

Minería, mercados y precios de las tierras raras

Raquel Vergara Espuelas (1*)

(1) Quantum Minería S.L. C/Santander 3, 28040, Madrid (España)

* corresponding author: raquel.vergara@quantummineria.es

Abstract:

Rare-earth elements (REE) are one of the most important types of strategic raw materials for European Union's economy, as they are needed in all leading-edge industries, and because of the lack of its own production in Europe and the enormous dependence on a single provider. China is the major supplier of these elements, accounting for 62% of the total supply to the E.U. and 80% to USA. The risks associated with the REE's production concentration have caused concern in the market due to the vulnerability of the western high-tech industry.

With this geopolitical scenario, the Matamulas Project, whose main mineral is grey monazite (REE-bearing phosphate), is more relevant than ever: it would be the first European REE mine that could supply up to 32% of European demand in the next ten years. It has exceptional geochemical characteristics which make it a singular ore deposit because it has non-significant content of radioactive elements, it is rich in critical elements such as neodymium and praseodymium, and it offers the possibility of a simple exploitation without needing additives or waste tails.

Resumen:

Los elementos de las tierras raras (TTRR) figuran en lo más alto de la lista de materias primas estratégicas importantes para la economía de la Unión Europea, al ser necesarios para todas las industrias de vanguardia, carecer de producción propia y tener gran dependencia de un único proveedor. China es el principal suministrador de estos elementos, representando el 62% del abastecimiento de la U.E. y el 80% de EE.UU. Los riesgos derivados de la concentración de la producción de TTRR han generado preocupación en el mercado por la vulnerabilidad de la industria occidental de alta tecnología.

Con este escenario geopolítico, el proyecto Matamulas, cuyo mineral principal es la monacita gris (fosfato de TTRR), cobra más relevancia que nunca, ya que sería la primera mina europea de TTRR y podría abastecer el 32% de la demanda europea en los próximos diez años. Presenta unas características geoquímicas excepcionales que lo hacen un yacimiento singular por tener un insignificante contenido en elementos radiactivos, ser rico en elementos críticos como el neodimio y el praseodimio, y ofrecer la posibilidad de explotación sencilla sin necesidad de aditivos ni escombreras.

Palabras Clave: Elementos de Tierras Raras, Monacita Gris, Materias Primas Estratégicas. | **Key Words:** Rare Earth Elements, Grey Monazite, Strategic Raw Materials.

LAS TIERRAS RARAS

Las tierras raras (TTRR) constituyen un grupo de 17 elementos químicos, dentro del cual se encuentran los 15 lantánidos (bloque 'f' de la tabla periódica), el ytrio y el escandio. Todos ellos tienen características muy afines y se presentan normalmente asociados en la naturaleza, con radios iónicos muy parecidos (exceptuando el Sc, menor al resto) y comportamientos físico-químicos muy semejantes, lo cual hace difícil su separación. Son elementos críticos porque son, en la mayoría de sus aplicaciones, insustituibles, siendo vulnerables a las restricciones de suministro, y su uso, esencial.

Estos 17 elementos son los siguientes: lantano (^{57}La), cerio (^{58}Ce), praseodimio (^{59}Pr), neodimio (^{60}Nd), prometio (^{61}Pm), samario (^{62}Sm), europio (^{63}Eu), gadolinio (^{64}Gd), terbio (^{65}Tb), disprosio (^{66}Dy), holmio

(^{67}Ho), erbio (^{68}Er), tulio (^{69}Tm), yterbio (^{70}Yb), lutecio (^{71}Lu), escandio (^{21}Sc) e ytrio (^{39}Y).

Este grupo de elementos químicos se suelen dividir en dos categorías en función de su peso atómico: ligeros y pesados (Fig. 1). Las TTRR ligeras representan los lantánidos con los números atómicos más bajos (como es el caso del praseodimio o del neodimio, entre otros), mientras que las pesadas son las que presentan números atómicos más altos (como el disprosio o el terbio). Las TTRR pesadas son menos comunes que las ligeras, y en ellas se incluye el ytrio, a pesar de ser más ligero que las TTRR ligeras, por sus asociaciones físico-químicas con las TTRR pesadas en depósitos naturales.

Aunque son relativamente abundantes en la corteza terrestre, es difícil encontrar TTRR en concentraciones explotables. Esto hace que su obtención sea un reto económico significativo.

21 Sc	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd
TTRR Ligeras								
65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	39 Y	
TTRR Pesadas								

Fig 1. Clasificación de las TTRR (serie de lantánidos más ytrio y escandio) en función de su configuración electrónica (adaptado de Castilloux, 2018).

Las TTRR se encuentran mayoritariamente en cuatro entornos geológicos: carbonatitas, sistemas ígneos alcalinos, depósitos de arcilla de adsorción de iones y depósitos de tipo placer. Si bien hay más de 200 tipos de minerales que contienen cantidades apreciables de algunas TTRR, solo se consideran tres de ellos como las principales fuentes de estos elementos: bastnasita, xenotima y monacita. La monacita y la xenotima (minerales del grupo de los fosfatos) pueden aparecer conjuntamente, aunque cristalizan a diferentes condiciones de temperatura y presión. Estos minerales pueden contener cualquier tipo de TTRR, ya sean ligeras o pesadas, aunque su enriquecimiento es variable en función del régimen de temperatura y presión en el cual se han formado. En el caso de la monacita, existen dos tipos: la amarilla y la gris. La monacita gris se caracteriza, entre otras peculiaridades, por los bajos contenidos en elementos radiactivos tales como torio y uranio. Esta característica es la que la diferencia completamente de la monacita amarilla común, de origen magmático o hidrotermal, la cual es rica en torio y uranio. La formación de la monacita gris aún no se comprende bien, pero hay estudios que la relacionan con la liberación y posterior fijación de los elementos de TTRR, inicialmente adsorbidos sobre minerales de arcilla, durante la diagénesis y el metamorfismo de bajo grado (Burnotte *et al.*, 1989).

En concreto, en el yacimiento Matamulas existe monacita gris con una densidad de 4,65 kg/l y una dureza de entre 5 y 5,5 en la escala de Mohs. Este depósito se encuentra inscrito en los términos municipales de Torrenueva y Torre de Juan Abad, en la provincia de Ciudad Real (España).

