

Método cuantitativo para determinar la rareza de los minerales basado en la abundancia de sus elementos constituyentes

Eduard BES FUSTER

Grup Mineralògic Català

Reus, Tarragona, España

ebesfus1968@gmail.com

RESUMEN

Se ha desarrollado un método objetivo para determinar la rareza de los minerales, fundamentado en aspectos cuantitativos, que permite su clasificación sistemática. Así, se ha partido de datos característicos de cada mineral y que no están sometidos a cambios, cuando menos, importantes: la fórmula química que lo describe y la abundancia en la corteza terrestre de los elementos que la conforman. Esto ofrece una potente herramienta, sobre todo a los coleccionistas, para valorar su colección a partir de un parámetro cuantitativo, clasificable, consistente, unívoco y de simple obtención: el índice de rareza i_R . Además, el artículo profundiza en la información que aporta este índice y explora las posibilidades que proporciona su aplicación en el coleccionismo de minerales.

PALABRAS CLAVE

Coleccionismo, rareza, abundancia, clasificación.

ABSTRACT

An objective method has been developed to determine the rarity of minerals, based on quantitative aspects, which will be useful for their systematic classification. This method is based on some characteristics of each mineral and which are not subject to important changes: the chemical formula that the mineral and the abundance in the Earth's crust of the elements that make it up. This offers a powerful tool, especially for collectors, to assess their collection based on a quantitative, classifiable, consistent, univocal and easy-to-obtain parameter: the rarity index, i_R . In addition, the article delves into the information provided by the rarity index and explores the possibilities of its application in mineral collecting.

KEYWORDS

Collecting, rarity, abundance, classification.

BES FUSTER, Eduard (2021): "Método cuantitativo para determinar la rareza de los minerales basado en la abundancia de sus elementos constituyentes". *Paragénesis*; vol. 3, núm. 1 (2021-1), pp. 87-102.

INTRODUCCIÓN

Actualmente están reconocidas por la IMA poco más de 5.600 especies minerales (febrero de 2021), de las cuales menos de 100 constituyen el 99% de la corteza terrestre. De entre estas, algunas de la familia de los feldespatos ya suman entre el 50% y el 60% del total (Pakhomova *et al.*, 2020). Del resto, existe una cantidad importante, catalogada en unas 2.500 especies minerales, que se consideran raras de acuerdo con una serie de criterios establecidos por la comunidad mineralógica. Estos representan, desde el punto de vista geoquímico, una marca de distinción de la Tierra respecto a otros planetas y sirven como firma específica del nuestro.

Los minerales, además de aportar un valor económico indiscutible, son para muchos una fuente de realización personal concretada en el mundo del coleccionismo.

Existen tantas colecciones de minerales como coleccionistas. Cada cual tiene sus personales apetencias so-

bre la línea de su colección. Así, hay quien se decanta por la sistemática, hay quien prefiere centrarse en unos grupos concretos, otros se cautivan por los colores, por sus componentes, por las dimensiones, por la espectacularidad, etc., pero en ningún caso a un coleccionista se le podrá decir que no tiene ejemplares especiales: cada uno dispone de unos criterios y gustos que pueden encontrarse totalmente alejados de los otros, pero que hace que sus piezas sean únicas o, cuando menos, especiales, y disfrutar es un privilegio. Todo ello es un incentivo para ir a su búsqueda en el campo o para adquirirlos en comercios y ferias especializadas, para intercambiarlos o para buscarlos en Internet.

OBJETIVOS Y ALCANCE

La rareza de un mineral es un atributo ligado a diferentes parámetros que a veces se encuentran relacionados y otros son absolutamente independientes, y contemplan aspectos como su génesis, la abundancia,

su composición, su degradabilidad natural, el aprovechamiento para uso humano, criterios estéticos...

Si se obvia una clasificación meramente económica, es decir, respecto de su precio, los métodos empleados para clasificar los minerales por su rareza están basados fundamentalmente en criterios cualitativos o semicuantitativos, que están a menudo referenciados a estimaciones subjetivas.

