualmente).

a) Litio:

El Li está presente mayormente en las baterías de los AEE; equipos de las categorías 4, 5 y 6 pueden funcionar gracias a estas baterías. Las baterías de ion litio contienen este metal una proporción aproximada del 7% en peso, calculado como LCE o equivalentes de carbonato de litio (la equivalencia, según pesos moleculares, es de 1 g Li/5,17 g LCE).⁵

El peso que supone la batería en cada AEE es un parámetro muy variable, al tiempo que no todos los AEE de las categorías 4, 5 y 6 funcionan con batería, por lo que resulta muy complicado extrapolar la cantidad de baterías presentes en los RAEE recogidos. Según la información disponible, anualmente se introducen en el mercado español 2.450 t de pilas y baterías de ion Li, de las cuales, 1.625 t son recogidas. Según el factor de corrección aplicado anteriormente, en Navarra se recogerían 20,5 t de baterías y pilas de ion Li anualmente. Sin embargo, las particularidades de estos elementos (gran parte de los que se recogen no fueron introducidos en el mercado ese mismo año, sino con anterioridad), provoca una desviación de este valor, que aumenta, según los datos de los gestores, hasta las 63 t anuales. Esta cantidad de pilas y baterías recogidas, se traduce en 4,41 t de LCE, que, a su vez, corresponden a un total de **853 kg de Li en forma de RAEE** disponibles en los centros de gestión, de forma anual.

b) Cobalto:

El Co también está presente en las baterías, de donde se recupera mediante procesos físico-químicos de alto rendimiento. El contenido medio en Co de las baterías se sitúa en el 7%.⁵ Si tenemos en cuenta el valor anteriormente mencionado de 100,8 t de baterías recogidas en Navarra anualmente, se puede estimar una cantidad total de **1,44 t de Co presente en los RAEE** anuales de Navarra.

c) Níquel:

Nuevamente, las baterías se pueden considerar como el principal repositorio de Ni en los RAEE, suponiendo un 4% de las mismas en peso, como media, en las baterías de ion litio (las más comunes), llegando hasta el 40% en peso en las baterías de tipo NiHB (baterías de hidruro de níquel-metal).⁶ Estas segundas son menos frecuentes, debido a sus inconvenientes asociados (mayor peso, mayor tiempo de carga, menor vida útil, efecto memoria...). De cara a la estimación de Ni disponible en los RAEE, se considera un valor medio del 10% de Ni en las baterías, considerando la prevalencia de las baterías de Li (con menor contenido en Ni) y la información disponible relativa a la puesta en el mercado de baterías de ambos tipos.

Si tenemos en cuenta el valor anteriormente empleado para el cálculo de Li y Co, de 20,5 t/año de baterías en Navarra, se puede estimar una cantidad de **2,05 t de Ni contenida en los RAEE** recogidos en Navarra, de forma anual.

d) Manganeso:

Los estudios citados anteriormente sitúan el contenido en Mn en las baterías de los RAEE en el 5%.^{4,5} De este modo, considerando las 20,5 t/año de baterías recogidas en Navarra, habría una disponibilidad de **1,03 t de Mn en los RAEE recogidos anualmente en la región**.

e) Grafito:

Siguiendo con los estudios anteriormente expuestos,^{5,6} las baterías presentan una media de un 16% de grafito en peso, por lo que, asumiendo el dato de la recogida de 20,5 t/año de baterías, en los RAEE navarro habría una disponibilidad de **3,28 t de grafito (calidad de batería) anualmente**.

f) Cobre:

Ya se ha mencionado que el Cu es un elemento ubicuo en los AEE, y, por lo tanto, en los RAEE. Su uso extendido en todas las conexiones eléctricas y electrónicas, hace que se encuentre en la práctica

⁵ M. Pagliaro, F. Meneguzzo: *Heliyon*, 5 (2019), e01866

⁶ F. Liu, C. Peng, A. Porvali, Z. Wang, B. P. Wilson, M. Lundström: *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 7 (2019), 16103-16111.

totalidad de los aparatos y equipos, con la ventaja añadida, desde el punto de vista de la recuperación, de que resulta, de forma mayoritaria, comparativamente más sencillo de separar para reciclar que el resto de materias primas críticas. En este sentido, el Cu presente en las conexiones eléctricas se puede separar de forma casi inmediata en las primeras etapas de preparación para el reciclaje de los RAEE, mientras que el presente de circuitos y otros componentes requiere de procesos más complejos. Sin embargo, nos encontramos con la gran complejidad de identificar el origen de dicho Cu, si tenemos en cuenta que, por ejemplo, en la planta de ECOINTEGRA, el 91% de los pequeños aparatos y equipos que se gestionan, provienen de Francia, y no de Navarra.

