

La fluorita como *Critical Raw Material*. El ejemplo de Mina Lújar (Órgiva, Granada).

Celso Amor Castillo (1), Rafael Navarro Domínguez (1*), Andrey Ilin Maximovich (2)

(1) Minera de Órgiva S.L., Mina Carriles Polígono 13, Parcela 1, 18400, Órgiva. Granada (España)

(2) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48940, Leioa, Bizkaia (España)

* corresponding author: rafa.navarro@mineradeorgiva.com

Abstract:

Fluorite (or fluorspar) is considered as a Critical Raw Material (CRM) by European Union since 2010. Therefore, this mineral is fundamental in the strategy which aims to the reduction of the dependence upon external providers and also to enhance the local economies of the Union's members. In addition, due to the generalized depletion of the classic ore deposits in Europe or because of its proximity to the populated areas, it also seeks to access the raw material which were not traditionally considered as such by cause of technical complexity which would imply its mining (e.g. deep deposits, remote or highly populated areas, former mines, low grade deposits). Given this context, the fluorite mining in Pb-F-(Zn) ore deposit, which is actively developed by Minera de Orgiva, S.L. in Lujar Mountain Range since 2010, is a precise example of the latter. It is an ancient underground mine following narrow veins which has a great intricacy of both geological setting and ore treatment. Nevertheless, in spite of huge technical and environmental challenges, the recovery of mining operations made an important economic revival in the district and also grants an excellent example of sustainable mining for European Union.

Resumen:

La fluorita (o espato-flúor) está considerada desde 2010 por la Unión Europea (UE) como materia prima crítica (*Critical Raw Material*, CRM), por lo que es un mineral fundamental en la estrategia de reducir la dependencia exterior, mejorando así las economías locales de los Estados miembros de la UE. Asimismo, debido al agotamiento generalizado de los grandes yacimientos minerales en Europa o la cercanía de la mena a áreas pobladas, se busca prioritariamente el acceso a yacimientos minerales de materias primas tradicionalmente no considerados como tales por estar ubicados en lugares técnicamente difíciles (e.g. grandes profundidades, áreas remotas, zonas pobladas, antiguas minas o depósitos de baja ley). La explotación de fluorita que está desarrollando Minera de Órgiva, S.L. en la Sierra de Lújar en un yacimiento de Pb-F-(Zn) desde 2010 es un claro ejemplo de lo anterior. Se trata de una mina antigua, subterránea, de filón estrecho, con una estructura geológica muy compleja y de difícil tratamiento. Sin embargo, la explotación de esta mina, con grandes retos técnicos y medioambientales, ha supuesto una importante inyección económica en la comarca, siendo además un ejemplo de explotación sostenible para la Unión Europea.

Palabras Clave: Fluorita, Espato-Flúor, Materias Primas Críticas, Minería Sostenible, Metalurgia, Lújar. | **Key Words:** Fluorite, Fluorspar, Critical Raw Material, Sustainable Mining, Metallurgy, Lújar.

INTRODUCCIÓN

La fluorita (CaF_2), o espato-flúor (*fluorspar*) en su nombre comercial (Fig. 1), es un mineral que industrialmente tiene una gran importancia como principal mena del flúor, siendo de gran utilidad en la industria química y metalúrgica.

La fluorita se comercializa en varios tipos de concentrado:

- Grado ácido (97% CaF_2 mínimo). Usada para la obtención del ácido fluorhídrico, básico para el desarrollo de la criolita sintética y del fluoruro de aluminio. Tiene múltiples aplicaciones en sectores como el petroquímico, farmacéutico, electrónico, el vidrio o la industria agroquímica.



Fig. 1. Ejemplar de fluorita de Mina Lújar.

- Grado cerámico (93-95% CaF₂). Utilizada como opacificador y clarificador de ópalo, vidrio y esmaltes.
- Grado metalúrgico (>70% CaF₂). Usada en la manufactura del acero para mejorar las características de las escorias, especialmente para reducir la tensión superficial, minimizar las variaciones en la viscosidad con la temperatura de fusión, disminuir la temperatura de fusión y mejorar la fluidez y, por tanto, las propiedades de transferencia de calor. Con esto se consigue facilitar y acelerar la formación de escoria, reduciendo así el coste energético. Se reducen así las pérdidas calóricas y mejora el rendimiento térmico durante las fases de calentamiento del horno y el afino. Por otra parte, una escoria con punto de fusión bajo tiene mayor capacidad para captar sulfuros en la desulfuración, mayor capacidad reductora y captadora de inclusiones, resultando un acero más limpio.
- Grado cementero (>35% CaF₂). En la industria del cemento el uso de la fluorita reduce el consumo de energía térmica al bajar la temperatura de clinkerización, además de incrementar la resistencia a la compresión en un 15 %.

Actualmente, los principales productores de fluorita metalúrgica son China, México, Mongolia y Vietnam (Trio y Guillermo, 2017).

La fluorita actualmente se encuentra incluida dentro de las veintisiete materias primas consideradas como críticas (conocidas como *Critical Raw Material* en la bibliografía en inglés, o como CRM por su abreviatura), que son fundamentales para la Unión Europea (UE), dado que los riesgos de escasez de suministro y los efectos que ejercen sobre la economía son más importantes que los de la mayoría de las demás materias primas (European

Commission, 2017a). Fue incluida en la primera lista de CRM en 2010 (European Commission, 2011), que contemplaba un total de 14 sustancias, y en sus actualizaciones de 2014 y 2017 (European Commission, 2014a, 2017a). Esto es indicativo de que la Unión Europea se plantea una estrategia común para reducir la dependencia exterior de materias primas críticas, entre las cuales, se encuentra la fluorita. De hecho, con esta política de declaración de CRM, se espera incrementar la competitividad global de la economía de la UE, en línea con la aspiración de aumentar la contribución del sector al PIB en hasta un 20% en 2020. La lista también ayuda a incentivar la producción europea de materias primas fundamentales, facilita la puesta en marcha de nuevas actividades mineras y se utiliza para contribuir a determinar las necesidades y acciones prioritarias (European Commission, 2014a).

En la Tabla 1 se muestran las características principales de la fluorita como CRM, según las consideraciones de la Unión Europea. El “índice de dependencia de las importaciones”, utilizado en el cálculo del riesgo del suministro, tiene en cuenta el suministro mundial y las fuentes de suministro reales de la UE. Este índice se calcula como la razón entre las importaciones a la UE netas y la suma de las importaciones a la UE netas más la producción interna de la UE. El “índice de sustitución” mide la dificultad para sustituir el material, teniendo en cuenta la importancia económica (IE) y el riesgo del suministro (RS). Los valores se sitúan entre 0 y 1, donde 1 indica la menor sustituibilidad. El “índice de aporte del reciclado al final de su vida útil” mide el índice de reciclado de metales viejos respecto a la demanda de la UE de una determinada materia prima, siendo la demanda igual al suministro de la UE de materias primarias y secundarias (Regueiro, 2014; European Commission, 2017b).

<i>Principales productores mundiales (media 2010-2014)</i>	<i>Principales importadores a la UE (media 2010-2014)</i>	<i>Fuentes de suministro de la UE (media 2010-2014)</i>	<i>Índice de dependencia de las importaciones para la UE</i>	<i>Índices de sustitución IE/RS</i>	<i>Índice de aporte del reciclado al final de su vida útil</i>
China (64 %) México (16 %) Mongolia (5 %)	México (38 %) China (17 %) Sudáfrica (15 %) Namibia (12 %) Kenia (9 %)	México (27 %) España (13 %) China (12 %) Sudáfrica (11 %) Namibia (9 %) Kenia (7 %) Alemania (5 %) Bulgaria (4 %) Reino Unido (4 %) Otros países de la UE (1 %)	70 %	0.98 / 0.97	1 %

Tabla 1. Características principales de la fluorita como CRM (European Commission, 2017b). IE: importancia económica; RS: riesgo del suministro.

La UE tiene un gran interés en reforzar el sector industrial de la economía europea. Esto se debe principalmente a la alta calidad de los empleos industriales y al hecho de que la economía debe estar bien equilibrada entre los diferentes sectores económicos, considerando los sectores primario, secundario y terciario. Para cumplir los objetivos de la estrategia del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea (Horizonte 2020) (European Commission, 2014b) e impulsar un crecimiento económico sostenible, las economías de la UE necesitan asegurar su acceso a materias primas estratégicas. Como es sabido, estas son esenciales para mantener un fuerte crecimiento industrial. La principal preocupación en este sentido es la alta dependencia externa que la UE tiene hoy en día en las materias primas. Esta elevada dependencia de las importaciones de CRM, como la fluorita, así como su elevado índice de sustitución, hace que explotaciones como las de la “Mina Lújar” y el trabajo de investigación de otras zonas mineras, como las que actualmente se está llevando a cabo por Minera de Órgiva, S.L., tengan una alta importancia de cara a reducir la dependencia exterior de esta sustancia, contribuyendo a la mejora de la economía a todos los niveles.

Minera de Órgiva, S.L. es la actual titular de la concesión de explotación “Lújar” nº30411, de 8 cuadrículas mineras para la explotación de fluorita, plomo y zinc, en el término municipal de Órgiva (Granada), y cuenta además con varios permisos de investigación minera para fluorita, plomo y zinc en Sierra de Lújar (“Lújar Sur” nº30785, “Lújar Norte” nº30798) y Sierra de Gádor (“Lupiñón” nº40644), o para barita y plomo (Grupo Minero “Los Guindos”, en La Carolina –Jaén-), entre otros.