APLICACIONES DE LAS TIERRAS RARAS

Los lantánidos, el ytrio y el escandio son muy buenos conductores de la electricidad y destacan por sus propiedades magnéticas. Éstas pueden ser adaptadas, mediante la variación de composición de sus aleaciones, con el fin de crear imanes con comportamientos específicos según su uso final. Debido a sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas, las TTRR son fundamentales en campos como la energía, las telecomunicaciones y la medicina, así como para la

producción química, el refinado y ciertos procesos de fabricación, donde confieren resistencia y estabilidad. Sus principales usos son para:

- **Energía limpia:** en este campo son muy demandados los imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB), que han reemplazado a otras variedades de imanes al ser los que ofrecen mayor producción de flujo magnético por unidad de volumen. Son muy demandados en multitud de aplicaciones, empleándose en la fabricación de herramientas inalámbricas y motores, principalmente para vehículos eléctricos y aerogeneradores, contribuyendo a la mejora de su eficiencia energética y, con ello, a la reducción de las emisiones de CO₂.
- **Industria aeroespacial y defensa:** las TTRR son esenciales para sistemas de posicionamiento global (GPS), sónar, sistemas de defensa, tecnologías de resolución o láseres. En este caso, también son muy demandados los imanes permanentes por su gran resistencia magnética a altas temperaturas.
- **Productos de alta tecnología:** las TTRR son fundamentales para mejorar las prestaciones en dispositivos electrónicos, los cuales cada día requieren mayor rapidez, eficiencia, durabilidad, así como menor tamaño y peso. Estos productos son, principalmente, teléfonos móviles, ordenadores, tabletas, altavoces, discos duros, fibra óptica, etc.
- **Cuidado de la salud:** son esenciales para la medicina moderna, ya que permiten un diagnóstico precoz y tratamiento de una gran variedad de enfermedades mediante imagen por resonancia magnética o por tomografías por emisión de positrones. También son utilizados en máquinas quirúrgicas modernas como las de cirugía asistida por robots o en tecnologías pioneras para implantes cocleares. Además, los medicamentos que incorporan TTRR son utilizados para tratamientos de cáncer de pulmón, próstata, mama y huesos, así como para la artritis reumatoide.
- **Aleaciones metálicas:** en el campo de la metalurgia, las TTRR tienen numerosas aplicaciones, principalmente como potenciadores de determinadas características físicas: reducción del peso, mayor resistencia a torsiones, temperaturas o corrosión. Destacan las superaleaciones, las aleaciones de aluminio-magnesio, la aleación de cerio y lantano (*mischmetall*) que, junto al neodimio, se emplea en la fabricación de los electrodos negativos de las baterías recargables (Ni-MH).
- **Luminiscencia (materiales fosforescentes y fluorescentes):** las TTRR, en combinación con el fósforo, hacen posible visualizar las pantallas de los dispositivos electrónicos en color. También, se emplean en la fabricación de LED, lámparas fluorescentes compactas, dispositivos láser, sistemas de visión nocturna, etc.
- **Catalizadores y procesos químicos:** el cerio y el lantano se utilizan como potenciadores en los catalizadores que se emplean en la industria del petróleo para el craqueo catalítico de los

hidrocarburos ligeros. Las TTRR también están presentes en los catalizadores de los vehículos e incluso en los hornos pirolíticos.

- Cristales y cerámicas: las TTRR son ampliamente utilizadas en la fabricación de vidrio y cerámica, siendo ésta la primera industria en emplearlos. Se utilizan como componentes de pulido de vidrio, lentes y pantallas, además de como aditivo del propio vidrio para decolorarlo, en filtros de color y como material protector de la radiación UV. En cuanto a sus aplicaciones cerámicas, las TTRR se emplean para la fabricación de condensadores, sensores, celdas de combustible o como colorantes.
- Otras aplicaciones: estos elementos también se usan para la fabricación de fertilizantes, tratamiento de aguas, aditivos para pigmentos, en joyería, etc.

En la Figura 2 se observa la demanda de los elementos de TTRR, en 2017, por aplicación.

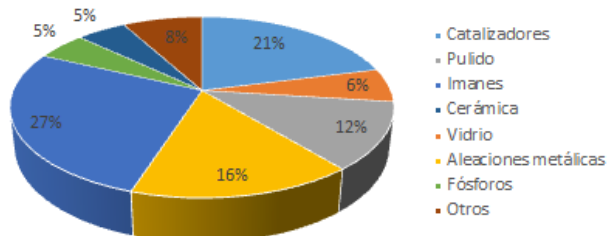


Fig 2. Porcentaje de demanda según el uso final de las TTRR (Chalmers y MacDonald, 2017).

MERCADO DE LAS TTRR

El mercado de TTRR ha estado dominado por China, tanto en términos de oferta como de demanda, durante más de 20 años. Además de producción y reservas, China ha sabido desarrollar la tecnología y el conocimiento necesario para poseer la mayor parte de la capacidad de procesamiento del mundo. Por ejemplo, entre 2014 a 2017, suministró el 80% de los óxidos de TTRR (REOs, por sus siglas en inglés) importadas por los EE.UU.

Con este escenario, la dependencia de China por parte de la industria occidental es absoluta, y las previsiones son que continuará siendo el líder del mercado en un futuro a corto-medio plazo. Esto se debe, principalmente, a que otros países, productores o con reservas, no tienen una capacidad de reacción rápida y suficiente como para hacer frente a las previsiones del mercado, al no estar la minería y el procesamiento de estos elementos lo suficientemente desarrollados.

Producción y reservas de TTRR

Según los datos del United States Geological Survey (2019), en 2018 China representó algo más del 70% de la producción mundial de TTRR, con 120.000 toneladas métricas. Aunque la producción de REOs ha ido

aumentando desde 2012 en prácticamente todos los países productores, destacando Australia y Rusia, la hegemonía por parte de China es clara (Fig. 3).

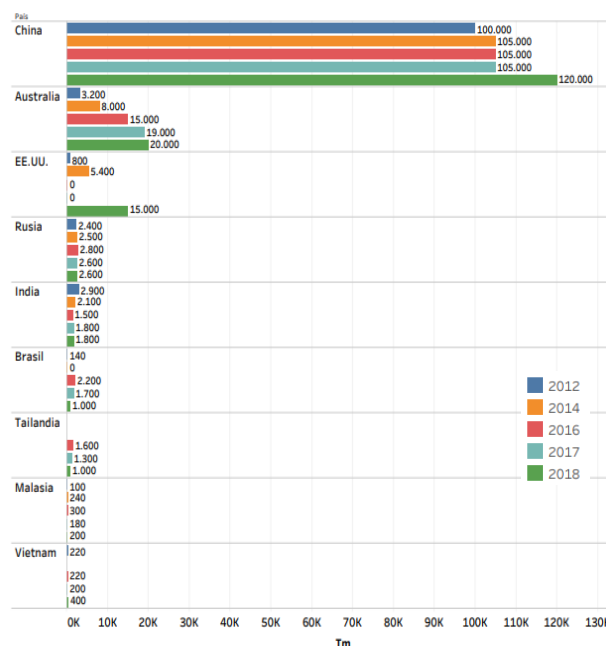


Fig 3. Principales países productores de REOs (en toneladas métricas) desde 2012 hasta 2018. Elaboración propia a partir de los datos de United States Geological Survey (2019).

La estimación de reservas mundiales totales de TTRR a finales de 2018 (Fig. 4) es de alrededor de los 120 millones de toneladas métricas. China representa aproximadamente el 38% de las reservas, con 44 millones de toneladas, seguido de países como Brasil, Vietnam, Rusia, India y Australia (United States Geological Survey, 2019).