Independientemente del origen, el contenido en Cu de los RAEE se puede considerar, como media, del 10% en peso (varía entre el 3% y el 24%, según la tipología concreta, situándose la media en dicho valor).⁷ Esto supone que, en las 4.700 t de RAEE gestionadas en Navarra anualmente, **se dispone de 470 t de Cu** reciclables y valorizables. Esta cifra sitúa al Cu como la materia prima crítica más abundante en los RAEE, con diferencia, suponiendo el 84% del total.

g) Neodimio:

Ya se ha mencionado que el Nd es un componente minoritario, aunque fundamental, para el funcionamiento de discos de memoria (tanto internos de ordenadores, como externos o HDDs) y dispositivos tipo notebook.

El contenido en Nd se estima en un 0,2%, en peso, como media, tanto en HDDs como en tablets;^{8,9} este mismo porcentaje se aplica a los ordenadores, pero no considerando el peso total, sino el del disco duro, elemento en el que se contiene. Sin embargo, dado que, en el procesamiento de los ordenadores, una vez considerados RAEE, se suele separar el disco de memoria, se puede considerar este valor como referencia.

En cuanto al contenido de Nd en dispositivos tipo notebook, tal y como se ha indicado, es menor que en HDDs y tablets, situándose en un 0,08%. Sin embargo, la creciente popularidad de estos dispositivos, hace prever que la cantidad de los mismos que deberá gestionarse como residuos seguirá una tendencia creciente en los próximos años.

La recogida de dispositivos de memoria anual en Navarra se estima en 8,5 t/año (considerando la totalidad de las tipologías anteriormente mencionadas). Traperos de Emaús es el principal agente de recogida, con 5,4 t/año, seguida de ECOINTEGRA, con 2,7 t/año. Considerando el 0,2% de Nd en estas cantidades, se dispone de **17 kg de Nd en forma de RAEE, anualmente**, en Navarra.

h) Silicio:

El Si, componente fundamental de los paneles solares más frecuentes en el mercado, dada su función en la conversión de la luz solar en energía eléctrica, está presente en estos elementos en una concentración media de 2,8 g/kg.⁸ En las tablas mostradas anteriormente, se puede ver que, de acuerdo a la información aportada por el MITERD relativa a la recogida de paneles solares en España, en Navarra se recogen 21 t de estos elementos de forma anual. Este dato se traduce en una disponibilidad de **58,8 t de Si en los residuos de paneles solares** de la región.

Pero, además, el Si se encuentra en los circuitos impresos o PCBs, componentes de multitud de equipos electrónicos, los cuales pueden suponer un peso muy variable en el total de cada equipo, según su tipología. En los residuos de PCBs, el Si supone aproximadamente 0,4 g/kg.⁸ Según la información disponible por parte de los gestores, se separan, para su posterior tratamiento, 54 t de PCBs de los RAEE anualmente, lo cual supone una cantidad de **21,6 t de Si** presente en los mismos. Por lo tanto, la **totalidad de los RAEE** gestionados anualmente contiene, de forma orientativa, **80 t de Si**.

⁷ A. Chagnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan: *WEEE Recycling*, Amsterdam (NL): Elsevier Inc., 2018.

⁸ F. Cucchiella, I. D'Adamo, S.C. Lenny Koh, P. Rosa: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51 (2015), 263, 272.

