

Rare earths, a key piece in the energy puzzle

Abstract:

Today's high technology relies on rare earth elements and we would go back to 1960 if they did not exist. These elements are strategically important to the military, critical to industry and key to the management of energy, by way of: consumption (lighting, magnets, and vehicles), storage (batteries, hydrogen storage) and production (wind turbines, photovoltaic panels, nuclear reactors).

Keywords:

Energy, rare earths, clean technologies, critical elements, China.

Cómo citar este documento:

PREGO REBOREDO, Ricardo. *Las tierras raras, una pieza clave en el puzle de la energía*. Documento de Análisis IEEE 33/2022.

https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2022/DIEEEA33_2022.pdf y/o [enlace bie³](#)
(consultado día/mes/año)

«Una nación en la cual las ciencias y las artes aplicadas languidezcan será adelantada por las naciones rivales y perderá poco a poco su capacidad de competición; su comercio, su riqueza, pasarán a manos de los extranjeros...».
Antoine Lavoisier (1743-1794)

La Edad de las Tierras Raras

Durante la gran revolución de la química que pusieron en marcha Lavoisier, Mendeleiev y Mosley, principalmente, para ordenar los elementos químicos, se inicia la pequeña historia del descubrimiento de los elementos de las tierras raras en 1787. Se denominaron inicialmente tierras porque no podían separarse de sus óxidos usando las capacidades tecnológicas del siglo XVIII. Solo se podía interpretar que esas «tierras» eran óxidos de metales desconocidos, que se aceptaba su identificación sin llegar a separarlos de sus óxidos. Las tierras raras no solo no son tierras, nombre arcaico que ha quedado obsoleto para la química, aunque suele presentarse¹, sino que tampoco son raras, esto es, escasas. En la corteza terrestre (Figura 1) son más abundantes que el mercurio, el oro o la plata, por ejemplo.

¹ Ello lleva a sinsentidos como, por ejemplo, el uso corriente del acrónimo REO (*Rare Earth Oxides*) para referirse a los óxidos de elementos de las tierras raras cuando *earth* y *oxide* son sinónimos.

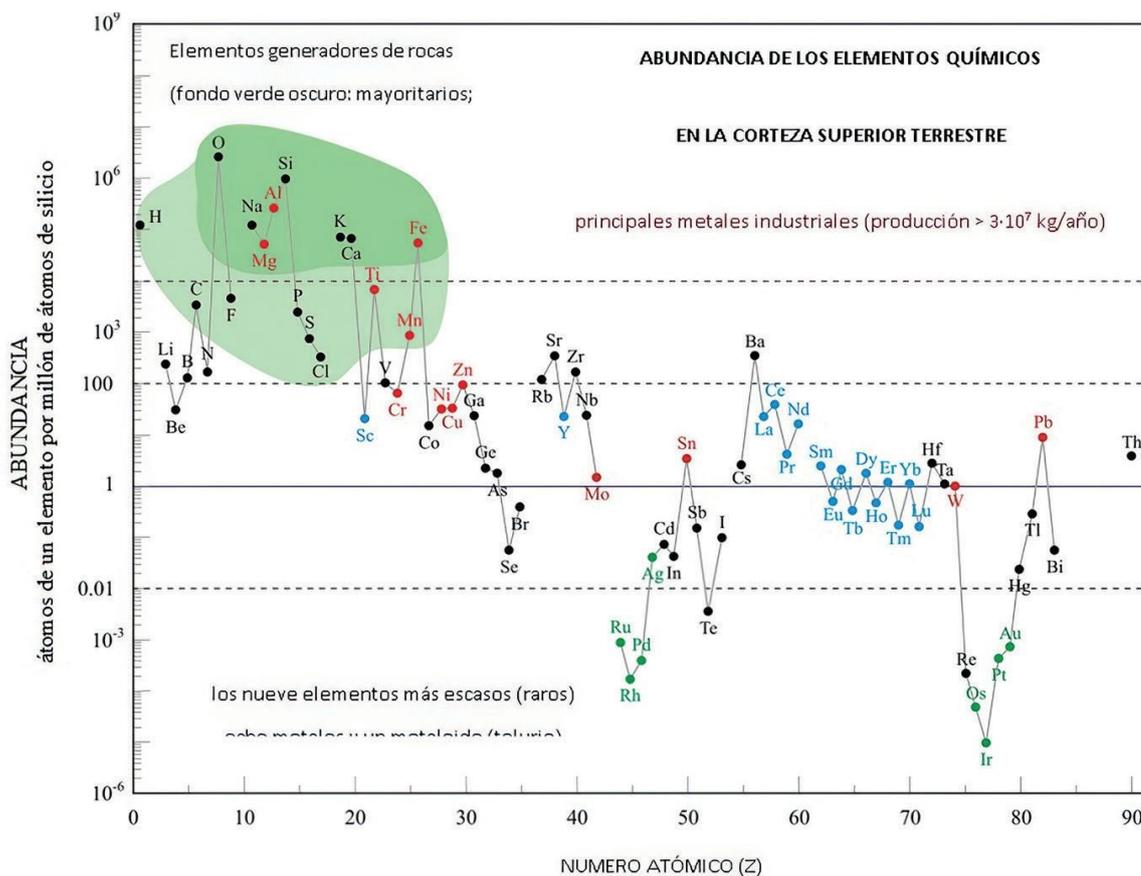


Figura 1. Abundancia relativa de los elementos químicos en la corteza continental superior de la Tierra en función del número atómico. Los elementos de tierras raras están etiquetados en azul. Fuente. Adaptado de E. Generalic, https://www.periodni.com/rare_earth_elements.html

Se denominaron así en un principio por ser muy poco frecuentes los minerales que las contenían y, además, había que buscarlos en Suecia. El descubrimiento² partió de dos minerales: la iterbita o gadolinita, en la mina de Ytterby, y la cerita en la de Bastnäs. Ambos minerales son el punto de partida para el descubrimiento de los demás elementos de las tierras raras, agrupados en dos familias³, la cérica y la ítrica (Tabla 1).

El estudio de las tierras raras estuvo inicialmente restringido, ya que los científicos solo disponían de pequeñas cantidades de muestras para su investigación. Esta

² Para detalles consultar: PREGO, R.: «Las tierras raras», Editorial Catarata, Madrid, pp. 13-38, 2019.

³ Los elementos de las tierras raras se suelen agrupar en ligeros (LREEs: *Light Rare Earth Elements*) y pesados (HREEs: *Heavy Rare Earth Elements*). Aunque la IUPAC incluye a siete entre los ligeros: desde el lantano hasta el gadolinio (el prometio no se considera), que coinciden con los céricos, y otros siete entre los pesados: del terbio al lutecio, serían los ítricos, hay otras distribuciones diferentes, e incluso se hace una división más en medios (MREEs: *Middle Rare Earth Elements*) o se incluye al itrio entre los pesados. Ello genera confusión y es muy conveniente que se expliciten en el texto los elementos.

limitación terminó en 1879 con el hallazgo de yacimientos de samarskita en Estados Unidos; este óxido acabó con la carestía en los laboratorios químicos. Las tierras raras mantuvieron su nombre, pero a partir de entonces dejaron de ser raras. El descubrimiento y aislamiento de estos elementos prosperó entre 1794 (itrio) y 1907 (lutecio), con la excepción del prometio (1945), surgido con la fabricación de la primera bomba atómica. Fue una gran aventura para la química experimental de unos científicos que poseyeron un toque de «románticos» al buscar los nuevos elementos químicos en la naturaleza dedicando muchas horas de trabajo en sus laboratorios; lo ha descrito George de Hevesy (1885-1966), premio Nobel de Química en 1943, fue «uno de los logros más brillantes que la química experimental haya realizado jamás»⁴.

Año	Metal (símbolo)	Autor (país)
Mineral gadolinita (o iterbita)		
1794	itrio (Y)	J. Gadolin (Suecia)
1843	erbio (Er)	C. Mosander (Suecia)
1843	terbio (Tb)	C. Mosander (Suecia)
1878	iterbio (Yb)	J.C. de Marignac (Suiza)
1879	tulio (Tm)	P.T. Cleve (Suecia)
1879	escandio (Sc)	L. Nilson (Suecia)
1879	holmio (Ho)	P.T. Cleve (Suecia)
1886	disproso (Dy)	P.E. Lecoq de Boisbaudran (Francia)
1907	lutecio (Lu)	G. Urbain (Francia) & C. Auer von Welsbach (Austria)
Mineral cerita		
1803	cerio (Ce)	J.J. Berzelius & W. Hisinger (Suecia); M. Klaproth (Alemania)
1839	lantano (La)	C. Mosander (Suecia)
1879	samarium (Sm)	P.E. Lecoq de Boisbaudran (Francia)
1885	praseodimio (Pr)	C. Auer von Welsbach (Austria)
1885	neodimio (Nd)	C. Auer von Welsbach (Austria)
1886	gadolinio (Ga)	J.C. de Marignac (Suiza) & P.E. Lecoq de Boisbaudran (Francia)
1898	europio (Eu)	E. Demarçay (Francia)
Desintegración del uranio		
1945	prometio (Pm)	J. Marinsky, L. Glendenin & C. Coryell (USA)

Tabla 1. Descubrimiento de los elementos de las tierras raras. Fuente. Basado en Krebs, R.E., 2006. The history and use of our Earth's chemical elements (2ª Ed.). Greenwood Press.

⁴ HEVESY, G.: «The discovery and properties of Hafnium», *Chemical Reviews*, 2: 1-41, 1925.

Así, paso a paso, de una manera temporalmente discontinua, se identificaron los 16 elementos que aparecen en la Tabla 1. Ellos, junto con el prometio (61Pr), que se obtuvo por otros caminos, constituyen los 17 componentes que conforman los elementos de las tierras raras: escandio (21Sc), itrio (39Y), lantano (57La), cerio (58Ce), praseodimio (59Pr), neodimio (60Nd), prometio (61Pm), samario (62Sm), europio (63Eu), gadolinio (64Gd), terbio (65Tb), disprosio (66Dy), holmio (67Ho), erbio (68Er), tulio (69Tm), iterbio (70Yb) y lutecio (71Lu). El número que precede al símbolo químico de cada elemento es el número atómico (sigla Z), esto es, el número de protones que tiene su núcleo. Al ser el átomo eléctricamente neutro, esas cargas positivas se compensan con un número igual de electrones situados en diferentes orbitales rodeando al núcleo. Desde el lantano hasta el lutecio aumenta un protón y un electrón de un elemento al siguiente, formando el grupo de los denominados lantánidos. En la naturaleza no existen en estado nativo, sino como iones normalmente con tres cargas positivas. Los radios iónicos de los lantánidos son muy parecidos. A ese conjunto se incorporan itrio y escandio, también cationes trivalentes, ya que suelen aparecer mezclados con los lantánidos en los mismos yacimientos. Estas similitudes entre los lantánidos, por sus orbitales electrónicos «f», su trivalencia y radio iónico, hace que se comporten químicamente de manera muy parecida, por lo que se presentan en unos mismos minerales, aunque en diferentes proporciones, lo que condiciona su separación y, consiguientemente, su descubrimiento.

Entre el centenar de científicos que participaron en esta labor realizada en Europa (Tabla 1), se encuentra Carl Auer von Welsbach⁵, quién no solo era un buen químico, descubrió al praseodimio y neodimio, sino también un brillante hombre de negocios. Auer inició un exitoso camino comercial con la primera aplicación industrial de las tierras raras. Cuando, a finales del siglo XIX, se pensaba que la electricidad sustituiría al gas en la iluminación de las ciudades, patentó la «Auerlicht», que incrementaba la luz del gas por efecto de incandescencia proporcionada con una frágil camisa suspendida de hilos metálicos hechos con cerio y torio, rodeando la llama de gas. Bombay, París, Berlín, Viena... En 1913 se fabricaron 300 millones de lámparas Auer. A su creador, el emperador Francisco José de Austria le concedió el título de barón «von Welsbach».

⁵ BAUMGARTNER, E.: «Carl Auer von Welsbach a Pioneer in the industrial application of rare earths», en: «Episodes from the history of the rare earth elements» (C.H. Evans, Ed.), Kluwer Academic Publishers, Londres, pp. 113-130.

Hoy en día su invento proporciona una intensa luz en las lámparas de campin-gas. Otra consecuencia de su inventiva, que perduró hasta nuestros días, fue la piedra de mechero, una aleación de cerio y hierro que desbancó a las cerillas que, desde hacía medio siglo, encendían fuegos. Esta visión práctica de Auer hace ver que disponer fácilmente de energía, que un humilde mechero de chispa nos inicia, es importante, pero también el saber gastarla, sacando el mayor rendimiento posible sin aumentar su consumo. Estos dos puntos son básicos para la sociedad actual en el manejo de la energía.

El recurso de los elementos de las tierras raras ha transformado nuestra sociedad a partir de la década de 1960. Sus elementos son abordables técnicamente al disponer de energía, procedimientos e instalaciones para el aislamiento de esos metales. Tras la labor de Auer hace un siglo, las invenciones sucesivas de los microprocesadores (1971), imanes (1966-1983), Internet (1981) teléfonos móviles (1991) y teléfonos inteligentes (2005) aumentaron la demanda de tierras raras; ellas nos han impulsado hacia una sociedad de alta tecnología. Los elementos de las tierras raras están en nuestros bolsillos, por ejemplo en los billetes de euro y los teléfonos móviles, en nuestras gafas, si las usamos, en algunas circonitas de joyería; en nuestra vida cotidiana, ordenadores, pantallas, cocinas y máquinas de fotos, vehículos (coches, patinetes...), neveras y congeladores, raquetas de tenis y palos de golf, bicicletas (eléctricas o no), luces...; nos ofrecen calidad de vida en hospitales y clínicas dentales, fi as ópticas y wifi transporte...; la tecnología que disfrutamos hoy en día se basa en buena parte en las tierras raras, hasta el punto de que retrocederíamos hasta los años sesenta del siglo pasado si no existiesen. Se puede afirmar que después de las Edades del Cobre, Bronce y Hierro podremos decir, por sus aplicaciones, que estamos en la Edad de las Tierras Raras⁶.

El objeto de este artículo es mostrar con una visión de conjunto por qué los elementos de las tierras raras son vitales para nuestra sociedad y cómo interactúan con la energía.

⁶ ONDREICKA, B.; SAMMAN, N.: «Rare Earth», Sternberg Press, Berlín, 272 pp.: 2020. https://www.tba21.org/#item--rare_earth--525. Fecha de la consulta 25.01.2021.

Una inmensa variedad de utilidades

Usualmente se considera que la historia de las tierras raras ha seguido tres etapas: una inicial con su descubrimiento (hasta 1947) que fue seguida por su estudio (hasta 1969) para terminar con el desarrollo de aplicaciones (hasta hoy en día) y su introducción en la vida cotidiana. No obstante, los hechos asociables a cada etapa se superponen. Son ejemplo las patentes de Auer o la investigación en marcha de nuevas propiedades fisicoquímicas sobre láseres y magnetismo. El gran impulso lo recibieron las tierras raras con la invención de los televisores de color en la década de 1960. Ese éxito comercial estuvo ligado a una mayor explotación minera junto con nuevos métodos para la obtención de sus elementos en estado de gran pureza, lo que facilitó la investigación de nuevas propiedades y aplicaciones. A partir de entonces la búsqueda científica surgida a finales del siglo XVIII para entender mejor el mundo que nos rodea con la recompensa de gloria académica u honores científicos se ha convertido en el negocio tecnológico de las aplicaciones, que condicionan mucho la investigación científica centrándola en resultados económicos. El gigante que es actualmente nuestra sociedad de alta tecnología, no deja de tener sus pies en una ciencia altruista de hace dos siglos.

El papel que tienen los 17 elementos de las tierras raras en las aplicaciones se condensa en la tabla 2 para cada elemento, aunque en un mismo aparato pueden intervenir varios de ellos.

Escandio	Agente de rastreo en refinerías de petróleo, aditivo en lámparas de halogenuros, aumentar la dureza del aluminio (bicicletas, raquetas, palos de golf...), aleaciones de metales en la industria aeroespacial.
Itrio	Bombillas de bajo consumo, cerámica, aleaciones metálicas, láseres cortadura, mejora eficiencia de combustibles, comunicación por microondas, pantallas LCD, sensores de temperatura.
Lantano	Electrodos para baterías recargables, catalizadores para el refinado de petróleo, baterías vehículos eléctricos, lentes de cámaras digitales de alta tecnología, cámaras de vídeo, baterías de portátiles, películas de rayos X, láseres.

Cerio	Catalizador en refinerías de petróleo, piedras de mechero, electrodos para baterías recargables, colorante cerámico, aditivo diésel para catalizar descomposición de humos, filtros UV, aleaciones metálicas, abrillantadores de lentes (vidrio, placas frontales de televisión, espejos, vidrio óptico, microprocesadores de silicio y unidades de disco).
Praseodimio	Láseres, motores eléctricos (v.g., aerogeneradores, vehículos, drones), aditivo en los cristales de las gafas de soldadura, aumentar la resistencia a la corrosión del imán, pigmento en vidrios y esmaltes, reflectores, lentes de señales de aeropuerto, filtros fotográficos.
Neodimio	Motores eléctricos (v.g., aerogeneradores, vehículos, drones, por ejemplo), aditivo en los cristales (gafas de soldadura, faros coches, por ejemplo), condensadores de cerámica, electrodos para baterías recargables, aparatos de resonancia magnética para hospitales, imanes de alta potencia para portátiles, láseres, catalizadores de <i>fracking</i> de fluidos.
Prometio	Pinturas fosforescentes, baterías nucleares, fuente de radiación beta, fuente radioactiva para instrumentos de medición de espesores.
Samario	Láseres, imanes de alta temperatura, varillas de control de reactores nucleares.
Europio	Láseres, autenticar billetes, pantallas de cristal líquido (LCD), iluminación fluorescente, aditivo para vidrio.
Gadolinio	Memorias de ordenadores, láseres para cortar acero, tubos de rayos X, agente de contraste para resonancias magnéticas en hospitales, aditivo para vidrio.
Terbio	Láseres, lámparas fluorescentes, aditivo en imanes de neodimio, iluminación y pantallas, sistemas de guía y control.
Disproσιο	Discos duros en informática, aditivo en imanes de neodimio, láseres.
Holmio	Láseres, los más poderosos imanes fabricados, aparatos de resonancia magnética para hospitales.
Erbio	Láseres, paneles solares, mantenimiento de la señal en fibras ópticas, colorante en vidrios.
Tulio	Láseres, aparatos radiografía de rayos X (v.g., clínicas dentales), imanes de alta potencia.
Itterbio	Tecnología de fibra óptica, paneles solares, aleaciones (acero inoxidable), fuente de radiación para equipos portátiles de rayos X, láseres (cortar metales y plásticos duros), bengalas.

Lutecio	Bombillas led, vidrios con altos índices de refracción, pantallas de rayos X, catalizador en refinerías de petróleo para producir gasolina y diésel.
---------	--

Tabla 2. Principales aplicaciones de los elementos de las tierras raras.

Las propiedades químicas de las tierras raras son muy parecidas, pero no las físicas, lo que explica la especificidad de sus propiedades ópticas y magnéticas. En el mercado de consumo no existe una clasificación uniforme para las aplicaciones de tierras raras y se suelen agrupar siguiendo nueve sectores: baterías, aditivo para vidrios, catalizadores (refinado del petróleo, vehículos), cerámica, imanes, metalurgia (aleaciones...), pigmentos y luminiscentes (láser, iluminación, pantallas LCD...), pulido y otros. La estimación realizada para 2020⁷ se expone en la Figura 2. No difiere de otras anteriores, por ejemplo la de 2015⁸. La mitad de la producción se consume para imanes y catálisis. En términos de valor económico, los imanes y luminiscentes generan las mayores ganancias. El consumo de elementos de las tierras raras está dominado⁹ por el neodimio (49 %) y praseodimio (20 %), que forman parte principal de los imanes, seguido por el lantano (6 %), cerio (4 %) y terbio (4 %); los demás están por debajo del 2 %.