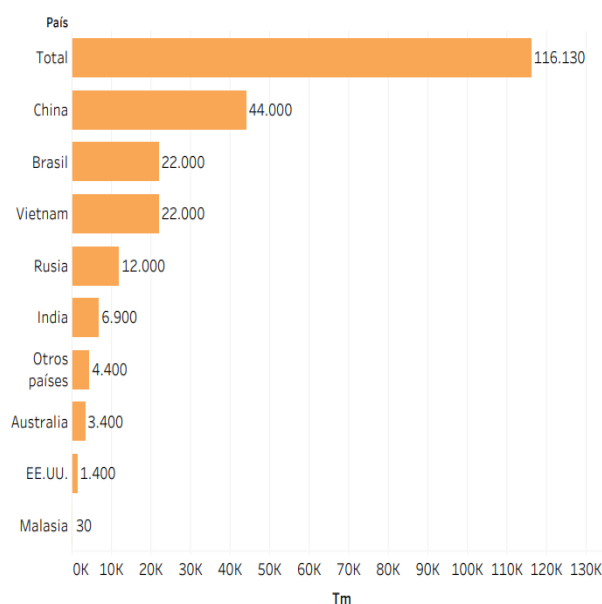


Fig 4. Reservas de REOs mundiales por país (en miles de toneladas métricas), estimadas a finales de 2018. Elaboración propia a partir de los datos de United States Geological Survey (2019).

En EE.UU. la única mina de TTRR en producción es la de Mountain Pass (California), cuya producción total es enviada a China (en forma de concentrado) para ser refinada en plantas de procesamiento (Mining Technology, 2015). Este depósito, cuya explotación a gran escala comenzó en los años 60, ha tenido periodos de alta actividad y otros de interrupción, en respuesta a restricciones ambientales y a la competencia de proveedores chinos. En 2015, tras una gran inversión para la construcción de una planta de procesamiento de concentrado de TTRR, iniciada en 2011 y cuando ésta estaba en plena producción, la empresa propietaria quebró y tuvo que abandonar su actividad. En el tercer trimestre de 2017, un grupo inversor, mayoritariamente estadounidense pero con participación china, compró la mina y comenzó su producción a principios de 2018, enviando el concentrado a China, tal y como se ha expuesto anteriormente. Sin embargo, la estrategia empresarial del grupo es reanudar la operación de la planta de separación química en 2020, para producir directamente REOs, minimizando la dependencia de China y garantizando su autoabastecimiento.

Por otra parte, en mayo de 2019, la empresa australiana Lynas Corporation, Ltd. (en adelante Lynas) la primera empresa productora de este mineral fuera de China y propietaria de la mina Mount Weld, ha anunciado una gran inversión para la construcción de una planta de tratamiento (*upstream*) cerca del yacimiento, manteniendo el procesamiento (*downstream*) en Malasia, cerca de sus clientes naturales. Con esta estrategia la empresa espera aumentar su producción de óxidos de neodimio y praseodimio a 10,5 kt al año. El mineral extraído tiene un alto porcentaje de elementos radioactivos, lo cual ha sido el desencadenante de una serie de problemas con el gobierno malayo, quienes a finales de 2018 obligaban a Lynas a retirar de su territorio 450.000 toneladas de residuos radioactivos almacenados en su planta de procesamiento. Esta exigencia debe cumplirse antes de septiembre 2019, pero la empresa ya ha anunciado que le será imposible acometerla dentro los plazos establecidos.

Consumo y precios de las TTRR

En los próximos años se espera un aumento de la demanda de las TTRR a nivel global, pasando de 120.000 t de REOs en 2017 a 190.000 t en 2026 (Castilloux, 2017). Esta previsión de aumento sustancial del consumo se debe, principalmente, a una mayor necesidad de componentes para cuya fabricación se utilizan estos REOs, como es el caso de los imanes permanentes de NdFeB empleados en energías limpias.

Según Castilloux (2018), la demanda prevista para los próximos diez años de óxidos de neodimio, praseodimio y disprosio es mayor que la producción estimada, lo que desequilibrará la balanza comercial entre oferta y demanda. En el caso concreto del óxido de disprosio, este desequilibrio se produciría incluso si se redujese su uso un 30% en la fabricación de diversos componentes

(Fig. 5). Por el contrario, esto no ocurrirá con otros óxidos de TTRR, como el cerio o el samario, para los cuales se prevé que existirá un excedente de producción.

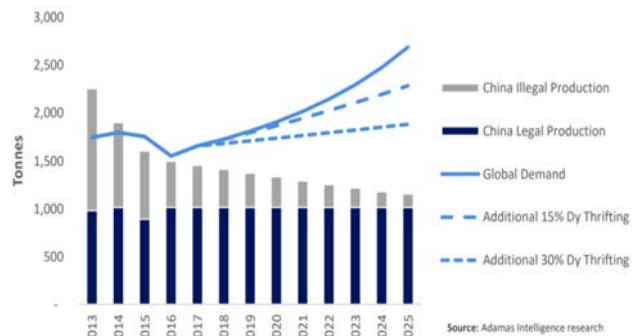


Fig. 5. Histórico y previsión de la producción de Dy en China (legal e ilegal). Demanda mundial de Dy hasta 2017, y previsión hasta 2025 con tres posibles escenarios: demanda de Dy esperada, con una reducción de 15% en su uso en imanes permanentes, y con reducción del 30% (Castilloux, 2018).

En cuanto a los precios de estos elementos (Fig. 6), se mantuvieron constantes durante el periodo comprendido entre 1990 y 2010. A partir de ese momento los precios de algunos REOs aumentaron de forma significativa, alcanzando un nivel máximo a mediados de 2011, lo que demuestra la volatilidad de su mercado, antes de disminuir a lo largo de los dos años siguientes por la desaceleración económica y el reciclado de algunos de estos elementos, que redujeron el consumo unitario de TTRR. Como ejemplo, el óxido de Nd que incrementó su precio en 6 veces, para luego bajar alrededor de los 80\$/kg.

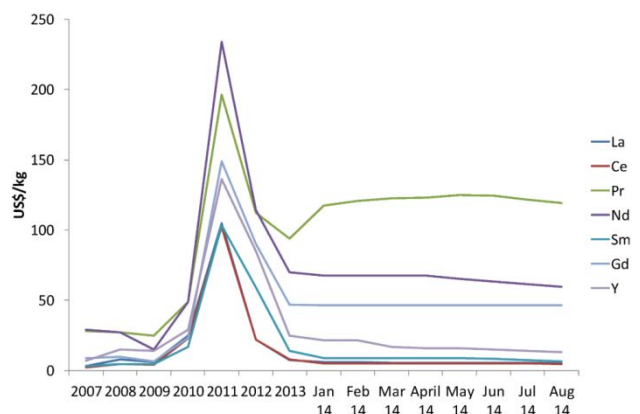


Fig. 6. Evolución de los precios (en \$/kg) de varios REOs de 2007 hasta mediados de 2014 (Nawsbad et al., 2014).