LA MINA LÚJAR: CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-MINERAS

Evolución histórica de la Mina Lújar

La actividad minera en la Sierra de Lújar se viene desarrollando de forma más o menos continuada desde hace más de 2700 años. Los primeros testimonios de explotación del plomo datan del siglo VII-VI a. C. (ENADIMSA, 1986). Hay también referencias a explotaciones por parte de los romanos, según se acredita por Estrabón en su libro Geografía, que señala la existencia de minas de oro y de otros metales en las sierras que separan de la Bastetania mediterránea o interior el litoral de Málaga, Almuñécar y Adra (Costa, 1895). Madoz (1850), cita en su Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar que, “*en la sierra de Lújar, además de las minas recientes, merece una particular atención la mina llamada de Bobelo, que se explotaba como muchas otras de la sierra en tiempos de los romanos, según vienen a testificarlo los utensilios y monedas que en ella se encuentran*”. También está bien documentada la existencia de labores mineras entre los siglos IX y X,

correspondiente a la época de Abd al-Rahman III (921-961), mediante la datación de vestigios mineros (candiles) en la Sierra de Lújar, localizados en la parte sur de la Sierra (Pérez-Salguero, 2017). Todas estas labores antiguas, según todos estos autores, son dispersas, discontinuas y modestas, ya que las mineralizaciones se disponen en bolsadas o en filones de “frente y de cabeza”, que luego se cortan y desaparecen, por lo que la Sierra de Lújar no constituye un gran centro de producción de plomo, a diferencia de las áreas de Gádor o Linares. Sin embargo, estas explotaciones, en manos locales, daban trabajo a gran cantidad de vecinos, bien como jornaleros, bien como rebuscadores, lo que se conocía como “macagueros” (Cohen, 2002). No es hasta el s. XIX cuando se generaliza la extracción de recursos en la zona. Esas primeras explotaciones se realizaron al amparo de la Ley de Minería de 1825 mediante la cual, aunque las minas pertenecían a La Corona, se permitía el acceso a las concesiones a particulares. En 1842 había 59 minas de plomo y 5 de plata en explotación, aunque solamente 22 rendían productos. La más rica de ellas explotaba entre 10.000 y 11.000 arrobas de mena mensuales (unas 120 toneladas/mes). Estos metales se fundían en los tres hornos de reverbero que existían en la sierra, dos en Órgiva y uno en Vélez de Benaudalla (Madoz, 1850). Sin embargo, en 1866, tan solo quedaban 16 minas activas, con una producción total de unas 276 toneladas de concentrado de plomo en conjunto, la menor desde que se tenía registro. Durante todo el resto del siglo XIX, la producción continúa con grandes altibajos, derivados de la falta de un sistema adecuado de explotación y de la falta de capital. A finales del s. XIX y a principios del XX, una caída generalizada a nivel global de los precios del plomo hunde la producción del plomo de la Sierra de Lújar, quedando en 1881 tan solo entre cuatro y seis concesiones activas en Órgiva y entre dos y tres en Vélez de Benaudalla, respectivamente (Cohen, 2002). No obstante, a pesar de esta caída de la producción, la Sierra de Lújar resiste mejor que otras comarcas mineras como la Sierra de Baza o Gádor. En 1900, la Sierra de Lújar albergaba la práctica totalidad de la explotación de plomo de la provincia, aunque con grandes carencias técnicas. El sistema de minifundismo de mitad del s. XIX poco a poco se va transformando con la entrada de familias adineradas en la titularidad de las concesiones. Hacia finales del s. XIX, se funda la empresa “Minas y plomos de la sierra de Lújar”, participada tanto por la familia Huelín (de Málaga) como por la familia Rodríguez-Acosta (de Granada), y en 1907 nombran como ingeniero-director al belga Louis de Pelsmaeker. En esta etapa, se unifican muchos registros mineros y se descubren nuevas zonas, permitiendo el desarrollo de una planificación minera más ordenada. Se realizan nuevas investigaciones y se descubren nuevas áreas de explotación, como las zonas de San Luis, que será el principal foco de explotación en esos años, o San Isidro. Se estima que entre 1908 y 1934 se extrajeron 85.000 toneladas de galena, con una ley media del 68% en el concentrado (Cohen, 2002). La crisis generalizada de los años 30 del s. XX, con una fuerte caída en el

precio del plomo, desembocó en la venta de la compañía y las concesiones en 1935 a la Compañía Metalúrgica de Mazarrón, que, a su vez, cedió en arriendo las minas a la Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya.

Entre 1935 y 1951 prácticamente no se desarrolló ningún tipo de labor en la mina, con excepción de algunas tareas de desescombro e investigación, debido principalmente a la dificultad del transporte del mineral. Al final se opta por instalar la planta de tratamiento (Fig. 2a) en la localidad de Los Tablones, anexa a Órgiva, y un cable aéreo (Fig. 2b) para transportar el mineral procedente de la mina y de las antiguas escombreras desde la bocamina “Carriles” hasta la planta, con capacidad de 200 toneladas/día. El transporte por el interior de la mina se realizaba mediante vagonetas (Fig. 2c) con tracción animal, siendo en algunas ocasiones los mismos mineros los que empleaban sus propias fuerzas en los trayectos más cortos. La perforación se realizaba mediante cincel y martillo con barrenos de 20 a 40 cm que eran cargados con pólvora y detonados mediante mecha lenta. Años más tarde se incorporaron locomotoras, para sustituir a la caballería en las galerías principales, y el aire comprimido para mejorar las técnicas de perforación (Amor y Navarro, 2016). A partir de los años 60, la Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya se plantea el beneficio de fluorita, por lo que se realizan instalaciones eléctricas y de agua para poder incrementar los ritmos de explotación. Asimismo, con el objetivo de facilitar el transporte del mineral, se construye el carril de acceso desde Tablones y a la práctica totalidad de las más de cincuenta bocaminas existentes en la actualidad. Además, la adquisición de maquinaria minera específica (Cargadoras de Transporte y Descarga -conocidas como L.H.D. por su abreviatura en inglés, *Load Haul Dump*-) permite modernizar los sistemas de explotación y transporte e incrementar la sección de las galerías, pasando de secciones de 2.5 m² a 4.5 m². Respecto a la producción de fluorita, inicialmente se empieza a producir en grado metalúrgico, y a partir de 1978, se comienza a considerar la obtención de fluorita en grado ácido. Para ello, se desarrolla una nueva planta de flotación diferencial de fluorita-galena para la obtención de concentrado > 97% de CaF₂ en grado ácido, que se prolonga hasta 1983, momento en que una crisis internacional de precios desemboca en la bajada de las exportaciones y en la casi paralización de la actividad minera en 1985 (Cohen, 2002; Amor y Navarro, 2016). El 5 de agosto 1989 se para la planta de flotación de forma definitiva para no volver a arrancar y, con ella, la mina.

En 1998 se crea la sociedad “Minera de Órgiva S.L.” que consigue, en 1999, la Concesión de Explotación “Lújar” nº 30411, de ocho cuadrículas mineras, de acuerdo con la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Abarca parte de las estructuras principales e históricas de todas las minas de la Sierra de Lújar. En estos años, apenas realiza actividades extractivas, ciñéndose a la extracción ocasional de galena. En 2010 se produce un cambio en



Fig. 2. a) Instalaciones de tratamiento del mineral de S.M.M. Peñarroya en Tablones (Órgiva) a mitad del s. XX. b) Vista del antiguo cable aéreo para el transporte del mineral. c) Vagoneta y sistema de railes empleado, que aún se conservan en algún sector de la mina. Fotografías a) y b), cedidas por el Ayuntamiento de Órgiva (Granada).

su accionariado, retomándose la actividad minera de forma ininterrumpida y creciente hasta la actualidad, extrayéndose principalmente fluorita en grado metalúrgico, aunque con previsiones de obtener fluorita en grado ácido en 2020. En estos años de actividad, se ha incrementado notablemente tanto el personal de la mina, pasando de 11 trabajadores en el año 2011 a los 53 actuales, como la inversión (600.000 € en 2018). Además, la política de la empresa es contar al máximo con proveedores locales. De los 4 millones de euros de gastos generales de explotación y tratamiento en 2018, aproximadamente un 15% repercutieron de forma directa en Órgiva y otras localidades cercanas. En la provincia de Granada, el total del gasto realizado fue del 50%.

La producción de fluorita se ha ido incrementando prácticamente todos los años, pasando de las 400 toneladas en 2011 hasta las 42.700 toneladas en 2018, tanto de fluorita en grado metalúrgico como en grado cementero. Es importante resaltar que esta empresa no cuenta con socios o capital extranjero, o de grandes compañías, siendo una empresa PYME de carácter local.

Contexto geográfico y geológico

Geográficamente, la Mina Lújar se encuentra situada en la Sierra de Lújar, en el término municipal de Órgiva (Granada). La Sierra de Lújar se encuentra en la parte meridional de la provincia de Granada, conformando una sierra de una altura superior a los 1.850 m que delimita el valle de la Alpujarra de la Hoya de Motril – Salobreña.

Desde el punto de vista geológico, se ubica en el Complejo Alpujárride (Zonas Internas de las Cordilleras Béticas). Concretamente, pertenece al manto de Lújar (Fig. 3), que constituye la unidad o manto inferior de cuantos componen este Complejo, que se ubica directamente por encima del Complejo Nevado-Filábride (Roldán, 2011).

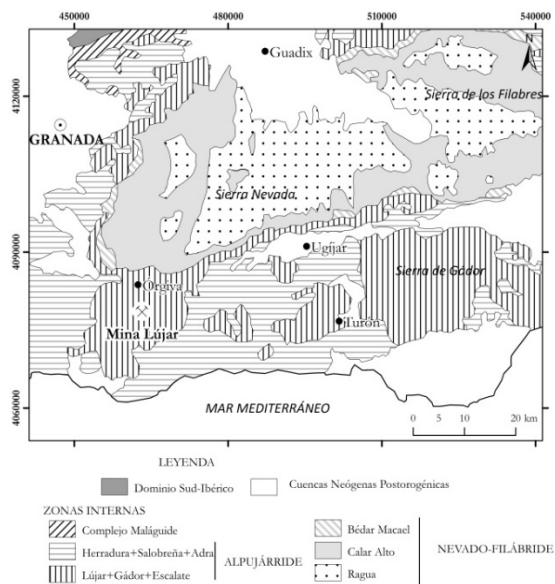


Fig. 3. Localización y esquema geológico del área de estudio. Modificado de Roldán (2011).

Estratigráficamente, la serie tipo Alpujárride consiste en un basamento metamorfizado (Paleozóico o anterior) de micaesquistos y cuarcitas, y una cobertera permotriásica, compuesta por una unidad inferior metapelítica (Pérmico-Triásico inferior) y una formación carbonatada suprayacente de edad Triásico medio-superior, con intercalaciones de metabasitas a lo largo de toda la serie (Martín *et al.*, 1984).

En conjunto, los depósitos estratoligados de F-Pb-(Zn) del Complejo Alpujárride se formaron en una cuenca marina somera con una notable inestabilidad, que se pone de manifiesto por la frecuente presencia de brechas y pliegues intraformacionales o intrusiones de diabasas (Ovejero *et al.*, 1982). Se encuentran en dos posiciones estratigráficas muy definidas dentro de la formación carbonatada, que puede tener hasta 1.200 metros de potencia. La primera, de edad Anisiense (Triásico medio), está relacionada con una transgresión y el paso de un *lagoon* restringido y aislado por una barrera calcarenítica, mientras que la segunda se localiza en el tránsito de Ladiniense superior a Carniense inferior (Triásico medio-superior) y muestra la situación inversa, es decir, de somerización (Martín *et al.*, 1987).