En este artículo, a pesar de la dificultad objetiva al catalogar los minerales por su rareza, se presenta un método basado en criterios cuantitativos que permite realizar una categorización de los minerales existentes y otros que puedan descubrirse en el futuro. El patrón de base del método desarrollado es, por un lado, la abundancia de los elementos químicos de la corteza terrestre y, por el otro, la cantidad de átomos de los diferentes elementos que conforman la fórmula empírica del mineral.

Hay que constatar, de forma inequívoca, que la intención de este artículo no es, en ningún caso, romper con las clasificaciones de rareza existentes hasta hoy; por ejemplo: Weiß (2018) y Hazen y Ausubel (2016). Lo que se pretende es dar una alternativa suplementaria a las posibilidades y opciones que se pueden ofrecer ante el coleccionismo de minerales. Ya se ha expuesto que los objetivos que persigue cada coleccionista son particulares y específicos. Es habitual, también, tender a crear varias subcolecciones en que el eje de clasificación varíe: coloraciones, cristalizaciones, radiactividad, composiciones específicas, presencia de unos elementos determinados..., cosa que hace que se valoren y se “vivan” de forma diferente cada una de estas subcategorías.

Este artículo está destinado a todos los amantes de los minerales pero, más específicamente, a aquellos que han elegido coleccionar especímenes poco comunes, aportando un criterio diferente a los existentes hasta la fecha sin, en ningún caso, tratar de suplantarlos o de desplazarlos; tan solo dar más opciones a la elección.

Así, el método que se presenta en este artículo permite catalogar aquellos minerales que contienen en su

formulación elementos que son de escasa incidencia o abundancia en la corteza terrestre y facilita la selección o adquisición de piezas con esta característica. Ejemplos de elementos con poca presencia en la corteza pueden ser el arsénico (1,8 mg/kg), la plata (0,075 mg/kg), el osmio (0,0015 mg/kg), el iridio (0,001 mg/kg) y algunos de las tierras raras, entre otros.

Por lo tanto, sin competir con los patrones descriptivos ya existentes sobre la rareza de los minerales, en este artículo se añade un aspecto suplementario (suplementario: que hace más completa una cosa; en este caso, el concepto de rareza, entendido en toda su magnitud) que:

- Se ha dotado de criterio científico, objetivo, robusto y replicable.
- Cuantifica numéricamente la rareza (referida siempre a la abundancia de elementos, tanto en la corteza terrestre como en la fórmula química) para facilitar la comparativa entre minerales.
- Se presenta como una ampliación a las opciones del coleccionismo para proporcionar una nueva herramienta de clasificación particular.

Se trata de contribuir con un criterio más objetivo para una “tipología” determinada de la rareza. Como ejemplo, el de la hazenita es muy claro. Se trata de una especie que se ha encontrado hasta ahora en un solo punto del planeta Tierra, en el lago Mono (California, EE. UU.). ¿Es posible afirmar categóricamente que este mineral (u otros que siguen este patrón de condiciones de formación y escasez) no aparecerá en el futuro en otros lugares y/o en cantidades significativas? O ¿por qué el número de cinco yacimientos es un límite que separa la rareza de la “normalidad”?, etc. (Hazen y Ausubel, 2016).

La hazenita es un mineral extremadamente raro, inusual y extraño. Y lo seguirá siendo siempre (si no hay algún cambio de los indicados más arriba). Pero esto no quita que, igual que se puede catalogar la rareza de un mineral bien por su escasez, bien por la dificultad

Figura 1. Hazenita (C.V. 5 mm) del lago Mono, California, EE.UU. Foto y ejemplar: proyecto RRUFF.