Entre 2014 y principios de 2017 los precios de los óxidos de Nd y Pr, entre otros, se estabilizaron, mostrando una clara resistencia a un mayor declive. Sin embargo, otros óxidos, como el de disprosio o el de erbio, tuvieron un incremento significativo a principios de 2015, para luego disminuir y mantenerse casi invariables. En mayo de 2017, los precios de algunos REOs ligeros, especialmente el de neodimio y el de praseodimio, comenzaron a subir debido al impulso de las energías renovables y al hecho de que China emprendió una serie de acciones contra la producción ilegal en sus propias

minas. El máximo se alcanzó en agosto de 2017 y, aunque se preveía que esta tendencia se mantendría a corto-medio plazo, el precio volvió a caer en los meses siguientes. No obstante, esta bajada no llegó a los niveles de años anteriores, manteniéndose desde entonces prácticamente constantes. En la Figura 7 se muestran los precios (en \$/kg) de los óxidos de Dy, Er, Eu, Nd y Pr, desde finales de 2014 hasta el tercer trimestre de 2019, existiendo una clara diferencia entre las TTRR pesadas y las ligeras (las primeras más caras al ser más buscadas y su separación más costosa). A pesar de ello, se puede observar que todos ellos tienen un comportamiento similar y reaccionan a los acontecimientos del mercado de manera análoga.

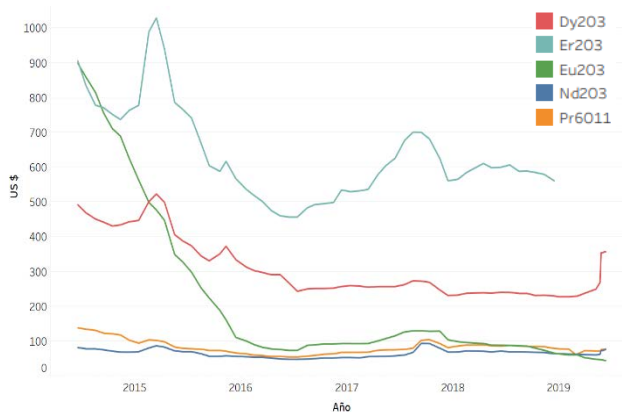


Fig 7. Evolución de los precios (en \$/Kg) de varios REOs desde finales de 2014 hasta el tercer trimestre de 2019. Elaboración propia a partir de los datos de KITCO (2019).

Teniendo en cuenta la escasez de suministro prevista, expuesta anteriormente, ligada a barreras ambientales y arancelarias, la mayoría de los analistas esperan un crecimiento importante del precio de ciertos óxidos de TTRR (especialmente de Nd, de Pr y de Dy).

Situación europea y española

Europa no tiene producción propia y se abastece, principalmente, de las TTRR procedentes de China. Por ello, y con el plan de paliar la dependencia de China y cumplir los objetivos vinculantes recogidos en el marco sobre Clima y Energía para 2030, la Unión Europea está promoviendo el estudio y la extracción de estos minerales en su territorio, con proyectos tales como EURARE (EURARE, 2017), que se llevó a cabo entre 2013 y 2017.

El objetivo principal de este proyecto era establecer las bases para el desarrollo sostenible de la industria europea de elementos de TTRR, reduciendo la dependencia del suministro. Se trabajó para definir y evaluar los recursos de TTRR explotables, y desarrollar tecnologías sostenibles y eficientes que permitiesen el procesamiento y refino de los concentrados para la obtención de óxidos, metales y aleaciones de TTRR, minimizando los residuos asociados y cumpliendo la normativa ambiental europea. Aunque actualmente no hay ningún yacimiento en

producción, Europa posee numerosos depósitos e indicios de TTRR (Fig. 8), en los que se centró el proyecto EURARE. En concreto, existen cuatro minas con un alto grado de exploración de reservas y avance tecnológico en plantas piloto de beneficio y extracción mineral. Estas minas son: Kvanefjeld y Kringlerne (depósitos encajados en rocas ígneas alcalinas) en el sur de Groenlandia, Norra Kärr (depósito intrusivo de nefelina-sienita peralcalina, enriquecido en TTRR pesadas) en el sureste de Suecia, y Aksu Diamas (depósito de tipo placer) en Turquía. Los tres primeros se podrían poner en marcha, como pronto y según las condiciones de mercado del momento, en 2020, pudiendo convertirse en proveedores europeos de varios tipos de productos de TTRR.

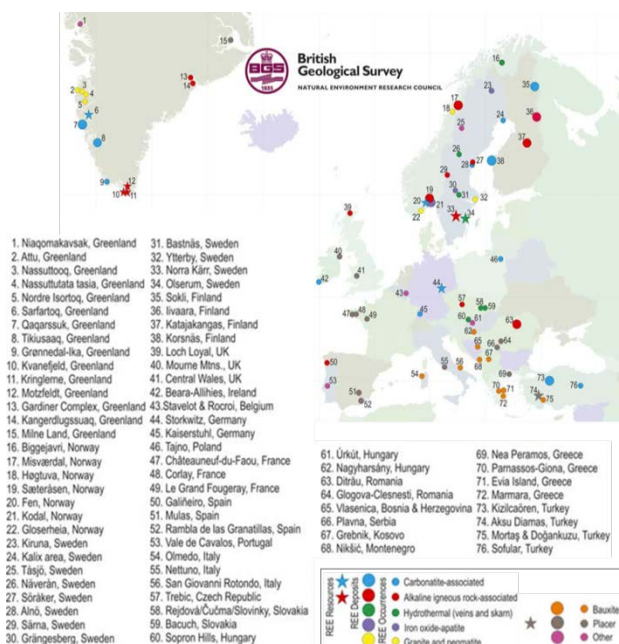


Fig 8. Mapa de los depósitos, recursos e indicios de TTRR en Europa hasta 2017. BGS © UKRI, Proyecto EURARE 2013-2017 (British Geological Survey, 2017).

Sin embargo, en Europa existen barreras significativas tanto para el lanzamiento de nuevos proyectos mineros como para la implantación de plantas de procesamiento y refino de concentrados minerales. Si bien es cierto que se ha demostrado la viabilidad técnica del tratamiento metalúrgico y separación química de las TTRR que podrían producirse en nuestro territorio, se requiere una gran inversión para la construcción y puesta en marcha de las respectivas plantas de procesamiento. Las empresas promotoras de estos proyectos tienen que asumir una gran inversión y, en la mayoría de los casos, hacer frente a una importante oposición social. Por ello, los gobiernos de todos los estados miembros deberían promover la exploración y explotación de proyectos vitales para la economía de la UE, siempre exigiendo el estricto cumplimiento de la legislación ambiental vigente.

Hasta 2010, España estaba a la cabeza en consumo de energía primaria procedente de las energías renovables, y actualmente representa el 17% de la energía consumida.

Se ha pasado de tener 2 megavatios instalados en 1990 a 23.200 megavatios registrados en 2018. Esta tendencia energética se mantiene, fijándose como objetivos principales para 2050 alcanzar la neutralidad climática con la reducción de al menos un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero y conseguir un sistema eléctrico 100% renovable. Para ello, el gobierno de España ha tomado una serie de medidas con el objetivo de impulsar el uso de energías renovables, reduciendo al máximo la utilización de combustibles fósiles y promoviendo la movilidad sostenible, entre otros (Fig. 9). Para mejorar el *mix* energético y reducir la dependencia exterior, es necesario aumentar la inversión para llevar a cabo planes específicos de acción que impulsen el desarrollo e implantación de tecnologías en el ámbito de las energías renovables y la eficiencia energética.