La morfología de los cuerpos mineralizados puede ser estratiforme, paleokárstica o relleno de diaclasas, siendo la primera más importante volumétricamente (Fontboté y Gorzawski, 1988).

En la Fig. 4 se muestra la columna de síntesis de la Sierra de Lújar y de la serie de la Mina, las cuales se describen a continuación.

Desde un punto de vista estratigráfico, Sanz de Galdeano y López-Garrido (2014) separan la serie de la Sierra de Lújar en seis miembros diferentes. El inferior (Miembro 1) está formado por filitas, que pueden localmente llegar a esquistos de grano fino y presentar intercalaciones finas de cuarcitas, yeso y calcoesquistos. El muro no es observable, pero se estima que el espesor es de varias centenas de metros y de edad de Permo-Werfaniense a Anisiense (Martín *et al.*, 1984). Subiendo en la serie, se observa una transición progresiva de filitas a calcoesquistos amarillos con sericita, intercalaciones de caliza, dolomía y lentejones de yeso (primario, propio de un ambiente somero con intensa evaporación), además de brechas intraformacionales y *slumps*. Este Miembro 2 presenta una gran variación en espesor, desde pocos metros hasta 75 m. Por encima se sitúan dolomías oscuras atribuidas al Miembro 3. Mayoritariamente son masivas, pero localmente aparecen laminadas o cebradas y con intercalaciones de margas, pudiendo estar mineralizadas con pequeñas cantidades de galena, aunque sin interés extractivo. La edad de los miembros 2 y 3 es Anisiense-Ladiniense (Martín *et al.*, 1984) y tienen un espesor de 350-450 m. Por encima se hallan calizas criptocristalinas de tonalidades grises a negras (Miembro 4), separadas del miembro anterior por un nivel de calcoesquistos. Además, presenta unas intercalaciones de dolomías que contienen materia orgánica, pirita idiomorfa, calcedonia y caolinita. La alteración de la roca fresca, visible por la limonitización de la pirita y la pérdida de magnesio, da lugar a la dolomía marrón (Ovejero *et al.*, 1982). Asimismo, se observa la dolomía con textura cebrada (también llamada “franciscana”), formada por la alternancia de bandas oscuras constituidas por los cristales más finos, y bandas claras de cristales más grandes y crecimiento en empalizada. Alternativamente, en algunas zonas se encuentra en la dolomía una estructura geopetal, formada por tres bandas, que de muro a techo presenta los colores gris, negro y blanco (Ewert, 1976). Esta alternancia se ha considerado tradicionalmente en la mina como el principal criterio de polaridad estratigráfica (Ovejero *et al.*, 1982). Localmente abundan los nódulos de sílex de colores blanco, gris o negro. Tiene una potencia de alrededor de 200 m y su edad es Ladiniense superior - Carniense inferior. De manera semejante, el Miembro 5 aparece aislado del anterior por un nivel de calcoesquistos. Litológicamente es muy parecido al infrayacente, presentando niveles discontinuos de dolomías oscuras intercalados entre margocalizas. Las brechas y *slumps* son más abundantes. La potencia es de alrededor de 150 m y la edad es Carniense. Cabe destacar que en estos dos últimos miembros se encuentran las mayores mineralizaciones de Pb-F-(Zn) de esta zona. Además, ligados a los miembros 3, 4 y 5 aparecen unos niveles de diabasas frecuentemente muy alteradas, que químicamente se asemejan a una andesita (Ewert, 1976).

Por último, la serie se culmina con el Miembro 6 formado por dolomías de color gris a gris oscuro, laminadas y con abundantes estructuras algales en su interior. Se reconocen las facies de *lagoon*, de arrecife y de *foreereef* marcadas por distintos tipos de dolomías (Martín *et al.*, 1984). Tiene un espesor observado de 200 m -la falta de conservación del miembro suprayacente impide la estimación de potencia original- y es de edad Carniense superior-Noriense inferior.

Con respecto a la mineralización, la zona de interés extractivo se localiza en un tramo de unos 200 m. de espesor, constituido por calizas y horizontes dolomíticos interestratificados (principalmente dos), de morfología, extensión y contenido en Pb-F-(Zn) variables, que pertenecerían al Miembro 4.

Los niveles dolomíticos inferiores (Miembro 3), de edad Anisiense, en la Sierra de Lújar están poco mineralizados, habiéndose encontrado algo de galena sólo muy puntualmente, a diferencia de lo que ocurre en la Sierra de Gádor, de características geológicas muy semejantes (Fenoll *et al.*, 1987), aunque hay que indicar que han sido poco investigados.

En detalle, este tramo está formado por calizas grises, criptocristalinas, con juntas de estratificación arcillosas rojas o amarillas, ocasionalmente negras, o bien niveles de calizas blanquecinas de aspecto marmóreo. Entre estas calizas se intercalan los horizontes dolomíticos mineralizados. Son dolomías grises oscuras a negras, con frecuentes zonas con una textura cebrada característica. Hacia techo las dolomías se reducen a horizontes discontinuos y débiles, ocasionalmente bien mineralizados, especialmente en fluorita.

De acuerdo con Ovejero *et al.* (1982), las mineralizaciones se sitúan en un conjunto de facies caracterizado por relaciones geométricas siempre complejas. Las discordancias menores abundan, pero no puede situarse en ninguna parte una discordancia cartografiada neta a la escala de la sierra. No se trata pues de mineralizaciones “*sous inconformité*” (Callahan, 1967) sino más bien de mineralizaciones ligadas a una suma de discordancias menores, reflejando una paleotopografía compleja y dinámica. Esta paleotopografía presentaría altos fondos, localmente emergidos (islotas), alrededor y sobre los cuales se han distribuido y han evolucionado los diferentes tipos de mineralizaciones existentes.

A nivel estructural, Ovejero *et al.* (1982) describen que la mina está ubicada dentro de un anticlinal, con un flanco N invertido y vergente hacia NW (Figs. 5a y 5b). Los bordes S y E de la sierra aparecen delimitados por un gran sinclinal invertido vergente hacia su interior y cuyo eje es curvado, variando la dirección de E-W a NNE (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2014). La dirección de plegamiento más abundante es la de NNE-SSW/N-S, que es fruto de la traslación de la Zonas Internas hacia el

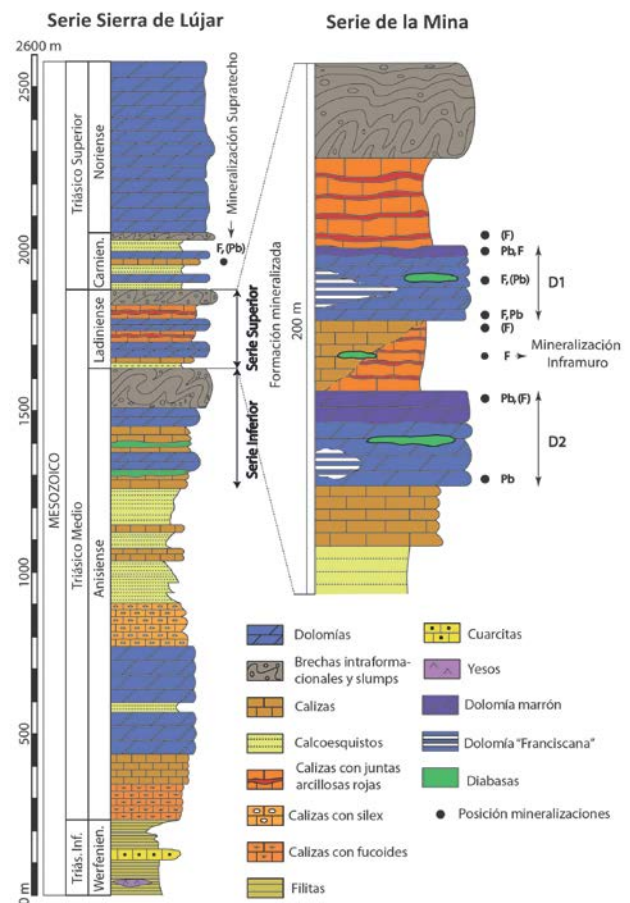


Fig. 4. Columna estratigráfica de la Sierra de Lújar y de la serie de la Mina, con indicación de la posición de los niveles mineralizados. Modificado a partir de Reolid (2017).

W, que se superpone a otras de dirección E-W formados durante el cabalgamiento de las unidades. Además, el anticlinal aparece afectado por una serie de fracturas contemporáneas con el plegamiento.

Características del yacimiento

En la Sierra de Lújar, la mineralización de fluorita y plomo es una mineralización estratiforme o estratoligada, considerada tradicionalmente como de carácter sedimentario/diagenético (Ovejero *et al.*, 1982; Fenoll *et al.*, 1987), aunque investigaciones recientes han puesto de manifiesto un posible origen hidrotermal, en base a datos de inclusiones fluidas y espectroscopía Raman (Ilin, 2018). Es considerado tipo Alpino, aunque también es frecuente encontrar una mineralización de tipo “filoniano” (s.l.) ligada a zonas de fractura. Dentro de los yacimientos de tipo Mississippi Valley (MVT), Sangster (1990) define los yacimientos Alpinos como un subtipo que presenta características muy similares a los MVT americanos pero las mineralizaciones están encajadas en carbonatos paleozóicos o triásicos de los orógenos Apalachiano o Alpino. Las principales diferencias corresponden a que son más calientes, encajan en materiales carbonatados deformados y los depósitos tienen un marcado control estructural (zonas de *rifting* o colisión), en comparación con los MVT clásicos. En

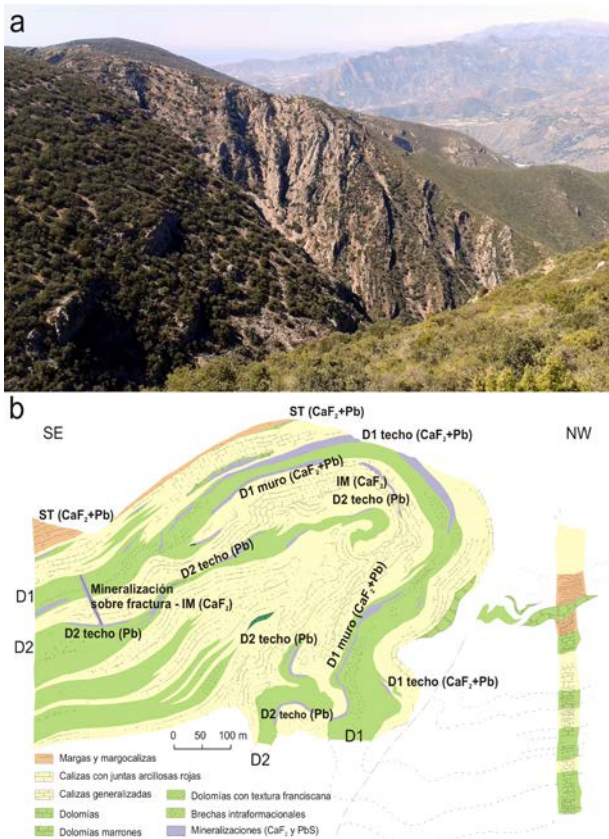


Fig. 5. a) Panorámica característica de la estructura de la parte norte de la Sierra de Lijar. b) Corte geológico esquemático de la serie de la Mina Lijar, con indicación de la posición de las principales mineralizaciones. ST: Supratecho; D1: horizonte dolomítico superior; IM: Inframuro; D2: horizonte dolomítico inferior. Modificado de Ovejero et al. (1982).

ocasiones, se asocian a fenómenos de emersión-karstificación desarrollados durante una determinada orogenia. En otros casos, pueden ser removilización tectónicas de antiguos yacimientos MVT (Tritlla et al., 2006).