⁷ ROSKILL: «Rare Earths». <https://roskill.com/market-report/rare-earths/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁸ ZHOU, B., LI, Z., CHEN, C.: «Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies», Minerals, 7: 203, 2017.

⁹ <https://www.statista.com/topics/1744/rare-earth-elements/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

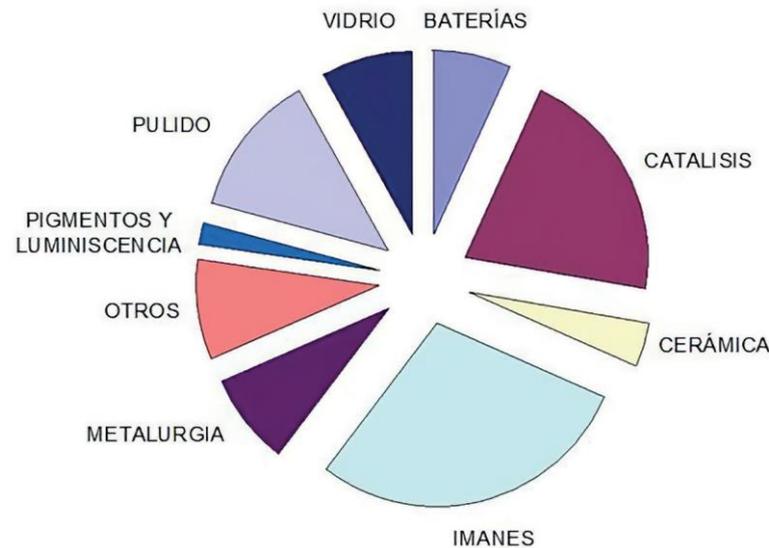


Figura 2. Distribución del consumo de los elementos de las tierras raras según sus aplicaciones en 2020.

Sin embargo, el coste de los diferentes óxidos de estos elementos va ligado a su escasez en los minerales y en la dificultad de separación. El iterbio y el lutecio son un aparte por su precio elevado y reducida producción. Entre los demás destacan¹⁰ los óxidos de escandio (955 USD/kg con un 99,99 % de pureza; noviembre de 2020 en EXM¹¹ China) y terbio (805 USD/kg; ídem). Hay que tener en cuenta que los precios varían mensualmente, según el mercado (chino, hindú...), el grado de pureza del óxido o, incluso, el volumen de la compra. Los usos militares merecen un comentario separado por su importancia en los juegos geopolíticos, aunque engloben algunas de las aplicaciones citadas.

Aplicaciones militares y optrónicas

La historia de las tierras raras y el uranio se entrecruzan al aparecer ambos juntos en algunos minerales y que, en ocasiones, los expertos nucleares también intervinieron en el aprovechamiento de las menas de las tierras raras. El proyecto Manhattan para la

¹⁰ <https://en.institut-seltene-erden.de/unsere-service-2/metall-preise/seltene-erden-preise/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹¹ El importador ha de asumir los costes logísticos de la mercancía desde el almacén del proveedor hasta el del importador.

fabricación de las dos primeras bombas, una de hidrógeno y otra de plutonio, abrió la puerta a una mejor separación de las tierras raras. En ese entorno secreto tres científicos norteamericanos, Jacob Marinsky, Lawrence Glendenin y Charles Coryell, fueron contratados por su experiencia en tierras raras y la similitud de ellas con el uranio y el plutonio, para que investigaran cómo separar isótopos radiactivos. Según Marinsky¹², los dos proyectos más emocionantes desarrollados en los laboratorios Clinton durante 1944-45 fueron el descubrimiento del elemento 61 (prometio) y la obtención de la fuente radiactiva que necesitaba Robert Oppenheimer para hacer estallar una bomba atómica. Todo lo relacionado con ello era considerado secreto militar por el ejército norteamericano, por lo cual el anuncio del descubrimiento se retrasó hasta 1947. El prometio es el único elemento de las tierras raras que merece la calificación de raro. En toda la corteza terrestre es tan escaso que no llega a sumar un kilogramo; es radiactivo y se desintegra completamente en unos pocos años. Corrientemente no se le tiene en cuenta dentro de las tierras raras. El necesario para unas pocas aplicaciones se obtiene artificialmente en reactores nucleares, ya que es uno de los elementos resultantes de la fisión del uranio.

La guerra fría condujo a la búsqueda y desarrollo de sistemas de vigilancia de otros países y a la carrera espacial, lo que impulsó aún más la investigación de las aplicaciones y la demanda de los elementos de las tierras raras. El poder basado en los ejércitos se apoya completamente en el espectro de tecnologías militares que dichos elementos proporcionan. Sin ellos, los países no podrían producir gran parte del equipo necesario para su defensa. Las naciones son reacias a proporcionar información. Algo más transparente es EE. UU.; aunque no proporciona detalles¹³, los destinos de las tierras raras quedan recogidos bajo epígrafes amplios como sistemas de objetivos y armas, sistemas de guía y control, y motores eléctricos o dispositivos de comunicación, y pantallas para visualizar datos analógicos y digitales. Pese a todo es posible obtener alguna información sobre las aplicaciones militares imprescindibles¹⁴. Sirven en los sistemas de guía y control que dirigen misiles y bombas hacia sus objetivos (terbio,

¹² MARINSKY, J. A.: «The search for element 61», en: «Episodes from the history of the rare earth elements» (C.H. Evans, Ed.), Kluwer Academic Publishers, Londres, pp. 91-108, 1996.

¹³ EPA 600/R-12/572, «Rare Earth elements: a review of production, processing, recycling, and associated environmental issues», 2012.

¹⁴ <https://www.defensemianetwork.com/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

disproσιο, samario, praseodimio y neodimio). El misil Patriot utiliza neodimio y samario en los motores eléctricos y sus sistemas de guía por radiofrecuencia precisan de gadolinio, itrio y samario para controlar magnéticamente el flujo de señales electrónicas en radar y sonar para mantener la navegación. El misil SideWinder, que actúa por búsqueda de calor, tiene imanes de tierras raras en sus aletas para controlar la trayectoria de vuelo. Las bombas inteligentes, municiones guiadas de precisión, tipo crucero Tomahawk, antibuque (ASM) y tierra-aire (SAM), así como destructores de búnker requieren disproσιο, neodimio, praseodimio, samario y terbio. Otros ejemplos son aviones y buques de guerra. Un caza F-22 contiene itrio, terbio y erbio en sus sistemas de ópticos, de detección y fibra óptica (en un F-35 hay 400 kilogramos de metales de tierras raras). Un submarino nuclear necesita 4 toneladas, entre ellas europio y lutecio para sus sónares activos y pasivos. Un destructor clase Aegis-2 lleva 2,5 toneladas y láseres para la detección de minas y contramedidas. Los motores eléctricos del futuro destructor militar guiado Zumwalt de la Armada Norteamericana requiere potentes imanes permanentes (terbio, disproσιο, samario, praseodimio y neodimio). Hay láseres montados en vehículos, como tanques y vehículos blindados, que posibilitan identificar objetivos enemigos hasta 35 kilómetros de distancia y aumentar la probabilidad de obtener impactos directos como en el tanque Abrams (europio, neodimio, terbio e itrio). El itrio se emplea en mejorar el blindaje de vehículos militares. Los radares precisan, al menos, de europio y lutecio. Finalmente, un ejército que depende de productos de alta tecnología para la comunicación entre los soldados y sus equipos; son de uso corriente móviles, ordenadores y pantallas táctiles. Los componentes actuales y futuros para la guerra electrónica y los radares dependen estrictamente de las tierras raras. La potencia de un ejército actual se apoya fundamentalmente en su tecnología, siendo motivo de continua investigación y desarrollo.

En los países avanzados se mezcla la investigación científica civil y militar, y se intercambian algunos frutos de las aplicaciones. Es el caso de los sistemas optrónicos. Son equipos formados por radar, láser, y calculadores electrónicos aplicados a la localización y seguimiento automático de blancos que pueden detectar objetos bajo cualquier condición de luz, evaluar sus características y efectuar su seguimiento por imágenes. El mejor ejemplo militar son los drones tipo Predator que disponen de

destinos civiles para la vigilancia de instalaciones críticas y de alto riesgo como puertos, aeropuertos, industrias, centrales térmicas y nucleares...

Aplicaciones relacionadas con la energía

La variedad de posibilidades tecnológicas que las propiedades de los elementos de las tierras raras ofrecen se han expuesto anteriormente, ahora merece la pena profundizar algo más en las que atañen a la energía. Se pueden agrupar según su conexión con ella siguiendo tres escalones: el primero corresponde directamente a la producción de energía; el segundo, a obtener una mayor eficiencia en el consumo de energía; y la tercera atendiendo a los medios que facilitan el manejo de la misma. Los tres se entremezclan en las emergentes tecnologías limpias, como turbinas eólicas, vehículos eléctricos, baterías recargables e iluminación de bajo consumo. Los elementos de las tierras raras clave para las tecnologías limpias son lantano, cerio, neodimio, europio, terbio disproso e itrio y la mayoría de las aplicaciones requieren solo uno o dos de ellos. Las cantidades y equipos donde se emplean se indica en la Tabla 3, donde destacan los 120 kilogramos de neodimio y 12 de disproso, por término medio, necesarios actualmente por cada megavatio de potencia del generador eólico. En el modelo más común, ambos metales se localizan en el de eje horizontal, donde un rotor formado por tres palas engarzadas al buje hace girar un eje conectado a una multiplicadora que eleva la velocidad de giro a 1500 revoluciones por minuto para producir energía alterna que se transmite a la red eléctrica. El generador funciona de manera semejante a una dinamo cuyo potente imán está construido con una aleación de neodimio (hasta un 30 %), hierro y boro. El inconveniente es que pierde sus propiedades magnéticas a una temperatura inferior a otros imanes, por ello se incluye disproso, y en ocasiones también terbio, para mejorarlo. En un parque eólico intervienen, asimismo, elementos de las tierras raras en los equipos informáticos para control, gestión y comunicación.

Otra aplicación llamativa en la producción de energía, por lo raro del elemento y lo singular de la misma, es la utilidad del prometio como fuente de alimentación en pilas atómicas. El isótopo de número másico (número de protones más neutrones) 147 del prometio se obtiene artificialmente y al transmutarse a samario emite partículas beta, esto es,

electrones, con baja energía, lo que evita un pesado blindaje. Forma parte de un pequeño grupo de isótopos radiactivos empleados en baterías betavoltaicas. Son capaces de general voltajes de corriente muy bajos que se usan en vehículos espaciales. En el caso del prometio-147, la pila dura unos cinco años y podría estarse aplicando militarmente en los sistemas guía de misiles para evitar una intromisión en sus sistemas informáticos.

Un ejemplo del segundo escalón en la mejora de eficiencia energética es la iluminación. Los elementos de las tierras raras permiten un menor gasto de electricidad por su uso, bien en tubos fluorescentes (*linear fluorescent lamp*: LFL), en bombillas fluorescentes (*compact fluorescent lamp*: CFL), y, recientemente, en luces led (*light-emitting diode*: LED). Desde que el invento de Auer intensificara la luz de gas actuando a través del óxido de torio (hoy en día itrio) que acumulaba energía calorífica de la combustión del gas y la emitía como radiación infrarroja, la cual, a su vez, era convertida por el óxido de cerio en una brillante luz visible. La iluminación por incandescencia de Auer tiene su versión actual en lámparas fluorescentes de mercurio. Este metal actúa como fuente de energía, y el recubrimiento del vidrio interior con poco menos de un gramo de elementos de las tierras raras (Tabla 3), basta para producir una luz semejante a la diurna. Dicha fuente de energía también puede ser una fría luz led que, incorporando trazas de europio e itrio (tabla 3), proporcionan una iluminación variada, tan corriente hoy en día en casas, coches, señales, decoración... Los ledes están sustituyendo a los fluorescentes, ya que proporcionan ahorro de energía, mantenimiento, control y ofrecen variedad de colores. La previsión para dentro de diez años¹⁵ es una fuerte caída en la demanda de fluorescentes (LFL y CFL), duplicándose, por el contrario, la de ledes. No obstante, se está experimentando con luces led basadas en la nanotecnología de puntos cuánticos (*quantum dots*: QD)¹⁶ que pueden remover el mercado futuro y llegar a desconectarlo de las tierras raras.

¹⁵ ZHOU & CHEN, nota 8.

¹⁶ <https://electricaltrends.com/2019/06/03/impacts-on-lighting-if-china-weaponizes-rare-earth-metals/>

Fecha de la consulta 25.01.2021.

Aplicación	por	Disproσιο (kg)	Neodimio (kg)	Cerio (g)	Europio (g)	Lantano (g)	Itrio (g)	Terbio (g)
Turbinas eólicas	MW	12	120					
Vehículos eléctricos	motor	0,075	0,45					
Idem bicicletas o patinetes	motor	0,031	0,038					
Baterías NiMH	batería		0,255	860		610		
Tubos fluorescentes	lámpara			0,18	0,041	0,077	0,56	0,045
Lámpara fluorescente	lámpara			0,14	0,095	0,462	1,3	0,105
Diodos LED	lámpara				0,0004		0,005	
Catalizadores	coche			20				

Tabla 3. Consumo de elementos de las tierras raras en cada una de sus principales aplicaciones en energías limpias. Fuente. Zhou, B., Li, Z., Chen, C. 2017. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7: 203.

El motor eléctrico precisa neodimio y disprosio en sus imanes. El campo magnético giratorio del estator arrastra al fijo del rotor, haciéndolo girar y propiciando que unos engranajes hagan, a su vez, moverse las ruedas del coche. Las cantidades de tierras raras utilizadas no llegan a medio kilogramo, aunque un coche híbrido puede contener hasta once kilogramos en otros equipamientos. El alto rendimiento y su reducido tamaño le hace apropiado para coches híbridos y eléctricos, patinetes, bicicletas e incluso drones.

La industria del automóvil está buscando alternativas tecnológicas a los motores eléctricos de imanes permanentes compuestos por tierras raras. En la actualidad existen dos posibilidades¹⁷: una, los motores eléctricos con un sistema externo de excitación que sustituye a los imanes; otra, imanes formados por materiales magnéticos que realicen la misma función y reduzcan al máximo la necesidad de las tierras raras. Pese a todo, ningún otro imán puede igualar su rendimiento, «realmente no se pueden reemplazar los imanes de tierras raras», en palabras de Da Vukovich, presidente de Alliance LLC¹⁸.

El neodimio es un metal importante para los actuales planes de explotación a gran escala de la energía eólica, principalmente la marina. El continuo aumento en la fabricación de

¹⁷ <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/motores-electricos-tierras-raras-son-posibles-son-alternativas/20200124185136032768.html> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹⁸ Ibídem.

turbinas eólicas, unido al de vehículos híbridos y eléctricos, hace que la demanda de neodimio haya crecido de manera continua. La empresa Toyota prevé que la demanda de neodimio excederá la oferta a partir de 2025 y está desarrollando motores eléctricos con la mitad de metales de tierras raras. La Agenda Verde, objetivo de muchos gobiernos nacionales y organismos internacionales para reducir emisiones de carbono, conllevará un crecimiento en la demanda de las tierras raras necesarias en la generación de energía renovable y el transporte con cero emisiones. Para 2030 se ha estimado¹⁹ un aumento del 35 % en los MW de energía eólica, se doblarán las baterías NiMH y el número de vehículos eléctricos será 14 veces superior. El informe *Perspectivas del mercado de tierras raras de Roskill*²⁰ para ese año proporciona un desglose detallado de la demanda, evaluando las tendencias tecnológicas y de la industria, y su impacto en el consumo de cada elemento por mercado de uso final; pronostica que las aplicaciones de imanes de tierras raras representarán un 40 % de la demanda total de esos metales.

En este segundo escalón se encuadra el almacenado de la energía: baterías electroquímicas para dispositivos portátiles y almacenamiento de hidrógeno²¹. Las baterías recargables de níquel e hidruro de metal (Ni-MH) se usan corrientemente como fuentes de energía. Forman parte de la electrónica de consumo: ordenadores personales, teléfonos, equipos de audio, televisores, calculadoras, sistemas GPS, cámaras digitales, reproductores y grabadores de vídeos... Son las más extendidas en los vehículos eléctricos e híbridos. El cátodo de la batería está elaborado con una aleación (*Mischmetal*) de elementos de tierras raras que contiene proporciones variables de cerio (45-50 %), lantano (25 %), neodimio (15-20 %) y praseodimio (5 %). Las baterías Ni-MH reemplazan las de níquel-cadmio, pues aportan el doble de energía, no son contaminantes y se pueden recuperar los metales para fabricar nuevas baterías. A su vez está siendo amenazada por las que usan litio, que ofrecen una parecida capacidad en la mitad de tamaño, aunque a mayor coste. No se prevé que disminuya la demanda de baterías Ni-HM, sino que se duplique su número en 2030²².

¹⁹ ZHOU & CHEN, nota 8.

²⁰ ROSKILL, nota 7.

²¹ JIANG, Z., WANG, J., CAO, D.: «Research Progress of Rare Earth-Based Hydrogen Storage Alloys», *Key Engineering Materials*, 861: 354-362, 2020.

²² ZHOU & CHEN, nota 8.

En el tercer escalón se encuadran todas las aplicaciones de apoyos a los sistemas que controlan las fuentes y distribución de la energía: sistemas de comunicación, equipos informáticos, controles de seguridad... La necesidad de disponer de reservorios de energía hace que se esté experimentando con diferentes aleaciones²³ para almacenar hidrógeno. Son muy atractivas las de lantano-níquel (LaNi₅) o Mm-níquel-aluminio-cobalto-manganeso (*Mischmetall* se simboliza por Mm). Los depósitos de hidruros de tierras raras forman redes cristalinas con intersticios en los que pueden quedar adsorbidas moléculas de hidrógeno gas; después lo liberan mediante una ligera calefacción y condiciones catalíticas apropiadas, haciendo posible su utilización como combustible.

En el aspecto de control de la energía de origen nuclear participan varios isótopos de las tierras raras: samario, gadolinio, disprosio, holmio y erbio. El samario-149 presenta el fenómeno curioso de ser «relativamente» estable, ya que se desintegra tan lentamente que aún no se han observado fisiones, esto es ¡necesita más tiempo que la edad del universo! Por otra parte, resulta un veneno nuclear, es decir, un material absorbente de neutrones, útil para reducir la alta reactividad inicial del combustible nuclear, el uranio en el núcleo del reactor, haciendo que las desintegraciones se ralenticen. En este proceso es el más eficiente después del isótopo 135 del xenón. Debido a que el samario no se desintegra, presenta el inconveniente de que solo puede estar operativo durante unos 20 días²⁴. Algo parecido sucede con el gadolinio-157²⁵. Es un veneno combustible (se desintegra) que se carga en el núcleo del reactor como aditivo para controlar la reactividad del exceso y prevenir los picos de potencia en algunas regiones del reactor sin tener que aplicar las barras de control. En reactores de agua en ebullición se utiliza habitualmente el trióxido de gadolinio. Los venenos solubles también se aplican en los sistemas de parada de emergencia inyectando disoluciones nitrato de gadolinio directamente en el refrigerante del reactor. Asimismo, el disprosio natural absorbe neutrones fácilmente y es aleado con acero; su óxido combinado de níquel se añade a un cemento especial usado para enfriar las barras de los reactores nucleares. El holmio

²³ UCHIDA, H., HARADA, M.R.: «Application of hydrogen storage alloys», en: «Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies» (P.E. de Miranda, Ed.), Academic Press, Londres, pp. 290-302, 2018.

