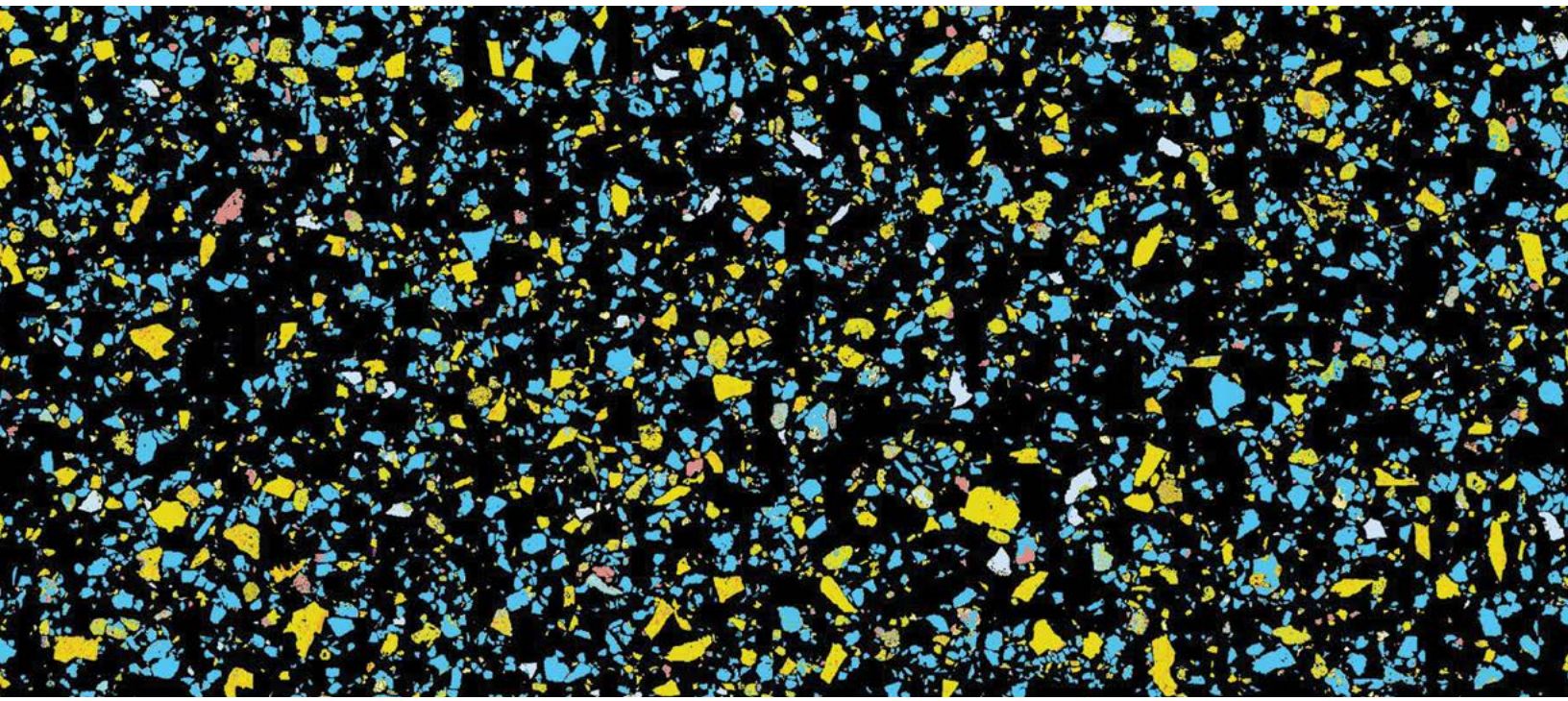


Información sobre mineralogía cuantitativa automatizada para el procesamiento de yacimientos complejos de REE



Seeing beyond

Autores: Eddy Hill y Rich Taylor
Carl Zeiss Microscopy Ltd, Cambourne, Reino Unido

Fecha: Agosto de 2020

Existen diferentes definiciones de lo que es un yacimiento complejo. En su forma más simple, el término puede hacer referencia a un yacimiento del que se debe extraer más de un elemento de valor (p. ej., cobre u oro) o puede hacer referencia a yacimientos de procesamiento costoso debido a la presencia de un elemento nocivo (p. ej., concentración elevada de arsénico en un depósito de oro). Cada vez con más frecuencia se explotan yacimientos difíciles de tratar como consecuencia de la complejidad de su composición, la liberación limitada de minerales objetivo y la fina granularidad. Estos son los yacimientos complejos a los que se hace referencia en este texto. La demanda de materias primas cruciales y de uso técnico depende cada vez más de las influencias sociales y tecnológicas. Al mismo tiempo, la disponibilidad de yacimientos de fácil extracción es cada vez menor, por lo que se requiere un refinamiento en la extracción de minerales objetivo para mantener la cadena de suministro y prolongar el uso sostenible de los recursos minerales.

El beneficio eficiente de los yacimientos complejos requiere información detallada sobre el yacimiento que va más allá de los meros conocimientos sobre mineralogía y tradicionalmente incluye una gran variedad de técnicas, como la difracción de rayos X (XRD), la fluorescencia de rayos X (XRF) y algún tipo de análisis de liberación. Los siguientes párrafos sirven a modo de ejemplo sobre cómo ZEISS Mineralogic (ML) proporciona una gran cantidad de información relevante para el procesamiento de yacimientos complejos sin necesidad de recurrir a otras técnicas analíticas. El sistema ML va más allá de la mera descripción de la mineralogía, la composición química y la liberación, y ofrece información detallada para tomar decisiones de procesamiento durante el aprovechamiento de yacimientos.

Tecnología: el método ZEISS Mineralogic

El sistema ML ofrece mineralogía automatizada cuantitativa (AQM) basada en SEM por medio de una combinación de captura de imágenes SEM de gran resolución y EDS. El uso de detectores EDS para análisis químicos precisos se ha validado repetidamente para demostrar que, dentro de su límite de detección físico de 1000 ppm por punto analizado, la EDS puede ser tan precisa como la WDS para composiciones con elementos en menor y mayor cantidad [1, 2]. ML es un sistema versátil diseñado para obtener precisión y flexibilidad analíticas. Cualquier detector

de captura de imágenes (SE, BSD, CL, etc.) puede utilizarse por sí solo o combinado para definir la zona que debe analizarse antes de realizar un análisis químico cuantitativo para clasificar automáticamente las fases minerales con base en su composición química, proporcionando información detallada sobre morfología, química y parámetros texturales. El uso y la filosofía del sistema ML superan a otros paquetes de mineralogía automatizada. El análisis químico cuantificado, en combinación con un procesamiento y un análisis avanzados de la imagen, hacen que el sistema ML sea algo más que una herramienta petrográfica capaz de describir la mineralogía, es decir, lo convierten en una herramienta petrográfica que ofrece descripciones de las partículas y parámetros de interpretación que hasta ahora no estaban disponibles sin una fase de posprocesamiento compleja y costosa.

El resultado es una solución única, un sistema integral para mineralogía de procesos que ofrece información química y mineralógica detallada sin necesidad de recurrir, por ejemplo, a las técnicas XRD o XRF, ya que la desconvolución de cada espectro recogido durante el análisis implica que el sistema ML puede proporcionar una composición química general de la muestra. En el flujo de trabajo, esto permite ahorrar al no tener que utilizar otras técnicas más caras como la XRF o la microsonda electrónica (EMP). Como se podrá comprobar más adelante en el texto, esto proporciona información de la que normalmente no disponemos cuando decidimos sobre un proceso de beneficio.

Los análisis citados se han realizado con un sistema ML compuesto por un microscopio electrónico de barrido (SEM) ZEISS Sigma 300 equipado con 2 detectores EDS Ultim Max de Oxford de 65 mm². El uso de la gama de detectores EDS Ultim Max de Oxford permite aumentar la velocidad de análisis y la resolución química analítica ofrecida por el sistema ML. Los detectores EDS Ultim Max se han diseñado para ofrecer precisión y facilidad de uso en todo tipo de condiciones analíticas, incluso con las elevadas tasas de recuento que se utilizan con frecuencia en la mineralogía automatizada. Esto es posible gracias a la tecnología de procesamiento de espectro TruQ de Oxford Instruments, que combina una serie de algoritmos específicos para procesar y cuantificar todos los espectros en tiempo real y garantizar así que se obtengan siempre los resultados correctos. Por ello se puede confiar de inmediato en los resultados sin necesidad de revisar manualmente los espectros obtenidos (Figura 1).