Figura 2. Edoyleerita (C.V. 1,4 mm) de la montaña Goat, California, EE.UU. Foto y ejemplar: Andreas Schloth.



de acceso, o bien por las condiciones extraordinarias de formación..., se puedan clasificar los minerales según un criterio de rareza diferente: en este caso, la abundancia de los elementos que lo conforman. ¿Esto hace que la hazenita deje de ser rara, con K, Na, Mg, O como elementos abundantes? No, categóricamente y de acuerdo con los criterios actuales; pero sí según el índice de rareza que se describe en este artículo. En consecuencia, si un geólogo, mineralogista, coleccionista, aficionado... busca minerales con elementos inusuales en la Tierra, no se focalizará en la hazenita, que es rara, por supuesto, porque no logra sus criterios de "rareza".

DEFINICIÓN DE RAREZA

La rareza de un mineral se valora actualmente a partir de varios aspectos. Estos han sido descritos, entre otros, por Weiß (2018) y Hazen y Ausubel (2016), y a continuación se resumen, ampliados adicionalmente por el mismo autor de este artículo:

a) Condiciones de formación.

Existen minerales que requieren unos factores geoquímicos muy específicos que no se suelen dar o que se producen en momentos muy específicos, como pueden ser en episodios geotermales o volcánicos esporádicos con unas condiciones de presión y temperatura que aparecen puntualmente y son el marco perfecto para la génesis de unos minerales específicos. Un caso ilustrativo es la ya citada hazenita (figura 1), un fosfato hidratado de metales térreos y alcalinos que se encuentra en el lago Mono, en California (EE.UU.), en condiciones altamente básicas (pH 10). Otro es la amicita, mineral compuesto por elementos habituales, pero que requiere condiciones muy específicas de temperatura, presión y composición para formarse. Un tercer ejemplo es la hatrurita, descubrimiento en la formación de Hatrurim (Israel). Se trata de un mineral constituido por oxígeno, silicio y calcio, tres de los elementos más abundantes de la corteza y que necesita un ambiente muy concreto de formación, puesto que exige temperaturas superiores a 1.250 °C y ausencia absoluta de aluminio, otro elemento muy común.

Además, también se puede añadir que bajo ciertas condiciones de presión, temperatura y tiempo de reacción, se favorecen algunas clases cristalinas ante otras, produciendo polimorfismo menos habituales. Ejemplos de rareza muy dispares por polimorfos son el diamante y el grafito o el cuarzo, la coesita, la tridimita, la cristobalita, la stishovita y la moganita, que además presentan formas diferentes, α y β , en función de las temperaturas de formación.

b) Carácter esporádico

Algunas especies tienen una vida efímera a causa de su rápida degradación por causas diversas. Así,

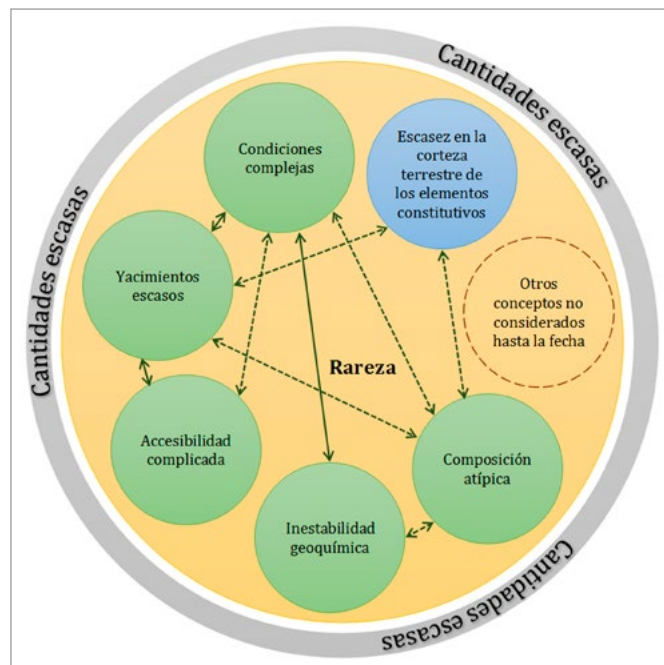


Figura 3. Representación de los diferentes aspectos considerados actualmente para definir la rareza de un mineral (en verde). El índice propuesto en este artículo (en azul) ocupa un espacio en la globalidad del concepto de rareza. Quizás todavía existe la posibilidad de deducir otros que permitan completarla (línea discontinua). Fuente: elaboración propia.