²⁴ O'BRIEN, J.: «Fundamentals handbook nuclear physics and reactor theory». U.S. Department of Energy, 2015.

²⁵ *Ibidem*.

también se aplica, en ocasiones, como veneno consumible para mantener una reacción nuclear en cadena bajo control. En Rusia, los estudios sobre el desarrollo de un combustible de uranio-erbio para sus reactores del tipo RBMK comenzaron después del accidente de Chernóbil a fin de mejorar su rendimiento y seguridad. Para los isótopos 166 y 167 del erbio se ha validado su destino como absorbentes del combustible nuclear en las centrales de Leningrado, Kursk y Smolensko²⁶, y se ha adoptado²⁷ este combustible primero para reactores RBMK-1500 y luego en RBMK-1000.

Finalmente, hay que incluir al lantano y cerio al ser un apoyo de las tecnologías limpias como convertidores catalíticos en los automóviles²⁸. En la década de 1990 se desarrollaron catalizadores con platino, paladio, rodio y óxido de cerio depositado sobre aluminio y óxido de lantano. Su acción es disminuir la contaminación producida por los gases de post-combustión emitidos por los tubos de escape de los vehículos. Los hidrocarburos no quemados, el monóxido de carbono y los óxidos nitrosos producidos por los motores de explosión diésel son procesados a dióxido de carbono, gas nitrógeno y vapor de agua hacia la atmósfera. Posteriormente se incluyeron nuevos catalizadores conteniendo cerio en los filtros antipartículas; ello facilita la combustión de hollines en el filtro, reduciéndose su expulsión al 1 %. Incluso puede suministrarse el óxido de cerio como catalizador líquido en el combustible. Este aditivo, de reconocida eficacia, acompaña a los gases del escape y reduce la temperatura de combustión del hollín, lo que ayuda a limpiar el turbo y los filtros de partículas.

La bibliografía habla: comunicando lo investigado

Las tierras raras entraron en el conocimiento de la humanidad en la Suecia de 1787 y, en 1947, se comunicó en EE. UU. el descubrimiento de la última de ellas. Durante ese intervalo de años, los científicos informaron a sus colegas de los avances mediante encuentros personales y la publicación de sus estudios en revistas científicas nacionales alemanas, inglesas y francesas, principalmente. Lo aparecido en otros idiomas quedó en el anonimato. Cuando, en 1897, Konstantin von Chrustchhoff anunció

²⁶ BYSTRIKOV, A.A. *et al.*: «Experience in using uranium-erbium fuel in power-generating units with RBMK-1000 reactors», *Atomic Energy*, 100: 165-170, 2006.

²⁷ FEDOSOV, A.M: «RBMK Uranium-Erbium Fuel», *Atomic energy*, 124: 221-226, 2018.

²⁸ PREGO, nota 2, pp. 88-89.

en una revista rusa que había separado dos nuevos elementos, que bautizó como glaucodinio y rusio, la novedad permaneció desconocida fuera de su país. El intercambio de ideas y experiencias ayudó en los avances de la investigación, que fue un duro trabajo de científicos europeos (Suecia, Francia, Austria, Suiza y Alemania; Tabla 1), donde los problemas para la separación e identificación de los elementos de las tierras raras en el siglo XIX los resumió Urbain con una breve sentencia: «era un mar de errores, y la verdad se ahogaba en él»²⁹. Durante el siguiente siglo, el dinamismo editorial fue mucho mayor y las aplicaciones, tanto puramente científicas (geología, astronomía...) como aplicadas (ciencia de los materiales, ingeniería...), vieron la luz en publicaciones de difusión internacional. Resulta muy revelador hacer un seguimiento de los trabajos difundidos por una amplia base de datos bibliográfica.

La plataforma tecnológica «Scopus» ha sido desarrollada por Elsevier, pero es gestionada independientemente por un comité editorial internacional desde 2009; resulta accesible para la red de bibliotecas del CSIC. Los contenidos, 24 500 títulos de publicaciones seriadas de más de 5000 editores en 140 países, se consultaron a través de la web de Scopus³⁰ y son la fuente de información seguida. De entrada, se han seleccionado las publicaciones que atienden a revistas científicas, capítulos de libros y revisiones temáticas en cuyo título o palabras clave aparece «rare earths»; la búsqueda se hizo a nivel internacional y también en España. Se encontraron 86 916 documentos, de los cuales 943 corresponden a España (1,1 %), entre ellos 59 están escritos en nuestro idioma, en buena parte, por autores iberoamericanos. En ambos casos predominan los artículos científicos, 96,8 % y 96,9 %, respectivamente. En la Figura 3 se representan el número de documentos publicados frente al año de aparición hasta la fecha de 2020. El primer documento, un artículo, que aparece recogido, data de 1881 y las publicaciones fueron pocas hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando ya superan anualmente la decena (Figura 3). Por entonces se encontraron nuevos métodos de separación para las tierras raras y hubo una progresiva mejora en su purificación, lo cual permitió estudiar nuevas propiedades, como el efecto láser y las aplicaciones en magnetismo y óptica. En 1962 las publicaciones sobrepasaron la centena, fue el inicio

²⁹ TRÍFONOV, D. N., TRÍFONOV, V. D.: «Cómo fueron descubiertos los elementos químicos». Editorial MIR, Moscú, p. 141, 1984.

³⁰ <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic> Fecha de la consulta 25.01.2021.

de la época dorada (Figura 3). Los elementos de las tierras raras se incorporan de lleno a la vida cotidiana (sin olvidar las contribuciones de Auer) con la comercialización de televisores en color que utilizan al europio.

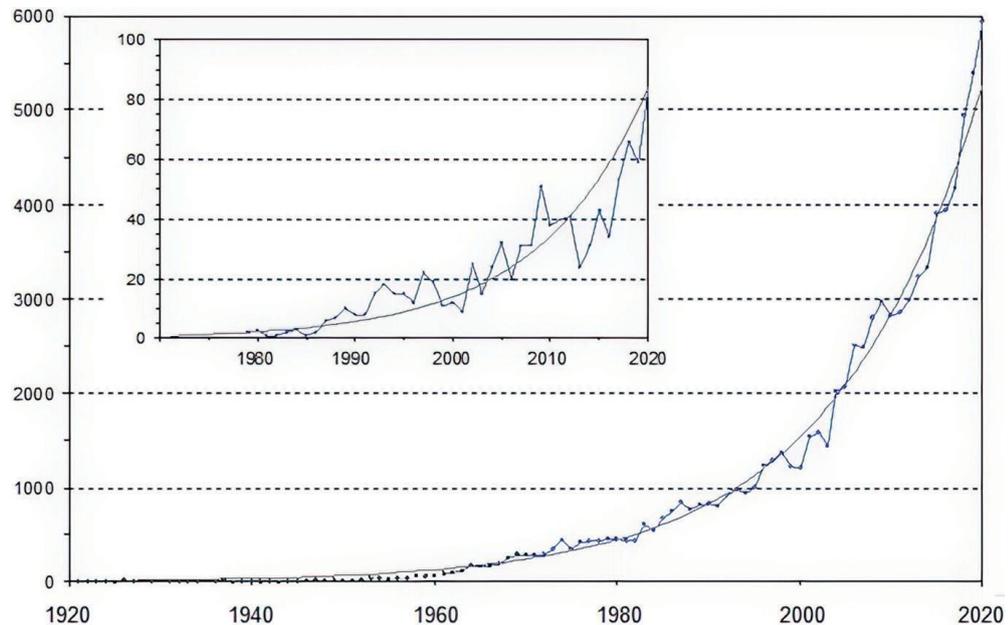


Figura 3. Número de publicaciones científicas aparecidas anualmente a nivel mundial sobre tierras raras en la base bibliográfica Scopus, la cual recoge 86.916 desde el año 1882. Los datos crecen exponencialmente desde 1961 con un ajuste de R^2 igual a 0,983. En la esquina superior izquierda se representa lo mismo para la producción española. Hay 943 publicaciones que se iniciaron en el año 1979 que muestran una tendencia semejante con una R^2 igual a 0,831.

En España (Figura 3) la base de datos inicia su registro en 1979, para sobrepasar anualmente la decena de documentos en 1992; luego sigue una tendencia creciente, si bien con irregularidades, a manera de la caída acontecida entre los años de 2013-2016. En general esa progresión es semejante a la internacional, que mantiene un periodo de expansión marcado por una proliferación exponencial de publicaciones científicas. A ese respecto, David Abraham³¹, estratega en el campo de los recursos naturales del norteamericano Technology, Rare and Electronic Materials Center³², opina que «la investigación es crucial para descubrir los secretos de la ciencia de los materiales... Los gobiernos deberían trabajar más cerca de las instituciones de

³¹ ABRAHAM, D.S.: «The elements of power». Yale University Press, p. 226, 2015.

³² <http://www.tremcenter.org/trem/about-us/mission/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

investigación y la industria tecnológica para comprender mejor las demandas futuras de metales raros». La frase pierde su optimismo para la cultura occidental cuando se revisan los documentos científicos con mayor profundidad reparando en los países, las fuentes de financiación y la filiación de los autores. En este último punto dominan los autores chinos. El mayor número de escritores en temas de las tierras raras pertenece a la Academia China de Ciencias seguido, la mitad en número, por la Academia Rusa de Ciencias. Entrambos países están ocho de las diez afiliaciones más frecuentes: seis son chinas y dos rusas. Solo aparecen un par con diferente origen: el CNRS francés (en tercer lugar) y la universidad japonesa de Tohoku (décimo lugar). En cuanto a las fuentes de financiación para los artículos el dominio sigue siendo chino, seguido por EE. UU. (un tercio del anterior) y Rusia (la novena parte); en menor medida aparecen otros países, Japón y Alemania, con intereses industriales, y Brasil, por su minería. Atendiendo a dónde se hizo la investigación, el ámbito no difiere de los anteriores. Entre los diez mejores destaca China, con diferencia el preponderante (34 %), seguida a distancia por EE. UU. (14 %), Japón (8 %), Alemania (7 %), Rusia, Francia y la India (cada una con un 6 %), Inglaterra (4 %) y rematan Polonia y Canadá (3 % cada una). España ocupa un modesto lugar, como se puede observar de la Figura 3; la investigación, de acuerdo con los documentos publicados, está realizada principalmente por científicos afirman a los diferentes institutos del CSIC, seguidos por las universidades, encabezadas por las madrileñas Autónoma y Complutense. Todos ellos reciben una financiación estatal a través del ministerio relacionado con la investigación y, en menor medida, de la Unión Europea.

Queda muy claro el papel dominante chino, cuyas posibles razones e intereses se comentarán posteriormente. Dicho rol se traduce asimismo en la dirección, por parte de The Chinese Society of Rare Earths, de la única revista científica en inglés que publica trabajos sobre aspectos de la teoría básica y la ciencia aplicada en el campo de las tierras raras: el *Journal of Rare Earths*³³, dependiente de Elsevier. Es la primera del «top-5» de revistas que dan luz a la mayor parte de los artículos científicos sobre las tierras raras seguida de cerca por la revista interdisciplinar europea *Journal of Alloys and Compounds*, no centrada específicamente en las tierras raras. Las dos siguientes

³³ <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-rare-earth/about/editorial-board> Fecha de la consulta 25.01.2021.

siguen su línea, pues están enfocadas hacia las aplicaciones, incluidas las de las tierras raras: el *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* y el *Journal of Luminiscence*, para terminar con otra revista china: *Journal of the Chinese Rare Earth Society*.

Lo más especializado en el campo de las tierras raras se reúne en la serie de libros del *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*³⁴ (Elsevier). Iniciada en 1978 por Karl A. Gschneidner Jr. (1930-2016)³⁵, apodado Mr. Rare Earth, quien trabajó más de 50 años en el *Ames Laboratory* y dirigió 41 volúmenes (hasta su jubilación en 2011), marcando una época de dominio norteamericano sobre ese campo. En 2020 ha aparecido el volumen 58, con lo que ya suman 314 capítulos monotemáticos que cubren variados aspectos de las ciencias de las tierras raras, incluida la química, las ciencias de la vida, la ciencia de los materiales y la física. Toda esta actividad literaria científica es un claro ejemplo, junto con la curva exponencial creciente de publicaciones (Figura 3), de la gran atención que reciben los elementos de las tierras raras; no mermará durante los próximos años. La investigación científica, pura y aplicada, sobre esos elementos ha pasado de Europa a Norteamérica, seguramente como una de las consecuencias negativas de las guerras «civiles» europeas del siglo XX y, aunque la situación de postguerra en China no fue mejor que en Europa, es ahora China quien se hace con su ámbito.

³⁴ <https://www.elsevier.com/books/book-series/handbook-on-the-physics-and-chemistry-of-rare-earths>
Fecha de la consulta 25.01.2021.

³⁵ PECHARSKY, V.: «Karl A. Gschneidner Jr (1930–2016)», *Nature Mater* 15, 1059, 2016.

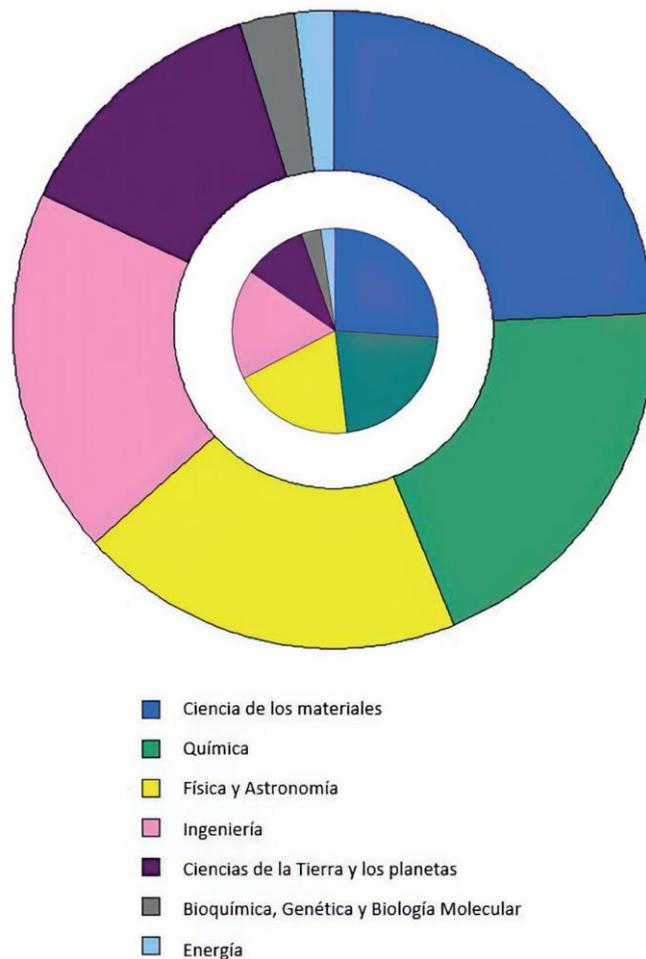


Figura 4. Participación de los diferentes temas de investigación sobre las tierras raras en las publicaciones científicas. El círculo interior atiende solo a España y el anillo exterior a nivel global. La Ingeniería incluye a la Ingeniería Química y las Ciencias de la Tierra a Medioambiente.

Visto el interés global en los elementos de las tierras raras bajo la faceta científica, resulta relevante averiguar en qué cuestiones se centran los escritos. Los temas se han agrupado siguiendo siete tipos de materias (Figura 4). Los porcentajes, tanto a nivel global como español, son semejantes; para España muestran un ligero aumento del 2 % en ciencias de los materiales y química y una disminución (3 %) en las ciencias de la tierra y los planetas. En esta clasificación porcentual, el apartado correspondiente a ciencias de los materiales recibe la mayor atención científica mundial, seguida por la química. La energía es la séptima en interés con un 2,0 % (2,2 % en España) y su pauta global es exponencialmente creciente con un ajuste de 0,92 para R^2 . Si bien tardó hasta 1987 para

superar la veintena de publicaciones anuales, el aumento es vivo desde 2009, cuando sobrepasó el centenar de publicaciones por año; en 2020 ha llegado a 326. En el tema de la energía destaca igualmente China con 902 publicaciones de un total de 3174 documentos. España ocupa el puesto 12 por países.

Fuentes de tierras raras: el pasado condiciona al presente

La disponibilidad actual de 16 elementos de las tierras raras, esto es 14 lantánidos (el prometio no se considera), escandio e itrio, en la corteza superior terrestre (Figura 1) viene condicionada por su origen estelar, la formación de nuestro planeta y las propiedades químicas en el proceso de cristalización de los minerales en la litosfera. Únicamente el escandio se pudo originar por fusión nuclear en el interior de las estrellas (nucleosíntesis estelar³⁶), como es el caso de los elementos químicos hasta el hierro. Los demás surgieron durante la explosión como supernovas de estrellas masivas. Este evento proporciona energía suficiente para que la repulsión eléctrica entre protones sea superada y entre a actuar la fuerza nuclear fuerte que los mantiene unidos en un núcleo atómico. Por adición de neutrones³⁷ se formaron los elementos químicos hasta el uranio, entre ellos, el itrio y los lantánidos. Este diferente proceso hace que sean menos abundantes en nuestro sistema solar, unos siete órdenes de magnitud, esto es, diez millones de veces más exiguos que el hierro (Figura 1). Por el mismo motivo el escandio es unas cien veces más frecuente que los lantánidos (Figura 1). A su vez, la abundancia de los elementos disminuye al crecer su número de protones (Z), de modo que el orden de abundancia esperable sería decreciente desde el escandio (Z=21) hasta el lutecio (71). De esta manera, entre los lantánidos, los más profusos son el cerio (58) y el neodimio (60), y el que menos es el lutecio (71).

El lantano (57) debería ser más abundante que el cerio (58), pero no acaece así. Igualmente debería suceder con los demás lantánidos, sin embargo, su ocurrencia acontece en dientes de sierra, ya que los de número atómico (protones) par son más cuantiosos que sus vecinos de número impar (Figura 1). Un efecto nuclear proporciona

³⁶ LANGMUIR, C.H., BROECKER, W.: «How to build a habitable planet». Princeton University Press, Princeton, pp. 51-82, 2012.

³⁷ Ibídem.

una mayor estabilidad a aquellos núcleos atómicos con números pares de protones o neutrones (regla de Oddo-Harkins)³⁸. En ese sentido, se entiende que los impares escandio (21) e itrio (39) sean menos comunes en el universo que sus vecinos pares (Figura 1): cinco órdenes de magnitud que el calcio (20) o un orden de magnitud que el estroncio (38). Esta diferencia hace más escasos a algunas de las tierras raras en la naturaleza, sobre todo a lantánidos como el tulio o lutecio, afectando los procesos de extracción de los minerales y su coste comercial.

Una misma nube de materia configuró el Sol, la Tierra y los demás planetas que adquirieron diferentes composiciones durante la formación y evolución del sistema solar. En la formación de la Tierra los elementos se distribuyeron, según la clasificación cosmoquímica ideada por Goldschmidt³⁹, en litófilos, siderófilos calcófilos y atmósfilos. Los elementos de las tierras raras son todos litófilos, esto es, afines a los silicatos. La semejanza química entre ellos proviene de su estructura electrónica. Por ese motivo, en sus minerales siempre se presentan juntos, en mayor o menor proporción. En la naturaleza sus átomos no aparecen como metales sin carga eléctrica, sino como iones positivos que han perdido tres electrones. El progresivo aumento de protones hace que la fuerza de atracción eléctrica aumente desde el lantano (57 protones) hasta el lutecio (71 protones) y el tamaño del catión trivalente (considerado como una esfera) disminuye de 1,02 diez mil millonésimas de metro (Å) a 0,86 Å. Este hecho marca una pequeña, pero fundamental, diferencia que determina cuáles de ellos se incorporarán antes en los cristales que se forman al enfriarse un líquido, sea agua o magma. En los magmas, los elementos⁴⁰ del lantano al samario tienen una fuerte tendencia a permanecer en la fase fundida donde se van acumulando; por el contrario, en soluciones hidrotermales ocurre del gadolinio al lutecio, y además el itrio, pues su radio iónico (0,90 Å) es semejante al holmio. Cuando uno de los procesos es dominante se suele tener un depósito explotable. La mayor parte de la corteza terrestre se formó a partir del manto (situado a una media de 33 kilómetros por debajo de los continentes) hace unos 2500-2000 millones de años. En aquel momento, las rocas fundidas acumularon tierras raras ligeras que las llevaron consigo en la diferenciación de la corteza terrestre,

³⁸ ODDO, G.: «Die Molekularstruktur der Radioaktiven Atome», Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie, 87: 253-268, 1914.