⁹ G. Reisdörfer, D. Bertuol, E. Hiromitsu Tanabe: *Minerals Engineering*, 143 (2019), 105938.

i) Indio:

Tal y como se ha indicado anteriormente, el mayor repositorio de In en los RAEE son las pantallas de cristal líquido o LCDs, en los cuales se encuentra en forma de ITO (óxido de indio y estaño). Los estudios disponibles apuntan a un contenido medio de 102 mg de In por kg de cristal líquido, suponiendo este cristal líquido el 0,1% en peso del total de la pantalla LCD.^{10,11} Desde el punto de vista logístico, resulta complicado separar las pantallas LCD del conjunto del equipo en el cual se encuentra, debido a la multitud de componentes con diferente función y composición que integran el conjunto; en este sentido, cabe destacar la labor que realiza Traperos de Emaús, en su plante de Berriozar, en la separación de cada uno de estos componentes, con el objetivo de maximizar la tasa de reciclaje de los mismos.

En Navarra se gestionan anualmente casi 400 t al año de este tipo de pantallas, pero hay una gran cantidad de ellas que provienen de regiones cercanas (Euskadi, La Rioja e incluso Francia). De hecho, según la información disponible, la cantidad de estos elementos de procedencia navarra, gestionados en la región, se reduce aproximadamente a la mitad (200 t/año). Por desgracia, no se dispone de información suficiente (que debería ser suministrada por los SCRAPs) como para evaluar la cantidad de estos residuos (o de cualquier otra tipología), cuya procedencia se sitúa en Navarra, pero son gestionados en otras comunidades autónomas.

En todo caso, con la información disponible, se puede concluir que los **RAEE generados y gestionados en Navarra** anualmente, contienen **20,5 g de In**, que suben hasta **41 g si consideramos el total de LCDs gestionados en la región**.

Además, el In también está presente en los paneles solares, aunque cantidades muy inferiores, sobre todo teniendo en cuenta que este elemento no está presente en todas las tipologías de paneles solares. Según los datos mostrados en las tablas anteriores, en las que se extrapola la recogida total de paneles solares en Navarra a partir del dato nacional aportado por MITERD, anualmente se recogen aproximadamente 21 t de paneles solares, los cuales, como media, presentan In en una proporción de 0,001 g/kg.⁷ Esto se traduce en una disponibilidad adicional de **26 kg de In en los residuos de paneles solares gestionados en Navarra**.

j) Galio:

El contenido es muy minoritario en los RAEE, al encontrarse tan solo en determinadas tipologías de paneles solares, que además son minoritarias dentro del total de paneles fotovoltaicos puestos en el mercado. Como media, según los estudios disponibles,⁸ se puede considerar que los paneles solares en uso contienen 0,001 g de Ga por kg de producto, equivalente a la de In (teniendo en cuenta los pesos habituales de los paneles solares, una media de 0,1 g de Ga por unidad).

Tal y como hemos visto en el caso del In, según las extrapolaciones mostradas en las tablas anteriores, a partir de los datos de recogida de paneles solares aportados por el MITERD, en Navarra se recogerían anualmente aproximadamente 21 t de estos RAEE, por lo que su **contenido en Ga** sería de **26 kg**.

k) Ytrio:

El Y, tierra rara ligera, es un componente fundamental de las matrices fosforescente empleadas en los tubos catódicos de los monitores de tipo CRT. Estos monitores siguen resultando un porcentaje importante de los RAEE gestionados en Navarra, aunque el número de los mismos puestos en el mercado sea tan solo residual. De hecho, el Y supone, según la información disponible en la bibliografía, una media del 15%, en peso, de dichas matrices fosforescentes.^{12,13} De acuerdo a estos mismos estudios, considerando un peso medio de 15 kg para un monitor CRT, y la cantidad de matriz fosforescente que estos contienen, se pueden encontrar 0,06 g de Y por cada kg de esta tipología de residuo gestionada.

¹⁰ X. Zhuang, W. He, G. Li, J. Huang, Y. Ye: *Pol. J. Environ. Stud.*, Vol. 21, No. 6 (2012), 1921-1927.

¹¹ H. Y. Wang: *Waste Manage*, 29 (2008), 335.

¹² F. Forte, L. Yurramendi, J. L. Aldana, B. Onghena, K. Binnemans: *RSC Adv.*, 9 (2019), 1378.

¹³ L. Alvarado-Hernández, G. T. Lapidus, F. González: *Waste Management*, 95 (2019), 53.