En detalle, los dos horizontes dolomíticos más conocidos, presentan las siguientes características:

- El horizonte dolomítico D2 es de potencia muy irregular (0 a 70 m.) y llega con frecuencia a desaparecer. Presenta frecuentemente discordancias locales con las calizas del techo y del muro. La mineralización (especialmente galena) se sitúa casi constantemente hacia el techo del horizonte, sobre dolomías marrones muy alteradas. También puede contener fluorita de interés económico.
- El horizonte dolomítico D1 está estratigráficamente por encima del D2. Entre ambos hay calizas grises con juntas arcillosas rojas de espesor muy variable (entre algunos metros y 60 m) y calizas grises masivas. Su potencia varía entre 10 y 80 m., pero se mantiene frecuentemente dentro de los 45-50 m. Su continuidad lateral es mayor que la del D2. Las mineralizaciones (F-Pb) se sitúan a techo y muro y muy ocasionalmente en la parte media.

La potencia de los niveles mineralizados de interés es muy variable, incluso en áreas muy cercanas. Puede pasar en pocos metros desde 4-5 metros a varios centímetros, o incluso desaparecer. En general, varía entre unos pocos centímetros y unos 12 metros. Frecuentemente se cumple que, a mayor potencia, mayor ley dentro de un mismo horizonte. Actualmente, con los condicionantes económicos actuales de laboreo y tratamiento, la potencia mínima económicamente explotable se estima en 1.2 metros. En general, la ley media es del 35% en fluorita y del 2% en plomo, aunque varía enormemente entre unos sectores y otros.

Además de estos horizontes más o menos interestratificados, es frecuente la aparición de otras zonas mineralizadas denominadas:

- Supratecho (ST): Está por encima del D1 y se localiza en los lentejones dolomíticos que aparecen intercalados ocasionalmente entre las calizas y margas del Carniense. Son mineralizaciones de potencia muy variable (entre varios centímetros y hasta 2 metros), de poca continuidad lateral.
- Inframuro (IM): Se denomina mineralización inframuro a un tipo de mineralización de tipo “filoniano” (s.l.) que aparece principalmente entre los niveles D1 y D2. Es una mineralización principalmente de fluorita, ligada a una extensa red de fracturas de dirección variable, y que pueden alcanzar hasta 8-10 m de potencia.

La mineralización de fluorita puede aparecer con diferentes aspectos (Fig. 6):

- Fluorita conocida como “piedra india”, constituida por alternancia rítmica de fluorita blanca y fluorita negra, presentando en corte vertical un aspecto cebrado característico.
- Fluorita blanca-violeta bien cristalizada, de pequeño tamaño (cristales generalmente milimétricos), presentando relictos de fluorita negra (facies pseudo-brechoide).
- Fluorita negra, finamente cristalizada (50 μ m) con numerosos cristales subidiomorfos de dolomita.

En cuanto a la mineralización de plomo, aparece principalmente en forma de galena, encontrándose interestratificada en niveles de potencia centimétrica, discontinuos a lo largo de un nivel principal, o en forma de nódulos o “pintas”, dispersos en las dolomías. Junto con la galena aparece también algo de cerusita o anglesita, de origen secundario.

Junto a la fluorita y la galena, además de calcita y dolomita, se ha puesto de manifiesto la presencia en muy pequeñas cantidades de otros minerales como piritita, calcopiritita, esfalerita, barita, cuarzo o minerales de la arcilla. Como minerales supergénicos, se ha identificado la presencia de goethita, malaquita, azurita, hemimorfita, cerusita y anglesita.

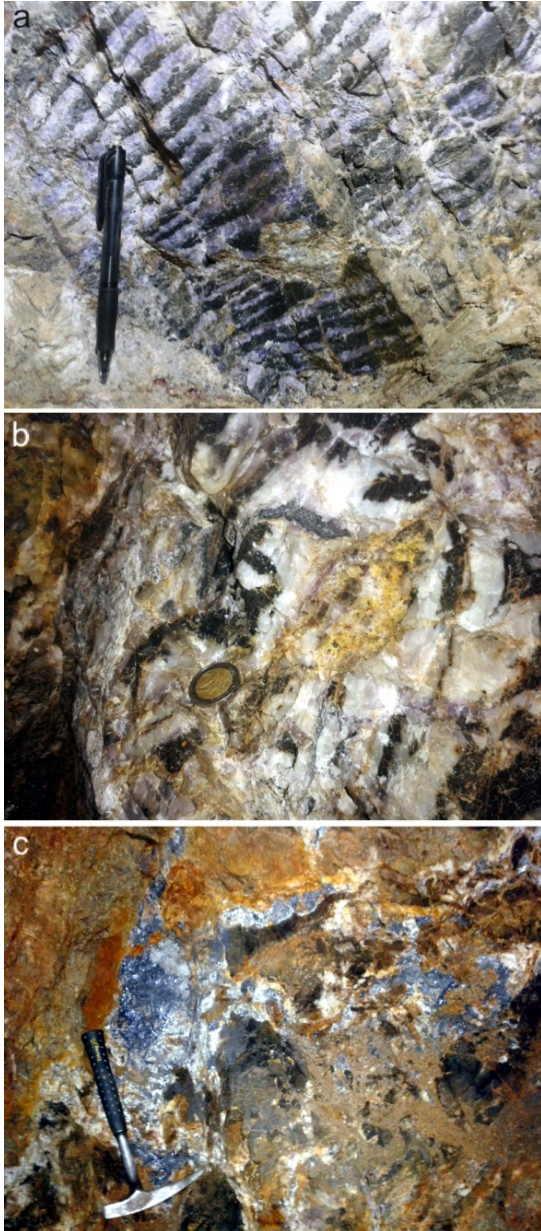


Fig. 6. Algunos tipos de mineralización. a) Fluorita con textura cebrada ("piedra indiana"), con bandas subparalelas a la estratificación. b) Fluorita blanca o violeta cristalizada, muy fracturada y con numerosos relictos de fluorita negra o dolomía. c) Galena interestratificada con fluorita, en un nivel muy brechificado.

El contexto desde el punto de vista sedimentológico corresponde a un dominio de plataforma carbonatada epicontinental de aguas someras, con episodios de inestabilidad tectónica (Fenoll *et al.*, 1987). Los tramos mineralizados tienen un fuerte control estratigráfico y paleogeográfico, de tal forma que las mineralizaciones se concentran preferentemente en facies carbonatadas de aguas someras de tipo *lagoon* y en subambientes relacionados con la formación de islas barrera y llanuras de mareas (*tidal flat*). Con respecto a las dolomitizaciones, tradicionalmente se ha considerado que se producirían por mecanismos de reflujos durante la diagénesis temprana, y que la mineralización de estos horizontes

debió producirse de forma coetánea a estos procesos de dolomitización (Martín, 1980). Ovejero *et al.* (1982) establece que se trata de mineralizaciones de tipo diagenético temprano donde se produce alternativamente una dolomitización o una fluoritización sindiagenética y una posterior silicificación. La transformación a facies de tipo franciscana o tipo indiana se produciría durante la diagénesis temprana, junto con procesos de brechificación, apareciendo en algunos puntos una dedolomitización en periodos epigenéticos tardíos. La distribución de las mineralizaciones, incluso a nivel geoquímico, dentro de un tramo litoestratigráfico preciso, y en estrecha relación con las facies dolomíticas y la morfología de las mismas, conduce a considerar la mineralización como sindiagenética. El papel de la actividad volcánica intermedia-básica no resulta claro. En recientes investigaciones (Ilin, 2018; Ilin *et al.*, 2019), mediante el estudio de inclusiones fluidas y espectroscopía Raman, se ha considerado que la formación de la textura franciscana en las dolomías y la mineralización se producen durante una etapa posterior, hidrotermal, que consiste en una dolomitización de la roca de caja, la formación de la textura cebrada durante la diagénesis tardía o inicio de hidrotermalismo, siguiendo el modelo de Merino y Canals (2011), seguido de la mineralización. Los datos obtenidos apuntan a que la formación del depósito posiblemente se habría producido en al menos dos fases. Una fase inicial probablemente de más baja temperatura y moderada-alta salinidad y una segunda fase, aparentemente de temperaturas mayores y con salinidades moderadas. La primera fase podría ser pre-Alpina o bien sin-Alpina, en relación con el inicio de la deformación, mientras que la segunda fase sería de removilización o de rejuvenecimiento post-Alpina durante el Terciario.

Las labores mineras

Las labores son todas subterráneas. Tienen la estructura típica de una minería de montaña donde se realizan varios niveles principales que sirven como galerías de transporte. Estos niveles, que normalmente presentan una diferencia de cota de entre 40 y 60 metros aproximadamente, se encuentran comunicados entre sí mediante chimeneas y rampas. Las chimeneas sirven para verter mineral a niveles inferiores, para paso de personal o para ventilación de las galerías. Por la disposición de los niveles mineralizados y la dirección del eje del pliegue, estos niveles principales de transporte, son en general perpendiculares a la estratificación. Cuando se alcanza uno de los dos niveles principales mineralizados, tanto a techo como a muro, se realiza un crucero que va siguiendo ese nivel, tanto en dirección como en profundidad, de tal manera que se crea una red de galerías más o menos regular (Fig. 7).