³⁹ GOLDSCHMIDT, V.M.: «Geochemistry», Oxford University Press, Londres, 742 pp., 1954.

⁴⁰ Este es otro agrupamiento que suele aparecer para las tierras raras ligeras y pesadas.

empobreciendo al manto en ellas⁴¹. Si los magmas al ascender transportan dióxido de carbono, los carbonatos se asocian fuertemente con las tierras raras ligeras, dando lugar a depósitos rentables para su explotación. Son sus principales yacimientos. Por otra parte, los yacimientos secundarios tienen un origen hidrotermal formando mineralizaciones en filón. En la corteza superior terrestre la meteorización es otro poderoso mecanismo para concentrar las tierras raras. Así se formaron las arcillas lateríticas, tras una intensa meteorización química de granitos, configurando importantes depósitos de tierras raras pesadas con escaso coste de explotación en las zonas subtropicales de China, Madagascar y Laos. Resultado de todos los procesos mencionados se han descubierto⁴² más de 270 minerales, a los que se suele añadir alguno nuevo cada año, que contienen algún elemento de las tierras raras como componente esencial de su fórmula química. Empero, solo once minerales son, en mayor o menor medida, explotables⁴³: fluorocarbonatos (bastnasita, parisita, sinchisita), fosfatos (monacita, xenotima, churchita), silicatos (allanita, eudialita, laterita) y óxidos (loparita, fergusonita). Los yacimientos comunes son de monacita, basnasita y loparita para las tierras raras ligeras (un 95 % del total extraído⁴⁴) y xenotima y arcillas lateríticas para las pesadas.

Las reservas de tierras raras en nuestro planeta se han considerado suficientes para unos 900 años, en el caso de que su demanda se mantenga a los niveles de 2017⁴⁵. La tendencia es de un incremento anual del 10 %, por lo que dichas reservas podrían agotarse a mediados del siglo XXI. Otros autores hacen previsiones más optimistas⁴⁶. No consideran que vaya a producirse una carestía en el presente siglo, aunque sobrevendría un aumento de los precios por los costes de extracción. Los recientes yacimientos descubiertos contradicen esa previsión.

La minería espacial ha iniciado su caminar apoyada en el conocimiento cosmoquímico alcanzado sobre los elementos químicos y sus minerales, tal es el caso de las tierras

⁴¹ CHAKHMOURADIAN, A.R., WALL, F.: «Rare Earth Elements: minerals, mines, magnets (and more)», *Elements*, 8: 333-340, 2012.

⁴² *Ibidem*.

⁴³ *Ibidem*.

⁴⁴ GSCHNEIDNER, K.A.Jr., PECHARSKY, V.K.: «Rare-earth element», *Enciclopedia Britannica*, 2019.

⁴⁵ *Ibidem*.

⁴⁶ HENCKENS, M.L.C.M. *et al.*: «Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations». *Resources Policy*, 49: 102–111, 2016.

raras. La minería de asteroides queda cubierta dentro de tratados internacionales sobre leyes espaciales⁴⁷: el Outer Space Treaty (1967), suscrito por 110 países en 2020. A mayores existen actos legislativos específicos: en Norteamérica se promulgó en 2015 una ley para la competitividad de los lanzamientos espaciales comerciales (The Space Act, firmada por Barack Obama) que otorga a sus ciudadanos derechos de propiedad sobre los recursos espaciales; al año siguiente fue seguida por la iniciativa de la UE para la minería de asteroides. Sondas espaciales de EE. UU. y Japón (misiones Hayabusa) han viajado, o siguen haciéndolo (OSIRIS-Rex de la NASA), para recoger muestras de los asteroides, considerados ya como una fuente de recursos estratégicos. La carrera espacial minera incorpora iniciativas privadas. La compañía (año 2012) Planetary Resources pretende desarrollar una industria robótica para la minería de asteroides; la británica Asteroid Mining Corporation (2016) prepara satélites para la exploración de asteroides. Captan millones de dólares en inversiones privadas, a pesar de estar lejos de su objetivo, para situarse en primera línea de un potencial negocio espacial.

El deseo de los grupos, públicos y privados deviene a la Luna en el «octavo continente» de la Tierra⁴⁸. Durante su formación, la menor gravedad dejó un mar de magma atrapado entre manto y corteza; al solidificarse lentamente, algunos elementos migraron hacia la corteza formando depósitos con grandes contenidos en potasio (K), elementos de las tierras raras (REE) y fósforo (P). Son abundantes (llamados KREEP) en el mayor de los mares lunares, el Oceanus Procellarum. Es una oscura y llana extensión de 1 692 000 kilómetros cuadrados, en la cara visible de la Luna, donde aterrizaron varias naves y sondas de las misiones norteamericanas Surveyor y Apollo, soviéticas Luna y el rover-robot chino Cháng'é Yutu en 2013. Con motivo de este éxito, Ouyang Ziyuan, miembro de la Academia China de Ciencia, declaró⁴⁹:

«[La Luna] está llena de recursos, principalmente minerales raros, titanio y uranio, que son muy escasos en la Tierra, y estos recursos podrían ser usados sin

⁴⁷ ROSENDAHL, M.: «Galactic Preservation and Beyond: A Framework for Protecting Cultural, Natural, and Scientific Heritage in Space», William & Mary Environmental Law and Policy Review, 43 (3): article 5, 2019.

⁴⁸ KLINGER, J.M.: «Rare Earth Frontiers: From Terrestrial Subsoils to Lunar Landscapes». Cornell University Press, Ithaca, p. 230, 2018.

⁴⁹ RINCON, P.: «¿Qué busca China en el lado oculto de la Luna?» BBC News, 2018. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46490139> Fecha de la consulta 25.01.2021.

limitaciones». La exploración lunar china camina a través de las misiones Chang'e. Las dos primeras para recolectar información en órbita, las dos siguientes para realizar operaciones sobre la superficie del satélite y las dos próximas para traer muestras. La quinta ha retornado a la Tierra el 16 de diciembre de 2020 con unos dos kilogramos de muestras de suelo y rocas lunares. La Agencia Espacial Europea ha firmado un acuerdo tecnológico de colaboración mutua con la Administración Nacional China del Espacio. Por el contrario, el 112º Congreso de los Estados Unidos prohibió a la NASA participar en acuerdos bilaterales y de coordinación con China⁵⁰. En la amplia y prolija revisión que hace la geógrafa Julie Klinger, profesora adjunta de Relaciones Internacionales en la Universidad de Boston, sobre ese tema en el capítulo *Extraglobal extraction* de su libro, pone un poco de sentido común al concluir⁵¹ que «seguramente podemos hacerlo mejor: tanto en la búsqueda de razones para explorar el cosmos como en nuestra producción y consumo diario de elementos de tierras raras» ya que «la carrera por extraer tierras raras en la Luna tiene menos que ver con la escasez real de recursos y mucho más con la forma en que la minería de tierras raras en estos lugares [Amazonas brasileño, Afganistán o Groenlandia] podría servir a pujas frustradas por territorio, poder y control».

Épocas en la explotación de tierras raras

De regreso en la Tierra, previamente a 1890 no había un mercado comercial para las tierras raras. La mina sueca de Bästnas lo suministraba a los laboratorios científicos. Los inventos de Auer que iluminaron al mundo iniciaron la industria y ampliaron la explotación minera de las tierras raras a Brasil e India. Luego, durante el proyecto Manhattan el estudio de la química de los elementos de las tierras raras, especialmente los lantánidos por su similitud con los actínidos (uranio, neptunio, plutonio...), disfrutó de un gran avance. No obstante, hasta finales de los años cincuenta del pasado siglo, la

⁵⁰ Sec. 1340. (a) None of the funds made available by this division may be used for the National Aeronautics and Space Administration or the Office of Science and Technology Policy to develop, design, plan, promulgate, implement, or execute a bilateral policy, program, order, or contract of any kind to participate, collaborate, or coordinate bilaterally in any way with China or any Chinese-owned company unless such activities are specifically authorized by a law enacted after the date of enactment of this division. Department of Defense and Full-year Continuing Appropriations Act, 2011. United States Congress. <https://www.congress.gov/112/plaws/publ10/PLAW-112publ10.htm>

⁵¹ KLINGER, nota 48, pp. 199-228.

demanda comercial de tierras raras era poca, no superaba dos mil toneladas anuales, y se atendía desde minas en los dos citados países. El conocimiento de las propiedades, especialmente las ópticas y magnéticas, de los elementos de las tierras raras abrió el camino a las aplicaciones industriales, que en la década siguiente disparó la búsqueda y explotación de nuevos depósitos en Sudáfrica, la URSS y EE. UU. Ulteriormente, recibió un nuevo impulso en los ochenta con la aplicación en imanes de tierras raras, que ahora, por ejemplo, su consumo alcanza las 60 000 toneladas anuales.

Dominio norteamericano: mina de Mountain Pass

El aprovechamiento industrial de las tierras raras considera la mina norteamericana de Mountain Pass (California) para señalar una época relevante, que abarca desde 1965 hasta 1984. Durante esos veinte años se mantuvo como la fuente más importante de tierras raras en todo el mundo. Fue descubierta en 1949 durante una prospección que detectó una veta radiactiva y se comenzó a explotar uranio en 1952. El depósito era rico en carbonato de bario, que contenía un 8-15 % de bastnasita asociada con minerales que incluían torio. El torio es un elemento litófilo que se presenta en la naturaleza como catión tetravalente, con un radio iónico similar al de los lantánidos, por lo que suele ser un acompañante indeseable en los minerales de tierras raras. La compañía Molycorp Inc. operó esta mina a cielo abierto para cubrir la demanda de europio surgida por la comercialización de la televisión en color. La historia de Mountain Pass ejemplariza el devenir de la minería de las tierras raras y el colapso de la minería norteamericana. Entre 1984 y 1998 hubo una serie de derrames en la canalización de aguas residuales que vertieron desechos radiactivos. Al parecer, el presidente norteamericano Nixon se acercó a los ejecutivos mineros con una propuesta para subcontratar algunos de los procesos a China, con el fin de reducir la responsabilidad ambiental en California y ahorrar costes⁵². Se clausuró la planta de refinado y solo produjo concentrado de bastnasita que se exportaba para su tratamiento. Las estrictas normativas ambientales y los precios en el mercado, que no hacían rentable la explotación, llevaron a su cierre en 2002. En 2007 hubo un intento de reflotado con el apoyo de Wall Street y el Pentágono; la exportación de concentrados regresó. En 2011, Molycorp compró la compañía estonia

⁵² KLINGER, nota 48, p. 112.

Silmet⁵³ para procesar metales raros y firmó un acuerdo para el suministro de tierras raras con las empresas japonesas Sumitomo y Mitsubishi, y con el fabricante de catalizadores W. R. Grace & Co. La caída de precios quebró el proyecto en 2014, una vez que gran parte de los activos más rentables pasaran a Neo Materials, vinculada a China⁵⁴. ¡La dependencia norteamericana de tierras raras quedaba bajo control chino! Mountain Pass dirigió su concentrado de tierras raras a China para su procesado. En este contexto, el presidente de Green & Co., compañía de éxito reconocido en 2020 en la Hill's Top Lobbyist list que ayuda a las empresas a navegar por las complejidades del gobierno de EE. UU., afirma que «el departamento de Defensa ha tomado nota, habiendo solicitado recientemente a la industria opciones sobre la capacidad de separación de tierras raras, lo que podría resultar en una inversión directa. Estas correcciones, ejecutadas correctamente, representan la mejor oportunidad que tiene Estados Unidos de revitalizar una industria paralizada, esencial para nuestra seguridad nacional»⁵⁵. En 2019 EE. UU. produjo 26 000 toneladas de tierras raras (segundo productor mundial; Tabla 5) procedentes únicamente de Mountain Pass, adquirida por MP Mine Operation (10 % capital chino), la cual había reanudado los trabajos mineros y el refinado el año anterior. Ahora se está abriendo una nueva mina rica en tierras raras pesadas, localizada en Round Top Mountain (Texas), junto con una planta piloto en Wheat Ridge (Colorado) para el procesado completo de los elementos de tierras raras; verificado su éxito, se trasladará a Texas para un procesado comercial. En Norteamérica, el proyecto es considerado de importancia estratégica para la seguridad nacional en sectores clave, incluidos defensa y energía, a fin de fabricar tecnología avanzada⁵⁶. A ese respecto, el 30 de septiembre de 2020, la administración Trump firmó una orden ejecutiva que declaró una emergencia nacional

⁵³ Hasta 1989 suministró materiales nucleares a la URSS; desde 1970 procesó loparita de la península de Kola, extrayendo las tierras raras. Actualmente *NPM Silmet AS* refina elementos de las tierras raras para producir aleaciones de neodimio hierro-boro, lingotes de neodimio y *mischmetal*.

⁵⁴ GREEN, J.A.: «The collapse of American rare earth mining – and lessons learned», Reagan Defense Forum, 2019. <https://www.defensenews.com/opinion/commentary/2019/11/12/the-collapse-of-american-rare-earth-mining-and-lessons-learned/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁵⁵ *Ibídem*.

⁵⁶ NS Energy, 2020. <https://www.nsenerybusiness.com/projects/round-top-rare-earth-critical-minerals/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

en la industria minera; una medida diseñada para impulsar la producción de minerales de tierras raras⁵⁷.

La República Popular China se incorpora al mundo de las tierras raras

Después de unos años de interregno (1984-1991), durante el cual coexistieron diversas fuentes mineras de tierras raras, comenzó el periodo de dominio chino. Los prolegómenos afloraron cuando el líder chino Deng Xiaoping (1904-1997) cortó con el modelo agrícola de Mao (1893-1976) y declaró que «la fuerza de la producción radicarán en las ciencias» (Tabla 4).

1976	El líder chino Deng Xiaoping (1904-1997) corta con el modelo agrícola de Mao (1893-1976) y declara que «la fuerza de la producción radicarán en las ciencias».
1978-89	Aumenta un 40 % la producción anual de tierras raras. Se inician programas innovadores en ciencia y tecnología.
1986	Deng Xiaoping afirma que «Oriente Medio tiene petróleo, China tiene tierras raras» Aprueba el Programa 863 (mezcla de proyectos militares y civiles) centrado en biotecnología, tecnología espacial, tecnología de la información, tecnología láser, automatización, tecnología energética y nuevos materiales.
1990s	Inicio de las exportaciones de óxidos y metales ya extraídos de los minerales de tierras raras, causando una caída mundial de los precios. El presidente Jiang Zemin (ingeniero eléctrico) anunció que había que «mejorar el desarrollo y aplicación de las tierras raras, y cambiar la ventaja de recursos hacia una superioridad económica».
2000s	El presidente Hu Jintao (ingeniero hidráulico) declaró que la «ciencia y tecnología eran la columna vertebral de la estrategia del desarrollo chino». Crece a expensas del dinamismo industrial occidental y capta empresas con su riqueza. Restricción (tasas altas) sistemática a la exportaciones de tierras raras.

⁵⁷ International Banker, «Rare-earth elements: will China constitute its market dominante?», 2020. <https://internationalbanker.com/brokerage/rare-earth-elements-will-china-continue-its-market-dominance/#:~:text=%E2%80%9CThe%20Middle%20East%20has%20its,China%2C%20remarked%20back%20in%201992> Fecha de la consulta 25.01.2021.

2010s	El XII Plan Quinquenal (2011-15) apuesta por el auge científico y la creatividad. Absorbe empleos occidentales. Elabora productos terminados, como motores eléctricos, computadoras, baterías, pantallas, teléfonos y dispositivos de música portátiles.
2013	El presidente Xi Jinping (ingeniero químico) considera una concepción científica para el desarrollo del socialismo chino y una política de seguridad para los abastecimientos de minerales (por ejemplo, desde África).
2016-20	Plan Quinquenal basado en la innovación y el progreso tecnológico. Admite la absorción de las patentes de empresas conjuntas en suelo chino.
2025	En 2013 Gan Yong, presidente de la «Sociedad China de Tierras Raras», puso en palabras la política china a largo plazo: «El valor real de las tierras raras se consigue en el producto final». Plan chino para convertirse en líder mundial, con la creación de 40 centros de innovación industrial para ser proveedor de conocimientos mediante el descubriendo de nuevas propiedades de los elementos de las tierras raras, registrando patentes y explotando aplicaciones futuras. Llegar a ser la vencedora de la transición energética y digital. Ídem militar.

Tabla 4. Pasos seguidos por China en relación con las tierras raras.

Este gran deseo de lograr la independencia tecnológica del extranjero se cruza con la figura del químico Xu Guangxian (1920-2015)⁵⁸, el padre científico del desarrollo chino en tierras raras; su labor fue clave para el progreso de la industria de las tierras raras en China y la formación de expertos científicos en esos metales. De nuevo en la historia de las tierras raras aparece una conexión con Norteamérica y con la fisión (y armamento) nuclear. Xu viajó a USA (1948) donde obtuvo el doctorado en Química Física por la Universidad de Columbia. En 1951 regresó a la recién nacida República Popular China para incorporarse a la Universidad de Pekín. Cinco años después dirigió el departamento de Química de la Radiación, que participaba en el programa chino de armas nucleares, atendiendo a la separación y extracción de uranio para combustibles nucleares. Durante la Revolución Cultural fue acusado de espionaje y condenado a un campo de trabajo (1969-1972). Tras el fallecimiento de Mao y el advenimiento de Xiaoping, Xu recuperó su puesto en la universidad, la cual le pidió que se centrara en las

⁵⁸ GAO, S.: «Rare earth chemistry in memory of Professor Xu Guangxian on the centenary of his birth», Inorganic Chemistry Frontiers, DOI: 10.1039/d0qi90084b, 2020.

tierras raras. Entonces realizó investigaciones teóricas, experimentales e industriales sobre la separación de estos metales, culminando un proceso de extracción a contracorriente, que redujo sustancialmente el tiempo necesario para extraerlos y su coste. En 1986 Xu fundó el Research Center of Rare Earth Chemistry y, tres años después, fue el personaje clave en la creación del State Key Laboratory of Rare Earth Materials Chemistry and Applications. Hasta su fallecimiento, Xu fue un científico internacionalmente reconocido en el área de las tierras raras.