De acuerdo a la información disponible, en Navarra se gestionan, anualmente, alrededor de 100 t de este tipo de monitores; resulta complicado establecer el origen de estos residuos, ya que hay una parte de los mismos que no se generan en Navarra, pero sí se gestionan aquí. Considerando la totalidad de los residuos gestionados en la comunidad, de acuerdo al contenido en Y anteriormente estimado, se puede considerar un remanente de **6 kg de Y contenido en los CRTs recogidos anualmente** en Navarra.

Además, el Y también está contenido en el vidrio de las pantallas negras de los dispositivos con pantallas LCD. En este caso, el contenido en Y supone, como media, 300 mg/kg en las pantallas negras, y éstas, de forma estimativa, son el 30% del peso total de una pantalla con tecnología LCD. Así, teniendo en cuentas las 400 t de estas pantallas que se gestionan anualmente en Navarra, habría un remanente de **36 kg de Y proveniente de pantallas LCD**.

Por lo tanto, considerando las dos fuentes, en Navarra se dispondría, anualmente, de **42 kg de Y en forma de RAEE**.

l) Europio:

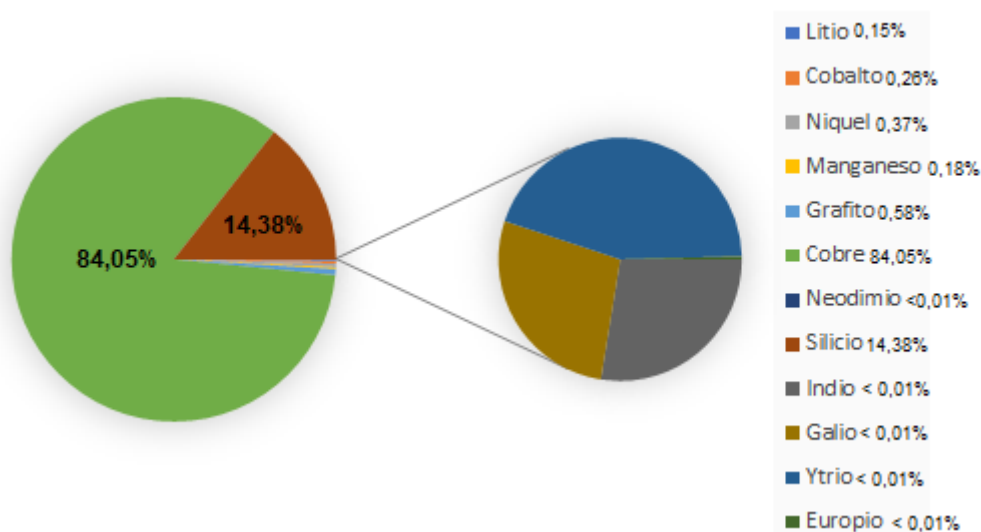
El Eu se encuentra igualmente en los tubos catódicos de los monitores de tipo CRT, formando parte de la matriz fosforescente. Sin embargo, su proporción en los mismos es menor que la del Y, por lo que su recuperación resulta menos ventajosa. De hecho, los estudios disponibles apuntan a un contenido de 0,004 g de Eu por kg de residuos de CRTs, ya que este elemento supone tan solo el 1% de la matriz fosforescente.^{12,13}

De este modo, teniendo en cuenta las 100 t anuales recogidas de CRTs en Navarra, esta fracción de los **RAEE** contendrían en torno a **360 g de Eu**.

A continuación, se muestra una tabla y un resumen gráfico, en los que se indican las materias primas críticas valorizables a partir de los RAEE, los componentes de estos en los que se pueden encontrar, y las cantidades de las mismas que contenidas en los RAEE gestionados en Navarra, de forma anual.

Componente	Baterías	Memorias/HDDs	LCDs	CRTs	Paneles solares	Circuitos/PCBs	PAES/GAES (general)
Materia prima crítica	t/año						
Litio	0,85						
Cobalto	1,44						
Níquel	2,05						
Manganeso	1,03						
Grafito	3,28						
Cobre							470
Neodimio		0,017					
Silicio					58,8	21,6	
Indio			4,1.10 ⁻⁶		0,026		
Galio					0,026		
Ytrio			0,036	0,006			
Europio				3,6.10 ⁻⁴			