La cota 0 de mina se corresponde con la cota 1330 m.s.n.m, llegando las labores hasta la cota -510 (820 m s.n.m.). La diferencia de cotas, junto con la gran cantidad de comunicaciones por galerías y chimeneas entre niveles

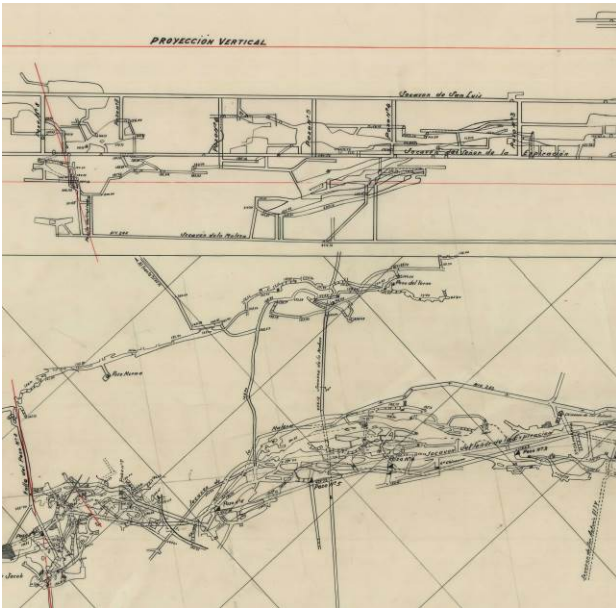


Fig. 7. Ejemplo de planos de labores de los años 80 del s. XX. Planta y esquema vertical del Nivel 140-San Luis. Plano cedido por el Ayuntamiento de Órgiva (Granada).

y bocaminas, constituye un sistema de ventilación natural muy eficaz que proporciona aire fresco a las explotaciones mineras, no siendo necesario, excepto en algunas zonas puntuales, la ventilación forzada. Algunos de las principales galerías son las conocidas como Mina Carriles, El Tajo, San Antonio el IV, San Luis, El Señor, Santa Rita, Las Candelarias o San Isidro. Actualmente se estima que hay unos 140 km de galerías en toda la Sierra de Lújar. La ausencia de agua en las galerías y el tipo de roca existente proporciona un macizo rocoso estable que permite trabajar en buenas condiciones de seguridad.

Proceso de explotación

La Mina Lújar se puede considerar como un yacimiento de filón estrecho en minería subterránea de montaña. Las mineralizaciones están sobre horizontes o zonas preferenciales dentro de los cuales se ensanchan y estrechan, a modo de budines, sin un patrón claramente identificado. Respecto a la inclinación de las capas mineralizadas, presentan buzamientos muy variables, entre 0 y 90°, normal o invertidos, en función de su posición dentro del pliegue anticlinal de la mina, aunque la mayor parte de las explotaciones presentan buzamientos de entre 30° y 70°. Esta inclinación de las capas condiciona el método de explotación. En principio, si es menor de 45°, se explota mediante el método de cámaras y pilares, mientras que si es mayor a 60°, se emplea cámara-almacén, aunque es frecuente una combinación de ambos métodos o una transición entre uno y otro, a medida que va variando el buzamiento de la capa mineralizada. El método de cámaras y pilares (Fig. 8) es un método de apertura de cámaras con pequeño ángulo con respecto a la horizontal que excava huecos y deja pilares distribuidos en función de la riqueza de las mineralizaciones y de las características

geotécnicas de la roca. De acuerdo a unas dimensiones de vanos y pilares determinadas mediante cálculos geotécnicos, se hacen coincidir éstos últimos con zonas pobres en mineralización siempre que sea posible, aunque su posición siempre responde a criterios de seguridad.

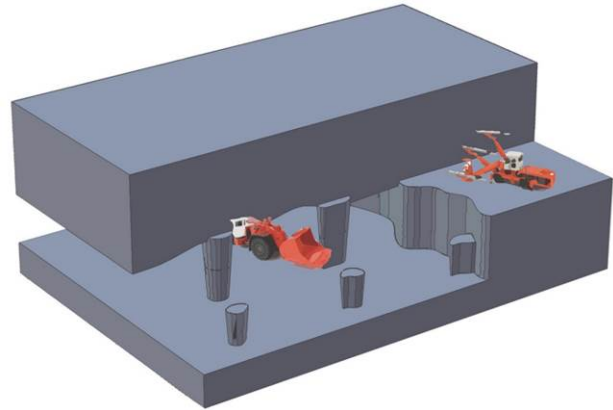


Fig. 8. Sistema de cámaras y pilares.

El método cámara – almacén (Fig. 9) es un método de explotación ascendente en la que la mayor parte del mineral arrancado permanece en la cámara de explotación constituyendo el piso de trabajo para continuar con las labores de extracción mediante perforación y voladura o mediante picado. Además, el material del piso sirve de soporte adicional de los hastiales hasta que se completa la descarga. En este método la preparación de las labores consiste en la preparación de una galería de base (por debajo de la mineralización) que se conecta mediante chimeneas con otra galería de explotación situada por encima de ésta y construida en mineral. Una vez arrancado el mineral se extrae un 30% de las chimeneas mediante palas cargadoras de perfil bajo (L.H.D.), de forma que queda espacio suficiente para seguir trabajando sobre el mineral de la cámara.

Dependiendo de la estabilidad de los hastiales, este método necesita o no de sostenimiento, normalmente bulones y gunita.

Con respecto a las dimensiones de las cámaras, hay que considerar varios factores como son la competencia de la roca encajante y de la propia roca mineralizada en fluorita, que, a su vez, varía en función de factores como la posición estratigráfica o la presencia de fallas y fracturas o de estructuras geológicas como pliegues o zonas de cizalla.

En función de todos estos factores, se diferencian varios tipos de mineralización, que condicionan tanto el método de explotación como su procesado en la planta de tratamiento. Estos niveles y sus características principales se muestran en la Tabla 2.

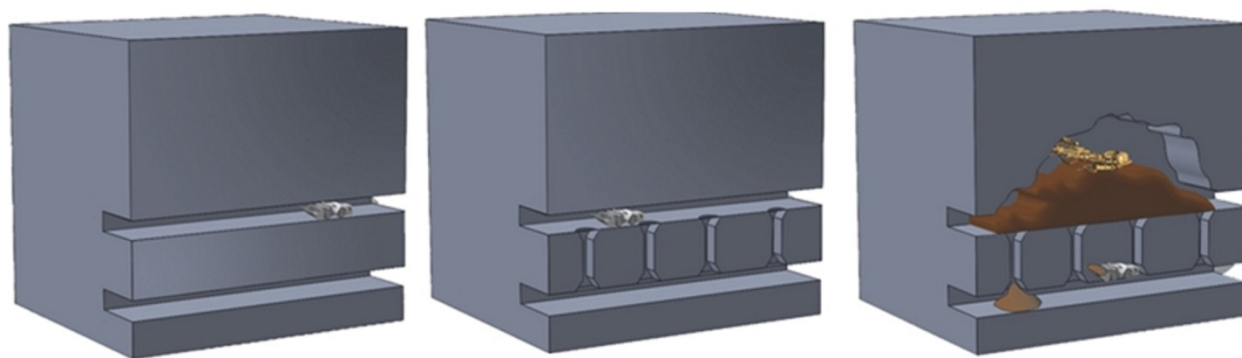


Fig. 9. Ejemplo de cámara almacén.

<i>Zona mineralizada</i>	<i>Características de las explotaciones</i>	<i>Potencias medias</i>	<i>Dimensiones de las cámaras</i>
Supratecho	Techos inestables por contacto con margocalizas. Mineralizaciones ricas en fluorita, presentando la galena contenidos en Pb de hasta 1 Kg/T. Incrustaciones de sílice en fluorita.	0.5-3 metros Fluorita-galena	Altura 2.5 m Vano 3 m
Techo D1 Flanco Norte (Invertido)	Techos estables, pero poco mineralizados.	0-1 metro Fluorita-galena	Altura 1.5 m Vano 2.5 m
Techo D1 Flanco Sur	Techos estables, mineralizaciones normalmente estrechas pero muy continuas. Normalmente fluorita-galena.	0.5-2 metros Fluorita-galena	Altura 3 m Vano 2.5 m
Muro D1 Flanco Norte (Invertido)	Las calizas tableadas de muro aparecen en el techo. Se deja una capa de 0.4 metros de fluorita para que sujeten estas calizas inestables. Mineralizaciones muy importantes, de fluorita principalmente. Históricamente es el nivel más explotado.	1.5-8 metros Fluorita	Altura 6 m Vano 6 m
Muro D1 Flanco Sur	No suele estar mineralizado. Cuando lo está, presenta poca potencia, a excepción de un área que se está investigando en la actualidad, que se asemeja mucho al muro en flanco norte.	0.5-2 metros Fluorita	Altura 3 m Vano 2.5 m
Inframuro	Se conocen pocas áreas mineralizadas en este nivel, pero presentan grandes potencias y alta calidad. Además, la ganga es caliza, que es mucho más fácil de separar por métodos gravimétricos. Presentan grandes potencias (hasta 10 metros).	2-10 metros Fluorita	Altura 6 m Vano 6 m
D2	Mineralizado generalmente a techo, principalmente en plomo, aunque con fluorita ocasionalmente. El muro se ha investigado muy poco.	0.2-1.2 metros Galena - (fluorita)	Altura 3 m Vano 2.5 m

Tabla 2. Tipos de mineralizaciones a considerar para el laboreo y tratamiento. Modificado de Amor y Navarro (2016).

Sistemas de producción

En cuanto a la explotación de mina, el arranque se produce bien mediante perforación y voladura, o bien mediante picado con martillo hidráulico. Los barrenos se realizan con carros de perforación capaces de una producción media de 20 m/h en barrenos de 3 metros y 36 mm de diámetro, con perforadoras tipo MIG (Fig. 10a) o bien mediante perforadora tipo Jumbo (Fig. 10b), con diámetro de 51 mm (2"). El esquema de perforación se realiza mediante barrenos paralelos. La carga se realiza con un cartucho de 26 mm de dinamita en fondo y ANFO en columna, iniciándose mediante detonador eléctrico. Cuando la resistencia a compresión de la roca

lo permite, se realiza el arranque directo mediante martillo hidráulico sobre robot con control remoto (Fig. 10c), siendo más productivo que la perforación y voladura. Además, presenta la ventaja de mantener hastiales saneados durante todo el proceso.