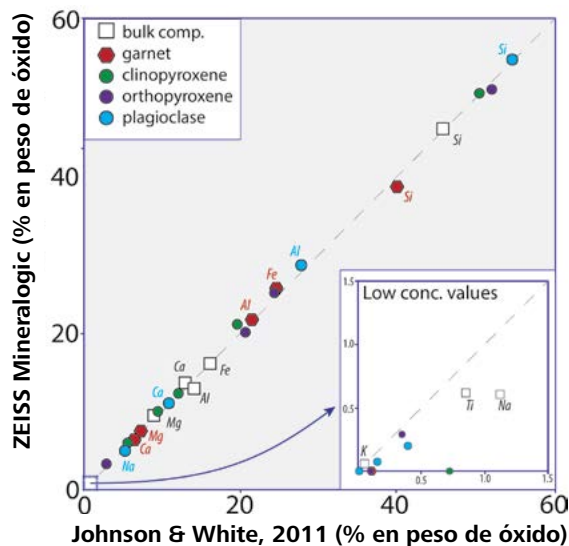


Figura 1 Comparación de la geoquímica de Johnson y White y la química de ZEISS Mineralogic para el metagabro de Scouriemore. Gráfico que compara la química mineral promedio de las principales fases de silicato (símbolos de colores) y la química de la roca total (cuadrados abiertos) de los dos estudios. Los datos muestran que ZEISS Mineralogic proporciona una correlación 1:1 con respecto a la química mineral determinada mediante EPMA y la química de la roca total determinada mediante XRF.

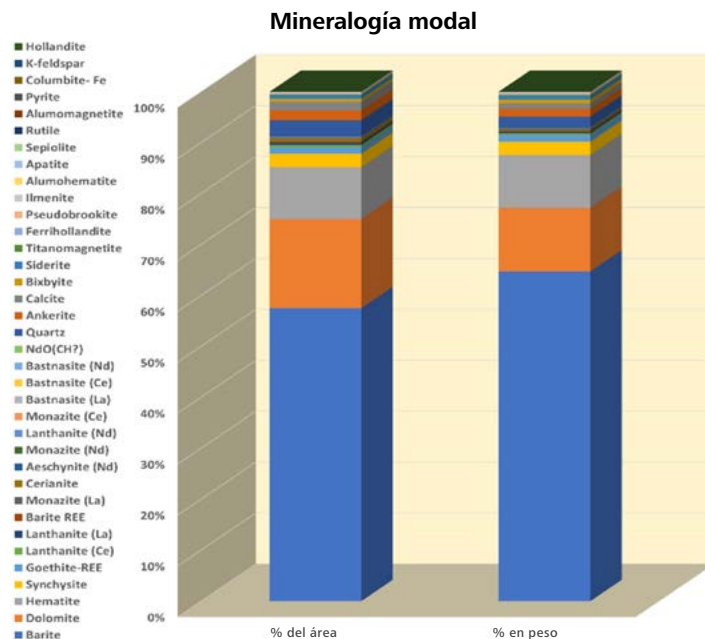


Figura 2 Composición modal de la contribución en % del área y % en peso de las diferentes fases. En la muestra predomina la barita, la dolomita y la hematita. La sinchisita es el principal mineral REE presente, junto con el lantánido y la bastnasita en una menor cantidad.

	Número	Área %	Peso %	Tamaño del grano (µm)	Desv. est. del tamaño del grano (µm)	Composición promedio
Barita	11 880	57,5	64,7	81,4	77,5	Ba 62,57; O 22,91; S 14,51
Dolomita	4015	17,5	12,5	66,1	94,9	O 51,88; Ca 28,7; Mg 13,36; Fe 6,06
Hematita	15 705	10,1	10,4	21,5	39,0	Fe 69,82; O 27,55; Mn 1,25; Al 0,69; Si 0,39; P 0,23; Ba 0,04; Ca 0,01; Ce 0,01
Sinchisita	5966	2,7	2,6	18,1	30,1	O 34,69; Ce 31,22; Ca 14,49; La 12,23; Nd 5,09; Fe 2,09; F 0,15; Pr 0,03
Goetita REE	17 320	1,3	1,3	9,3	11,3	Fe 43,98; O 33,34; Ce 9,25; Si 4,34; La 3,09; Nd 2,14; Al 1,61; Mn 0,81; P 0,67
Lantánita (Ce)	5399	0,5	0,4	12,1	12,5	Dy 0,56; Eu 0,11; F 0,03; Pr 0,02; Ba 0,02; Er 0,02
Lantánita (La)	3971	0,4	0,3	11,5	13,5	Ce 41,98; La 23,29; O 22,88; Nd 9,41; Fe 2,35; Pr 0,08; F 0,01
Barita REE	7132	0,2	0,3	5,8	2,9	La 35,56; O 24,99; Nd 21,18; Ce 15,3; Fe 2,82; Pr 0,13; F 0,01; Ca 0,01
Monacita (La)	987	0,1	0,2	13,1	17,2	Ba 53,05; O 19,84; S 13,44; Ce 9,89; La 2,47; Nd 1; Eu 0,11; Tm 0,06; Ho 0,05
Cerianita	5917	0,5	0,1	11,1	12,1	Dy 0,03; Pr 0,02; Gd 0,02; Yb 0,01; Lu 0,01
Esquinita (Nd)	1723	0,1	0,1	7,1	6,0	O 43,58; La 26,93; Nd 15,51; P 13,19; Ce 0,75; Pr 0,04
Monacita (Nd)	1033	0,1	0,1	8,4	7,5	Ce 63,02; O 26,31; Fe 10,65; Pr 0,01; La 0,01
Lantánita (Nd)	1955	0,1	0,1	7,2	5,1	O 36,41; Nd 26,4; La 23,03; Nb 5,65; Ca 3,69; Ti 3,27; Fe 1,34; S 0,19
Monacita (Ce)	605	0,03	0,04	7,8	6,6	O 41,94; Nd 25,62; La 17,19; P 13,52; Ce 1,31; Pr 0,43
Bastnasita (La)	476	0,02	0,02	6,0	3,4	Nd 33,26; O 28,28; La 28,23; Ce 4,91; Fe 4,8; Pr 0,51; Sm 0,01
Bastnasita (Ce)	307	0,01	0,01	6,5	3,2	O 44; Ce 37,27; P 11,57; La 3,69; Nd 3,46
Bastnasita (Nd)	105	0,003	0,004	6,1	3,3	La 35,72; Nd 23,43; O 22,5; F 10,66; Ce 7,5; Fe 0,09; Pr 0,08; Sm 0,02
NdO(CH?)	119	0,003	0,004	5,1	0,6	Ce 36,31; La 23,78; O 20,28; F 10,7; Nd 8,84; Fe 0,07; Pr 0,03
Cuarzo	641	3,3	2,2	73,2	99,0	Nd 33,9; La 28,36; O 23,46; F 11,36; Ce 2,35; Pr 0,58
Ankerita	26 089	2,0	1,5	10,5	11,2	Nd 81,8; O 18,2
Calcita	9992	1,7	1,1	9,9	20,5	Si 50,65; O 49,34; Al 0,01
Bixbyita	1338	0,6	0,7	21,6	30,7	O 46,82; Ca 26,51; Fe 18,34; Mg 8,34
Siderita	16 793	0,6	0,6	6,9	4,2	O 56,59; Ca 42,69; Fe 0,46; Mg 0,25; Mn 0,01
Titanomagnetita	3918	0,2	0,3	8,3	8,5	Mn 55,55; O 30,32; Fe 14,13
Ferrihollandita	2842	0,2	0,2	8,7	8,9	Fe 56,75; O 34,58; Ca 5,9; Mg 1,5; Mn 1,01; Si 0,27
Pseudobrookita	2664	0,2	0,2	9,5	9,3	Fe 74,23; O 23,25; Ti 2,51
Ilmenita	975	0,1	0,1	9,7	11,2	Fe 40,4; O 26,01; Mn 23,75; Ba 9,83
Alumohematita	836	0,03	0,04	5,8	3,6	Fe 57,51; O 31,27; Ti 11,22
Apatito	78	0,04	0,03	18,3	25,2	O 38,17; Ti 37,68; Fe 24,09; Mn 0,06
Sepiolita	676	0,03	0,02	7,6	6,6	Fe 72,78; O 23,04; Al 4,18
Rutilo	170	0,01	0,02	10,6	10,3	Ca 43,2; O 38,01; P 18,72; Al 0,04; F 0,03
Aluminomagnetita	313	0,01	0,01	5,4	2,0	O 63,85; Si 22,12; Mg 14,03
Pirita	21	0,01	0,01	16,8	30,3	Ti 53,14; O 42,54; Fe 4,32
Columbita-(Fe)	172	0,01	0,01	6,9	4,2	Fe 78,54; O 16,97; Al 4,49
Feldespato K	37	0,005	0,003	11,8	11,2	S 51,47; Fe 47,94; O 0,52; Cl 0,08
Hollandita	24	0,001	0,001	5,2	1,0	Nb 44,31; O 35,1; Fe 20,59
						O 44; Si 31,53; K 13,77; Al 10,7
						O 55,5; Mn 28,81; Ba 14,58; Fe 1,11