Dominio chino: mina de Baiyun-ebo

La historia de la explotación en el distrito minero de *Baiyun-ebo* ejemplifica como antes hacía Mountain Pass, el devenir de la minería de las tierras raras desde entonces. Esta mina a cielo abierto se extiende a lo largo de 48 kilómetros cuadrados en la región autónoma china de Mongolia Interior, a unos 150 kilómetros al norte de la ciudad de Baotou, cuya economía se basa en la industria del hierro y acero. A Baotou se transporta el mineral de tierras raras para su procesado. El depósito de hierro fue descubierto en 1927 y las tierras raras en 1935. Se extraen minerales desde 1957. Entre ellos el suministro para la planta de producción de combustible nuclear 202 en Baotou, clave en la fabricación de la primera bomba atómica china detonada en 1964. Baiyun-ebo cuenta con unas reservas de 1500 millones de toneladas de hierro (carbonatos y óxidos) y 1 millón de niobio (óxidos); también contiene 48 millones de toneladas de tierras raras (monacita y bastnasita), esto es, predominan las ligeras, en una serie de vetas y diques originados por reemplazamiento hidrotermal de dolomita. Es la mayor mina de tierras raras del planeta, tanto por producción como por reservas, lo que permite al China Northern Rare Earth Group High-Tech Co Ltd, propietario y operador de las instalaciones de procesamiento en Baotou, ser el mayor suministrador mundial de tierras raras. Aparte de Baiyun-ebo, que concentra un 83 % de los depósitos chinos, están las minas de Daluxiang y Maoniuping (las segundas en tierras raras ligeras de China) en la provincia de Sichuan⁵⁹; su depósito es similar al de Mountain Pass en muchos aspectos, como su contenido en bastnasita y bario. Existen otras

⁵⁹ WANG, D. *et al.*: «A Special Orogenic-type Rare Earth Element Deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and Geochemistry», *Resource Geology*, 51: 177-188, 2001.

minas al sureste del país⁶⁰, en las provincias de Jiangxi (descubiertas en 1969), Hunan, Fujian y Guangdong y en la región autónoma de Guangxi Zhuang. Los depósitos surgieron tras la meteorización de granitos y concentración por adsorción de iones sobre arcillas, siendo de fácil explotación. Las reservas se estiman en un millón de toneladas de tierras raras, que son muy importantes por su rico contenido en las pesadas; suponen el 80 % del mundial.

La pródiga aparición de tierras raras en China no pasó desapercibida para sus gobernantes. El antiguo presidente Deng Xiaoping pronunció en 1992 su famosa frase: «hay petróleo en Oriente Medio, pero hay tierras raras en China»⁶¹. Nueve años después, el presidente Jiang Zemin proseguiría esa línea: «Mejorar el desarrollo y la aplicación de tierras raras y convertir la ventaja de los recursos en una superioridad económica»⁶². El desarrollo iniciado por Xiaoping en 1976 es seguido por los presidentes posteriores, como se recoge en la Tabla 4. Las tierras raras explotadas en China son uno de los medios para hacer valer internacionalmente su influencia geopolítica. Perfilan como objetivo para 2025 convertirse en la primera potencia mundial en la investigación y desarrollo tecnológico para la industria de las tierras raras. Hacia ese camino avanzan con una estrategia a largo plazo. Las desregulaciones durante la era del presidente norteamericano Ronald Reagan y la primera ministra inglesa Margaret Thatcher, aunque se tratan normalmente por separado de las reformas de Xiaoping, fueron fundamentales en la reorganización económica global y el nacimiento del monopolio chino de tierras raras⁶³. En la década de 1990, gracias a la mina de Baiyun-ebo, la oferta china fue la más barata gracias a que las tierras raras son un subproducto de la extracción de hierro, la mano de obra tiene un bajo coste y las leyes ambientales son permisivas. China hundió los precios y logró expulsar del mercado de las tierras raras a sus competidores y conseguir una posición dominante cercana al monopolio.

⁶⁰ VONCKEN, J.H.L.: «The rare Earth elements, An introduction». SpringerNature, Basilea, pp. 43-45, 2016.

⁶¹ «There is oil in the Middle East; there is rare earth in China». <https://quotes.thefamouspeople.com/deng-xiaoping-4263.php> Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁶² HURST, C.: «China's rare Earth elements industry: what can the west learn?» Institute for the Analysis of Global Security (IAGS), 2010.

⁶³ KLINGER, nota 48, p. 104.

Crisis y situación actual

China había alcanzado una situación preeminente de dominio sobre el mercado de las tierras raras, hija de sus depósitos minerales y su política de precios. Con la llegada del presente siglo, no solo produce tierras raras ya separadas en las plantas que había construido en su territorio para el procesado de los minerales, sino que también apuesta por la elaboración de productos finales (imanes, motores eléctricos, ordenadores, baterías, teléfonos...), esto es, productos de alto valor económico⁶⁴, dentro su territorio. A fin de desarrollar su industria ofreció unas condiciones muy favorables a empresas y capital foráneo. Atraídas por precios domésticos bajos y abundancia de suministro, fueron instaladas en una zona franca de Baotou con 120 kilómetros cuadrados para las industrias extranjeras; esa ciudad pasó de ser la capital china de la industria de tierras raras a la capital internacional. Mientras que la mina de Baiyun-ebo está en pleno desierto, la ciudad se encuentra a las orillas del río Amarillo, que suministra el agua necesaria para el procesado de menas e industrial de los productos elaborados. En Baotou está el Baogang Steel and Rare Earth, un complejo industrial del tamaño de una ciudad. En 2014 cinco empresas⁶⁵ procesaban anualmente 73 500 toneladas de tierras raras. Este crecimiento, a expensas del dinamismo industrial occidental, ha causado un vacío en la minería, industria e investigación sobre tierras raras en otros países. La globalización y la reducción de costes habían hecho rentable una deslocalización de las empresas. A ese respecto –reconoce con pesar Abraham–, que en la época de Mountain Pass había unos veinticinco mil expertos relacionados con el tema de las tierras raras, ahora solo existen mil quinientos en Norteamérica, «al no haber ni minería ni industrias de transformación, los investigadores ya no están»⁶⁶. Pitron es más pesimista, si cabe, confiesa que «la cultura minera francesa se muere»⁶⁷.

En el año 2007 China comenzó a limitar las exportaciones de tierras raras; es el mayor exportador de ellas y, además, su mayor consumidor; quería (y quiere) retenerlos para

⁶⁴ GESCHNEIDER, K.A.: «The rare earth crisis – the supply/demand situation for 2011-2015». *Mater Matters*, 6: 32-41, 2011.

⁶⁵ *Baotou Feida Rare Earth Co., Baotou Jinmeng Rare Earth Co., Baotou Hongtianyuan Rare Earth Magnets Co., Wuyuan Runze Rare Earth Co. y Xinyuan Rare Earth Hi-Tech & New Material Co.*

⁶⁶ ABRAHAM, nota 31, p.195.

⁶⁷ PITRON, G.: «La guerra de los metales raros». Ediciones Península, Barcelona, p. 209.

su mercado interior. En 1998 implementó un sistema de licencias y cuotas de exportación para productos de tierras raras al poner una cuota de exportación de 65 600 toneladas por año en 2005. Al siguiente impuso un arancel de exportación del 10 % sobre metales y óxidos de tierras raras. En 2009, la cuota de exportación descendió a 50 145 toneladas y un año después el control fue más exigente: el arancel de ventas para otros países subió al 15 % (neodimio 25 %) y solo reconoció a 32 exportadores cualificados para las tierras raras⁶⁸. Estando la situación comercial tensa, un incidente en el mar de China vino a agravarla. El precio de los elementos de las tierras raras se desbocó en el mercado mundial. Fue la crisis de 2009-2013⁶⁹.

Existe un grupo de ocho pequeñas islas en el mar de China Oriental conocidas por Senkaku en Japón, Diaoyu en China y Diaoyutai en Taiwán, que Japón las incorporó a su territorio en 1895. Luego de la publicación de un informe de Naciones Unidas en 1968, donde reflejaba la existencia de importantes recursos energéticos en aguas del archipiélago, los gobiernos de China y Taiwán reclamaron su posesión. Es desde entonces motivo continuo de incidentes causados por activistas nacionalistas de los tres países. El 7 de septiembre de 2010 hubo un roce más⁷⁰; esta vez, un pesquero chino abordó un guardacostas japonés, lo que derivó en un grave incidente diplomático cuando el barco fue detenido y llevado a Japón. Allí liberaron la tripulación, salvo al capitán, para su juicio. Sin haber decretado oficialmente China un embargo, las protestas populares antijaponesas impidieron, a partir del 22 de septiembre, el envío de tierras raras a Japón. ¡Las tierras raras entraron directamente en la geopolítica! Fueron las protagonistas del primer embargo de la transición energética y digital. Japón importa de China el 90 % de los metales que necesita para sus productos de alta tecnología. El incidente diplomático se saldó con una rápida liberación sin cargos del capitán del arrastrero Minjinyu 5179. A pesar de ello, el «embargo» se mantuvo con Japón hasta mediados de noviembre y se extendió a EE. UU. y la UE. La situación se resolvió, pero causó gran alarma entre los consumidores de dichos metales y sus respectivas naciones. Ese mismo año, el gobierno de la UE publicó un informe referente a las

⁶⁸ CHEN, Y., ZHENG, B.: «What Happens after the Rare Earth Crisis: A Systematic Literature Review». *Sustainability*, 11, 1288, 2019.

⁶⁹ VONCKEN, nota 60, pp. 112-113.

⁷⁰ REINHARD, D.: «The Senkaku/Diaoyu Islands territorial dispute between Japan and China», *UNISCI Discussion Papers*, 32: 1696-2206, 2013.

materias primas claves para la industria de alta tecnología europea por inseguridad en el suministro. Entre las catorce señaladas, las tierras raras suponían el mayor riesgo⁷¹. En Norteamérica hubo un informe semejante⁷² del departamento de Energía que analizaba el papel de los metales de las tierras raras en la economía de las energías limpias. Estados Unidos reconoció su vulnerabilidad hacia siete elementos para sus equipos militares: disprosio, erbio, europio, gadolinio, itrio, neodimio y praseodimio.

En 2011, la crisis de las tierras raras llegó a su punto culminante cuando los precios que se habían mantenido estancados hasta 2009 aumentaron desproporcionadamente. Los importes, que habían subido una media del 3,7 % anual⁷³ entre 1990 y 2009, de repente se dispararon⁷⁴. El cerio pasó de 4,5 USD/ kg en 2009 a 158 USD/kg en 2011, el neodimio de 14 a 318 USD/kg, el disprosio de 100 a 2510 USD/kg, el europio de 450 a 5870 USD/kg y el terbio de 350 a 4410 USD/kg. Al año siguiente, en 2012, los precios cayeron un 23-76 % y siguieron decreciendo hasta valores que duplicaron o triplicaron los de precrisis, aunque el europio y el terbio se mantuvieron en 2016 sobre 1600 USD/kg. Los precios para las tierras raras, a diferencia de otros metales, no son accesibles, puesto que no existe un intercambio público ampliamente utilizado, son particularmente susceptibles a los movimientos en el mercado chino y muchas transacciones se hacen directamente entre comprador y vendedor, quienes acuerdan los importes. A mayores, elementos de las tierras raras pesadas como disprosio y terbio tienen unos precios al contado que oscilan en línea con la apertura y el cierre de la frontera China con Birmania, ya que la oferta de estos elementos de baja producción se reduce rápidamente. A fecha de junio de 2020 el precio del europio era de 285 USD/ kg y el del terbio de 831 USD/kg. Hay empresas especializadas que, bajo pago, ofrecen sus evaluaciones periódicas de este mercado.

En 2009 EE. UU., la UE y Japón presentaron quejas contra China ante la Organización Mundial de Comercio (OMC; WTO en inglés) por restringir las exportaciones de tierras raras. China formaba parte desde 2001 de ese organismo

⁷¹ Comisión Europea, «Presentación de una lista de 14 materias primas minerales fundamentales», MEMO/10/263, 2010.

⁷² U.S. Department of Energy, «Critical materials strategy», December 2010.

⁷³ ECORYS, «Mapping resource prices: the past and the future», Final report, European Commission - DG Environment (ENV.G.1/FRA/20410/0044), 2012.

⁷⁴ CHARALAMPIDES, G. *et al.*: «Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe». *Procedia Economics and Finance*, 24: 126-135, 2015.

supranacional que impone un conjunto de reglas comerciales para sus países miembros. En plena crisis, volvieron a solicitar la resolución de las quejas presentadas hacía tres años. En 2014 la OMC falló⁷⁵ en contra de las cuotas de exportación chinas sobre las tierras raras. Después del fracaso, China canceló en 2015 la cuota de exportación y el arancel de exportación, y comenzó a hacer cumplir la licencia de exportación de tierras raras. No cesa en la meta de utilizar sus propios recursos, y emplear a sus ciudadanos en la obtención de tierras raras y la fabricación de dispositivos de alta tecnología. A día de hoy, la guerra comercial entre EE. UU.-China añade una complicación más al sector de las tierras raras.

La principal consecuencia de la crisis fue que los países mayores consumidores de tierras raras admitieron su completa dependencia de China y, como respuesta ante una potencial escasez, empezaron a diversificar sus fuentes siguiendo tres diferentes rutas dando apoyo a empresas: se inició la explotación de nuevas minas, se reabrieron minas abandonadas y se emprendió la búsqueda de nuevas reservas por todo el planeta. La producción se halla ahora más repartida. China, mediante la extracción de 130 000 toneladas al año (sin considerar la minería ilegal; en 2011 se estimaba en un 20 % de la oficial) y la política de precios, llegó a controlar el 97 % de la producción mundial en 2010 (Tabla 5). En 2019 decreció al 62 % con la aparición de once países en un mercado minero en expansión (Tabla 5).

Reservas	Nación	2019 (%)	2015	2010	2005	2000	1995
44000000	China	132.000	105.000	130.000	98.000	70.000	30.000
14000000	USA	26.000	4.100			5.000	28.700
¿?	Birmania	22.000					
3300000	Australia	21.000	10.000				3.000
6900000	India	3.000	1.700	2.700	2.700	2.700	2.500
12000000	Rusia	2.700	2.500			2.000	6.000
¿?	Madagascar	2.000					

⁷⁵ WTO, «China-Measures related to the exportation of rare earths, tungsten, and molybdenum», WT/DS431/AB/R • WT/DS432/AB/R • WT/DS433/AB/R, 2014. WTO Appellate Body rules against Chinese restrictions on access to rare earths and other raw materials. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_14_912 Fecha de la consulta 25.01.2021.

1100	Tailandia	1.800	760		2.200		150
22000000	Brasil	1.000	880	550		1.400	400
22000000	Vietnam	900	200				
50000	Burundi	600					
124251100	TOTAL	213.000	125.140	133.250	102.900	81.100	70.750

Tabla 5. Relación de las once mayores naciones productoras de tierras raras y sus minas en 2019 y su evolución desde 1995. Las reservas mundiales son estimativas, para Birmania y Madagascar no se dispuso de datos. Las unidades están en toneladas métricas. Fuente. Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey.

China produce 132 000 toneladas/año de un total mundial de 213 000 toneladas año de tierras raras extraídas (Tabla 5), ¡20 000 toneladas más que en 2018!⁷⁶ Mientras en China la producción aumentó el 10 %, en EE. UU. lo hizo en un 44 %. Australia y Birmania han sobrepasado las 20 000 toneladas al año. En Australia su gran mina de Mount Weld, operativa desde 2013 (el concentrado de mineral va a una planta situada en Kuantan, Malasia, para su procesado), puede llegar a ser la mayor fuente de tierras raras fuera de China. La situación es compleja. Norteamérica aún importa desde China el 80 % de las tierras raras que consume y China es el principal cliente de Birmania, la cual ha cerrado su frontera entrabos países por conflictos territoriales, suspendiendo las exportaciones de tierras raras⁷⁷. El «estado autónomo» de Wa en Birmania, situado en la frontera con China, no es reconocido ni por el gobierno birmano ni por otros organismos internacionales, excepto China. Los minerales allí extraídos proceden de dos minas de tierras raras acumuladas por adsorción de iones sobre arcillas y contienen altas concentraciones de disprosio y terbio (32 % de la producción mundial). Son una fuente atractiva para las refinerías chinas, ya que se comercializan a precios relativamente bajos por mano de obra barata y escasa protección ambiental. Otros países, con producciones que no superan las 3000 toneladas al año, llevan tiempo extrayendo tierras raras, como Rusia, o lo hicieron en un pasado, como fue el caso de la India o Brasil, y han reabierto su explotación, o son recién llegados a modo de Madagascar,

⁷⁶ U.S. Geological Survey, «Mineral Commodity Summaries», 2020.

⁷⁷ ROSKILL: «Rare earths: Myanmar's border to China recloses». <https://roskill.com/news/rare-earths-myanmars-border-to-china-recloses/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

Tailandia, Vietnam o Burundi. Estas once referidas naciones constituyeron los mayores productores de tierras raras en 2019 (Tabla 5).

Elementos críticos y estratégicos

La demanda de elementos de las tierras raras ha crecido continuamente, a la par que la producción (Tabla 5), que de 1995 a 2010 se ha duplicado, y lo hará nuevamente en 2020. Estos metales se han convertido en críticos para la industria y estratégicos para las naciones. Se consideran «críticos» aquellos elementos químicos o minerales cuya escasez dañaría la economía de un país, puesto que resultan esenciales para sus aplicaciones tecnológicas. La limitación se origina cuando no existe un sustituto y surgen riesgos porque el suministro⁷⁸:

- a) depende del precio, como durante la citada crisis de 2009-2013 para las tierras raras;
- b) depende del tiempo: los quince elementos que consumía la informática en la década de 1990, no todos críticos, han aumentado a unos sesenta actualmente, abarcando la mayor parte de los elementos de las tierras raras;
- c) depende del contexto tecnológico –lo esencial para un tipo de industria puede no serlo para otra– y variar en cada país de acuerdo con sus necesidades;
- d) depende de imponderables como la pandemia de la COVID-19: según el *Global Times*⁷⁹ (periódico insignia del Partido Comunista Chino), las exportaciones de tierras raras de China se desplomaron un 26,7 % interanual en los primeros once meses de 2020 debido a que en Ganzhou, donde se procesan cerca del 70 % mundial de los metales raros, estaban trabajando en febrero a un 20 % de su capacidad a causa del brote, lo cual afecta las exportaciones hacia EE. UU., Japón y Europa⁸⁰;
- e) en el caso particular de los elementos de las tierras raras, ocurre un «problema

⁷⁸ PREGO, nota 2, pp. 109-111.

⁷⁹ GT Staff, «Rare-earth exports plunge in first 11 months: Chinese customs», *Global Times* (2020/12/7). <https://www.globaltimes.cn/content/1209248.shtml> Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁸⁰ XUANMIN, L, «China's rare earth exports drop 20-30%, crippled by COVID-19 outbreaks abroad», *Global Times* (2020/5/14). <https://www.globaltimes.cn/content/1188392.shtml> Fecha de la consulta 25.01.2021.

de balance»⁸¹ al encontrarse mezclados en proporciones distintas según sea el mineral; cuando se ajusta un elemento a su demanda, en el mercado se obtienen otros en demasía, lo que puede subir su precio debido a los costos de almacenamiento; en caso contrario, si se ajusta la producción a la demanda del sobrante se genera una escasez del primero; los elementos más requeridos suelen ser el neodimio y el disprosio mientras que el cerio, gadolinio, holmio, iterbio, lutecio praseodimio y tulio se producen en exceso y se almacenan⁸².

La globalización de la economía ha implicado a la industria y, con ella, el comercio de los elementos químicos y sus minerales. Entre ellos están los esenciales bajo un aspecto militar. Son los denominados «estratégicos», cuya producción nacional no logra satisfacer la demanda de su industria militar. En 2012 la industria militar norteamericana consumió el 5 % de las tierras raras gastadas en su país. El departamento de Defensa norteamericano⁸³ reconoció su vulnerabilidad hacia varios elementos de las tierras raras, debido a que eran estratégicos para sus equipos militares, y recomendó el acopio de itrio y disprosio en 2013 y de europio en 2015. Los elementos/minerales estratégicos siempre serán críticos, pero no al contrario. A veces, ello es causa de confusión entre ambos términos para algunas publicaciones. Las reservas mundiales de aquellos elementos/minerales, cuyo suministro en tiempo de guerra no cubrirían las necesidades mínimas de un estado, son muy codiciados y cada país industrializado tiene su propia lista. El club de elementos críticos y estratégicos se ha incorporado a la geoestrategia y la geopolítica mundial.