El transporte se realiza mediante pala de perfil bajo (L.H.D.) (Fig. 10d), deszafrando el mineral desde las cámaras de explotación hasta el nivel inferior principal, y de aquí hasta el nivel general de transporte, vertiendo por alguna de las 5 chimeneas principales o bien al exterior de la mina donde el material es llevado a la planta de tratamiento subterránea. La distancia media de acarreo es de aproximadamente 1.5 km, si bien puede llegar a ser de hasta 3 km.

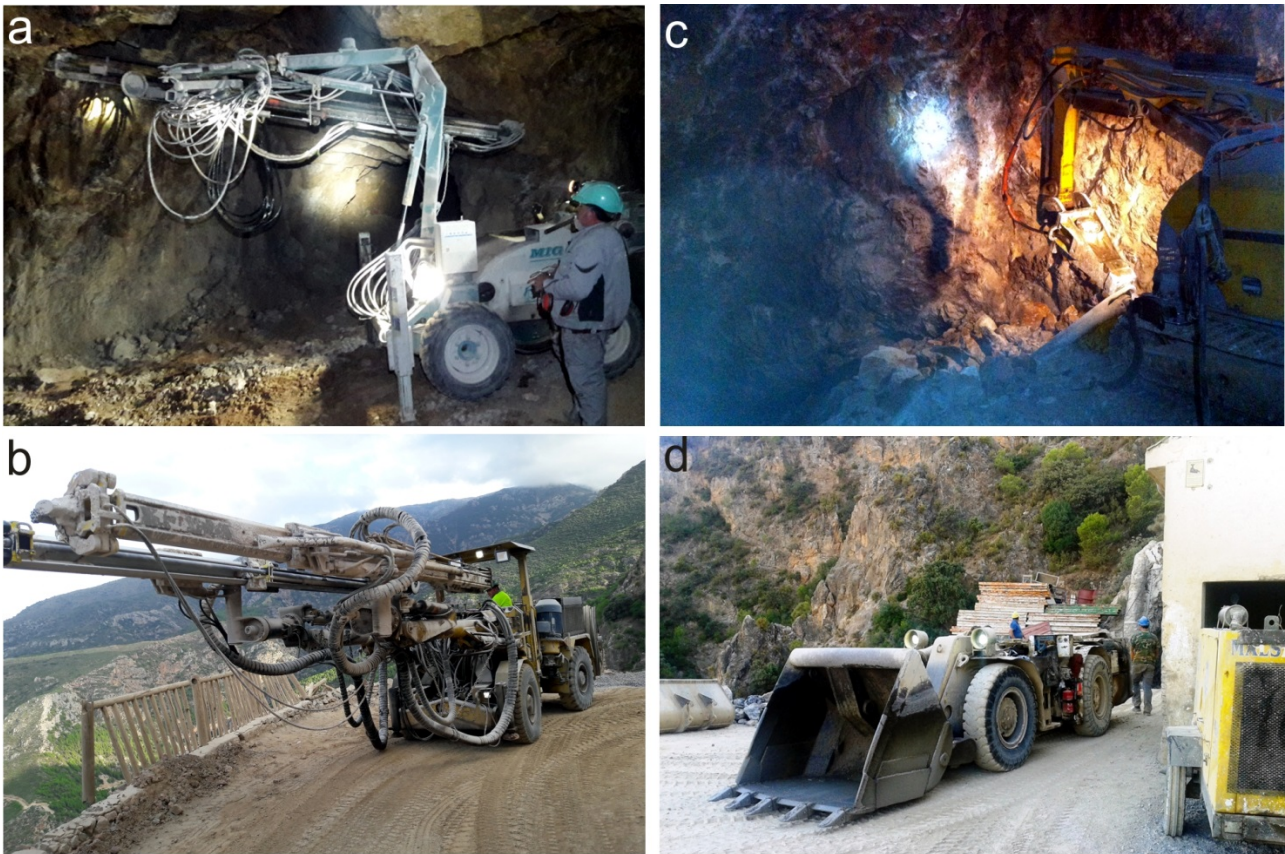


Fig. 10. Ejemplo de máquinas empleadas en la Mina Lijar. a) Perforadora de un brazo. b) Perforadora de dos brazos tipo Jumbo. c) Robot de demolición teledirigido. d) Pala cargadora de perfil bajo (LHD).

El proceso de concentración

Minera de Orgiva, S.L. cuenta con una planta de tratamiento en el interior de una de las galerías principales, la cual concentra el mineral de fluorita desde valores aproximados del 35% hasta un producto final que varía entre el 55 y el 90% de CaF_2 . En función de su enriquecimiento, el mineral será destinado a aplicaciones cementeras o metalúrgicas. Es una de las pocas plantas de tratamiento instaladas en el interior de una mina en Europa.

Inicialmente, el todo-uno llega a la planta a través de palas de carga de perfil bajo (L.H.D.) para interior, las cuales vierten su contenido a través de una rampa hasta la primera machacadora. El material producido en la trituración primaria, a través de una cinta transportadora, pasa a una segunda machacadora, la cual mediante el mismo proceso reduce aún más el tamaño de la roca hasta lograr la granulometría deseada. El material, previamente a la entrada de la segunda machacadora, debe superar una malla que filtra su tamaño. Los restos que no superen esta malla se circulan nuevamente a una machacadora más pequeña pero que realiza la misma función de trituración primaria para obtener un material de granulometría adecuada para la trituración secundaria.

Una vez se ha reducido el tamaño del todo-uno, el material procedente de la segunda machacadora se transporta a una tolva, la cual sirve de entrada al escurridor primario. El escurridor, con forma de una mesa llena de ranuras en su base, permite eliminar mediante limpieza con agua la parte con una granulometría inferior a 1.5 mm. El agua limpia todo el material, arrastrando estas partículas, que se filtran a través de las ranuras de la mesa hasta una tolva de recepción en la parte inferior del escurridor. Este material fino se bombea junto al agua mediante una tubería hasta el concentrador gravimétrico (espirales), donde se recupera la fluorita con esta granulometría. El resto de todo-uno libre de finos sale del escurridor hasta caer a una tolva de mezclado.

La siguiente etapa consiste en la separación dinámica por medios densos. Permite separar sólidos en función de su densidad, usándose como medio un fluido de densidad intermedia. El material procedente del primer escurridor se mezcla en una tolva con la dosis adecuada de agua con ferrosilicio, y esta mezcla se bombea hasta un ciclón en rotación que, mediante fuerzas centrifugas, produce la separación entre la mena, que se desplaza a la parte más exterior del ciclón, y la ganga, que gira más próxima al centro de ciclón. Ambos productos se recogen por separados a la salida del ciclón y pasan a un segundo

escurridor, que sirve para limpiar con agua el ferrosilicio adherido al material de salida, el cual se recupera mediante la utilización de un separador magnético, recirculando nuevamente para comenzar el proceso sin pérdidas de ferrosilicio.

Finalmente, el mineral es transportado hasta una nueva etapa de molienda que proporcionará una granulometría acorde a las necesidades del consumidor y que representa el producto final de la planta. Por otro lado, el estéril se almacena para otros posibles usos.

El material que se genera en el proceso de lavado es procesado mediante un concentrador gravimétrico que consiste en un conjunto de espirales con canaletas helicoidales con cuatro a nueve vueltas. Las partículas más pesadas se reúnen en el fondo, donde la fricción y el lastre actúan para aminorar la velocidad del material. Debido a la forma de espiral del lecho de la canaleta, las fuerzas centrífugas en la pulpa llevan al material más liviano hacia afuera, hacia el borde de la espiral, mientras que el material pesado permanece adentro. Este sistema permite de forma óptima la separación de la fluorita (densidad: 3.18 kg/m^3), la galena (7.60 kg/m^3) y el estéril, constituido principalmente por caliza (2.70 kg/m^3) y dolomía (2.85 kg/m^3).

Actualmente está en desarrollo una planta piloto de flotación mediante columnas con el fin de beneficiar el material que actualmente no es recuperable por las espirales (lamas con tamaño de grano inferior a $150 \mu\text{m}$). La flotación de minerales es un método utilizado para separar y concentrar minerales basado en la diferencia de las propiedades superficiales de las distintas especies minerales. La hidrofobicidad e hidrofiliicidad de los distintos minerales son generalmente inducidas mediante la introducción al proceso de una serie de reactivos químicos. Esta técnica, de gran complejidad, se basa en una combinación de las leyes de la química superficial, química coloidal, mineralogía y física.

En la Fig. 11 se muestra la planta de medios densos (a), la planta de espirales (b) y la planta piloto de flotación (c).

Características medioambientales

Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta una explotación minera es a una adecuada gestión medioambiental de los residuos y de factores como ruidos, polvo, etc., tanto por el coste económico, como por la degradación medioambiental que puede suponer. Estos desafíos también son económicos o tecnológicos, e incluyen reducir los altos costes de inversión, reducir la generación de residuos y grandes relaves, identificar y abordar los impactos ambientales, y mejorar la flexibilidad, la automatización y la seguridad de las operaciones. Además, en general, la desconfianza pública hacia el sector de las materias primas se basa, a veces, en un mal legado de la minería, tanto en forma de residuos

como de accidentes. Esta idea a menudo también se alimenta de prejuicios y falta de conciencia de la importancia de las materias primas para la sociedad. Esto además, se incrementa en determinadas áreas especialmente sensibles, como es la Sierra de Lújar, muy cercana al Parque Nacional de Sierra Nevada, y