Tabla 1 Datos generales de la muestra de roca con el número de casos de cada fase, la proporción del área que representan, la proporción del peso que representan, el tamaño de partícula promedio, la desviación con respecto a dicho promedio y la composición química promedio de cada fase con base en el número total de análisis de la fase en cuestión. Los detalles de cada punto analizado y de cada fase medida están disponibles en la base de datos para su consulta

La muestra:

Descripción

El material de muestra (polvo triturado) se preparó como bloque metalográfico de 30 mm. Está compuesto principalmente por barita (~58 % por área), carbonatos, mayormente dolomita (~20 % por área), y óxidos de hierro, en su mayoría hematita y goetita (~11 % por área) (Tabla 1 y Figura 2). En la mineralogía de los elementos de tierras raras (REE) predomina la sinchisita (2,6 % en peso de la muestra) con otras contribuciones de menor importancia de lantanita, monacita, esquinita, cerianita, bastnesita y NdO(CH). Además de los minerales REE, la goetita y una pequeña proporción de la barita contienen REE. Estos casos se han clasificado por separado como barita REE y goetita REE. La goetita REE representa un 1,3 % en peso de la muestra y contiene Ce 9,25 % en peso, La 3,09 % en peso, Nd 2,14 % en peso, Dy 5600 ppm, Eu 1100 ppm, Pr 200 ppm y Er 200 ppm. La barita REE representa un 0,3 % en peso de la muestra y contiene Ce 9,89 % en peso, La 2,47 % en peso, Nd 1 % en peso, Eu 1100 ppm, Tm 600 ppm, Ho 500 ppm, Dy 300 ppm, Pr 200 ppm, Gd 200 ppm, Yb 100 ppm y Lu 100 ppm.

Dado que el sistema ML realiza un análisis químico cuantificado de la muestra, el ensayo citado aquí es el ensayo medido obtenido durante el análisis. La fila del ensayo de la muestra indica la proporción de cada elemento y los datos de las fases corresponden a la proporción de cada uno de los minerales (Tabla 2). Las concentraciones de los elementos se presentan como contribución a modo de % en peso a la muestra y se calculan a partir de cada punto individual analizado. De este modo es posible detectar concentraciones en ppb al nivel de la muestra, si no al nivel de un punto individual. La muestra es más rica en tierras raras ligeras en las que La, Ce y Nd representan la mayor parte de REE.

Las fases clave son sinchisita, lantanita y goetita REE (Figura 3), que combinadas aportan >80 % del total de La, Ce y Nd (Tabla 3).

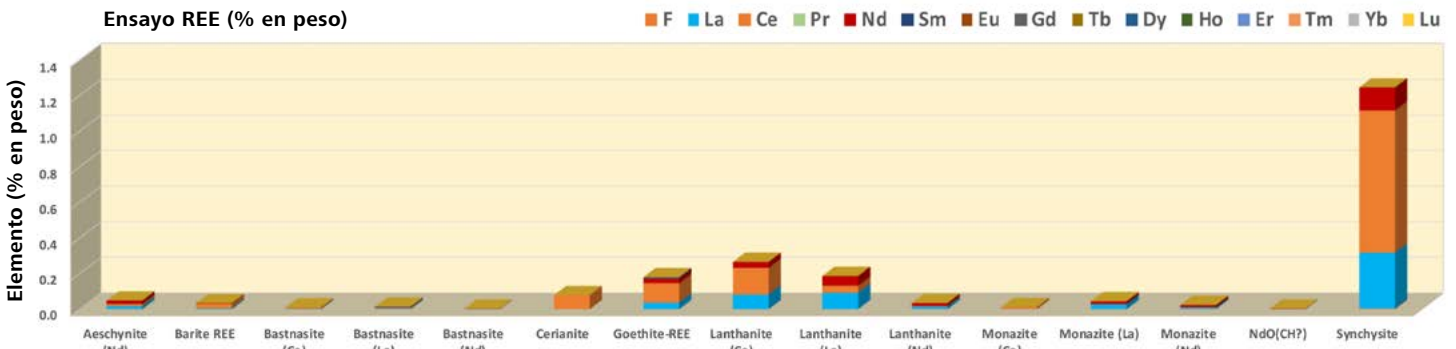


Figura 3 La sinchisita, la lantanita, la goetita REE y la cerianita son las que más La (6100 ppm), Ce (1,3 % en peso) y Nd (3200 ppm) aportan a la muestra. ZEISS Mineralogic realiza un ensayo de la muestra como parte del análisis estándar y puede utilizarse para compararlo con un ensayo químico más detallado. La capacidad de informar sobre la contribución al ensayo por fase ofrece un gran nivel de detalle que se habría perdido si se tomara en consideración la contribución de las fases solo con respecto a la mineralogía general.

	% en peso	F	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ensayo de la muestra	9,8E-03	6,1E-01	1,3E+00	2,3E-03	3,2E-01	1,0E-04	3,4E-03	1,4E-04	5,5E-06	7,6E-03	1,3E-04	2,0E-04	1,6E-04	4,5E-03	7,2E-05	
Esquinita (Nd)	0,15	1,2E-03	1,7E-02	1,1E-02	1,1E-04	1,9E-02	3,7E-05	bd	7,5E-06	bd	bd	bd	bd	bd	1,9E-07	bd
Barita REE	0,25	1,8E-05	6,0E-03	2,4E-02	4,5E-05	2,4E-03	1,2E-05	2,7E-04	4,0E-05	3,3E-06	7,4E-05	1,2E-04	3,3E-06	1,5E-04	2,9E-05	1,5E-05
Bastnasita (Ce)	0,01	1,3E-03	2,9E-03	4,5E-03	3,1E-06	1,1E-03	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
Bastnasita (La)	0,02	1,9E-03	6,4E-03	1,4E-03	1,4E-05	4,2E-03	2,9E-06	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
Bastnasita (Nd)	0,00	4,6E-04	1,1E-03	9,5E-05	2,3E-05	1,4E-03	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
Cerianita	0,13	2,5E-06	6,5E-06	7,9E-02	7,0E-06	bd	bd	1,5E-06	4,4E-06	bd	2,7E-06	bd	bd	6,7E-07	bd	bd
Goetita REE	2,88	3,3E-04	3,6E-02	1,1E-01	2,5E-04	2,5E-02	1,4E-05	1,3E-03	1,8E-06	bd	6,6E-03	bd	1,9E-04	2,7E-06	2,0E-05	1,1E-05
Lantanita (Ce)	0,29	3,4E-05	8,3E-02	1,5E-01	2,9E-04	3,3E-02	2,4E-06	5,0E-06	7,4E-06	1,5E-06	bd	bd	bd	bd	bd	1,8E-06
Lantanita (La)	0,21	3,6E-05	9,2E-02	4,0E-02	3,3E-04	5,5E-02	1,8E-06	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	3,0E-06	bd
Lantanita (Nd)	0,04	bd	1,5E-02	2,6E-03	2,7E-04	1,7E-02	3,5E-06	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
Monacita (Ce)	0,04	bd	9,6E-04	9,7E-03	bd	9,0E-04	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
Monacita (La)	0,19	bd	2,8E-02	7,7E-04	3,9E-05	1,6E-02	bd	bd	bd	bd	3,7E-06	bd	bd	bd	bd	bd
Monacita (Nd)	0,09	bd	8,9E-03	6,8E-04	2,2E-04	1,3E-02	bd	bd	bd	bd	3,5E-06	bd	bd	bd	bd	bd
NdO(CH?)	0,004	bd	9,7E-04	5,3E-05	bd	2,2E-03	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
Sinchisita	2,58	3,9E-03	3,1E-01	8,0E-01	6,9E-04	1,3E-01	2,1E-05	1,2E-05	6,0E-05	bd	1,3E-05	bd	bd	bd	bd	bd

Tabla 2 Tabla del ensayo. ZEISS Mineralogic realiza un análisis químico cuantificado completo en cada punto analizado, lo que le permite proporcionar información sobre la composición de la muestra y el ensayo de los elementos de interés sin necesidad de recurrir a otros instrumentos. Según los análisis, solo se observa una concentración notable de La 6100 ppm, Ce 1,3 % en peso y Nd 3200 ppm.