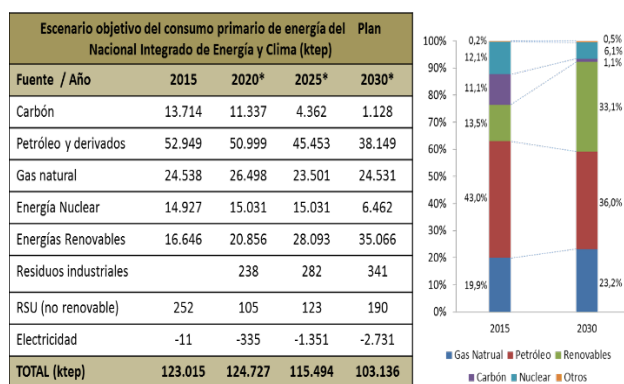


Fig 9. Consumo primario de energía, incluyendo usos no energéticos, en el escenario objetivo del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (Ministerio de Transición Ecológica, 2018).

En este contexto, el proyecto Matamulas cobra especial relevancia, ya que es el único proyecto europeo que podría comenzar su producción a corto plazo, abastecería una tercera parte de la demanda europea durante los próximos diez años y alberga un alto porcentaje de elementos críticos esenciales para la fabricación de numerosas tecnologías altamente demandadas.

PROYECTO MATAMULAS

El yacimiento Matamulas fue descubierto en los años 90 a raíz de las investigaciones sobre meta-areniscas de rutilo-zircón que llevó a cabo la empresa nacional ADARO en la zona del Campo de Montiel (Ciudad Real), bajo el Programa de Investigación Sistemática de Recursos Minerales (Proyecto: Zona Centro), cuyos resultados fueron recogidos en varios informes anuales durante el periodo en el que se prolongó el proyecto (ADARO, 1991, 1992). Tras la realización de una campaña regional mineralométrica, se localizó un valor extremadamente alto de fosfatos de TTRR en la Sierra de Cabeza de Buey, donde se manifestaba disperso en un depósito aluvial. Se trata de un depósito de tipo placer formado por un aluvión no consolidado de arenas y arcillas. Este aluvión alberga nódulos de monacita gris,

con forma redondeada, y un tamaño variable entre 0,2 y 2,0 mm (Fig. 10).

Entre 2013 y 2015, Quantum Minería solicitó cuatro permisos de investigación en esta zona, reanudando la exploración minera, en base a la información recopilada anteriormente, que culminó con la solicitud de tres concesiones de explotación derivadas de dos de los permisos.

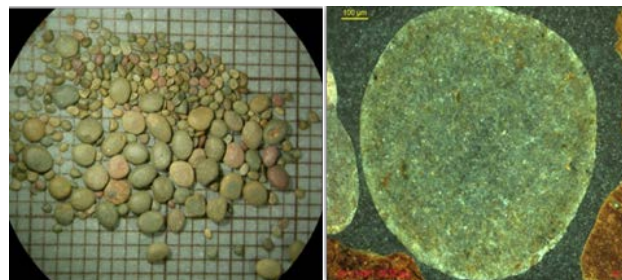


Fig 10. La imagen de la izquierda muestra los nódulos de monacita gris, sobre cuadrícula milimétrica, entre 0,2 y 2 mm de tamaño, con formas redondeadas y colores similares, que manifiestan la homogeneidad del fosfato de TTRR. La imagen de la derecha muestra el detalle de un nódulo de monacita al microscopio (barra escala: 100 micras), con recubrimiento micáceo que indica poco transporte antes del depósito. (Quantum Minería, 2016).

La monacita gris es el único mineral con interés económico del yacimiento, siendo un fosfato de TTRR procedente de las rocas paleozoicas meteorizadas. Su composición química, expresada como porcentaje en peso, es de 60% de óxidos de TTRR totales (TREO, por sus siglas en inglés, que representa la suma total de los diferentes REOs), 23 % de óxido de fósforo, 10% de óxido de silicio y 7% de óxidos de hierro.

La monacita gris del yacimiento Matamulas presenta un contenido insignificante de torio y uranio. Los resultados obtenidos de los análisis de radioactividad concluyen que el proyecto Matamulas no supone ningún tipo de riesgo radiológico, pues las dosis medidas en los concentrados de mineral indican valores de 0,22 mSv/año, cuando el valor medio mundial de radiación natural existente en el ambiente, según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas, (también conocido como UNSCEAR por sus siglas en inglés) es de 2,4 mSv/año, y el Consejo de Seguridad Nacional obliga a tomar medidas a partir de dosis superiores a 1 mSv/año.

Geología del yacimiento

Las unidades litológicas presentes en el entorno geológico del yacimiento Matamulas son la cuarcita armoricana y las alternancias de Pochico, hasta final del Arenig, transición de Pochico a pizarras negras de Calymene en el Llanvirn, transición a pizarras verdes (Llandeilo) y las alternancias superiores de pizarras, areniscas y cuarcitas hasta los bancos gruesos de cuarcita del Caradoc. Las formaciones existentes son, de más antigua a más moderna, cuarcita armoricana, alternancias

de Pochico, pizarras negras de Calymene y las alternancias superiores y cuarcitas de cantera (Instituto Geológico y Minero de España, 2004).

El esquema estructural básico constituye un gran anticlinal de eje aproximado este-oeste, ligeramente levantado hacia el norte en su parte más oriental. El núcleo de este anticlinal lo constituyen la cuarcita armoricana y la interfase superior de alternancias de Pochico. Los contactos con la serie siguiente, la pizarra negra de Corredera, son concordantes en los pocos sitios donde han podido ser observados. La estructura de esas pizarras, sin aparentes pliegues sobre sí misma, es de buzamiento bastante tendido, sin grandes alteraciones estructurales. El anticlinal se completa, tanto al norte como al sur, con la unidad de cuarcitas del Caradoc, con rumbos y buzamientos bastante normales al sur y algo más trastocada al norte, donde el contacto es, al menos en algún punto, tectónico, y alguna falla longitudinal con respecto al eje de la estructura altera las cuarcitas hasta colocarlas, en algún caso, con buzamiento sur en la vertiente norte (Kremenetski *et al.*, 1991).

Toda esta estructura está cortada por una familia de fallas nordestadas (N15°-30°W), que determina la morfología de la Sierra, según espacios y desplazamientos de componente vertical, que han sido definitivamente importantes en los modelos de erosión, arrastre y depósito de los materiales detríticos que hoy contienen monacitas liberadas en su matriz. Los sedimentos con más perspectivas respecto a los placeres de monacita son los de edad Neógeno-Pleistoceno, que se extienden en el piedemonte y en los antiguos valles (enterrados) que lo desmiembran, y en las depresiones de contraste.

El reconocimiento geológico llevado a cabo determinó un yacimiento de tipo placer donde la meteorización físico-química liberó nódulos de monacita gris de la roca primitiva, concentrándose el mineral a lo largo de una cuenca somera encajada entre dos relieves, depositándose como unidades detríticas cuaternarias. El depósito aluvial de época plio-cuaternaria descansa sobre pizarras aflorantes marginales del Paleozoico, al norte y al oeste de la Sierra de Cabeza de Buey, cuya altitud se encuentra en torno a los 800 m. El depósito económicamente explotable se adapta a un antiguo cauce, extendiéndose unos 9 km a lo largo del valle norte, con una anchura variable entre 500 m y 2 km, y con una potencia media de 2,5 metros de profundidad.