hay minerales que se descomponen con la incidencia de la luz solar (los llamados "minerales vampiro"), como la edoylerita (figura 2). Los hay que se oxidan con gran celeridad, otros se funden, se evaporan, se deshidratan, etc. y, por tanto, recolectarlos es muy complicado o incluso imposible.

c) Dificultad de obtención

Accesos complicados, lugares inaccesibles o peligrosos... hacen que en algunos casos conseguir la muestra sea prácticamente imposible y, en el caso de lograr el objetivo, la cantidad de mineral normalmente será muy baja. Un ejemplo puede ser la fingerita, que solo se localiza en una vertiente del volcán Izalco (El Salvador), en medio de fumarolas a muy alta temperatura y, además de estar constituido por vanadio y cobre, que tienen que existir a la vez, el rango de condiciones de formación es muy pequeño, de forma que si cambia ligeramente la proporción entre ambos metales, el mineral resultante es diferente. Además, cada vez que llueve, se redisuelve. La fingerita es el paradigma de mineral raro.

d) Composición extraña

Este aspecto, ligado al objeto de este artículo, tiene que ver con la rareza de los elementos que componen un mineral, dado que ciertos constituyentes presentan abundancias extremadamente limitadas en nuestro planeta y, por ejemplo, encontrar especímenes con elementos del grupo del platino (platinoides), como la ferodsita (con Rh, Ir

Elemento	mg/kg	Elemento	mg/kg	Elemento	mg/kg
Actinio	6E-13	Francio	1E-18	Plata	0,075
Aluminio	82300	Gadolinio	6,2	Platino	0,005
Americio	-	Galio	19	Plomo	14
Antimonio	0,2	Germanio	1,5	Plutonio	3E-11
Argón	3,5	Hafnio	3	Polonio	2E-10
Arsénico	1,8	Hasio	-	Potasio	20900
Astato	3E-20	Helio	0,008	Praseodimio	9,2
Azufre	350	Hidrógeno	1400	Prometio	2E-17
Bario	425	Hierro	56300	Protactinio	0,0000014
Berkelio	-	Holmio	1,3	Radio	0,0000009
Berilio	2,8	Indio	0,25	Radón	4E-13
Bismuto	0,0085	Iridio	0,001	Renio	0,0007
Bohrio	-	Iterbio	3,2	Rodio	0,001
Boro	10	Itrio	33	Rubidio	90
Bromo	2,4	Kriptón	0,0001	Rutenio	0,001
Cadmio	0,15	Lantano	39	Rutherfordio	-
Calcio	41500	Laurencio	-	Samario	7,05
Californio	-	Litio	20	Seaborgio	-
Carbono	200	Lutecio	0,8	Selenio	0,05
Cerio	66,5	Magnesio	23300	Silicio	282000
Cesio	3	Manganeso	950	Sodio	23600
Cloro	145	Meitnerio	-	Tántalo	2
Cromo	102	Mendelevio	-	Tecnecio	1,35E-12
Cobalto	25	Mercurio	0,085	Telurio	0,001
Cobre	60	Molibdeno	1,2	Terbio	1,2
Curio	-	Neodimio	41,5	Talio	0,85
Dubnio	-	Neón	0,0051	Torio	9,6
Disproso	5,2	Neptunio	3E-12	Tulio	0,52
Einstenio	-	Níquel	84	Titanio	5650
Escandio	22	Niobio	20	Uranio	2,7
Estaño	2,3	Nitrógeno	19	Vanadio	120
Estroncio	370	Nobelio	-	Wolframio	1,25
Erbio	3,5	Oro	0,004	Xenón	0,00003
Europio	2	Osmio	0,0015	Yodo	0,45
Fermio	-	Oxígeno	461000	Zinc	70
Flúor	585	Paladio	0,015	Zirconio	165
Fósforo	1050				