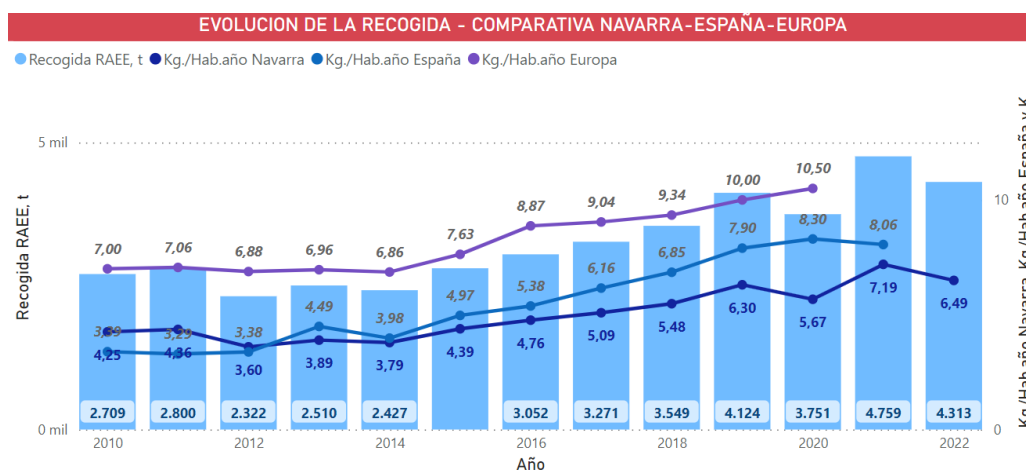
Materias primas críticas recuperables de los RAEE, junto a sus componentes de origen y la cantidad presente en los RAEE recogidos anualmente en Navarra (cantidades orientativas).



Materias primas críticas recuperables de los RAEE, con su proporción relativa.

De la tabla anterior se desprende que los RAEE gestionados en Navarra anualmente, contienen un total de **562,5 t de materias primas críticas**, es decir, casi el 12% de los RAEE está compuesto por estos materiales.

Es importante destacar que, tal y como se ha indicado en puntos anteriores, los valores de la tabla anterior están referidos a la cantidad de materias primas críticas disponible en los RAEE gestionados en Navarra, que no es, ni se puede correlacionar de forma directa, con los RAEE generados en Navarra, ya que hay una gran cantidad de RAEE que se gestionan en la región, pero proviene de otras zonas, y una cantidad menor de estos residuos que, siendo generada en Navarra, es gestionada en regiones cercanas. Sin embargo, se puede considerar también, de acuerdo a la tendencia de los últimos años, que la cantidad de RAEE recogida y gestionada en Navarra, independientemente de su origen, seguirá creciendo todavía en los próximos años, creciendo con ello la cantidad de materias primas críticas presentes en los mismos y aumentando la necesidad de recuperación y valorización de las mismas.



Comparativa de la recogida de RAEE en Navarra, España y Europa. Se aprecia la tendencia creciente.

Paralelamente, el incremento en la demanda, a nivel mundial, estatal y regional, de materias primas críticas (en base al mayor número de tecnologías en las que se aplican), y su reducida disponibilidad, genera un incremento en su precio que aumenta, cada vez más, la necesidad de recuperación y valorización a partir de los mismos. El paradigma de esta situación se puede considerar el Li, cuya

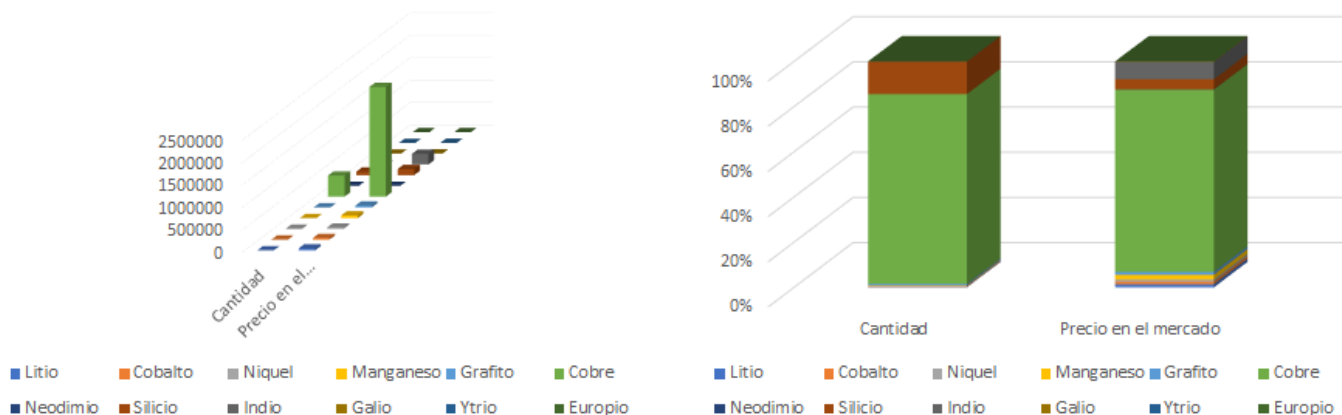
demanda está aumentando de forma drástica debido a su papel fundamental en la motorización eléctrica, que, de hecho, se está viendo frenada por la escasez (o precio demasiado elevado) de este elemento.