La UE considera críticos aquellos que poseen una alta importancia económica combinada con un riesgo asociado a su suministro; suman veinte materiales de una lista de 54 potenciales: antimonio, berilio, borato, cromo, cobalto, carbón de coque, elementos del grupo del platino, elementos de tierras raras, flúor, galio, germanio, grafito natural, indio, magnesita, magnesio, fosfato mineral, niobio, silicio metal y wolframio. El escandio⁸⁴ no lo

⁸¹ VONCKEN, nota 60, p. 109.

⁸² BINNEMANS, K. *et al.*: «Recycling of rare earths: a critical review», *Journal of Cleaner Production*, 51: 1-22, 2013.

⁸³ GAO: «Rare Earth materials: developing a comprehensive approach Could help DOD better manage National Security risks in the supply chain». Report to Congressional Committees, 2016.

⁸⁴ Su producción es poca, unas 15-20 toneladas al año, aunque aumenta continuamente al igual que su demanda; sus aplicaciones principales son aleaciones con aluminio (industria aeroespacial, equipamiento deportivo), láseres en odontología y lámparas de descarga de alta intensidad (precio en 2019: en lingotes 134 USD/gramo; como óxido 5 USD/gramo).

incluyeron dentro del conjunto de tierras raras, pero sí al itrio. La criticidad se puede valorar en detalle; son las tierras raras pesadas (del europio al lutecio, más el itrio), seguidas por las ligeras (del lantano al samario) las que para la UE⁸⁵ presentan un mayor riesgo de suministro, considerado este por su posibilidad de sustitución, velocidad de reciclado, producción minera y gobernanza (según el World Governance Index). Cada miembro de la UE tiene su propio listado, coincidente o no con el común. Todos concuerdan en el asunto de las tierras raras al igual que diferentes naciones tecnológicamente desarrolladas: Japón, Corea del Sur y Australia, aparte de China y EE. UU. A mayores, la trascendencia de las tierras raras se agranda al existir un fuerte crecimiento en su demanda, un 8 % anual. Tanto en importancia como en riesgo de suministro (2015-2030), están señalados cinco elementos de las tierras raras⁸⁶: disprosio, europio, itrio, neodimio, y terbio.

La UE importa el 99 % de las tierras raras pesadas de China y el 87 % de las ligeras. El riesgo por esta dependencia ha conducido a diferentes caminos en la búsqueda de suministro. Según estimaciones recientes, las reservas de tierras raras (Tabla 5) se encuentran en China (sobre 44 millones de toneladas) seguida por Brasil y Vietnam con la mitad de China, luego EE. UU. y Rusia con una tercera parte, y a continuación una serie de países que están incrementando la explotación. En total, las provisiones mundiales se han estimado en unos 124 millones de toneladas de tierras raras (esto es, óxidos de sus elementos: acrónimo común, REO). Se estima que, sumados a los recursos por descubrir, las reservas son grandes en relación con la demanda prevista, pudiendo atenderla durante unos 900 años. Los minerales bastnasita y monacita constituyen el mayor porcentaje de los recursos de tierras raras, destacando los depósitos de monacita en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tailandia y EE. UU. Está previsto arrancar la explotación de minas en Groenlandia (complejo de Ilímaussaq: uranio, elementos tierras raras y zinc), Zambia (Nkwombwa Hill), Canadá (depósitos de Hoidas, Thor, Stange y Misery Lakes), Sudáfrica (complejo descubierto de Pilanesberg y reapertura de Steenkampskraal). Hay que tener en cuenta que, desde el descubrimiento de un yacimiento hasta su explotación

⁸⁵ EU Ad-Hoc Working Group on raw materials, «Report on critical raw materials for the EU», European Commission, 2014.

⁸⁶ MCLEOD, C.L., KREKELER, M.P.S.: «Sources of Extraterrestrial Rare Earth Elements: To the Moon and Beyond», *Resources*, 6, 40, 2017.

comercial, pueden llegar a transcurrir quince años, lo que no proporciona una respuesta ágil ante posibles carestías.

En esta «guerra» geoestratégica para disponer de suministros en un futuro o de controlarlos en el presente, África es zona de combate. Javier Molina Acebo⁸⁷, miembro del Consejo de EdV-ESIC Business & Marketing School, considera que «las armas de la Segunda Guerra Mundial son los bits de ahora». A su juicio, las guerras ya no se libran «desde un avión, sino con la tecnología» y las tierras raras son el sustento de la industria tecnológica. En este sentido, mira hacia África y recuerda que «los chinos son los dueños de Angola, que está cambiando materias primas por desarrollo civil». China ya se ha acercado a las naciones africanas para explotar su potencial de tierras raras. Se aprovecha de su deuda internacional para ofrecer rescates financieros a cambio de acceso a sus depósitos de tierras raras⁸⁸.

Respuesta de la Unión Europea a la crisis

Durante la crisis por el suministro de tierras raras, la UE creó una lista en 2011 con 14 materias primas que en 2014 rehízo y amplió a 20; en su última revisión, 2017, el número creció a 27. En todas esas listas, los elementos de las tierras raras, ligeras y pesadas, presentaron el mayor riesgo por suministro a la UE. Identificados los elementos críticos la UE promovió y financió parcialmente (65 % del total) con nueve millones de euros el proyecto EURARE, European Rare Earth Element (2013-2017), para «atacar la carestía potencial de tierras raras para su industria: sentar las bases para el desarrollo de la industria de tierras raras en Europa que salvaguardará un suministro ininterrumpido de materias primas de tierras raras y productos cruciales para el sector económico

⁸⁷ De QUIROGA, C.: «Las tierras raras, posible baza de China en la guerra comercial», *ABC Economía* (22/05/2019). https://www.abc.es/economia/abc-tierras-raras-posible-baza-china-guerra-comercial-201905220138_noticia.html Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁸⁸ FERREIRA, G., CRITELLI, J., JOHNSON, W.: «The Future of Rare Earth Elements in Africa in the Midst of a Debt Crisis», *Eunomia Journal* (Aug 15, 2020). <https://www.civilaffairsassoc.org/post/the-future-of-rare-earth-elements-in-africa-in-the-midst-of-a-debt-crisis> Fecha de la consulta 25.01.2021.

industrial de la UE»⁸⁹. En el mapa elaborado por EURARE⁹⁰ se señalan 76 yacimientos y depósitos de tierras raras en Europa (excluida Rusia e incluida Turquía). Siete son recursos, esto es, depósitos que se han explorado con suficiente detalle para tener buenas estimaciones. Se encuentran en Escandinavia (Fen en Noruega y, en Suecia, Norra Kärr y Olserum), Groenlandia (Sarfartoq, Kvanefjeld, Kringleme y Motzfeldt) y Alemania (Storkwitz). De modo especial, Europa mira hacia Groenlandia⁹¹ como principal suministro futuro. Esta región autónoma de Dinamarca es una apetitosa fuente de tierras raras. Mediante el proyecto Kvanefjeld, liderado por la australiana Greenland Minerals, donde la china Shenghe Resources tiene participación, ambiciona llegar a suministrar un 25 % de la demanda mundial. Otra vía, más modesta pero de interés, al explotar tierras raras pesadas, está en Suecia. El complejo de Norra Kärr (mineral eudialita), descubierto en 1906, es de momento el proyecto europeo más prometedor y está siendo explotado por Tasman Metals Ltd⁹². En conjunto, EURARE considera que esos siete depósitos pueden asegurar el suministro a la UE durante décadas. Este tipo de explotaciones requieren mucha inversión, por lo cual resulta oportuno concentrarse únicamente en Groenlandia y Suecia, tal y como sugiere Christopher Ecclestone, especialista en minería del banco de inversión neoyorquino Hallgarten & Company:

«Europa debería concentrarse en una o dos minas, y en reciclar muchísimo»⁹³.

En España el mapa aludido apunta a un depósito en Mulas y dos ocurrencias: una asociada a rocas ígneas alcalinas en Galiñeiro, y otra en placeres situada en la Rambla de las Granatillas. Una revisión reciente reconoce cinco⁹⁴ ubicadas en el Monte

⁸⁹ «The main goal of the EURARE project was to set the basis for the development of a European REE industry that will safeguard the uninterrupted supply of REE raw materials and products crucial for the EU economy industrial sectors, such as automotive, electronics, machinery and chemicals, in a sustainable, economically viable and environmentally friendly way». <http://www.eurare.org/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁹⁰ «REE resources, deposits and occurrences in Europe recognised by the EURARE Project (2013-2017)». <http://oryktos.blogspot.com/2018/03/europes-ree-eurare-project-is-completed.html> Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁹¹ PAULICK, H., ROSA, D. AND KALVIG, P.: «Rare Earth Element projects and exploration potential in Greenland», MiMa rapport 2015/2, 2015.

⁹² VONCKEN, nota 60, p. 40.

⁹³ https://elpais.com/politica/2015/05/10/actualidad/1431274081_028653.html Fecha de la consulta 25.01.2021.

⁹⁴ MORANTE GUTIÉRREZ, M.: «Estudio de prefactibilidad de un aprovechamiento de tierras raras en España». Universidad de Cantabria, Santander, pp. 43-46, 2019.

Galiñeiro (Galicia), Campo de Montiel (Ciudad Real), Ramblas de las Granatillas (Almería), río Cúa (Asturias) y Fuerteventura (Islas Canarias). La sierra del Galiñeiro⁹⁵ es un complejo geológico de diez kilómetros cuadrados, descubierto por un geólogo holandés en 1966. Está formado por gneises alcalinos y peralcalinos con minerales ricos en tierras raras (bastnaesita, fergusonita, monacita, torita, xenotima, allanita, torianita y circón), cuya erosión transporta tierras raras y torio a los sedimentos de la ría de Vigo⁹⁶ y del río Miño⁹⁷. En 2013 se frustró un proyecto de explotación por la dificultad técnica y la presión social local. En el Campo de Montiel se encuentra un placer aluvial de monacita de 2,34 kilómetros cuadrados con 30 000 toneladas de alto contenido en neodimio, praseodimio y europio. Fue hallado por la empresa Quantum Minería, cuyo proyecto de explotación de Matamulas fue rechazado en 2019 en base a una declaración ambiental negativa por afectar al hábitat del águila imperial, al lince y al sisón⁹⁸. Las otras tres: el depósito aluvial de la Granatilla, al sur del antiguo complejo volcánico del Hoyazo de Níjar, fue explotado por el granate, y contiene tierras raras ligeras y torio⁹⁹. Las carbonatitas del Complejo Basal de Fuerteventura exhiben una mayor presencia de las ligeras en contenidos explotables¹⁰⁰. Sobre el río Cúa no se dispone de una información precisa. Además de esos tres lugares ya identificados recientemente se ha descubierto uno nuevo en Gran Canaria¹⁰¹ con un volumen de elementos de las tierras raras ligeras e itrio de unos mil kilómetros cúbicos. Existe otro en el límite de Salamanca con Zamora, en la zona denominada Domo del Tormes, donde se detectaron¹⁰² proporciones significativas de lantano y cerio en granitos porfídicos biotíticos.

⁹⁵ FLOOR, P.: «Petrology of an aegirine-riebeckite gneiss-bearing part of the Hesperian massif: The Galiñeiro and surrounding areas, Vigo Spain». *Leidse Geologische Mededelingen*, 36: 1-204, 1966.

⁹⁶ PREGO, R. *et al.*: «Rare earth elements in sediments of the Vigo Ria, NW Iberian Peninsula», *Continental Shelf Research*, 29: 896-902, 2009.

⁹⁷ PREGO, R., *et al.*: «Lanthanides and yttrium in the sediments of the lower Minho River (NW Iberian Peninsula). Imprint of tributaries», *Journal of Soils and Sediments*, 19: 2558-2569, 2019.

⁹⁸ BURKHALTER, E.: Comunicación personal, 2019.

⁹⁹ LÓPEZ-RUIZ, J.: «El campo neógeno del SE de España», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7.3: 244-253, 1999.

¹⁰⁰ MANGAS, J. *et al.*: «Minerales de tierras raras en las carbonatitas del Complejo Basal de Fuerteventura (Islas Canarias)», *Geogaceta*, 20: 1511-1513, 1996.

¹⁰¹ MENÉNDEZ, I. *et al.*: «Distribution of REE-bearing minerals in felsic magmatic rocks and paleosols from Gran Canaria, Spain: Intraplate oceanic islands as a new example of potential, non-conventional sources of rare-earth elements», *Journal of Geochemical Exploration*, 204: 270-288, 2019.

¹⁰² LÓPEZ PLAZA, M., GONZALO CORRAL, J.C.: «Caracterización geoquímica de las anatexitas del Domo del Tormes (provincias de Salamanca y Zamora)», *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6: 113-128, 1993.

Otra ruta es el reciclaje de elementos de las tierras raras. Es un recurso secundario que atiende a evitar la contaminación o por necesidad de recursos estratégicos, más que de beneficios económicos reales en los países industrializados. El reciclado es muy bajo, un 1 %, ocasionado por la falta de un reto tecnológico, recolección ineficiente y escasez de incentivos¹⁰³. Esta cuestión recibe más atención cada día y hay revisiones amplias del tema¹⁰⁴ que pueden consultarse. El problema para la industria es lo caro que resulta recuperar metales raros, un coste por ahora superior a su valor¹⁰⁵. Normalmente son residuos provenientes de imanes permanentes, lámparas, pantallas, material informático y pilas recargables. En Europa solo son reciclados a nivel comercial fluorescentes, baterías de hidruro de níquel e imanes. Para estos dos últimos, el proyecto europeo REE4EU¹⁰⁶ desarrolló a escala industrial un método de extracción de aleaciones de tierras raras para la producción de imanes. Las alzas de precios hacen más rentable el reciclado y se deriva hacia países donde la mano de obra sea barata y la exigencia ambiental baja. EE. UU. exporta a Asia el 80 % de sus residuos electrónicos y desde la UE se envían 1,3 millones de toneladas anuales a África (Ghana) y Asia (China, Filipinas, India, Vietnam). Como comenta el químico Keith Veronese¹⁰⁷: «el reciclaje en el Tercer Mundo es inquietantemente post-apocalíptico. Aventurándose en montañas de monitores descartados, ordenadores de sobremesa y refrigeradores, los niños y adolescentes se pelean por las partes electrónicas expuestas al sol y la lluvia en busca de cualquier metal... para una posible reventa».

Actualmente está creciendo la atención sobre la «minería urbana», reciclaje de materiales domésticos, y se presta atención a residuos industriales como fosfoyeso y barros rojos de alúmina. Aunque algunos dispositivos son relativamente pobres en tierras raras, dificultando su recuperación, al sumar enormes volúmenes de material la cantidad obtenible es grande y se están convirtiendo en una fuente potencial de neodimio,

¹⁰³ BINNEMANS *et al.*, nota 82.

¹⁰⁴ BUSTILLO REVUELTA, M., RUÍZ SÁNCHEZ-PORRO, J.: «Tierras raras: geología, producción, aplicaciones y reciclado», Fuelle Editores, Madrid, pp. 353-403, 2019.

¹⁰⁵ PITRON, nota 67, p. 76.

¹⁰⁶ REE4EU «Project: Rare Earth Recycling for Europe». <https://www.ree4eu.eu/the-project/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹⁰⁷ VERONESE, K.: «Rare», Prometheus Books, Nueva York, p. 143, 2015.

praseodimio, samario, disprosio, cerio, europio e itrio separables por hidrometalurgia¹⁰⁸, menos costosa y escasamente contaminante.

Respuesta norteamericana a la crisis

Al final de la crisis de las tierras raras, en 2013, EE. UU. había reaccionado como la UE creando el Critical Materials Institute (CMI)¹⁰⁹, un centro de innovación energética dirigido por el laboratorio Ames con una visión holística para el ciclo de los materiales críticos. Autodenominado Proyecto tipo Manhattan por sus dimensiones (4 laboratorios nacionales, 7 universidades y 10 socios industriales) que integran investigación científica, innovación en ingeniería, fabricación y mejoras de procesos. Norteamérica está tratando de mitigar su vulnerabilidad en tierras raras. Victoria Bruce, periodista con formación en geología, en su libro aparecido en 2017 considera que «la destreza tecnológica estadounidense solía ser incomparable. Pero debido a la globalización, y con la bendición del gobierno, los materiales, componentes y tecnologías patentados se comercializan cada vez más fuera de U.S.»¹¹⁰. Afganistán podría ser un buen apoyo minero. En 2011 el servicio geológico norteamericano (USGS) había informado¹¹¹ de los mayores depósitos de minerales de tierras raras descubiertos bajo un volcán extinto en el suroeste de Afganistán. Estimó que las reservas podrían abastecer a todo el mundo durante 10 años. A ese respecto, James Kennedy, experto en tierras raras y presidente de ThREE Consulting, escribía¹¹²: «Aunque esta área es una de las áreas mineralizadas más prometedoras del mundo (...) un artefacto explosivo improvisado en un vehículo acabó con muchos, si no la mayoría, del personal

¹⁰⁸ JYOTHI, R.K. *et al.*: «Review of rare earth elements recovery from secondary resources for clean energy technologies: Grand opportunities to create wealth from waste», *Journal of Cleaner Production*, 267: 122048, 2020.

¹⁰⁹ The Critical Materials Institute is a U.S. DOE Energy Innovation Hub led by Ames Laboratory, and supports early-stage research to advance innovation in U.S. manufacturing. CMI seeks ways to eliminate and reduce reliance on rare-earth metals and other materials critical to the success of clean energy technologies. <https://www.ameslab.gov/cmi> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹¹⁰ BRUCE, V.: «*Sellout: How Washington Gave Away America's Technological Soul, and One Man's Fight to Bring It Home*», Bloomsbury, Nueva York, 304 pp., 2017.

¹¹¹ PETERS, S.G.: «Summaries and Data Packages of Important Areas for Mineral Investment and Production Opportunities in Afghanistan», The USGS-TFBSO Afghanistan Minerals Project. U.S. Department of Defense, and the U.S. Geological Survey, 2011.

¹¹² KENNEDY, J.: «Blackwater mercenaries go Off-World», 2017. <https://www.linkedin.com/pulse/blackwater-mercenaries-go-off-world-james-kennedy> Fecha de la consulta 25.01.2021.

afgano de minería y petróleo y gas cerca del Servicio Geológico de Afganistán y Ministerio de Minas en Kabul (...) probablemente perdió a la mayoría de sus geólogos sénior» y concluye «olvídense (...) la minería en este país no sucederá en nuestra vida (...) demasiado corrupta y sin infraestructura» por lo que afirma que «la grandeza estadounidense proviene del liderazgo económico y tecnológico, no de conflictos interminables. Este es un problema para el liderazgo estadounidense». La respuesta de EE. UU. pasa por la reapertura, anteriormente comentada, de la mina de Mountain Pass, que explota tierras raras ligeras. Al igual que hizo la UE, el USGS realizó un estudio¹¹³ sobre los posibles depósitos explotables en su suelo. Fueron identificados Bokan Mountain (Alaska), conteniendo 5,3 millones de toneladas de tierras raras con un 40 % de las pesadas, Bear Lodge (Wyoming) con 550 mil toneladas, Round Top (Texas) con 300 mil toneladas y Elk Creek (Nebraska), rica en escandio (3400 toneladas de su óxido). Entre ellas, atendiendo al delicado tema del suministro de tierras pesadas, está la mina subterránea de Bokan Mountain, localizada en la isla Príncipe de Gales (Alaska). En esa montaña hay una mina de uranio cerrada, que se encuentra dentro y alrededor de las áreas del depósito de tierras raras. La empresa canadiense Ucore¹¹⁴ adquirió la concesión en 2012 y prevé producir 375 toneladas de concentrado de tierras raras al día, durante once años, que plantea comercializar cerca de la mina, aplicando su tecnología patentada de extracción por solvente.