	F	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Esquinita (Nd)	11,8	2,7	0,9	4,9	5,9	35,1	0,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Barita REE	0,2	1,0	1,9	1,9	0,8	11,5	8,0	28,1	60,5	1,0	97,0	1,7	96,3	0,6	20,8
Bastnasita (Ce)	13,4	0,5	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bastnasita (La)	19,6	1,1	0,1	0,6	1,3	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bastnasita (Nd)	4,7	0,2	0,0	1,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cerianita	0,0	0,0	6,3	0,3	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0
Goetita REE	3,4	6,0	8,7	10,7	7,8	13,6	39,2	1,2	0,0	87,2	0,0	95,5	1,7	0,4	15,3
Lantanita (Ce)	0,3	13,5	11,9	12,6	10,4	2,3	0,1	5,1	28,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
Lantanita (La)	0,4	15,0	3,1	14,2	17,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Lantanita (Nd)	0,0	2,4	0,2	11,6	5,4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Monacita (Ce)	0,0	0,2	0,8	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Monacita (La)	0,0	4,5	0,1	1,7	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Monacita (Nd)	0,0	1,5	0,1	9,6	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NdO(CH?)	0,0	0,2	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sinchisita	39,8	51,1	63,6	29,7	40,3	19,9	0,3	42,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 3 Tabla de distribución de los elementos. La sinchisita contiene la mayor parte de La, Ce y Nd, con otras fases de interés como minerales de lantanita y goetita REE.

Beneficio

A modo de primera estrategia pueden considerarse pasos de beneficio que impliquen un separador magnético de alto gradiente (HGMS) para eliminar los óxidos de hierro y la dolomita ferrífera del conjunto, seguido de un proceso de flotación para concentrar la sinchisita. Tanto el HGMS como la flotación han demostrado su efectividad para la separación de dolomita ferrífera y para la concentración de carbonatos, respectivamente [3,4,5]; no obstante, en un flujo de trabajo que incluya una parte de preconcentración por flotación, la muestra resulta complicada. Desde el punto de vista de la mineralogía automatizada, las probabilidades de realizar la flotación de los componentes valiosos de un yacimiento se evalúa normalmente mediante un estudio de liberación por área. En estas mediciones, los criterios de liberación establecieron que $\geq 80\%$ del área de la partícula debe ser una fase de interés para que se considere liberada, < 80 y $\geq 30\%$ del área se considera como media y $< 30\%$ del área se clasifica como fase bloqueada cuya concentración no se logrará con un paso de flotación. De acuerdo con estos criterios, solo el 40 % de la sinchisita y el 4 % de la goetita REE están liberados, y el 26 % y 50 % respectivamente están bloqueados (Tabla 4). Concentrando todas las partículas con una exposición a la sinchisita $> 50\%$ por área, se obtendrá $< 60\%$ de sinchisita (Figura 4).

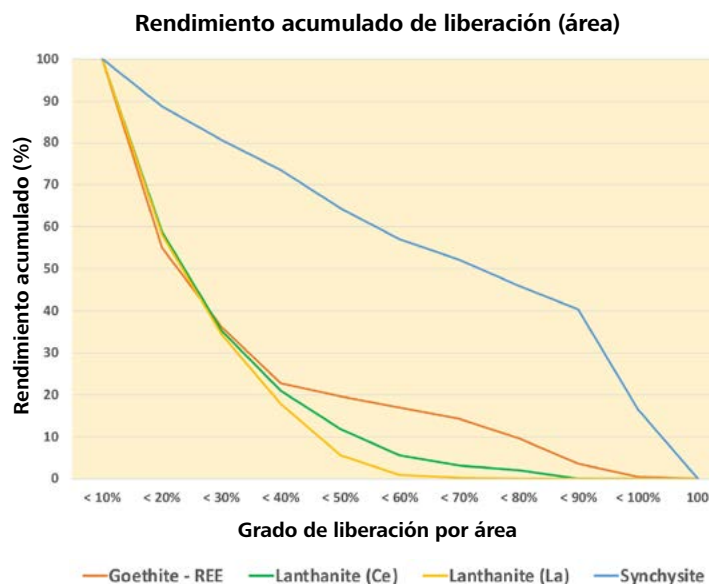


Figura 4 Curva de rendimiento acumulado de liberación. Se espera que un paso de beneficio con flotación de partículas compuestas por sinchisita en $\geq 80\%$ del área presente un 40 % de rendimiento.

	<10 %	<20 %	<30 %	<40 %	<50 %	<60 %	<70 %	<80 %	<90 %	<100 %	100	Liberado	Medio	Bloqueado
Esquinita (Nd)	82	17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Barita REE	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Bastnasita (Ce)	82	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Bastnasita (La)	95	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Bastnasita (Nd)	90	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Cerianita	51	15	12	5	5	7	1	3	0	0	0	1	21	78
Goetita REE	45	19	13	3	3	3	5	6	3	0	0	4	19	77
Lantanita (Ce)	41	24	14	9	6	3	1	2	0	0	0	0	21	79
Lantanita (La)	42	24	16	12	5	1	0	0	0	0	0	0	18	82
Lantanita (Nd)	85	6	2	6	1	0	0	0	0	0	0	0	7	93
Monacita (Ce)	72	17	0	0	8	0	3	0	0	0	0	0	11	89
Monacita (La)	18	23	48	2	8	2	0	0	0	0	0	0	12	88
Monacita (Nd)	50	32	4	3	0	0	11	0	0	0	0	0	14	86
NdO(CH?)	99	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Sinchisita	11	8	7	9	7	5	6	6	24	16	0	40	33	26

Tabla 4 Liberación basada en el área. Se prevé que el beneficio del yacimiento mediante un paso de flotación presente un rendimiento del 40 % de la sinchisita, del 4 % de la goetita REE y ningún rendimiento de las lantanitas.