Figura 4. Abundancia en mg/kg de los elementos químicos, constituyentes últimos de los minerales, en la corteza terrestre. Fuente: *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (2016-17).

y Pt) o la tatyanaíta (con Pt y Pd) puede ser muy complicado.

e) Yacimientos escasos

Algunos minerales se encuentran distribuidos por toda la geografía terrestre y están en cantidades ingentes, mientras que otros se limitan a pocas localidades muy concretas y, en consecuencia, su disponibilidad es muy pequeña. En este caso se ha considerado que la rareza atribuida a estos aspectos se produce cuando solo hay cinco yacimientos o menos de aquel mineral en el mundo (Hazen y

Ausubel, 2016). En este sentido se definen 2.550 como minerales raros. La marinaíta es un ejemplo muy claro, puesto que se ha encontrado en un único yacimiento del mundo, el volcán Polsky Tolbachik, en Kamchatka (Rusia), donde se formó a raíz de la erupción de 2012-13. También la limitada cantidad de yacimientos va ligada a su dificultad de acceso, como se ha mencionado más arriba. Desde el punto de vista de la escasez, también hay que añadir que de estos minerales no se ha descubierto más de 1 o 2 cm³ de cada uno de ellos.

Número atómico Z	Elemento	Abundancia, tanto per uno, p_k	Masa atómica (g/mol) A_k	f_k	Lf_k
1	Hidrógeno	0,00140	1,01	722,2	2,86
8	Oxígeno	0,460	16,00	34,81	1,54
13	Aluminio	0,0820	26,98	328,9	2,52
16	Azufre	0,000349	32,06	91.901	4,96
27	Cobalto	0,0000249	58,93	2.364.685	6,37
29	Cobre	0,0000598	63,55	1.062.409	6,03
33	Arsénico	0,00000179	74,92	41.753.381	7,62
52	Telurio	0,000000000997	127,60	$1,27999 \times 10^{11}$	11,11

Figura 5. Algunos elementos de ejemplo con los parámetros f_k i Lf_k respectivos. Fuente: elaboración propia.

Si todos estos factores -o una gran parte- se reunieran en un solo mineral, el carácter de rareza excepcional lo haría extraordinario, con independencia de criterios estéticos, dimensiones u otras consideraciones, como puede ser el precio de mercado, que puede ir ligado, precisamente, a su particularidad. De hecho, normalmente sí que se suelen dar diferentes factores a la vez (caso de la mencionada fingerita), puesto que los elementos químicos extraños son por sí mismos poco abundantes y en consecuencia se encuentran en localidades limitadas y, a menudo, formados bajo condiciones fisicoquímicas complejas.

Las interrelaciones entre estos aspectos se muestran en la figura 3 en la que se ha añadido el concepto específico de rareza presentado en este artículo, el cual ocupa un espacio que se podía considerar que se encontraba vacío o incompleto en la definición global de la misma.

En cualquier caso, estos aspectos son criterios cualitativos, semicuantitativos o incluso empíricos, que se han establecido con una cierta dosis de arbitrariedad. Este comentario no hace referencia a falta de rigor, pero sí que está sujeto a los criterios del investigador o grupo que lo haya establecido. Es cierto que algunos de estos factores no pueden ser contabilizados cuantitativamente de ninguna otra manera y, por lo tanto, deben mantenerse bajo criterios subjetivos; y es la mejor manera, porque no hay otra.

En concreto, el criterio aplicado para determinar la rareza de un mineral basado en el número de yacimientos que existen en la Tierra de aquel mineral invita a plantear ciertas consideraciones. Según se establece, si no se superan las 5 localizaciones, se considera raro. Ciertamente, esta es una manera de poner límites, pero el hecho es que el número de “cinco” localidades es un criterio arbitrario que presenta importantes carencias. En este sentido, el límite de las localidades para determinar la rareza de un mineral podía haberse fijado en 3 o 10, por ejemplo, sin que esta norma perdiera validez. Además, si de un mineral del cual se conocen 5 yacimientos, se descubre un sexto, atendiendo solo a esta regla, dejaría de ser

“raro” y pasaría a ser común; de la noche a la mañana... Un tipo de “desplanetización” del mineral, como el que sufrió Plutón. Se trata, pues, de un criterio que se puede considerar ciertamente demasiado subjetivo.