Demanda mundial de Li (en kt de LCE), con sus principales aplicaciones (movilidad eléctrica, baterías, sistemas de almacenamiento de energía o ESS, y usos tradicionales).

Para contextualizar la gran importancia estratégica de la recuperación del Li y del resto de materias primas críticas de aplicación en la motorización eléctrica de los RAEE, se puede considerar que una batería de un coche eléctrico actual contiene, como media, 8 kg de Li, 14 de Co y 20 de Mn. Teniendo en cuenta las cantidades de estos elementos contenidas en los RAEE gestionados en Navarra anualmente, se puede ver que, solo en estos residuos, **se dispondría de Li suficiente para fabricar 106 baterías, del Co equivalente a 102 baterías, y del Mn necesario para fabricar 51 baterías.** En Navarra, en 2021, según los datos de ANFAC (Asociación Nacional de Fabricantes de Automóviles y Camiones), se vendieron 590 vehículos eléctricos nuevos: con los elementos recuperados, se podría fabricar un mínimo del 8% de las baterías de los vehículos eléctricos nuevos puestos en el mercado navarro.

Finalmente, sin tener en cuenta el precio en el mercado de cada una de estas materias primas críticas (que oscila entre los 1,7 €/kg del Si y los 781 €/kg del Eu, aunque, por la propia naturaleza de estos materiales, dicho precio presenta grandes fluctuaciones), se puede hacer una estimación del precio en el mercado de las cantidades recuperables de los RAEE. Este precio alcanzaría un total ligeramente superior a los 3 millones de € (3.029.807 €).



Cantidad disponible de materias primas críticas en forma de RAEE en Navarra, junto a su precio en el mercado (de forma orientativa).

5. Recuperación de materias primas críticas: caso real.

En el contexto del presente estudio, se ha llevado a cabo un trabajo de muestreo de RAEE, analizando un producto de consumo con alta presencia y tasa de renovación, como es una pantalla de ordenador, de cara a evaluar los componentes en los cuales se puede separar, los materiales presentes en dichos componentes, las estrategias de valorización y reciclaje de dichos materiales, y las posibilidades de recuperación de materias primas críticas a partir de los mismos.

Tal y como se ha indicado, para el muestreo se ha seleccionado una pantalla de ordenador, como ejemplo de AEE con amplia presencia en el mercado, y que se renueva de forma frecuente, aún sin completar la vida útil de las mismas. La pantalla seleccionada es de tecnología LCD, al ser la más habitual; esta tecnología se caracteriza por el uso de materias primas críticas, fundamentalmente indio e ytrio, en un conjunto con una gran variedad de materiales (plásticos de diversa naturaleza, metales, vidrio...). Además de indio e ytrio, necesarios para la propia tecnología LCD, en estas pantallas se pueden encontrar otras materias primas críticas (como el cobre o el silicio), en componentes como los circuitos o el cableados. Cada uno de los componentes en los cuales puede separarse una pantalla, tiene un destino diferente en función de los materiales en los que se construye y hasta qué punto pueden estos obtenerse de forma individualizada: mientras, por ejemplo, los plásticos que se pueden separar efectivamente son destinados al reciclaje y se valorizan, las pantallas LCD propiamente son enviados al vertedero, eliminándose sin valorización ni recuperación de materiales. Esto tiene, adicionalmente, un impacto en el funcionamiento de los gestores de residuos: mientras que los materiales valorizables les suponen un ingreso (las plantas de reciclado pagan por los materiales que reciben), los que no se valorizan suponen un gasto, al tener que pagar a los vertederos para su eliminación. Así, la implementación de tecnologías de recuperación, sería de interés para estos agentes de la cadena de valor de los RAEE.