Asociación mineral

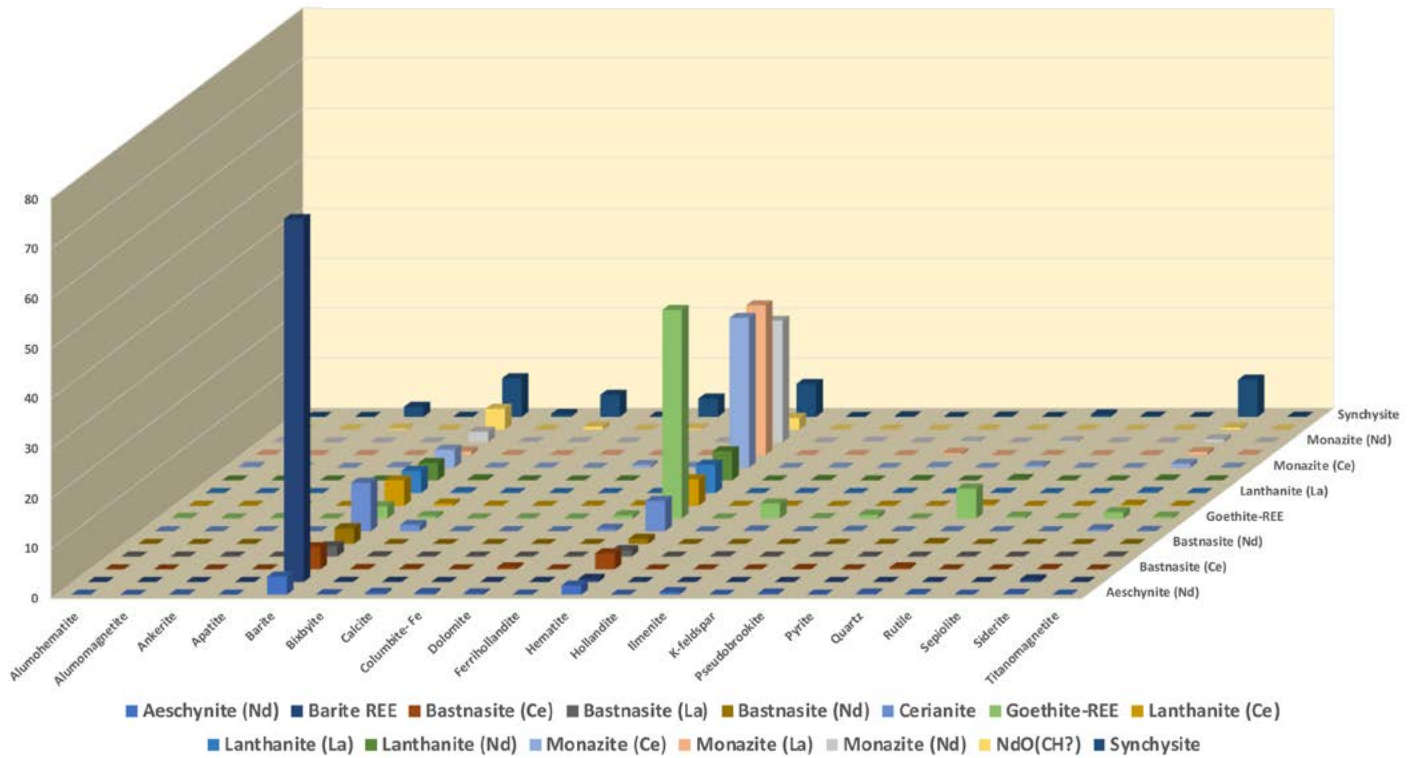


Figura 5 Asociaciones de contacto de las fases REE con ganga. Todas las fases de interés están asociadas con barita y hematita. La sinchisita presenta asociaciones notables con siderita, hematita, dolomita, calcita, barita y ankerita.

	Número	% del área	% en peso	Tamaño de partícula (µm)	Densidad de partícula (g/cm ³)
REE >80	482	2,1	1,8	86,3	3,1
REE <80	209	0,6	0,5	70,6	3,1
REE <70	132	0,5	0,5	77,1	3,1
REE <60	109	0,6	0,5	93,0	3,3
REE <50	117	0,9	0,9	108,5	3,3
REE <40	112	1,2	1,1	129,0	3,4
REE <30	181	2,0	2,0	131,9	3,6
REE <20	396	4,1	4,1	126,6	3,7
REE <10	4517	53,9	56,7	151,3	4,1
Partículas restantes	7743	34,1	31,9	87,7	3,8

Tabla 5 Datos de partículas de roca clasificados por grupos en función de su contenido en minerales REE determinado por su contribución en área superficial a la partícula. Por ejemplo, REE >80 hace referencia a partículas compuestas por minerales REE en un 80 % o más. REE <10 hace referencia a partículas compuestas por minerales REE en menos de un 10 % de su área y en un 0,1 % de su área o más. Las partículas restantes pueden contener minerales REE hasta por debajo de un 0,1 % del área.

Asimismo, con un paso de beneficio con HGMS para eliminar la hematita y los carbonatos ferríferos, nos exponemos a diluir aún más el rendimiento de la sinchisita, ya que presenta asociaciones notables con la siderita, la hematita y la dolomita (Figura 5).

	Número	% del área	% en peso	Tamaño de partícula (µm)	Densidad de partícula (g/cm ³)
REE >80	482	2,1	1,8	86,3	3,1
REE <80	209	0,6	0,5	70,6	3,1
REE <70	132	0,5	0,5	77,1	3,1
REE <60	109	0,6	0,5	93,0	3,3
REE <50	117	0,9	0,9	108,5	3,3
REE <40	112	1,2	1,1	129,0	3,4
REE <30	181	2,0	2,0	131,9	3,6
REE <20	396	4,1	4,1	126,6	3,7
REE <10	4646	23,1	23,2	123,6	3,9
REE >09	127	1,3	1,3	141,6	4,2
REE <08	158	1,6	1,7	145,7	4,1
REE <07	186	2,2	2,3	157,9	4,2
REE <06	209	2,5	2,6	159,9	4,2
REE <05	242	3,6	3,8	180,5	4,2
REE <04	288	4,6	5,0	192,8	4,3
REE <03	365	6,9	7,8	211,8	4,3
REE <02	296	8,1	8,9	256,5	4,2
Partículas restantes	7743	34,1	31,9	87,7	3,8

Tabla 6 Datos de partículas de roca con más segmentaciones para partículas que contienen entre un 10 % del área y un 0,1 % del área de fases REE. La elevada proporción de REE <10 hace que este tipo de partícula sea significativo en el proceso. El tamaño de partícula de la muestra analizada está por debajo del tamaño con el que se tomarían en consideración métodos de separación por densidad, pero el aumento de la densidad de partícula con un incremento del componente de ganga resulta esperanzador a este respecto.

Distribución del área de la partícula

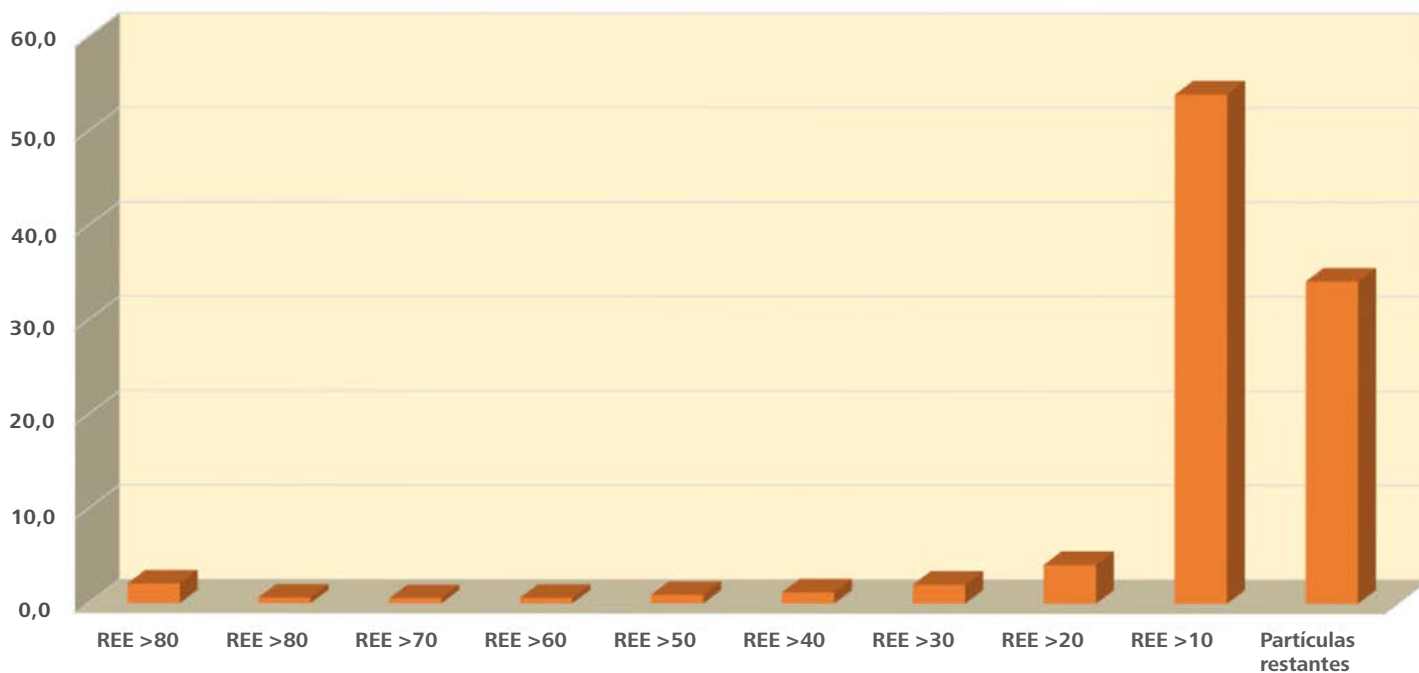


Figura 6 Descripción de la muestra teniendo en cuenta el grado REE de las partículas. La mayor contribución al área de la muestra corresponde a partículas compuestas por minerales REE en <10 y $\geq 0,1$ % del área, así como a partículas que contienen minerales REE en <0,1 % del área ("partículas restantes").