Otra opción mundial en el suministro de las escasas tierras raras pesadas es la mina Browns Range (xenotima-Y), que cubre 3600 kilómetros cuadrados en el oeste de Australia. Está posicionada para convertirse en el mayor productor de disprosio (precio diciembre 2020: 244 USD/kg) y terbio (958 USD/kg) fuera de China. En 2018, Northern Minerals Limited, con objeto de verificar su viabilidad técnica y económica, comenzó a producir carbonato de tierras raras en una planta piloto situada en la misma mina.

¹¹³ TRACY, B.S.: «An Overview of Rare Earth Elements and Related Issues for Congress», Congressional Research Service, USA, 2020.

¹¹⁴ UCORE, «Bokan Mountain Alaska: The highest grade heavy rare Earth element Project in the United States of America», 2021. <https://www.ucore.com/bokan> Fecha de la consulta 25.01.2021.

Respuesta japonesa a la crisis

Japón es una nación muy sensible a cualquier restricción de elementos de tierras raras, en especial su industria automovilista. Por ejemplo, la empresa Toyota precisa de 10 000 toneladas anuales de tierras raras para sus coches híbridos. Una opción que ha abordado para paliar carestías es el reciclado. Por una parte, los catalizadores que contienen platino, paladio, rodio y óxido de cerio depositado sobre aluminio y óxido de lantano están siendo reciclados para fabricar nuevos catalizadores. Por otra parte, en 2018 Toyota fabricó un nuevo imán¹¹⁵ para motores eléctricos que disminuye la cantidad de tierras raras a la mitad. No utiliza terbio ni disprosio, y sustituye parte del neodimio por lantano y cerio, más abundantes y de menor coste. Otras empresas ya habían seguido ese camino. En 2012, Nissan había desarrollado un nuevo motor eléctrico con un 40 % menos de disprosio y TDK un método para elaborar imanes con un 50 % menos de ese metal¹¹⁶. Más allá de la industria en particular, Japón, como observó Abraham en 2015¹¹⁷, «está en proceso de cambio en este momento. Consideran los metales raros como elemento vital de su economía y su economía de fabricación» y prosigue «... tienen menos miedo de invertir dinero en garantizar que las líneas de suministro sean sólidas... Pero también invierten mucho más en educación y dan dinero a las universidades para que se centren en muchos de estos materiales».

El otro camino nacido de la crisis de 2009-2013 fue la búsqueda de fuentes propias de tierras raras. El gobierno japonés pretende obtener más del 60 % de sus requisitos de tierras raras de fuera de China; para lograrlo, las principales corporaciones japonesas desenvuelven proyectos mineros en cooperación con entidades locales en Australia, India y Kazajistán. Las empresas japonesas cuentan con el respaldo de su gobierno, que está estableciendo asociaciones internacionales en las mismas regiones. La independencia japonesa de la importación está en camino de desaparecer tras el descubrimiento en 2011 de altos contenidos de elementos de tierras raras en el lodo (oxihidróxidos de hierro hidrotermales y filipsita) de las profundidades marinas del

¹¹⁵ Toyota, «Toyota reducirá el uso de tierras raras críticas un 50 % gracias a un nuevo imán para motores eléctricos», 2018. <https://prensa.toyota.es/toyota-reducira-el-uso-de-tierras-raras-criticas-un-50-gracias-a-un-nuevo-iman-para-motores-electricos/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹¹⁶ ZHOU, B. *et al.*: 2016. Rare Earth Elements supply vs. clean energy technologies: new problems to be solve. *Mineral Resources Management*, 32: 29-44.

¹¹⁷ ABRAHAM, D., KINTISCH, E.: «The Rare Metal Age», *Science & Diplomacy*, vol. 4, nº 4, 2015. <http://www.sciencediplomacy.org/perspective/2015/rare-metal-age> Fecha de la consulta 25.01.2021.

Pacífico Norte. Los geólogos estimaron que se trataba de un recurso enorme y muy prometedor, donde un área un kilómetro cuadrado podría proporcionar una quinta parte del consumo mundial anual de estos elementos¹¹⁸. Posteriormente, en 2013, una campaña japonesa llevada a cabo en el buque de investigación de aguas profundas Kairei encontró una capa de lodo, de 2 a 4 metros de espesor, a 5600-5800 metros de profundidad alrededor de la isla Minami-Torishima, dentro de la zona económica exclusiva japonesa. Esos lodos son muy ricos en tierras raras ligeras y pesadas; contenían un 0,66 % de pesadas, esto es, 25 veces superiores a los depósitos del sur de China¹¹⁹. La isla de Minami-Torishima, pequeña (1,5 kilómetros cuadrados) y aislada (no hay otra tierra en mil kilómetros a la redonda) se halla situada a 1950 kilómetros al sureste de Tokio en el océano Pacífico Norte y pertenece a Japón desde 1898. Este hallazgo abre una perspectiva de futuro para Japón como una nación próspera en recursos de metales en general y tierras raras en particular. Ahora están diseñando un sistema que permitiría recuperarlos y, asimismo, un procedimiento para el procesado de los minerales a fin de explotar en un futuro próximo este recurso que se estima en 16 millones de toneladas de sedimentos mineralizados de tierras raras. Un área de 105 kilómetros cuadrados supone 1,2 millones de toneladas de tierras raras que representa 62, 47, 32 y 56 años de la demanda global anual de itrio, europio, terbio y disprosio, respectivamente¹²⁰. Según sus científicos, ¡se espera atender la demanda mundial durante más de 500 años!

La iniciativa japonesa ha acelerado la búsqueda de depósitos oceánicos similares en todos los océanos, cuya ocurrencia se conoce desde hace un siglo. Hace 40 años se comenzó a conocer la génesis, distribución y potencial de esos recursos. Los bajos precios de los metales en los mercados mundiales moderaron el entusiasmo por la minería de las profundidades del océano hasta la década de 2000, aunque la investigación no se había abandonado. Consorcios mineros de China, Francia, Alemania, India, Japón, Corea y Rusia siguen intentando explotar los fondos marinos más ricos en nódulos polimetálicos

¹¹⁸ KATO, Y., *et al.*: «Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements», *Nature Geoscience*, 4: 535-539, 2011.

¹¹⁹ IJIMA, K. *et al.*: «Discovery of extremely REY-rich mud in the western North Pacific Ocean», *Geochemical Journal*, 50: 557-573, 2016.

¹²⁰ TAKAYA, Y. *et al.*: «The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements», *Scientific Records*, 8, 5763, 2018.

con potencial rendimiento económico¹²¹. Se concentran principalmente en tres regiones oceánicas: la cuenca del Océano Índico Central, la cuenca de Perú y la zona de fractura de Clarion-Clipperton, en el océano Pacífico Noreste. Los yacimientos están constituidos por nódulos de manganeso, costras de ferromanganeso y sulfuros polimetálicos precipitados en las fuentes hidrotermales de las dorsales oceánicas. Se encuentran situados fuera de las 200 millas de la zona económica exclusiva, por lo que la exploración y explotación en esas áreas es patrimonio común de la humanidad. Conocida como «La Zona» cae dentro de la administración de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (International Seabed Authority, ISA)¹²², constituida en 1994. A través de la ISA, y siguiendo sus reglamentos, los consorcios formalizan y contratan una parcela de exploración inferior a 150 000 kilómetros cuadrados sobre el que tienen derecho exclusivo durante ocho años. Estos cambios legales conllevan el hecho de que hace un siglo los océanos (71 % del planeta) no tenían dueño, ahora el 40 % de esa superficie marina (28 % del planeta) pertenece a algún país y un 10 % está en disputa (7 % del planeta). En concreto, el océano «libre» se ha reducido de un 71 % a un 36 %, esto es, a la mitad, por los intereses nacionales y comerciales. Ahora algunos estados pretenden extender su dominio de 200 a las 350 millas.

La llegada del recurso de la minería submarina y los depósitos existentes en la zona económica exclusiva española ha sido compendiada y analizada con claridad y profundidad en un artículo del Instituto Geológico Minero de España¹²³. Ese artículo señala tres zonas geográficas de gran interés: el golfo de Cádiz, el Banco de Galicia y los montes submarinos de las Islas Canarias. Entre ellos destaca este último, definido como la provincia volcánica de las Islas Canarias, que abarca un gran número de montes y colinas submarinas, algunos de los cuales están más allá del límite de las

¹²¹ HEIN, J.R. *et al.*: «Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high and green-technology applications: Comparison with land-based resources». *Ore Geology Reviews*, 51: 1-14, 2013.

¹²² The International Seabed Authority (ISA) is an autonomous international organization established under the 1982 United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) and the 1994 Agreement relating to the Implementation of Part XI of the United Nations Convention on the Law of the Sea (1994 Agreement). ISA is the organization through which States Parties to UNCLOS organize and control all mineral-resources-related activities in the Area for the benefit of mankind as a whole. In so doing, ISA has the mandate to ensure the effective protection of the marine environment from harmful effects that may arise from deep-seabed related activities. <https://www.isa.org/jm/about-isa> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹²³ MARINO, E. *et al.*: «Llega la era de la minería submarina», *Tierra y Tecnología*, 49, 2017. <https://www.icog.es/TyT/index.php/2017/05/llega-la-era-de-la-mineria-submarina/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

200 millas. Por ejemplo, el monte submarino Tropic (3,5 kilogramos de tierras raras por tonelada de costra de ferromagnesio) que España lleva años estudiando¹²⁴, junto con los fondos submarinos que lo rodean, para documentar la demanda que presentó en 2014 ante la ONU con el objetivo de extender la plataforma continental de Canarias hasta las 350 millas. Las costras de ferromanganeso estudiadas en los montes submarinos canarios, entre otros metales, contienen un 0,4 % de tierras raras.

¿Una «rara» pieza clave del puzle de la energía?

Los elementos de las tierras raras entraron de lleno en nuestra sociedad durante la década de 1960 para ir convirtiéndose en una sociedad de alta tecnología. Al inicio de esa decenio el historiador de la ciencia ruso Trifonov¹²⁵ comentaba, en una excelente revisión sobre el tema de las tierras raras, que «los elementos de las tierras raras eran una rama olvidada de la química inorgánica» y vaticinaba: «No sería sorprendente que en un futuro próximo los metales de las tierras raras se vuelvan tan comunes en la ciencia y la industria como, por ejemplo, el magnesio o el aluminio son ahora». Así fue. En los últimos cincuenta años han sido ampliamente abordados desde ambos puntos de vista, impulsados por sus aplicaciones, que nos han conducido a la Edad de las Tierras Raras. Aunque cada habitante del planeta apenas consume 17 gramos de tierras raras al año, el mundo sería en extremo lentificado sin esas escasas migajas de corteza terrestre¹²⁶. El progreso para esos metales no ha terminado, sigue en un continuo avance, solo hay que revisar lo que se publica científicamente y recordar la llegada de nuevos dispositivos, los cuales contribuyen a un suministro de energía alternativo y renovable. Una vez que las tierras raras se han incorporado plenamente en nuestra cultura, y leídas las páginas anteriores, cabe atender ahora a las tres preguntas que se plantearon sobre su relación con la energía: ¿Intervienen directamente las tierras raras en la producción de energía? ¿Mejoran la eficiencia en el consumo de energía?

¹²⁴ MARINO, E. et al.: «Strategic and rare elements in Cretaceous-Cenozoic cobalt-rich ferromanganese crusts from seamounts in the Canary Island Seamount Province (northeastern tropical Atlantic)», *Ore Geological Reviews*, 87: 41-61, 2017.

¹²⁵ TRIFONOV, D.N.: «*The rare-earth elements*», The MacMillan Company, Nueva York, p. 118, 1963.

¹²⁶ PITRON, nota 67, p. 106.

¿Proporcionan medios que facilitan el manejo de la energía?

Esta última cuestión conduce al sistema periódico de los elementos químicos. Los lantánidos son los únicos elementos en los que el llenado de sus siete orbitales «f» les proporciona unas propiedades magnéticas y ópticas especiales. Después de ellos, esto es, del hafnio al radio, los orbitales «f» ya están completos y solo para sus «primos» los radiactivos actínidos vuelve a repetirse ese llenado, empero solo existen en la naturaleza cuatro de ellos (los demás son elementos obtenidos artificialmente): actinio y protoactinio (extremadamente escasos), torio y uranio, que no son aptos para las aplicaciones de los lantánidos. Son únicos entre los elementos químicos existentes en nuestro universo. Ellos, junto con el escandio e itrio que comparten sus minerales, son insustituibles en la mayor parte de sus aplicaciones tecnológicas. En Norteamérica, la USGS lo reconoce en sus informes¹²⁷: «Hay sustitutos disponibles para muchas aplicaciones, pero generalmente son menos efectivos». Al igual en Europa, el informe final del proyecto EURARE señala¹²⁸: «En las aplicaciones donde se han identificado sustitutos, estos son más costosos o también críticos». Varios elementos, más onerosos y menos abundantes, tales como el europio, el terbio y el disprosio no pueden ser reemplazados; mientras que el tulio, el iterbio y el lantano, difícilmente (solo en un 25 % de los dispositivos); el praseodimio, el neodimio y el samario en un 60 % y los demás en el 37-40 % de los casos¹²⁹. Ni que decir tiene que la especificación de «son menos efectivos» para potenciales sustituciones hace irremplazables a los elementos de las tierras raras en su papel militar de «estratégicos». En respuesta a la pregunta inicial se puede afirmar que, en todos los dispositivos de manejo, comunicaciones e informática son básicos para la gestión de la energía; permiten levantar redes eléctricas pseudointeligentes, al igual que para otros destinos similares en nuestra sociedad tecnológica presente.

Al respecto de la segunda cuestión, los elementos de las tierras raras están presentes en muchos equipos que reducen el consumo de energía. En particular destacan en

¹²⁷ USGS, «Mineral Commodity Summaries 2020», U.S. Department of Interior & U.S. Geological Survey, 2020.

¹²⁸ EURARE brochure, 2017. http://www.eurare.org/docs/EURAREbrochure_vfinal.pdf Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹²⁹ GRAEDEL, T.E. *et al.*: «On the material basis of modern society», PNAS, 2013. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110> Fecha de la consulta 25.01.2021.

dos, la iluminación y los imanes. Las modernas y cada vez más presentes luces led utilizan menos elementos de las tierras raras y consumen menos energía; su vida es mayor y rinden un 20 % más de luz que los fosforescentes a los que están sustituyendo. La fabricación de imanes consume una mezcla de neodimio (el mayor destino de su producción mundial), praseodimio, disprosio, junto con otros elementos utilizados en rellenos, como cerio y gadolinio. Estos imanes han sustituido a los tradicionales en dispositivos electrónicos para amplificar señales de radiofrecuencia, ventiladores, cabezas de lectura de discos duros, imágenes por resonancia magnética nuclear, altavoces y auriculares, motores eléctricos, herramientas inalámbricas, servomotores, motores síncronos, motores de pasos o motores para automóviles, tanto híbridos como eléctricos. El informe de perspectivas del mercado de tierras raras de Roskill¹³⁰ hace un desglose detallado de la demanda, evaluando las tendencias tecnológicas y de la industria, y su impacto en el consumo de cada elemento por mercado de uso final. Para 2030 pronostica que los imanes de tierras raras representarán un 40 % de la demanda total, esto es, casi el doble de la actual. La investigación de aplicaciones, como se comentó (Figura 3), sigue una evolución vertiginosa. Está abordando las propiedades magnéticas de las tierras raras en la fabricación de sistemas de refrigeración, y bombas de calor sostenibles y eficientes, aprovechando el efecto magnetocalórico. Es una de las mejores soluciones para el ahorro energético, ya que permite refrigerar de forma ecológica (no emplea gases dañinos para la atmósfera), silenciosa (no tienen partes móviles) y con un menor consumo energético (son tres veces más eficientes que los tradicionales). Comprobada su viabilidad con el gadolinio, ahora se ensaya con prototipos basados en elementos más baratos de las tierras raras en menesteres destinados a equipos de refrigeración industrial, sistemas de aire acondicionado en vehículos y edificios y refrigeradores en supermercados. Este es uno de los diversos ejemplos sobre las grandes posibilidades que abren los elementos de las tierras raras, posiblemente su mayor contribución: aplicaciones «verdes», para disminuir el consumo de energía.

Finalmente, las tierras raras intervienen en el almacenado y la producción de energía bajo diferentes apartados. Si se consideran las tres fuentes de energía básicas en la

¹³⁰ ROSKILL, «Rare Earths. Outlook to 2030», 20th Edition, 2020.

Tierra, la fusión nuclear solar (hidrógeno y helio), la fisión nuclear (uranio, torio y potasio) dentro de nuestro planeta y la gravedad (mareas), los elementos de las tierras raras tienen un papel insignificante: el prometio como pila nuclear, o secundario: en los reactores nucleares como veneno para reducir una alta reactividad. En ambos casos pueden ser reemplazados por otros elementos químicos. En consecuencia, son sustituibles. Si se tienen en cuenta las fuentes de energías resultado de los gradientes originados por las tres primarias en la Tierra: las intermitentes eólica y solar, la hidráulica y la geotérmica, principalmente, la labor de los elementos de las tierras raras es considerable, sobre todo en cuanto a generadores eléctricos para turbinas de viento. No obstante, es posible fabricar generadores asíncronos o síncronos sin imanes permanentes, para reducir la dependencia de tierras raras. Sin soluciones alternativas en los próximos años, el sector eólico podría llegar a consumir un 6 % de la producción anual de neodimio y más del 30 % de la de disprosio, dado que se espera que los polígonos eólicos marinos, una de las tecnologías renovables con mayor potencial de expansión, alcancen los 120 GW de capacidad. De los 12 GW actuales en la UE, la Comisión Europea estima disponer de una capacidad instalada de, al menos, 60 GW de energía eólica marina y de 1 GW de energía oceánica para 2030, con vistas a alcanzar respectivamente 300 GW y 40 GW de capacidad instalada en 2050¹³¹.

En otra faceta de la energía, el almacenamiento, tienen una función interesante en baterías, aunque utilicen cantidades pequeñas en el cátodo de las de hidruro metálico de níquel. En comparación con las, de momento, caras baterías de iones de litio, su uso seguirá. Se están realizando experiencias para el almacenado de hidrógeno gas para vehículos y también en ampliar el rendimiento de las células solares¹³² mediante el iterbio, que absorbe la luz infrarroja y la envía al erbio, que lo devuelve como luz verde visible. En el campo del almacenado y la producción de energía, las tierras raras son valiosas cara a la Transición Energética. Es deseable que tengan una mayor participación en la generación de energía, e investigar para ampliar y mejorar sus aplicaciones, a ser posible

¹³¹ COMISIÓN EUROPEA, «Una estrategia de la UE para aprovechar el potencial de la energía renovable marina para un futuro climáticamente neutro», 2020. <https://eurlex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0741> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹³² FAKHIM LAMRANI, A.: «Rare-earth-doped TiO₂ rutile as a promising ferromagnetic alloy for visible light absorption in solar cells: first principle insights», RSC Advances, 10, 35505, 2020. ROBERS Jr., G.: «Nanoparticle Breakthrough Could Capture Unseen Light for Solar Energy Conversion», 2018. <https://newscenter.lbl.gov/2018/04/23/nanoparticle-breakthrough-solar-energy-conversion/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

aprovechando el sobrante por desbalanceado en la producción de elementos de las tierras raras.