La pantalla seleccionada en el muestreo presentaba un peso total de 4,526 kg, tal y como es recogida en el centro de gestión de residuos. El desensamblado de la misma en los componentes en los que es posible, para separar al máximo los diferentes materiales y promover su reciclaje efectivo y valorización, se desglosa en la siguiente tabla.

ORDEN	IDENTIFICACIÓN ELEMENTO DESENSAMBLADO	PESO (kg)	DESTINO FINAL ACTUAL
1	Pie de plástico	0,8 kg	Reciclado tradicional (valorización)
2	Pie de metal		Reciclado tradicional (valorización)
3	Carcasa trasera de plástico ABS	0,576	Reciclado tradicional (valorización)
4	Altavoces (dos unidades)	0,32	Reciclado tradicional
5	Marco de plástico	0,2	Reciclado tradicional (valorización)
6	Circuito consumo + CPV + pantalla	0,327	Reciclado tradicional (valorización)
7	Chasis chapa de acero	0,488	Reciclado tradicional
8	Pantalla LCD	0,434	Desecho (vertedero)
9	Resto de la pantalla	1,585	Desecho (vertedero)
	Lámina de plástico	0,319	
	Lámparas montadas en chasis	1,266	
			Gestor de tratamiento de lámparas

De acuerdo a lo indicado en el punto anterior, en estos componentes en los cuales se puede desensamblar el RAEE de estudio, se pueden encontrar las siguientes materias primas críticas:

- **Conjunto de la pantalla:** del conjunto total de una pantalla, tal y como es recibida en un centro de gestión de RAEE, se puede obtener, tras separar todos sus componentes, cobre, presente en las diferentes conexiones eléctricas, circuitos, etc. Como media, el 10% del peso total de un AEE es cobre; en este caso, se podría considerar que, de la pantalla de estudio, se podrían recuperar en torno a **450 g de cobre**.
- **Circuito de consumo, pantalla de visualización/CPV:** en estos componentes electrónicos se puede encontrar silicio, que, según se ha mencionado, normalmente supone un peso de 0,4 g/kg

en estos componentes. Así, el caso de estudio contendría **0,13 g de silicio**. Tal y como se indica en la tabla anterior, estos circuitos son actualmente valorizados, siendo enviados a empresas especializadas que se encargan de la valorización de todos los materiales de los circuitos.

- **Pantalla LCD:** la pantalla LCD (una capa plástica en particular dentro del conjunto de la pantalla), es una fuente de indio, tierra rara de alto precio catalogada como materia prima fundamental, dentro de las materias primas críticas. Dentro del cristal líquido, el indio supone, como media, 102 mg/kg. En la pantalla de estudio, se encuentran 0,434 kg de láminas plásticas de cristal líquido, que contendrían **44 mg de indio**. Cabe destacar que actualmente estas láminas son desechadas, enviándose al vertedero y eliminándose sin valorizar ninguno de los materiales que las componen. Esto, además, supone un gasto para los gestores, que deben pagar por esta eliminación.
- **Resto de la pantalla:** una separada la capa de cristal líquido, el resto de la pantalla contiene ytrio, como componente del cristal (pantallas negras) que se encuentra en estos elementos. En dichas pantallas negras, la proporción media de ytrio es de 300 mg/kg, lo cual supondría **475,5 mg de ytrio** en el caso de estudio (1,585 kg de capas de vidrio). Al igual que la lámina de cristal de líquido, estas pantallas negras son actualmente desechadas, tras la extracción de las lámparas, que son enviadas a gestores especializados, suponiendo una oportunidad perdida la recuperación de esta materia prima crítica, y un gasto para los gestores de RAEE.

En resumen, la pantalla seleccionada como muestreo de RAEE contendría las siguientes cantidades de materias primas críticas: **450 g de Cu, 130 mg de Si, 44 mg de In y 475,5 mg de Y**. De estas cantidades, tan solo el silicio y el cobre (que son los materiales de menor valor y menor dependencia en Europa) son actualmente valorizados, desechándose en vertedero los elementos que contienen indio e ytrio.