Partículas

La información mineral y los datos sobre asociación mineral ofrecen una imagen de complejidad que no puede resolverse en un nivel mineral, sino que se requiere información sobre las partículas que forman la muestra concreta. Por medio de su función de clasificación litológica, el sistema ML ofrece medición y clasificación de las partículas según los parámetros establecidos por el operador. En este caso, las clasificaciones de partículas se han determinado de forma que coincidan con los grados de liberación del grupo de minerales REE que forman el parámetro de interés. Por ejemplo, los criterios para la clasificación de partículas >80 REE es que ≥ 80 % del área de la partícula debe estar compuesta por minerales REE. Por consiguiente, queda claro de inmediato que más del 50 % de la muestra está compuesta por partículas que contienen minerales REE en <10 % del área (Tabla 5 y Figura 6).

Dado que una gran parte de la muestra se encuentra en esa fracción de partículas REE <10 %, es recomendable contar con más detalles sobre los datos. En este caso se utiliza la función de análisis retrospectivo del sistema ML para obtener nuevas descripciones y mediciones de partículas sin necesidad de volver al SEM. Un análisis más a fondo muestra que los grupos de partículas más importantes son REE <10 (23 % en peso) y las partículas con <0,1 % del área de REE, aquí denominadas «partículas restantes» (32 % en peso) (Tabla 6).

Se observa un claro aumento de hematita y barita con una reducción del contenido de la fase REE, mientras que la pirita también se vuelve paulatinamente más relevante, especialmente en el grupo de «partículas restantes» (Figura 7). El tamaño de partícula aumenta con la reducción del contenido de la fase REE, con una marcada caída en el tamaño de partículas que contienen <0,1 % REE. Es posible que este efecto refleje la mayor proporción de barita con la reducción de la fase REE hasta que la pirita se vuelva más significativa en el grupo de «partículas restantes». Es posible que la pirita, con un tamaño medio de 17 μm , véase la barita con 86 μm , esté actuando de modo que aumente la friabilidad de estas partículas. La densidad de las partículas aumenta con la reducción del contenido de REE, al volverse la pirita y la barita más predominantes en las mineralogías modales de los grupos de partículas (Figuras 8 y 9 y Tabla 6). En general, se observa un aumento de la densidad con la reducción del contenido de REE (Figura 8), lo que indica que las partículas que contienen la mayor proporción de minerales REE son las más ligeras. Se observa un correspondiente aumento del tamaño de partícula con el aumento de la densidad y la reducción del contenido de REE (Figura 9), lo que a su vez está relacionado con el incremento del contenido de barita (Ba), óxido de hierro (Fe) y pirita (S), así como la reducción de los carbonatos (Figuras 7 y 10).

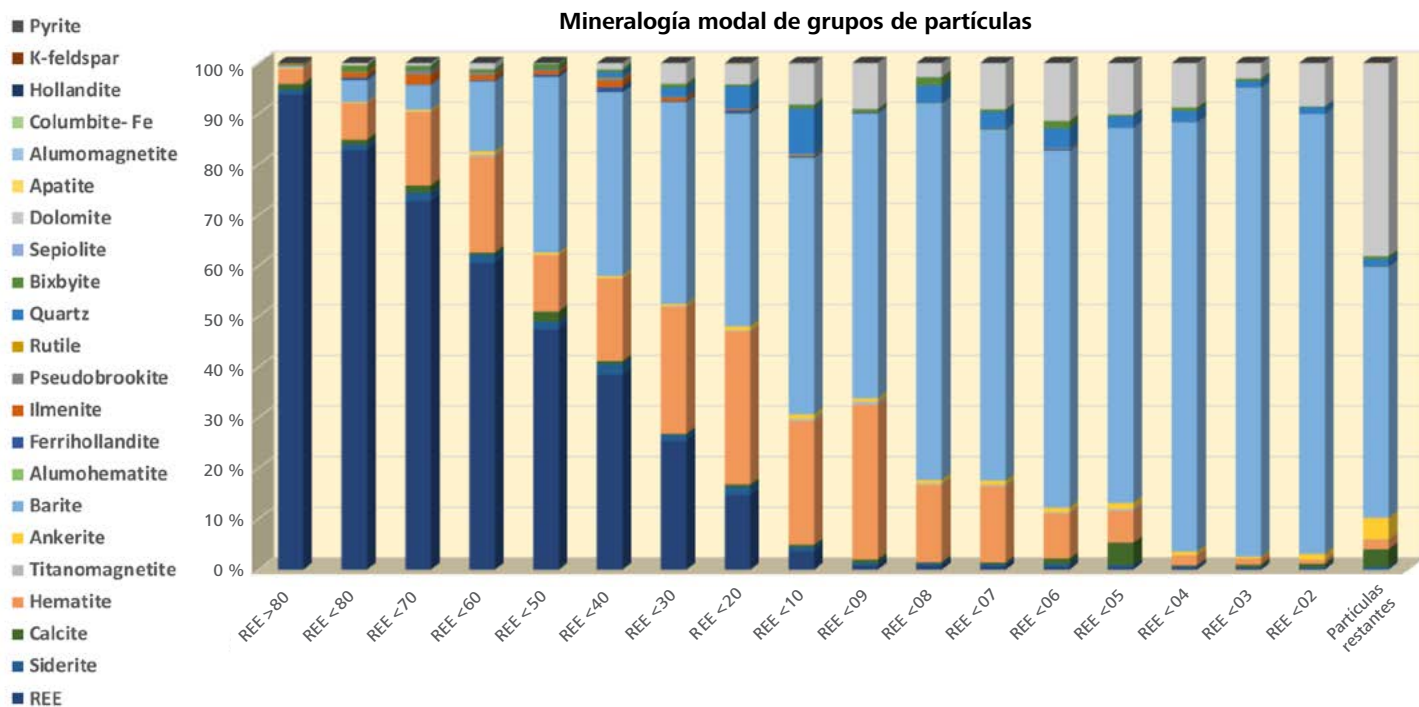


Figura 7 Mineralogía modal de cada tipo de partícula que contiene fases REE. Con la reducción de los minerales REE, los óxidos de hierro, los carbonatos y la pirita se convierten en las fases dominantes.