Trabajos realizados en el yacimiento

Durante los años siguientes, se excavaron más de 450 pozos nuevos en áreas históricamente muestreadas, con el objetivo de confirmar las estimaciones iniciales de recursos presentadas por ADARO. Los pozos se realizaron con un mallado regular de 150 m, cubriendo la totalidad de la longitud del antiguo cauce, y focalizándose sobre las áreas más favorables

identificadas anteriormente. Estos pozos de desmuestra se abrieron mediante retroexcavadora, con una profundidad variable, atravesando la totalidad del sedimento. Después de realizar una roza sobre una de las paredes del hueco, se tomaron las muestras 'metro a metro', desde el fondo de la calicata hasta la superficie. Una vez obtenidas las muestras de cada uno de los pozos excavados, éstas se cuartearon, cribaron y redujeron para su envío a un laboratorio homologado donde fueron analizadas químicamente. El propósito de esta fase fue delimitar y calificar los recursos y reservas de la zona. Posteriormente, en 2015, se realizó una nueva campaña de 612 pocillos sobre malla regular de 250 m y con una profundidad total excavada de 980 m, con la finalidad de estimar la ampliación de los recursos minerales del yacimiento en otras zonas de los permisos de investigación otorgados, que no habían sido exploradas hasta el momento (Fig. 11).

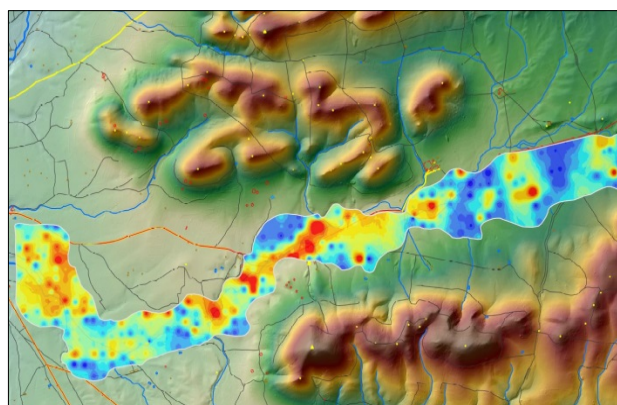


Fig 11. Mapa general del yacimiento con los resultados de la exploración y valoración llevada a cabo sobre los permisos de investigación Matamulas y Rematamulas en los términos municipales de Torrenueva y Torre de Juan Abad, Ciudad Real (escala: 1:20.000). Modelo digital de potencias por leyes (gr/m^2), donde las áreas de color rojo revelan valores mayores de ley, decreciendo según la gama de colores, hasta llegar a las zonas de color azul oscuro, con valores inferiores. (Quantum Minería, 2016).

También, durante este año, se realizaron ensayos mineralúrgicos sobre dos muestras compuestas obtenidas a partir de todos los pozos de reconocimiento del depósito, habiendo sido sometidas previamente a un proceso de tamizado en húmedo para obtener las fracciones granulométricas adecuadas. El estudio comprendió ensayos mineralúrgicos de separación en líquidos densos y concentración gravimétrica en mesas de sacudidas. También se realizaron varios ensayos hidrometalúrgicos, mediante vía ácida y cáustica, sobre los concentrados de monacita, concluyendo que ambas vías eran factibles, aunque se obtuvieron mejores recuperaciones por vía ácida, alcanzándose un 90%.

Resultados obtenidos

Se analizaron más de mil muestras de las calicatas realizadas y se obtuvo una distribución representativa de todos los elementos de TTRR presentes en el yacimiento, donde destaca la abundancia de Nd y Pr como elementos especialmente críticos. El porcentaje en

peso de los elementos de TTRR contenidos en los nódulos de monacita gris del yacimiento Matamulas se recoge en la Tabla 1.

La ₂ O ₃	17,52	CeO ₂	45,05	Pr ₈ O ₁₁	5,87
Nd ₂ O ₃	22,65	Sm ₂ O ₃	4,48	Eu ₂ O ₃	0,83
Gd ₂ O ₃	2,12	Tb ₄ O ₇	0,21	Dy ₂ O ₃	0,44
Ho ₂ O ₃	0,08	Er ₂ O ₃	0,03	Tm ₂ O ₃	0,05
Yb ₂ O ₃	0,05	Lu ₂ O ₃	0,00	Y ₂ O ₃	0,64
ThO ₂	0,18				

Tabla 1. Contenido medio (en porcentaje en peso) de los REOs presentes en los nódulos de monacita del yacimiento Matamulas (valor medio de todas las muestras analizadas).

Con los resultados obtenidos de los análisis de las muestras de las diferentes campañas ejecutadas, se realizó una estimación de recursos mediante un estudio preliminar de evaluación económica, bajo los estándares del código JORC (siglas en inglés de *Joint Ore Reserves Committee*). Se obtuvo un depósito de 29,9 millones de toneladas con una calificación de 0,101% de TREOs. Esta estimación da como resultado un depósito mineral de 30.207 toneladas de TREOs *in situ*.

Según los resultados de los análisis cuantitativos de liberación mineral realizados para alcanzar un mayor conocimiento sobre el mineral (Burrows, 2015), se determina que la monacita es el único mineral portador de los elementos de TTRR identificados en las muestras. Éstas fueron analizadas mediante un analizador de liberación mineral (MLA según sus siglas en inglés), que proporciona datos mineralógicos cuantitativos. La monacita aparece en las muestras como nódulos gruesos con un diámetro máximo que supera en un 80% las 1.100 µm. Se detecta en concentraciones de 1,04% en peso en las muestras individuales de mineral clasificado, y de 82,44% en peso en las muestras de concentrado. La composición de la monacita es variable, debido a la presencia de inclusiones de grano fino y diseminadas que no pudieron eliminarse completamente mediante el análisis por MLA. Para reflejar la naturaleza dominante de éstas inclusiones, se le asigna a los nódulos de monacita una composición promedio que incluye la presencia de K, Al, Fe y Si.

Por otro lado, de los estudios petrográficos realizados (Castroviejo, 2016), se determina que los nódulos de monacita presentes en las muestras individuales recogidas directamente del depósito no están liberados, mientras sí lo están, prácticamente al 100%, en las muestras del concentrado, pero incluyendo silicatos e impregnación limonítica (Fig. 12) en proporciones variables y difícilmente separables físicamente. Además, según el estudio mediante MLA, la ganga de las muestras individuales del depósito presenta concentraciones significativas de arcillas, calcita, clorita, moscovita, cuarzo e hidróxidos de Fe, mientras que la ganga del concentrado incluye concentraciones significativas de cuarzo, goethita, clorita y moscovita.