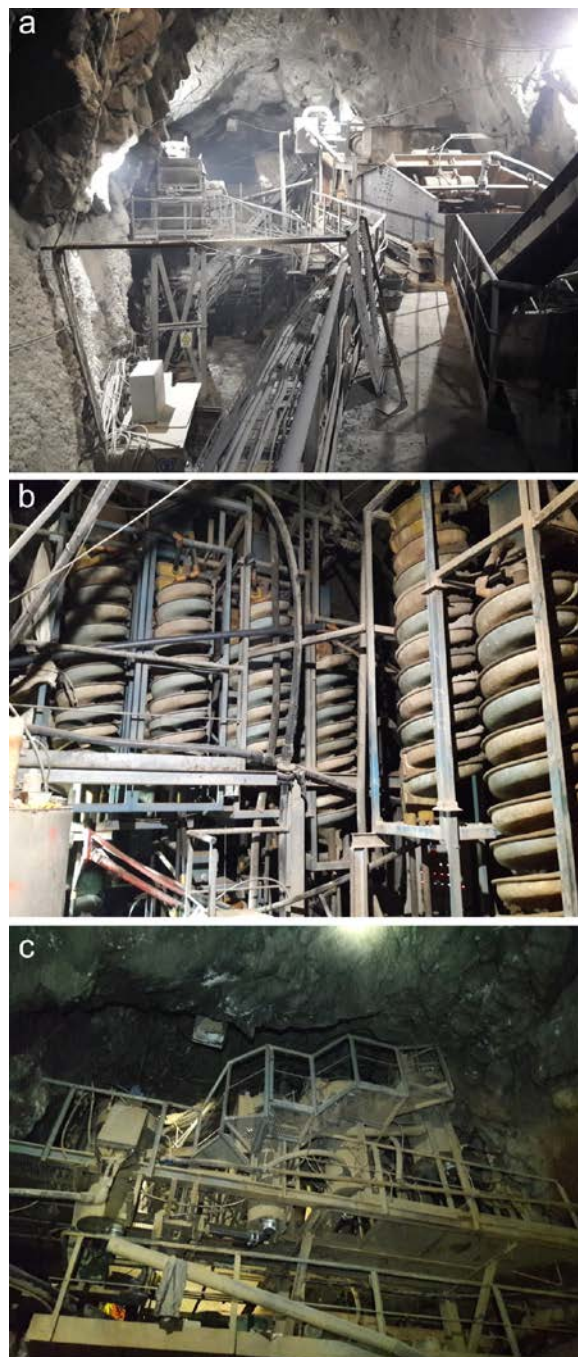


Fig. 11. Instalaciones de tratamiento. a) Planta de medios densos. b) Planta de espirales. c) Columnas de flotación.

englobada en una comarca, Las Alpujarras, que tiene al turismo como una de sus principales fuentes de ingreso.

Para superar estos conflictos de intereses contradictorios, los conceptos de minería invisible, minería de impacto cero y minería verde son cada vez más necesarios para las actividades mineras en muchas áreas de Europa y, en general, a nivel mundial. A pesar

de que el sector minero actualmente es visto como anticuado y altamente hostil para el medio ambiente, es importante aunar esfuerzos para revertir esta imagen, al mostrar que la extracción y el procesamiento de minerales se pueden realizar de una manera más innovadora y sostenible. Es por eso que será cada vez más importante desarrollar e implementar nuevas soluciones económicamente viables para explotar este tipo de recursos y obtener materiales de interés con un mínimo de residuos y emisiones, así como un consumo mínimo de energía y agua.

En el presente caso, Minera de Órgiva S.L. realiza una gestión integral de los residuos, de tal forma que la afección medioambiental es mínima. Los problemas principales son los derivados de la planta de tratamiento y de la gestión de los estériles. La planta de tratamiento está instalada en el interior de una galería, con lo que se reducen hasta el mínimo problemas derivados de la formación de polvo o ruidos, siendo inapreciables en el exterior. La instalación eléctrica se realiza mediante grupo electrógeno, evitando así la existencia de cables en el exterior, reduciendo por tanto, el riesgo de incendio. Estos grupos electrógenos van alimentados con gasoil, generando humos como consecuencia de la combustión. Para evitar su salida al exterior, estos humos se reconducen para alimentar el tambor de secado (*trommel*) de material, de tal manera que se aprovecha el calor generado para el secado de la fluorita, reduciendo por tanto el consumo energético y evitando la emisión de los gases de combustión. Otra cuestión destacada es el bajo consumo de agua en el beneficio del material. El consumo actual es inferior a 1 l/s, reciclando además más de un 80% del agua consumida. La instalación de la planta en interior permite reconducir y aprovechar casi toda el agua que se consume, mediante un sistema de aljibes y balsas, aprovechando, además, toda el agua de escorrentía de la precipitación que cae por los alrededores de la mina. Respecto a los estériles de mina o el generado tras todo el proceso de tratamiento y concentrado del mineral en planta, se emplean para rellenar cámaras antiguas, cuya explotación se ha dado por concluida, con el fin de incrementar las condiciones de seguridad y estabilidad de la zona. Estos estériles son residuos totalmente inertes, puesto que el proceso de concentración actualmente se realiza por medios exclusivamente mecánicos y físicos. De esta forma no se generan nuevas escombreras que puedan suponer una degradación medioambiental.

Estas buenas prácticas medioambientales han conducido a que la “Mina Lújar”, sea incluida como ejemplo de “exploración efectiva y diseño del emplazamiento” por la Unión Europea en la guía “*Desarrollo de un documento de orientación sobre las mejores prácticas en los Planes de Gestión de Residuos Extractivos (EWMP)*”, editada recientemente (European Commission, 2019).

LA FLUORITA Y LA ESTRATEGIA DE “CRITICAL RAW MATERIALS”

En Europa, la mayoría de los depósitos minerales de fácil acceso están prácticamente agotados. Por ello, la Unión Europea es consciente de que las oportunidades principales para acceder a las materias primas dentro de su territorio se ubican en lugares técnicamente difíciles por estar a grandes profundidades, en áreas remotas, en áreas pobladas, en antiguas minas, en depósitos de baja ley o en pequeños depósitos donde las operaciones mineras más grandes no son técnicamente factibles o económicamente viables. La viabilidad económica de estos depósitos depende de los precios del mercado y también de la eficiencia de la operación, desde la perforación hasta el producto final. El pequeño tamaño de las operaciones que se desarrollan para extraer estos depósitos impide campañas de exploración intensivas para definir los límites y la calidad del cuerpo del mineral, por lo que es necesario encontrar tecnologías avanzadas para guiar las etapas posteriores de la extracción.

En este contexto, la minería de depósitos pequeños, en particular, es especialmente interesante, ya que existe una necesidad específica de desarrollar soluciones rentables y ambientalmente avanzadas, puesto que antes de invertir en un pequeño depósito minero, se deben tener en cuenta los posibles beneficios y el retorno de la inversión. Para lograr este objetivo, es esencial mejorar la capacidad de tratamiento, con procesos equivalentes a los utilizados en minas más grandes y basados en tecnologías de minería flexibles. Esto, obviamente, incluirá el desarrollo de tecnologías mineras altamente automatizadas y rentables para mejorar la eficiencia económica de las pequeñas explotaciones.

Por otro lado, las leyes más bajas y los minerales complejos también presentan dificultades económicas y técnicas relevantes, lo que hace que muchas minas como la Mina Lújar muestren importantes limitaciones:

- El depósito es complejo, pequeño o profundo y presenta altos costes de excavación y operación. Como se ha descrito anteriormente, el caso de la Mina Lújar presenta estas características, ya que la potencia de las capas raramente supera los 3 metros, y por lo tanto está bastante limitado en extensión, restringiéndose exclusivamente a determinadas zonas de la Sierra de Lújar. En cuanto a la profundidad, se encuentra desde cotas casi superficiales hasta cotas de al menos 510 metros bajo la superficie, lo que supone un fuerte incremento de los costes de explotación o de transporte.
- La mena contiene minerales intersticiales y microcristalinos que requieren un tamaño de liberación muy fino. Como resultado, la trituración y la molienda son muy intensivas, requieren mucha

energía y son extremadamente costosas. En el caso de la fluorita, la presencia abundante de lamas, es decir, fragmentos de tamaño de grano inferior a 150 µm, dificulta en gran medida el procesamiento mediante espirales o flotación, impidiendo una recuperación óptima de todo el mineral.

- La separación de las diferentes fases minerales que contienen los elementos de interés es difícil, lo que dificulta la obtención de concentrados comerciales, así como altas tasas de recuperación, perdiendo una proporción sustancial del producto objetivo al no disponer de una tecnología óptima de recuperación. En este caso, la fluorita viene frecuentemente ligada a calizas o dolomías, pudiendo haber fragmentos que contengan ambos minerales, a cualquier tamaño de grano. Es lo que se conoce como “mixtos”, los cuales no responden de forma adecuada al proceso de separación por medio denso o espirales, lo que supone un incremento del coste al tener que reducir el tamaño de grano mediante molienda, para aprovechar aún más el mineral.
- La viabilidad de las minas está estrechamente relacionada con los precios de los minerales y de los metales, así como con las condiciones del mercado, de modo que su viabilidad puede alcanzar una situación crítica cuando los precios descienden de los costes de producción.

En esta dirección, se está desarrollando actualmente (2016-2020) un proyecto del programa Horizonte 2020 denominado SLIM (*Sustainable Low Impact Mining solution for exploitation of small mineral deposits based on advanced rock blasting and environmental technologies* - <https://www.slim-project.eu>), cuyo objetivo es desarrollar soluciones basadas en la fragmentación no lineal de la masa de roca mediante la optimización de modelos de voladura, control de partículas suspendidas en el aire, efectos de la vibración y acciones de mitigación de la lixiviación de los nitratos procedentes del explosivo para la explotación de pequeños depósitos minerales. El desarrollo de este proyecto tendrá como consecuencia una explotación más rentable y sostenible de los recursos minerales, acorde con las políticas más recientes en esta dirección de la Unión Europea. Asimismo, permitirá una reducción del impacto ambiental y una mejor aceptación social, al disminuir los costes de explotación y tratamiento al optimizar la fragmentación de la roca en la fase de voladura, generando, por tanto, menos estériles, y reduciendo una parte de los efectos derivados de las mismas, como el polvo, los gases o las vibraciones.

Es por todo ello, que depósitos minerales como los que se localizan en las Sierras de Lújar o Gádor son ideales para la estrategia de recursos minerales que pretende seguir a la Unión Europea en un futuro cercano. Como se muestra en la Tabla 1, la alta dependencia exterior de la fluorita, su elevado índice de sustitución y su bajo índice de reciclado, hace que sea prioritario el desarrollo de este tipo de explotaciones.

CONSIDERACIONES FINALES

La fluorita (o espato-flúor en su nombre comercial) es una de las 27 materias primas críticas cuya disponibilidad para la Unión Europea corre riesgo por su escasez de suministro y porque tiene la potencialidad de tener un importante impacto en la economía.

Mínera de Órgiva, S.L. retomó en el año 2010 la explotación de un yacimiento milenario de fluorita y plomo, con el fin de realizar una explotación racional del recurso. En conjunto, esta actividad minera ha supuesto un gran impulso económico, particularmente para Órgiva y las localidades cercanas, y en general, para la provincia de Granada, con un bajo coste ambiental, puesto que la mayor parte de la actividad minera (explotación y tratamiento) se realiza en interior, con lo que la afección ambiental es casi nula.