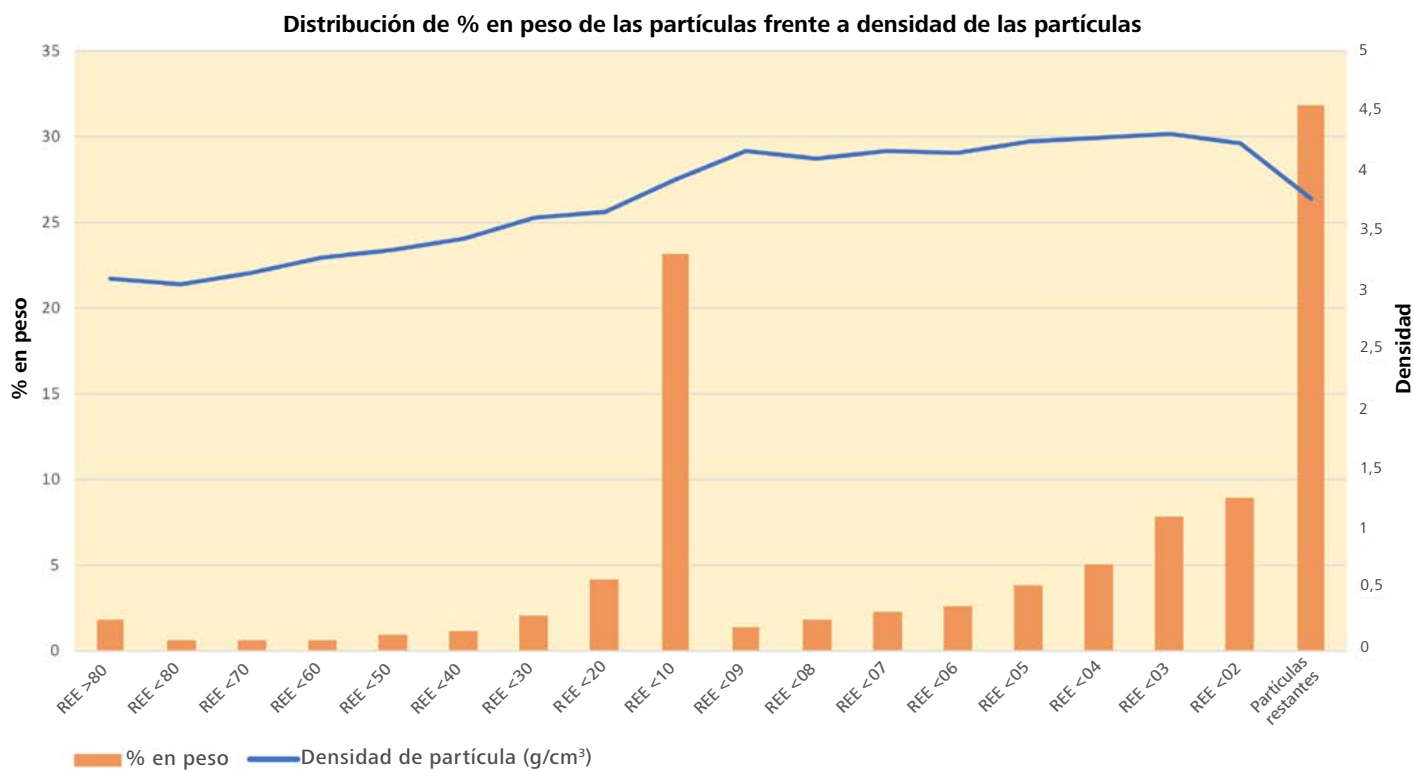


Figura 8 Distribución del porcentaje en peso de la muestra entre los tipos de partícula. Las partículas que contienen <0,1 % de fase REE suponen >30 % de la muestra, aunque no son las partículas presentes con mayor densidad. Por lo general, la densidad aumenta con el descenso de la presencia de la fase REE.

Distribución del % en peso de la partícula frente al tamaño promedio de partícula

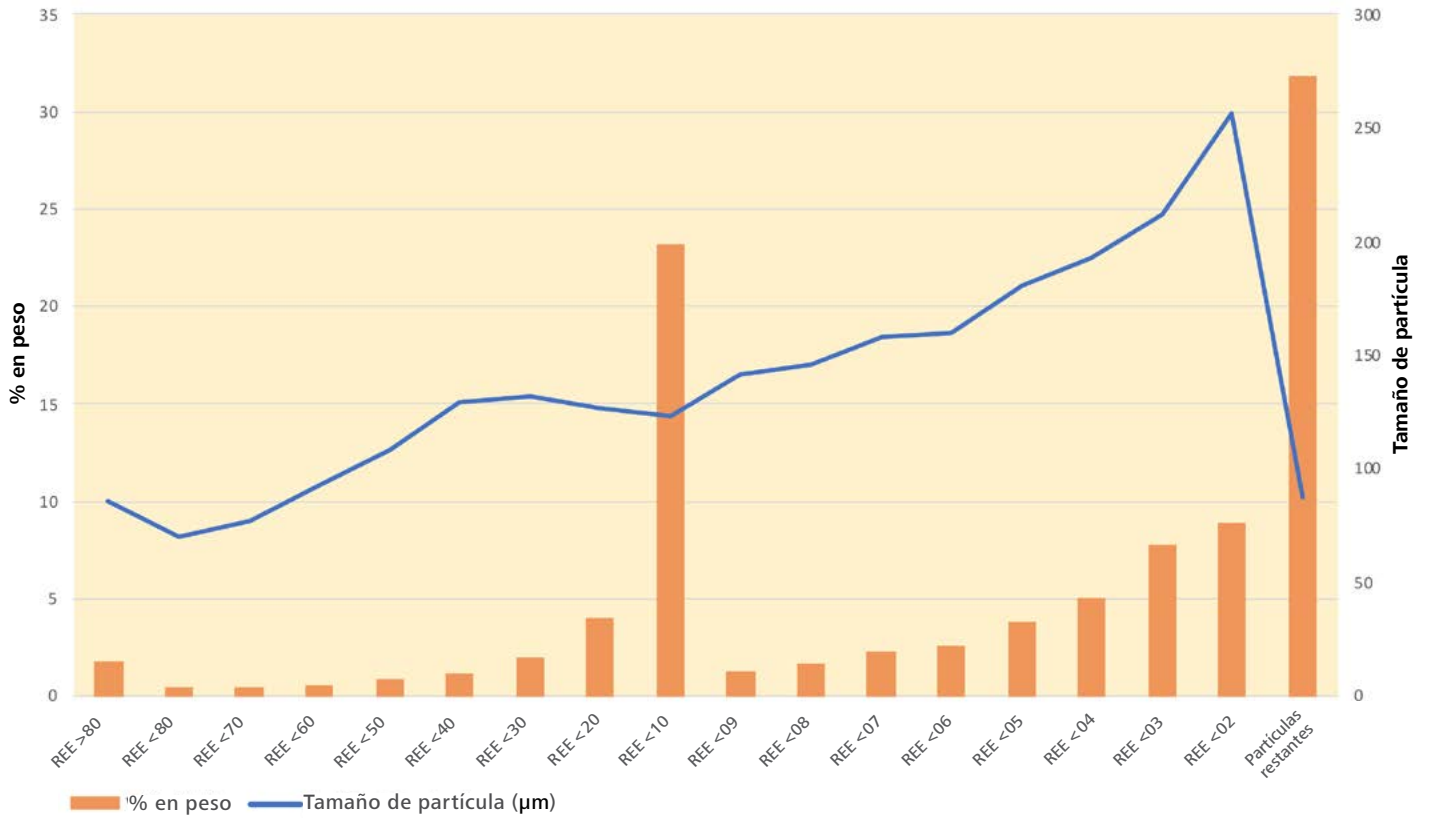


Figura 9 El tamaño de partícula aumenta cuando se reduce el contenido de la fase REE con un descenso notable en lo que respecta al tamaño de las partículas que contienen <0,1 % de REE. Este efecto puede reflejar la mayor proporción de barita con la reducción de la fase REE hasta que la pirita se vuelva significativa en las «partículas restantes». Es posible que la pirita, con un tamaño medio de 17 µm, véase la barita con 86 µm, esté actuando de modo que aumente la friabilidad de estas partículas.