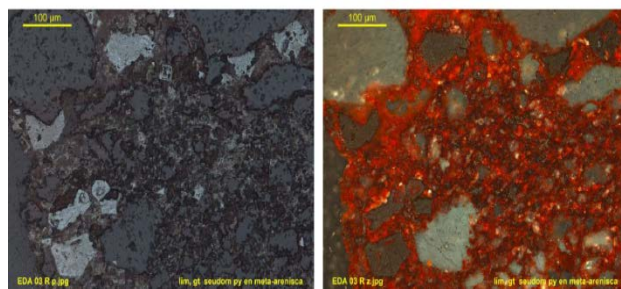


Fig 12. Fotomicrografías de la fracción desechada como estéril de las muestras analizadas (escala de la barra: 100 micras). Las dos imágenes son observaciones al microscopio petrográfico con luz reflejada. Ambas pertenecen al grupo de las meta-areniscas y muestran una notable impregnación limonítica con óxidos de Fe secundarios procedentes de la sustitución de fases sulfuradas de las que se conservan pseudomorfas, siendo más claros que los silicatos (izquierda: nicoles paralelos), y perceptibles las reflexiones internas rojizas (derecha: nicoles cruzados) (Castroviejo, 2016).

Por otra parte, tras un estudio experimental de evaluación cuantitativa de materiales mediante QEMSCAN, se concluyó que los nódulos de monacita relativamente grandes, aquellos con un diámetro superior a 1 mm, presentan una zonación bien definida, con una correlación inversa de Nd y Ce. En el caso del Nd, se enriquece en las partes centrales del nódulo (Fig. 13), mientras que el contenido en Ce aumenta en la dirección opuesta.

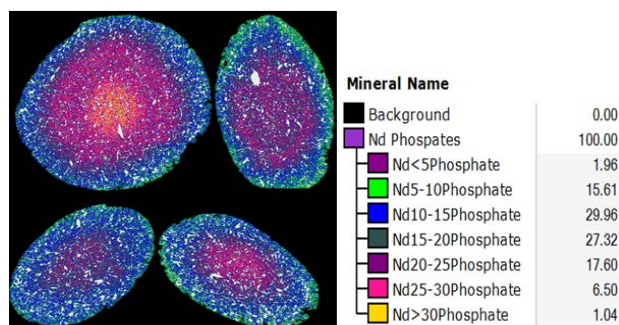


Fig 13. Imagen de nódulos de monacita tomada mediante QEMSCAN, en la que se observa la distribución de neodimio. El ancho del nódulo mayor es de 1.000 micras (Quantum Minería, 2016).

Tras todos los estudios llevados a cabo, se concluye que la ley del concentrado de monacita podría mejorarse del 0,2% al 40% solo por concentración física con métodos gravimétricos, de deslamado y cribado, obteniendo un concentrado de monacita pura con una recuperación mineral superior al 70%. Esto significa una disminución sustancial en los costes de operación y de capital en las fases siguientes de concentración química y extracción por solventes.

Método de explotación del yacimiento

En este yacimiento se prevé una explotación a cielo abierto durante 10 años, estableciendo una secuencia de extracción (con una profundidad media de 2,5 metros) que atenderá a la variación de las leyes y a la distancia entre la planta de tratamiento y la zona a explotar en cada fase, tal y como queda reflejado en los proyectos de

concesión de explotación presentados por la empresa ante el organismo competente.

Las áreas explotadas se restaurarán de forma simultánea a la explotación de otras zonas (minería de transferencia), minimizando, así, la superficie afectada en todo momento (Fig. 14). Como los terrenos que ocupan el proyecto Matamulas (234 hectáreas) están dedicados al cultivo, fundamentalmente cereal de secano, se realizaron estudios de caracterización edafológica del suelo y su interpretación agronómica, así como sobre la posible afección a la productividad agronómica por la extracción de monacita. Higuera *et al.* (2018) concluyen que ambas actividades son compatibles, resaltando las mejoras que podría suponer para el terreno en las futuras siembras, al no generar la minería ningún impacto negativo sobre la agricultura.



Fig 14. Secuencia de explotación del yacimiento en función de las concesiones solicitadas (localizadas en los términos municipales de Torrenueva y Torre de Juan Abad) y la ubicación de la planta de tratamiento (Advisian, 2017).

Las operaciones de arranque, carga, transporte y vertido en planta se llevarán a cabo con sistemas discontinuos. El arranque y la carga del material se realizarán mediante retroexcavadora y pala, mientras que las cintas transportadoras y un reducido número de camiones articulados serán los responsables de transportar el mineral y descargarlo sobre un acopio habilitado a la entrada de la planta de tratamiento. De esta manera, se minimizará, en gran medida, el impacto sobre la fauna, al permitir el tránsito natural de animales cuadrúpedos bajo las cintas transportadoras. Así mismo, se ha minimizado la posibilidad de creación de polvo en el transporte, carga y descarga del mineral y se ha disminuido significativamente el consumo de agua previsto, ya que al reducir el número de pistas de tránsito para camiones decrecen las necesidades de riego.

La planta de tratamiento prevista es de concentración gravimétrica y cuenta con dos grandes zonas: área de clasificación, deslamado y eliminación de arcillas, y área de concentración gravimétrica mediante espirales, mesas de sacudida y separación magnética (Duro Felguera, 2016). En la primera etapa de clasificación se retirará un 80% aproximadamente del material llegado de la mina, que será devuelto al hueco generado. El 20% restante del material total será enviado a la segunda área de la planta y, al ser los nódulos de monacita redondeados y más

densos que los estériles agregados, se obtendrá un concentrado comerciable mediante separación gravimétrica. Este tratamiento se llevará a cabo en dos fracciones granulométricas paralelas, pero se generará un único concentrado final de monacita. Al encontrarse la monacita en forma de nódulos libres y representar solamente un 1% de la masa inicial del yacimiento, el estéril resultante, tras el proceso de tratamiento, se acopiará a pie de planta, desde donde será transportado por cintas y camiones articulados de vuelta al yacimiento para su posterior restauración.

Restauración

La restauración del yacimiento se realizará de acuerdo a la propuesta de actuación de Higuera *et al.* (2016) con objeto de garantizar el mantenimiento del uso de cultivo herbáceo tradicional, una vez finalizado el proyecto minero.

Inicialmente se retirará la capa de suelo vegetal de los cuarteles de explotación con un grosor suficiente que permita el desarrollo de la raíz de los cultivos existentes en la situación preoperacional. Esta cobertura vegetal se acopiará temporalmente en las inmediaciones del cuartel correspondiente. El tiempo entre la retirada y posterior reposición de la capa será lo más corto posible, sin superar, en ningún caso, los tres meses. Esto queda garantizado por la elección del método de explotación, minería de transferencia, en el que la capa retirada pasa inmediatamente a recubrir zonas ya explotadas, minimizando así el tiempo que los huecos permanecen abiertos y la capa de tierra vegetal amontonada.

Los huecos de explotación serán rellenados con los estériles provenientes de la planta de tratamiento, evitando problemas de compactación, discontinuidades texturales violentas, falta de conductividad hidráulica, etc. A continuación, se extenderá la tierra vegetal acopiada, y se añadirá materia orgánica a la capa superficial para mejorar su estructura y fertilidad. Posteriormente, y cada tres años, se realizarán labores de subsolado para romper la suela de labor y la discontinuidad edáfica. Esta labor se realizará a la profundidad adecuada y garantizando que no se mezclen los horizontes. Por todo lo anterior, la restauración proyectada con fines agronómicos del suelo no tendrá ninguna incidencia negativa en la calidad y productividad biológica del suelo.