La Mina Lújar cumple con las características indicadas por la Unión Europea respecto a la evolución que debe tomar la minería en Europa para reducir la dependencia exterior de materias primas, a pesar de ser un yacimiento de pequeño tamaño, gran complejidad y con baja ley.

Respecto a las perspectivas de futuro, son varios los objetivos que se pretenden lograr, todo ello en relación con sustancias consideradas CRM:

- El estudio de nuevas zonas donde desarrollar la actividad minera, teniendo en cuenta la necesidad de CRM, tales como la previsión del reinicio de las explotaciones de fluorita en la Sierra de Gádor (Almería) o de barita en la zona de la Carolina (Jaén). Esto permitirá garantizar el suministro de materias primas durante un largo periodo de tiempo, permitiendo además un incremento de la producción en el caso de la fluorita.
- A nivel minero, se pretende mejorar la maquinaria para reducir los costes de producción y de mantenimiento, así como el impacto medioambiental de los equipos, para lo que actualmente se están desarrollando proyectos con varias universidades y empresas privadas de maquinaria, con el fin de automatizar procesos.
- A nivel de tratamiento de mineral, se pretende mejorar el rendimiento en la obtención de fluorita metalúrgica, lograr fluorita en grado ácido mediante la planta de flotación y conseguir producciones mayores que permitan reducir los costes de planta y bajar la ley de corte.
- A nivel medioambiental, seguir la línea de instalaciones en interior mina y dar a conocer nuestro sistema de procesamiento y minería de interior, que permita abrir camino ante las distintas administraciones para plantear otros posibles proyectos mineros.
- A nivel económico, nuestro punto de vista se torna algo más clásico por apostar por una minería a largo

plazo, aunque suponga pequeños-medios beneficios en una vida de proyecto lo más larga posible y mayor aprovechamiento de los recursos en oposición a la tendencia de realizar una minería con el mayor beneficio en el menor tiempo posible.

Ante el agotamiento de los grandes depósitos de recursos minerales en Europa, o ante la mayor dificultad en su explotación debido a condicionantes medioambientales y sociales, la política de la Unión Europea de fomentar la minería de pequeños depósitos antiguamente denostados por su baja rentabilidad o mayor complejidad técnica, favorece enormemente el desarrollo de la economía local. Se trata, en general, de explotaciones pequeñas, explotadas por compañías locales o regionales, con trabajadores y proveedores en su mayor parte de la comarca. Además, estas explotaciones pueden ser totalmente compatibles con la conservación de las características ambientales del territorio, sin que su desarrollo suponga un riesgo para los valores ambientales de una zona.

La apertura de nuevos proyectos de similares características puede suponer un impulso a la economía de las zonas afectadas, y en general a la región, sin que ello suponga un incremento de la degradación medioambiental, como ha quedado demostrado en el presente caso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto SLIM del programa Horizonte 2020 de la Unión Europea (nº 730294) (<https://www.slim-project.eu/>).

Los autores desean expresar su agradecimiento a dos revisores anónimos por su contribución a la mejora de este artículo.

REFERENCIAS

Amor, C. & Navarro, R. (2016): Minería del flúor en la Sierra de Lújar. *Rocas y Minerales*, **536**, 46-58.

Callahan, W.H. (1967): Some spatial and temporal aspects of the localization of Mississippi Valley-Appalachian type ore deposits. in: "Genesis of stratiform lead-zinc-barite-fluorite deposits (Mississippi Valley Type Deposits). A symposium.", J.S. Brown, ed., Economic Geology Monograph 3, Society of Economic Geologists Inc., Economic Geology Publishing Inc, New York, USA, 14-19. ISBN: 978-1-629495-50-7.

Cohen, A. (2002): Minas y mineros de Granada (Siglos XIX y XX). Diputación de Granada, Granada, España, 161 p. ISBN: 9788478073290.

Costa, J. (1895): Estudios Ibéricos. Tipografía de San Francisco de Sales, Madrid, España, 207 p.

ENADIMSA (1986): La minería andaluza. Libro Blanco Vol 1. Dirección General de Industria, Energía y

Minas. Consejería de Economía y Fomento, Sevilla, España. 350 p.

European Commission (2011): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials. COM/2011/0025 final. European Commission, Brussels, Belgium, 23 p. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0025:FIN:en:PDF>. [consulta: 12 abril 2019].

— (2014a): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative. COM/2014/0297 final. European Commission, Brussels, Belgium, 7p. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52014DC0297> [consulta: 12 abril 2019].

— (2014b): Horizon 2020 en breve. Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea (Horizonte 2020). European Commission, Luxembourg, 40 p. ISBN: 978-92-79-38915-3. DOI: 10.2777/80075 [consulta: 12 abril de 2019].

— (2017a): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. European Commission, Luxembourg, 93 p. ISBN: 978-92-79-47937-3. Catalogue number: ET-04-15-305-EN-N. <https://dx.doi.org/10.2873/876644> [consulta: 12 abril de 2019].

— (2017b): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU. COM/2017/0490 final. European Commission, Brussels, Belgium, 8 p. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2017:0490:FIN> [consulta: 12 abril de 2019].

— (2019): Development of a guidance document on best practices in the extractive waste management plans. Circular economy action. European Commission, Luxembourg, 46 p. ISBN: 978-92-76-00037-2. Catalogue number: KH-03-19-104-EN-N. <https://dx.doi.org/10.2779/061825> [consulta: 12 abril de 2019].

Ewert, K. (1976): Estratigrafía, litología y mineralizaciones del Manto de Lujar (Zona Bética). *Studia Geológica*, **11**, 109-120.

Fenoll-Hach-Ali, P., Delgado-Salazar, F., Fontboté-Rubio, L., Gervilla-Linares, F., Martín-Martín, J.M., Rodríguez-Gordillo, J., Torres-Ruiz, J., Velilla-Sánchez, N. (1987): Los yacimientos de fluorita, plomo, cinc y bario del sector central de la Cordillera Bética. Departamento de Mineralogía-Petrología, Universidad de Granada, Granada, España. 127 p.

Fontboté, L. & Gorzawski, H. (1988): Isotope (Sr, C, O, and S) tracing of diagenetic ore formation in carbonate-hosted ore deposits illustrated on the F-(Pb-

- Zn) deposits in the Alpujarrides, Spain and the San Vicente Zn-Pb mine, Perú. in “Mineral deposits within the European Community”, J. Boissonnas & P. Omenetto, eds. Special Publication No. 6 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, vol 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 465-484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51858-4_25
- Ilin, A. (2018): Mineralogía y microtermometría de los diferentes tipos de depósito de fluorita de “Mina Lújar” (Órgiva, Granada). Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Granada. 47 p.
- , Velasco, F., Navarro, R., Tornos, F. (2019): New data on Alpine type fluorite deposits: case of Lújar mine in Betic Cordillera (SE Spain). *Macla*, **24**, 00-00.
- Madoz, P. (1850): Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar. Establecimiento tipográfico de P. Madoz y L. Sagasti, Madrid, España. 1130 p.
- Martin, J.M. (1980): Las dolomías de las Cordilleras Béticas. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 201 p.
- , Torres-Ruiz, J., Fontboté, L. (1987): Facies control of strata-bound ore deposits in carbonate rocks: the F-(Pb-Zn) deposits in the Alpine Triassic of the Alpujarrides, southern Spain. *Mineral. Deposita*, **22**, 216-226. <https://doi.org/10.1007/BF00206613>
- , —, Velilla-Sanchez, N., Fenoll-Hach-Ali, P. (1984): Paleokarstic Lead-(Zinc)-Fluorite deposits in shallowing upward sequences in the Triassic of the Alpujarrides (Betic Cordillera, Southern Spain). in: “Syngensis and Epigenesis in the Formation of Mineral Deposits”, A. Wauschkuhn, C. Kluth, R.A. Zimmermann, eds. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 438-447. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70074-3_40
- Merino, E. & Canals, A. (2011): Self-accelerating dolomite-for-calcite replacement: self-organized dynamics of burial dolomitization and associated mineralization. *Am. J. Sci.*, **311**, 573–607. <http://dx.doi.org/10.2475/07.2011.01>
- Ovejero, G., Tona, F., Marín, J.M., Gutiérrez, A., Jacquín, J.P., Servajean, G., Zubiaur, J.F. (1982): Las mineralizaciones estratiformes F₂Ca-Pb en las dolomías triásicas de sierra de Lujar (Cordilleras Béticas, España). *Bol. Geol. Min.*, **93** (6), 15-35.
- Pérez-Salguero, A.J. (2017): Los candiles cerámicos como indicadores de la minería medieval Andalusí en Sierra de Lújar (Granada). *Espacio, Tiempo y Forma*, **10**, 249-295. <http://dx.doi.org/10.5944/etfi.10.2017.17915>.
- Regueiro, M. (2014): Minerales críticos en Europa: metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. *Macla*, **19**, 1-9.
- Reolid, A. (2017): Avances en la investigación de los depósitos F-Pb-(Zn) de las Cordilleras Béticas: The state of the art. Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Granada. 47 p.
- Roldan, F.J. (2011): La Andalucía Alpina. in: “Cartografía de Recursos Minerales de Andalucía”, A. García-Cortes, ed. ppal. IGME-Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, Madrid, 32-59. ISBN: 978-84-7840-869-6 y 978-84-7595-276-5.
- Sangster, D.F. (1990): Mississippi Valley-type and sedex lead-zinc deposits: a comparative examination. *Trans. Inst. Min. Metall., Sect. B*, **99**, B21-B42.
- Sanz de Galdeano, C. & López-Garrido, A.C. (2014): Structure of the Sierra de Lujar (Alpujarride Complex, Betic Cordillera). *Est. Geol.*, **70** (1), e005. <http://dx.doi.org/10.3989/egeol.41491.290>
- Trio, M. & Guillermo, M. (2017): Panorama minero. IGME. Madrid. 719 p. NIPO: 064170148.
- Tritlla, J., Levresse, G., Corona-Esquivel, R., Banks, D., Lamadrid, H., Bourdet, J. (2006): Depósitos de Pb-Zn-Cu-Ba-F-Sr epigenéticos estratoligados en series sedimentarias en relación con salmueras de cuenca: depósitos de tipo “Mississippi Valley” (MVT) y similares en México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, **58**, 103-139. <http://dx.doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a4>