Composición general en tipos de partículas

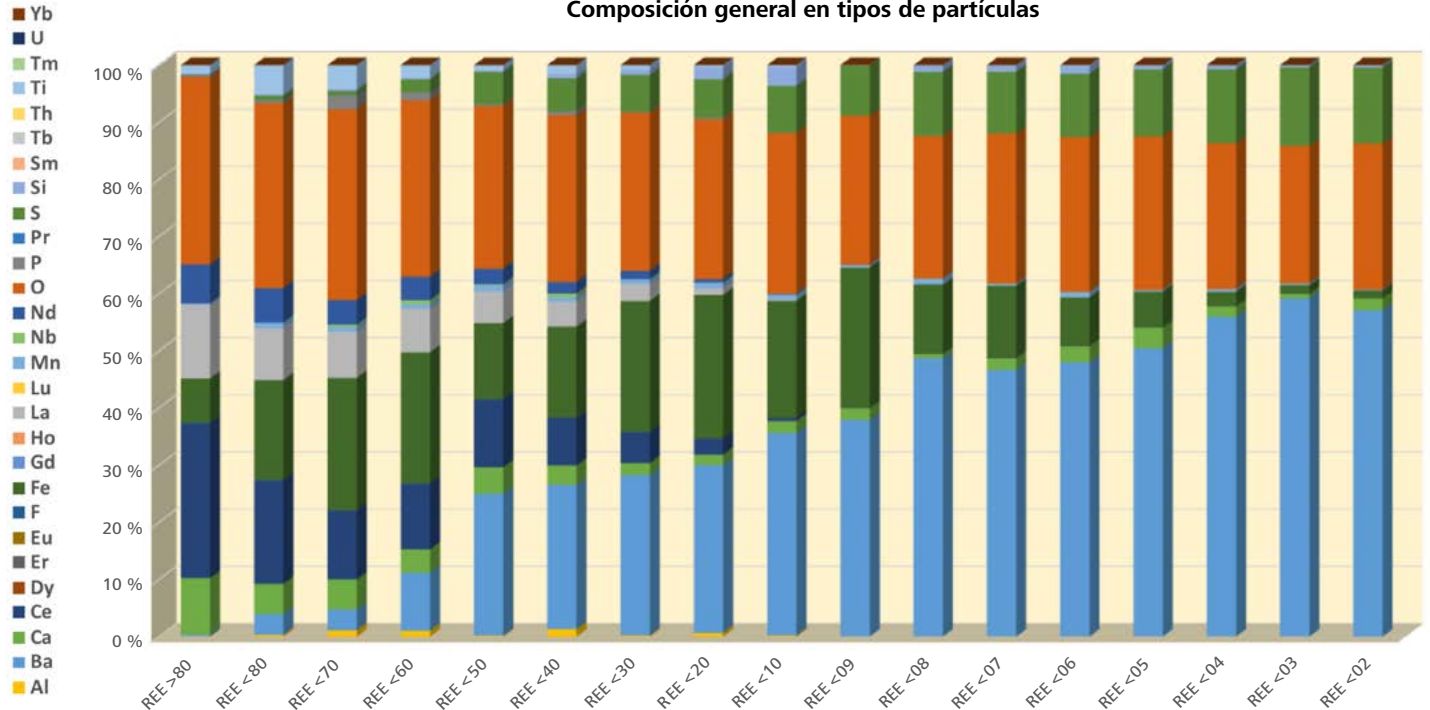


Figura 10 La reducción de REE coincide con un aumento de la concentración de Ba, Fe y S.

La distribución de F, La, Ce y Nd entre las clases de partículas (Figura 10) proporciona algo de información sobre la composición general de la muestra. Se observa de inmediato una distribución de tres pasos en la que REE >80 es, con diferencia, la submuestra más abundante. A esto le sigue una distribución relativamente homogénea entre REE <80 y REE <10. Por último, todos los subgrupos por debajo, incluidos REE <09, contienen una concentración insignificante de los elementos. De hecho, las partículas de REE >80 y REE <10 contienen más de un 80 % en peso de F, La, Ce y Nd. Relacionando la composición de las partículas y su tamaño se observa que una filtración por tamaño, como una primera estrategia, podría eliminar >30 % de la masa no deseada, con lo que mejoraría el material restante. Desafortunadamente, las diferencias en el tamaño de partícula y en la densidad no son suficientes para separar el grupo de «partículas restantes», que representa un 31,9 % en peso de la muestra original o ~48 % en peso del producto mejorado. Llegados a este punto, cuando quedan las «partículas restantes» y las partículas con una concentración de REE superior o igual a REE <10, un paso de flotación por espuma que suprima la flotación de dolomita y ankerita serviría para seguir mejorando el producto.

Resumen

Para tomar una decisión sobre el mejor tipo de procesamiento para cada yacimiento se requiere un amplio periodo de tiempo dedicado a investigar diferentes técnicas analíticas y a experimentar. Las técnicas de mineralogía automatizada tradicionales ayudan a obtener datos para tomar esta decisión, pero están limitadas a la clasificación mineral, las asociaciones y el resultado de la liberación. ZEISS Mineralogic ofrece ventajas con respecto a otras técnicas, ya que proporciona información química y descripciones de partículas relevantes para el beneficio. Los datos sobre las partículas permiten obtener información no disponible previamente sobre cómo podría comportarse el yacimiento en función de las diferentes estrategias y, aunque es posible que estos datos no nos ofrezcan respuestas definitivas por sí solos, sí sirven a modo de guía sobre qué pruebas deberían realizarse en el laboratorio.

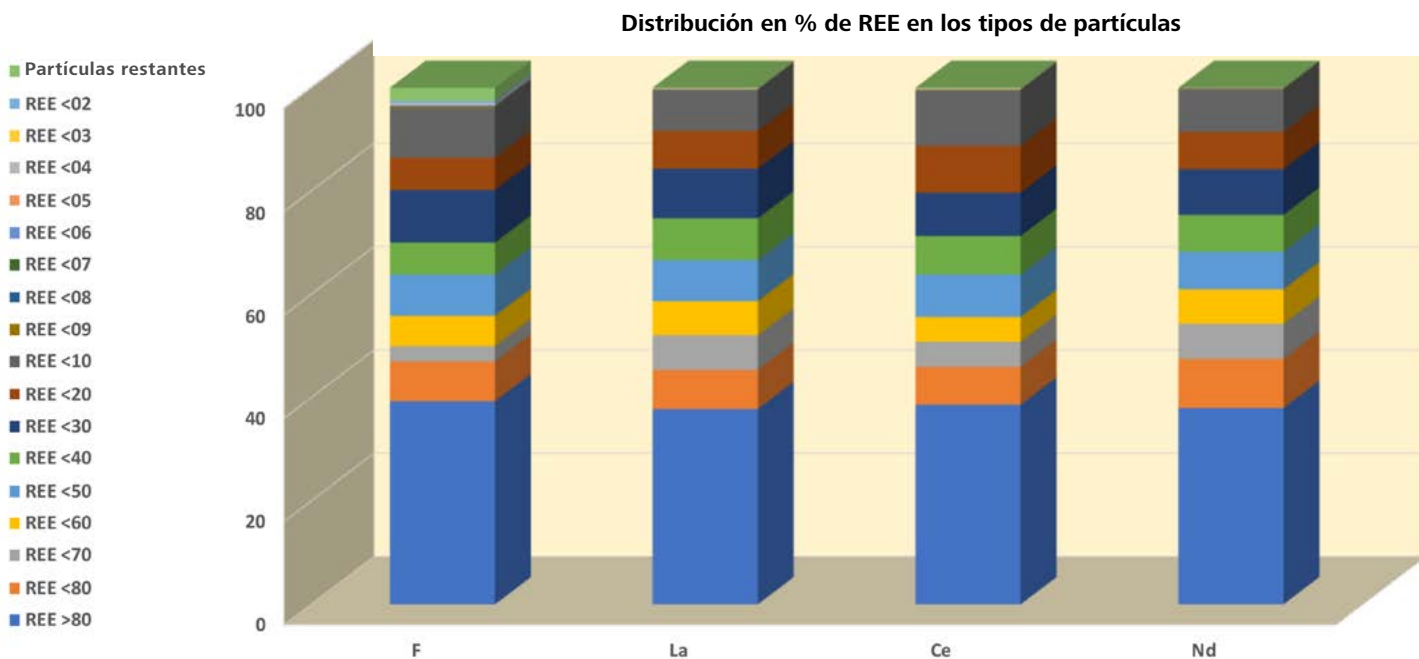


Figura 11 Se observa un evidente cambio en tres pasos entre la distribución de F, La, Ce y Nd por los tipos de partículas. La mayor concentración puede encontrarse en REE >80, que representa >30 % de cada una. A esto le sigue una distribución relativamente homogénea entre REE <80 y REE <10 y, por último, un paso más abajo encontramos una concentración mucho menor para las fracciones por debajo de REE <09.

Referencias

- [1] D.E.Newbury y N.W.M.Ritchie. J Mater Sci (2015) 50:493–518 DOI 10.1007/s10853-014-8685-2
- [2] R.Taylor, E.Hill, R.Khan, T.Johnson, C.Clark, y P.Lanari Goldschmidt Abstracts (2020), 2020 2574
- [3] P.Blazy y E.A.Jdid International Journal of Mineral Processing 49, 1-2 (1997), 49-58
- [4] Yang X et al., Minerals Engineering 71 (2015), 55-64
- [5] H.Soto y L.Iwasaki Int. J. Miner. Process 16 (1986), 17-27

Carl Zeiss Microscopy GmbH

07745 Jena, Alemania
microscopy@zeiss.com
www.zeiss.com/mining

No apto para uso en diagnósticos médicos, con fines terapéuticos o como tratamiento. No todos los productos están disponibles en todos los países.
Póngase en contacto con su representante local de ZEISS para obtener más información.
ES_42_013-322 | CZ 09-2020 | Diseño, ámbito de entrega y modificaciones técnicas sujetos a cambios sin previo aviso. | © Carl Zeiss Microscopy GmbH