Desde el punto de vista de la oportunidad industrial de la implementación de líneas de recuperación de materias primas críticas en la gestión de los RAEE, el Centro Tecnológico Lurederra cuenta con experiencia en la recuperación de indio e ytrio de pantallas planas de tecnología LCD. Lurederra, como coordinador del proyecto Life-RECUMETAL (en el que también participó la Fundación ASPACE Navarra Para el Empleo a través de su planta de gestión de residuos Ecointegra), desarrollado exitosamente entre 2015 y 2019 con financiación de la Comisión Europea, desarrolló un proceso de recuperación de estas tierras raras de los residuos de pantallas planas, consistente en el tratamiento mecánico, físico y químico de las partes de las mismas que actualmente son desechadas (cristal líquido y pantallas negras). El proyecto concluyó con la construcción de una planta piloto con capacidad para procesar 225 kg/h de estos RAEE. De forma importante, la tecnología desarrollada podría ser adaptada para la valorización de estos elementos de otras tipologías de RAEE.

El proceso de reciclaje diseñado consta de dos etapas, mecánica y físico-química, con las cuales se demostró la posibilidad de recuperar el In y el Y, con gran pureza y rendimientos casi cuantitativos. Los elementos recuperados resultan, así, directamente reutilizables en la fabricación de nuevos dispositivos (pantallas, LEDs, tinta electrónica, paneles solares...), reduciendo así la dependencia europea respecto a tierras raras, de otros mercados, y contribuyendo a reducir los residuos medioambientales.

Para llevar a cabo la recuperación de estas materias primas, resulta necesario, en primer lugar, desensamblar el conjunto de las pantallas, en los elementos indicados en la tabla anterior. Este desensamblado, que debe ser manual unidad por unidad, supone un factor limitante desde el punto de vista industrial, pero, de forma importante, es un proceso que actualmente ya está llevando a cabo Traperos de Emaús en su planta de Berriozar. De hecho, en esta planta llegaron a contar con 15 t de pantallas negras (cuya valorización habría supuesto la recuperación de 4,5 kg de ytrio), que debieron desecharse íntegramente, enviándose al vertedero, por no encontrar posibilidades de reciclaje.

La planta piloto construida al término del proyecto RECUMETAL cuenta con dos líneas independientes:

- **Línea 1:** encaminada al procesamiento mecánico de pantallas. Consta de dos módulos diferentes:
 - Módulo 1: desensamblado manual de los componentes de las pantallas.



Fracción	Destino
Plásticos	Reciclado tradicional
Metales	Reciclado tradicional
Altavoces y cableado	Reciclado tradicional
Circuitos y placas	Reciclado tradicional
Panel LCD	Línea 2 (procesado químico)
Pantalla negra	Línea 1- Módulo 2 (procesado mecánico)

- Módulo 2: procesamiento automático de las pantallas negras (el módulo de vidrio) separadas en el Módulo 1.



Fracción	Destino
Fracción magnética	Reciclado tradicional
Fracción no magnética	Reciclado tradicional
Fracción polvo de vidrio	Línea 2 (procesado químico)

- Línea 2: donde se desarrolla el tratamiento químico de las fracciones obtenidas.



El tratamiento químico seguido para recuperar cada una de las materias primas críticas (indio o ytrio) es diferente y se adaptó a las particularidades de cada una de ellas; básicamente, consiste en lixiviaciones selectivas con diferentes disolventes ácidos y orgánicos, con los que se consigue obtener disoluciones de estos elementos, que pueden ser introducidas directamente en nuevos procesos industriales. Además, el tratamiento se diseñó para poder reutilizar estos disolventes el mayor número posible de ciclos, controlando el rendimiento de recuperación. Finalmente, los tratamientos diseñados permiten la **recuperación de indio** con un rendimiento de entre **120-140 mg/kg de láminas plásticas de cristal LCD**, y la **recuperación de ytrio** con un rendimiento de **265 mg/kg del vidrio de las pantallas negras**. Estos valores son acordes a los contenidos medios encontrados en la bibliografía y mostrados previamente, lo cual es indicativo de la robustez de la tecnología desarrollada.