CONCLUSIONES

El proyecto Matamulas sería la primera explotación minera europea con capacidad de puesta en marcha a corto plazo. Este depósito alberga un alto porcentaje en peso de Nd y Pr y un contenido insignificante de elementos radiactivos. Además, tiene una minería sencilla donde no se requieren aditivos ni escombreras.

Es un proyecto crítico porque los metales que se obtén-

drían son vitales para la industria moderna y el desarrollo de energías limpias (aerogeneradores y coches eléctricos e híbridos). Asimismo, es un proyecto estratégico para la Unión Europea porque minimizaría la dependencia con respecto a China, suministrando el 32% de la demanda europea de TTRR durante los 10 años de vida útil del proyecto.

El proyecto Matamulas supondría una mejora en las condiciones socioeconómicas del Campo de Montiel, con beneficios tales como creación de empleo, programas de formación y capacitación y dinamización de las poblaciones cercanas. En este sentido, está prevista la creación de 154 puestos de trabajo directos, con un efecto multiplicador de unos tres puestos de trabajo indirectos por cada puesto directo creado. Esto conllevaría un aumento general en la renta disponible de los habitantes de la zona y la aparición de nuevas empresas que realicen actividades operativas vinculadas al proyecto minero. De esta forma, se incrementaría la actividad económica local de la zona, creando riqueza sin impactar negativamente en otras actividades económicas ya presentes.

Igualmente, se han previsto una serie de medidas preventivas, correctoras y compensatorias, tanto a nivel ambiental como socioeconómico, que serán el referente para el control, subsanación y mejora de todos aquellos factores sobre los que pueda incidir el proyecto minero. Así mismo, la empresa implantará adecuadamente la Gestión Minera Sostenible permitiendo un control externo del proyecto, que contribuya a mejorar la gestión, la percepción social, y aumente la implicación del entorno socioeconómico de las explotaciones.

Con todo ello, Quantum Minería considera que este proyecto es clave para fomentar el desarrollo industrial de la región, promover el crecimiento socioeconómico de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha, y posicionar a España como líder europeo en la producción de estos minerales.

REFERENCIAS

Advisian (2017): Estudio de impacto ambiental. Proyecto de explotación de las Concesiones Matamulas y Rematamulas Fracciones 1ª y 2ª (Ciudad Real). Informe científico-técnico (no publicado). 81 p. (más anexos).

ADARO (1991): Programa de investigación sistemática de recursos minerales. Proyecto: Zona Centro. Actuación en Cabeza de Buey (Fase II Monacitas). Informe de trabajos de 1990. Informe científico-técnico (no publicado). 130 p.

— (1992): Programa de investigación sistemática de recursos minerales. Proyecto: Zona Centro. Actuación en Cabeza de Buey (Fase II Monacitas). Informe de trabajos de 1991. Informe científico-técnico (no publicado). 235 p (tomo I) y 233 p (tomo II).

Burnotte, E., Pirard, E., Michel, G. (1989): Genesis of grey monazites; evidence from the Paleozoic of Belgium. *Econ Geol*, **84**, 1417-1429. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.84.5.1417>

Burrows, D. (2015): J0171 MLA analysis of phosphate REE ore and concentrate samples - Preliminary report. Australian Laboratory Services Pty Ltd. Informe interno (no publicado). 30 p.

British Geological Survey (2017): Map of European REE deposits and occurrences 2017 BGS © UKRI. EURARE Project. <http://www.eurare.eu/> [consulta: 30 mayo 2019].

Castilloux, R. (2017): Rare earth market outlook: supply, demand and pricing. Adamas Intelligence Ltd. 23 p.

— (2018): Spotlight on dysprosium. Revving up for rising demand. Adamas Intelligence Ltd. 37 p. <https://www.adamasintel.com/> [consulta: 20 mayo 2019].

Castroviejo, R. (2016): Estudio microscópico y caracterización mineralógica de concentrados, mixtos y estériles. Depósitos monacíticos de Matamulas (Ciudad Real). Laboratorio de Microscopía Aplicada (LMA) de la Universidad Politécnica de Madrid. Informe interno (no publicado). 63 p.

Chalmers, I. & MacDonald, A. (2017): Economics of rare earth projects. Alkane Resources Ltd, 19 p. <https://www.asx.com.au/asxpdf/20171012/pdf/43n5093j6r7rbl.pdf> [consulta: 30 mayo 2019].

Duro Felguera, S.A. (2016): Proyecto de explotación para el depósito mineral Matamulas. Informe interno (no publicado). 105 p.

EURARE Partners (2017): Research and development for the rare earth element supply chain in Europe. Eurare. 40 p. http://www.eurare.eu/docs/EURAREbrochure_vfinal.pdf [consulta: 23 mayo 2019].

Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C. (2014): Rare earth elements: overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources*, **3(4)**, 614-635. <https://doi.org/10.3390/resources3040614> [consulta: 19 mayo 2019].

Higueras, P., García, F.J., Amorós, J.A., Pérez, C., Esbrí, J.M., (2016): Caracterización edafológica y agronómica del suelo en el proyecto de explotación Matamulas. Instituto de Geología Aplicada de la Universidad de Castilla-La Mancha. Informe científico-técnico (no publicado). 59 p.

—, García, E., Campos, J.A., Esbrí, J.M., García, F.J., Álvarez, R., Jiménez, R. (2018): Estudio de la posible afección a la productividad agronómica por la extracción de monacita (Campo de Montiel, Ciudad Real). Instituto de Geología Aplicada de la Universidad de Castilla-La Mancha. Informe científico-técnico (no publicado). 36 p.

Instituto Geológico y Minero de España (2004): Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Segunda serie - Primera Edición. Hoja 838/20-33. Santa Cruz de Mudela. <http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50>

- /memorias/MMagna0838.pdf [consulta: 16 junio 2019].
- KITCO (2019): Strategic metals. <https://www.kitco.com/strategic-metals/> [consulta: 12 junio 2019].
- Kremenetski, A., Potapova, G., Veremeeva, L. (1991): Investigaciones mineralométrico-geoquímicas y estructural-geomorfológicas de las rocas primarias que contienen monacita y de placeres de la región de Navas de Estena (España). Informe sobre los trabajos de la I-Ka fase de MAYASA e IMGRE de 1990-1991. Informe científico-técnico (no publicado).
- Ministerio de Transición Ecológica (2019): Borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. 286 p. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/spain_draftnecp.pdf [consulta: 29 abril 2019].
- Mining Technology (2015): Mountain Pass Rare Earth Mine modernisation project, California <https://www.mining-technology.com/projects/mountain-pass-rare-earth-mine-modernisation-project-california/> [consulta: 20 abril 2019].
- Quantum Minería S.L. (2016): Proyecto de explotación. Concesión de explotación Matamulas nº 12.919-10; Concesión de explotación Rematamulas Fracción 1ª, nº 12.920-10; y Concesión de explotación Rematamulas Fracción 2ª, nº 12.920-20. Informe interno (no publicado). 108 p. (más anexos).
- United States Geological Survey (USGS) (2019): Rare earths statistics and information. Mineral commodity summaries from 2012 to 2018. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> [consulta: 30 abril 2019].