Retos a superar

A día de hoy, destacan dos entre los desafíos pendientes de resolver. Uno es medioambiental y otro geoestratégico. Siempre han de enfocarse con una visión de conjunto. Invariablemente hemos de preocuparnos por nuestro planeta. Por una parte, hay que aprovechar eficientemente los elementos de las tierras raras en la generación de una energía renovable y una economía baja en carbono. Una política científica adecuada es clave para perseguir soluciones que permitan a cada nación alcanzar una independencia energética, adaptándose a sus riquezas naturales. En España se puede decir lo mismo, e igualmente, que no se debe permitir la pérdida de conocimiento científico y técnico por una rotura generacional en la transmisión del saber. Por otra parte, debido a que los aparatos corrientes son más baratos cada vez y su ciclo de vida menor, es necesario usar eficientemente los recursos, cambiar algunos hábitos consumidores y modelos de negocios para crear una cadena rentable de suministros con productos diseñados para ser fácilmente reciclados o reusados. Los gobiernos han de estar más cercanos a las instituciones de investigación e industria tecnológica para comprender las demandas futuras de elementos críticos y prestigiar su trabajo. En una entrevista, el abogado y periodista francés Pitron¹³³ ofrece un camino: «La única solución realista que veo es la economía circular, de forma que el crecimiento económico no sea proporcional al incremento en el uso de materias primas y de energía. Eso nos permitirá continuar creciendo a la vez que preservamos el planeta». En el fondo es tratar de vivir con sobriedad.

Cuidado ambiental: evitar la contaminación

El predominio del mercado de las tierras raras por Norteamérica a través de su mina de Mountain Pass terminó a finales del pasado siglo. En 1980, una clasificación errónea de

¹³³ ALDAMA, Z.: «Las energías renovables y las tecnologías digitales no son tan verdes», *El País Economía*, 2020. https://retina.elpais.com/retina/2020/02/14/innovacion/1581675324_297883.html Fecha de la consulta 25.01.2021.

las tierras raras tuvo consecuencias catastróficas para su minería¹³⁴. La Comisión Reguladora Nuclear y la Agencia Reguladora Internacional colocaron la minería de tierras raras bajo las mismas regulaciones que la minería de torio, un elemento radiactivo que se desperdicia cuando se procesan algunos minerales de tierras raras. Ello, unido a varios derrames de desechos radiactivos en el desierto de Mojave, hizo que la industria minera de tierras raras en EE.UU colapsara y se trasladara a China. En Francia, describe Pitron una secuencia semejante¹³⁵: la industria química francesa Rhône-Poulenc era una de las dos grandes de metales raros; poseía una fábrica en La Rochelle. En la década de 1980 purificaba anualmente la mitad mundial de las tierras raras. Ante continuos rumores en la prensa de una contaminación marina radiactiva, trasladó el negocio a China, donde además le abastecían de tierras raras a una cuarta parte del precio en Europa. En China se repitió el problema de la contaminación, agravado mucho más. A pocos kilómetros de Baotou se vierten los desechos tóxicos generados en el tratamiento del mineral. Se descargan unas siete millones de toneladas al año¹³⁶ hacia la presa de relaves Weikuang, que los lugareños llamaban «el lago de las tierras raras». Fue construida en 1966 juntamente con las plantas de procesamiento que utilizan varios baños ácidos para extraer las tierras raras¹³⁷. En 2005, Xu Guangxian expresó su preocupación en un estudio oficial¹³⁸ sobre el torio como origen de contaminación radiactiva en la zona de Baotou y el río Amarillo. El lago está a doce kilómetros al oeste de esa ciudad y a diez al norte del río Amarillo. Unos 150 millones de personas dependen del río como suministro de agua, por lo que una contaminación radiactiva es un problema muy grave. Producir una tonelada de tierras raras genera en torno a diez mil metros cúbicos de gas residual, conteniendo dióxido de azufre, ácidos fluorhídrico y sulfúrico y polvo concentrado, unos setenta y cinco metros cúbicos de agua residual ácida y alrededor de una tonelada de residuos radiactivos que se acumulan

¹³⁴ MILLS, R.: «How the US lost the plot on rare earths», 2019. <https://www.mining.com/web/us-lost-plot-rare-earths/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹³⁵ PITRON, nota 67, pp. 90-95.

¹³⁶ AsiaNews.it, «China's dilemma: how to mine rare earths whilst protecting reserves and the environment», 2011. <http://www.asianews.it/news-en/China%E2%80%99s-dilemma:-how-to-mine-rare-earths-whilst-protecting-reserves-and-the-environment-21039.html> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹³⁷ EJAtlas, 2020. <https://www.ejAtlas.org/print/bayan-obo-world-biggest-rare-earths-mine-baogang-group-baotou-inner-mongolia-china> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹³⁸ HURST, nota 62.

dentro de Weikuang, que cubre doce kilómetros cuadrados y contiene 150 millones de toneladas de relaves¹³⁹.

El problema de la contaminación genera escepticismo respecto a las tecnologías verdes, y suscita dudas en el sano objetivo de una transición energética y digital. Es fundamental considerar el ciclo completo extracción-aplicación de los elementos de las tierras raras. La globalización para conseguir ganancias económicas está suponiendo una dicotomía con interesada ceguera. En palabras de Pitron¹⁴⁰: «¿No existe una trágica ironía en el hecho de que la contaminación no emitida en las aglomeraciones urbanas gracias a los coches eléctricos sea simplemente desplazada hacia las zonas mineras, donde se extraen los recursos indispensables para la fabricación de estos últimos?». El reto es encontrar las formas de explotar los recursos de las tierras raras de una manera viable, económica y medioambientalmente. Se han desarrollado, al parecer con éxito, dentro de los proyectos Norteamericanos de apertura de minas en su territorio, asimismo que en Australia y la UE¹⁴¹. El proyecto EURARE abordó experiencias piloto de tecnologías adaptadas al tipo de mineral explotable en la UE, de acuerdo con la legislación europea para proteger el medio ambiente de la minería y procesos industriales, emisiones y desechos¹⁴². El medioambiente no es óbice para asegurar el suministro de tierras raras en Europa u otros continentes. Según la experta británica Goodenough¹⁴³: «La mayor barrera para asegurar el suministro de tierras raras a Europa es la dificultad de las empresas para hacer rentables las explotaciones. Existe una gran dependencia con los precios, que están marcados por los vaivenes de los inversores en Bolsa y el equilibrio de oferta y demanda. Es oportuno disponer de un apoyo estatal, al menos inicialmente».

La ironía en toda esta situación está en que el torio puede ser un subproducto rentable dentro de la explotación de los minerales de las tierras raras que lo contengan. Por el contrario, este metal se considera la pesadilla de muchas operaciones mineras y carece de valor debido a sus pocas aplicaciones presentes. El desarrollo de los reactores

¹³⁹ EJatlas, nota 137.

¹⁴⁰ PITRON, nota 67, pp. 80-81.

¹⁴¹ EURARE, nota 128.

¹⁴² KEITH-ROACH, M. *et al.*: «Environmental Legislation and Best Practice in the Emerging European Rare Earth Element Industry», en: «*Rare Earths Industry, Technological, Economic and Environmental Implications*» (Lima, B. & Filho, L., Eds.), Elsevier, pp. 279-291, 2016.

¹⁴³ Ver nota 93.

nucleares para la generación de energía eléctrica ha partido del uranio, elección que permitía la producción de plutonio para armas nucleares. Cuando se escogió la vía uranio-plutonio quedó abandonada otra posibilidad, la opción del torio. Este combustible no genera desechos con grado armamentístico como subproducto¹⁴⁴. El gobierno norteamericano construyó un reactor experimental de sal fundida en el laboratorio de Oak Ridge utilizando como combustible el uranio-233, originado al bombardear torio-232 (único isótopo natural) con neutrones. Funcionó 15 000 horas desde 1965 hasta 1969¹⁴⁵. El torio es mucho menos peligroso que el uranio y una nueva generación de químicos, físicos e ingenieros nucleares estiman que la vía del torio es la llave de una nueva, limpia y segura fuente de energía nuclear¹⁴⁶. La dificultad es un mayor coste y que precisa de un combustible usual, uranio o plutonio, para iniciar su reacción en cadena. Aparte de eso, los reactores nucleares basados en el torio-232 son más eficientes y la tecnología es conocida. Destaca su sencillez. No precisa de grandes cúpulas de contención ni muchos mecanismos de seguridad. Puede ser el destino del exceso de torio encontrado en la minería de las tierras raras¹⁴⁷. Las reservas terrestres de torio son el triple de las de uranio y contienen más energía que todos los demás combustibles fósiles juntos. La monacita es la más importante fuente comercial de torio. Se encuentra en grandes depósitos principalmente en la India, Sudáfrica, Brasil, Australia y Malasia. Contiene de promedio un 2,5 % de torio, aunque algunos depósitos llegan al 20 %. Con el desarrollo tecnológico en marcha, el torio permitiría reactores fáciles de apagar y no originarían productos de deshecho de larga vida, en medio milenio la radioactividad se habría disipado.

A pesar de ello, hay quien lo considera una costosa distracción. Según Nils Bohmer, físico nuclear y miembro de la organización ecologista noruega Bellona: «Al desarrollo tecnológico le faltan décadas. En cambio, creo que deberíamos concentrarnos en desarrollar tecnología renovable. Por ejemplo, tecnología eólica de altamar, que tiene un enorme potencial»¹⁴⁸. A día de hoy, entre los proyectos modernos de reactores de

¹⁴⁴ VERONESE, nota 107, pp. 180-181.

¹⁴⁵ Una revisión en detalle del tema, con la situación actual, fortalezas y debilidades en: https://en.wikipedia.org/wiki/Thorium-based_nuclear_power Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹⁴⁶ VERONESE, nota 107, p. 178.

¹⁴⁷ VERONESE, nota 107, p. 179.

¹⁴⁸ HARRABIN, R.: «Torio: ¿el combustible nuclear del futuro?», BBC (6 nov. 2013). https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/11/131031_ciencia_torio_combustible_nuclear_np Fecha de la consulta 25.01.2021.

sal fundida, el de fluoruro de torio líquido se halla bajo investigación y desarrollo por una quincena de países, incluida la UE. En 2020, China es el único país que está construyendo dos reactores de ese tipo en el desierto del Gobi, para arrancarlos en 2030. Ha elegido ese tipo de reactor como esencial para su estrategia energética a medio y largo plazo¹⁴⁹ a la que ha destinado, primero 750 y luego 400 más, científicos e ingenieros¹⁵⁰.

Retorno de la minería y la industria

En 1976, el gobierno de la República Popular China inició el sendero (Tabla 4) de la independencia tecnológica, que espera culminar hacia 2025 como líder mundial de la transición energética y digital. Los elementos de las tierras raras son su principal herramienta: investigar nuevas propiedades, registrar patentes y explotar aplicaciones, participar en las explotaciones mineras de otros países. Nada nuevo bajo el sol que ilumina las ambiciones humanas en nuestro planeta. El 13 de junio de 1944, Theodore Roosevelt y Winston Churchill firmaron un acuerdo de colaboración entre ambas naciones «para la consecución de los mecanismos necesarios para controlar muchos yacimientos mundiales de mineral de uranio y torio, durante y después de la guerra»¹⁵¹. Pretendía que «en el caso de que al concluir el conflicto diera comienzo una carrera armamentística, Estados Unidos contase con suficientes materias primas para asegurarse la supremacía»¹⁵². Unos siglos antes Daniel Defoe había escrito¹⁵³ cómo tenía que ser la intervención estatal inglesa para convertir la industria textil en factor primordial del desarrollo económico. Brevemente: proteger manufacturas nacionales gravando con impuestos las importaciones al tiempo que se cargaba con tasas la exportación de lana en bruto, y desplegar una política activa de espionaje de la industria holandesa, así como captar personal cualificado de los Países Bajos. Dependier por completo de los demás, y encima reivindicarlo, es lo que hasta hace

¹⁴⁹ TENNENBAUM, J.: «Reactores de sal fundida (MSR) y de onda progresiva», 2020. <https://msiainforma.org/es/espanol-reactores-de-sal-fundida-msr-y-de-onda-progresiva/> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹⁵⁰ VERONESE, nota 107, p. 182.

¹⁵¹ WATSON, P.: «*Historia secreta de la bomba atómica*», Editorial Crítica, Barcelona, p. 359, 2020.

¹⁵² *Ibidem*.

¹⁵³ DEFOE, D.: «*A Plan of the English Commerce*», Vernon Art and Science (New Edition 2013), 1728.

poco parecía una política absolutamente suicida, ahora se ha convertido en lo más natural del mundo¹⁵⁴. La crisis de 2009-2013 en el suministro de tierras raras y el dominio del mercado por China, a través de los precios y exportaciones, llevó a una situación de pánico en los usuarios y sus gobiernos. En 2020 el dominio chino sigue aportando en torno a la mitad del suministro mundial¹⁵⁵, controlado por cuotas asignadas a sus seis empresas estatales. El impacto de la pandemia de la COVID-19 ha puesto aún más de relieve la dependencia de los consumidores de energía renovable, y de otras materias primas y productos elaborados, del suministro chino. La situación parece cambiar. La implementación de estrategias para reducir la dependencia de los suministros chinos se ha acelerado desde mediados de 2019 con la participación directa de los gobiernos de EE. UU., Rusia, UE, Australia y Japón (Tabla 5) mediante incentivos fiscales y económicos. Cada vez hay una mayor diversificación de las fuentes de suministro. Pitron en su clarificador, preocupante y provocador libro lo particulariza: Japón ha llegado a acuerdos con la India para importar tierras raras y despliega una agresiva diplomacia con Australia, Kazajistán y Vietnam; Alemania busca alianzas mineras con Mongolia; geólogos de Corea del Sur conversan con los de su vecino del Norte...¹⁵⁶. La previsión de Roskill precisa que «si bien China conserva su posición dominante tanto en la oferta como en la demanda de tierras raras, el aumento de la producción minera y de tierras raras refinadas no afiliadas a China es una tendencia clave, necesaria no solo para satisfacer la creciente demanda mundial, sino también para satisfacer los requisitos cambiantes de los consumidores intermedios»¹⁵⁷.

El principal problema que se encuentran los países hogaño es doble. Por una parte, ha acontecido una pérdida de expertos y abandono de las minas, que emigraron a China, donde aumenta constantemente el número de especialistas en tierras raras. Solo hay que revisar las publicaciones científicas. Una conferencia sobre tierras raras atrae a medio millar de científicos en China mientras que en Norteamérica solo un centenar.

¹⁵⁴ PITRON, nota 67, p. 106.

¹⁵⁵ En España, las importaciones de tierras raras son de 550 toneladas al año para la fabricación de vidrios y de cerámicas. Su procedencia es principalmente de China. También se importan cantidades menores de Austria, Francia e Italia. Las implicaciones para la Seguridad Nacional son muy limitadas y se asociarían a un contexto más amplio de eventual inestabilidad de los mercados globales y subida temporal de precios asociada a la denominada «guerra comercial». <https://www.dsn.gob.es/es/actualidad/sala-prensa/tierras-raras> Fecha de la consulta 25.01.2021.

¹⁵⁶ PITRON, nota 67, p. 199.

¹⁵⁷ ROSKILL, nota 130.

Por otra parte, como señala Abraham en su interesante libro¹⁵⁸ «la edad media de la mano de obra minera roza los cincuenta (...) en Canadá unos sesenta mil trabajadores se retiran en 2020 y el sector puede necesitar cien mil para atender la demanda».

Europa y América precisan de especialistas, científicos, tecnólogos y empresarios para explotar los recursos propios de elementos y materiales críticos, a la vez que patentar aplicaciones y fabricar dispositivos de alta tecnología. El cuello de botella no es económico o geológico sino humano, y para entrenar a buenos ingenieros y metalúrgicos hacen falta años. Abraham reconoce con pesar que muy pocas personas estudian las tierras raras, solo una universidad norteamericana ofrecía esa especialidad en 2015 y que los 25 000 empleados en esa industria en 1970 se redujeron a 1500 en 2010¹⁵⁹. Es de esperar que esta grave decadencia mengüe con el reciente impulso hacia la minería en suelo occidental, con todo la experiencia enseña que hacen falta sobre quince años para hacer plenamente operativa una mina de tierras raras.

Finalmente, está el papel clave de la industria y el comercio, donde las compañías multinacionales tienen también su rol. Pueden actuar atendiendo a intereses propios, los cuales no tienen por qué ser necesariamente coincidentes con los nacionales. Durante la crisis con China, las compañías japonesas actuaron según el mejor interés comercial para la compañía, no necesariamente concurrente con el de Japón¹⁶⁰. A nivel mundial hubo un continuo éxodo de compañías extranjeras hacia China, que ofrecía un acceso a bajo coste e ilimitado de los recursos. Allí, su secreta tecnología estaba en riesgo y sus especialistas desaparecieron del suelo patrio. En este complejo círculo de intereses adviene la globalización. En lo que atañe a las grandes empresas internacionales con intereses en China se crea una dualidad, un conflicto de intereses que se ve reflejado en las decisiones políticas, bien en la propia defensa nacional o en la de las compañías con base en su país. Ello puede ser una sustancial causa de la situación reinante en la sociedad norteamericana. Lo que acaece con las tierras raras solo son un síntoma más de esa dualidad y ahora sufre la debilidad de la cadena global de suministros. Pitron, en su libro recoge el escándalo, con varias decenas de condenados, bautizado como

¹⁵⁸ ABRAHAM, nota 31, p. 85.

¹⁵⁹ *Ibidem*, p. 195.

¹⁶⁰ *Ibidem*, p. 205.

Chinagate¹⁶¹: el apoyo económico chino a la reelección de Clinton en las presidenciales de 1996. Anteriormente, obligada por Clinton, la administración norteamericana había compartido con China secretos industriales de su tecnología de misiles. Tanto para esos metales como para la transición energética, parece que la respuesta a la crisis de 2009-2013 camina hacia una defensa de lo propio, alejada de una globalización estricta. En otro sentido, durante la sesión inaugural (25/1/2021) del Foro de Davos, el presidente chino ha dicho: «Ahora [en China] desempeñaremos un papel más activo para fomentar una globalización económica mundial que sea más abierta, inclusiva, equilibrada y beneficiosa para todos»¹⁶². Tras las interrupciones de la producción industrial relacionadas con la COVID-19, la previsión a corto plazo para las tierras raras, según recoge Roskill¹⁶³, es una fuerte recuperación de la demanda en 2021. Aumentaría un 10 % interanual respaldado por una Agenda Verde objetivo de muchos gobiernos nacionales y organismos internacionales, que buscan reducir las emisiones de carbono.

A medio plazo no conviene olvidar que el crecimiento chino, que es superior al de sus competidores, resulta un formidable consumidor de energía. China está impulsando ampliamente la producción de energía propia, junto con una intensa búsqueda de recursos mineros fuera de su país, incluidas las tierras raras, previendo que la producción propia no sea suficiente para el consumo interno. El problema lo señala Kalantzakos¹⁶⁴: «Aunque los gobiernos democráticos al responder a la gestión de China de la crisis de tierras raras lograron un cierto nivel de cooperación (principalmente científica y diplomática), no formularon ni promulgaron un plan estratégico central que proporcionara una alternativa viable a la posición dominante de China en la industria».

Releyendo en la historia la política proteccionista, consecuente con Disraeli, del primer ministro inglés Robert Walpole y del nuevo orden mundial de Roosevelt, da la impresión, con las tierras raras por testigo, de que, tras el Imperio norteamericano, que siguió al Imperio británico, se vislumbra en el horizonte la posibilidad un nuevo Imperio, el chino.

¹⁶¹ PITRON, nota 67, pp. 175-176.

¹⁶² DE LA CAL, L.: Xi Jinping inaugura Davos pidiendo multilateralismo: «El mundo no volverá a ser lo que fue en el pasado», 2021. Es un sugestivo artículo en la sección de Macroeconomía del periódico *El Mundo*. <https://www.elmundo.es/economia/macroeconomia/2021/01/25/600edf7d21efa091338b45a0.html>
Fecha de la consulta 27.01.2021

¹⁶³ ROSKILL, nota 130.

¹⁶⁴ KALANTZAKOS, S.: «*China and the Geopolitics of Rare Earths*». Oxford University Press, Nueva York, p. 167, 2018.

*Ricardo Prego Reboredo**