El método que se presenta, por el contrario, aporta unos fundamentos objetivos que no se ven alterados por la modificación de los datos de base. Las características de la formulación matemática desarrollada, mediante cálculo logarítmico, y los cimientos físicos (la abundancia en la corteza terrestre de los elementos que lo constituyen y la fórmula química), hacen que no esté sujeto a grandes, o ninguna, modificaciones. Esto es evidente en caso de descubrir importantes yacimientos, ya sea en número como en cantidad. El hecho es que eventuales nuevas actualizaciones de la abundancia de elementos en la Tierra provocaría efectos nimios en la modificación del índice de rareza (i_R), de forma que se tendrían que dar descubrimientos que corrigieran de forma muy significativa la cantidad de un elemento determinado y, además, tendría que ser de los considerados más extraños. Muy difícilmente nuevos yacimientos multiplicarán (o dividirán) por 10 o más la cantidad de algunos elementos. Este hecho aporta mucha consistencia al método presentado.

MÉTODO CUANTITATIVO

El sistema que se ha desarrollado adopta los criterios cuantitativos y objetivos de dos aspectos concretos ya presentados:

- el que está ligado con la abundancia de los elementos químicos en la corteza terrestre y
- el de la aportación que hace el número de átomos de los diferentes elementos de la fórmula química del mineral.

La presencia de elementos químicos en un lugar limita la probabilidad de que entre ellos pueda haber interacción y, si las condiciones son las adecuadas, que se produzcan reacciones químicas que permitan la aparición de especies minerales. Es decir, para co-

cinar un plato hacen falta los ingredientes, mezclarlos adecuadamente y después ponerlo en el fuego en una cazuela o en una olla a presión.

Con un ejemplo se puede entender mejor. Suponiendo un escenario con un ambiente oxidante donde haya solo Cu y S, la posibilidad que se formen minerales como la calcocianita, $\text{Cu}(\text{SO}_4)$, es elevada, mientras que si se desea encontrar, en el mismo lugar, fosfatos de manganeso como la purpurita, por ejemplo, la búsqueda será infructuosa.

Por su parte, si el Cu se encuentra acompañado del Zn, pero en proporciones muy bajas (y con independencia de consideraciones cinéticas o termodinámicas de formación, o aspectos como la paragénesis...), este lugar proporcionaría sulfato de cobre, pero también de zinc, a pesar de que este último será difícil encontrarlo a causa de su escasa presencia. Será un mineral raro en este espacio de estudio. Además, se podría valorar la probabilidad de encontrar compuestos sulfatados de zinc en función de la proporción de este metal en el medio, en comparación con la del cobre, aportando una información concisa y objetiva de la rareza o normalidad de la existencia de un mineral formado por uno de estos dos metales.

Esta simulación es perfectamente extrapolable a cualquier amplitud de terreno, territorio, zona... que interese. Por extensión, se puede llegar a todo el espacio dominado por la geología de la corteza de la Tierra. Es aquí donde entra en juego el método presentado en este artículo.

Componentes cuantitativos de la rareza de un mineral

Desde hace décadas se han hecho estudios para conocer cuál es la abundancia relativa de los diferentes elementos químicos que conforman la Tierra. La importancia económica, industrial, logística, científica... de los minerales ha llevado de forma imperiosa a determinar qué cantidades de los diferentes elementos se distribuyen en toda la corteza. De ahí han salido recopilaciones diversas, más o menos cuidadosas, de los porcentajes de los elementos químicos y esto, además de los usos anteriormente mencionados, también los tiene desde el punto de vista mineralógico.

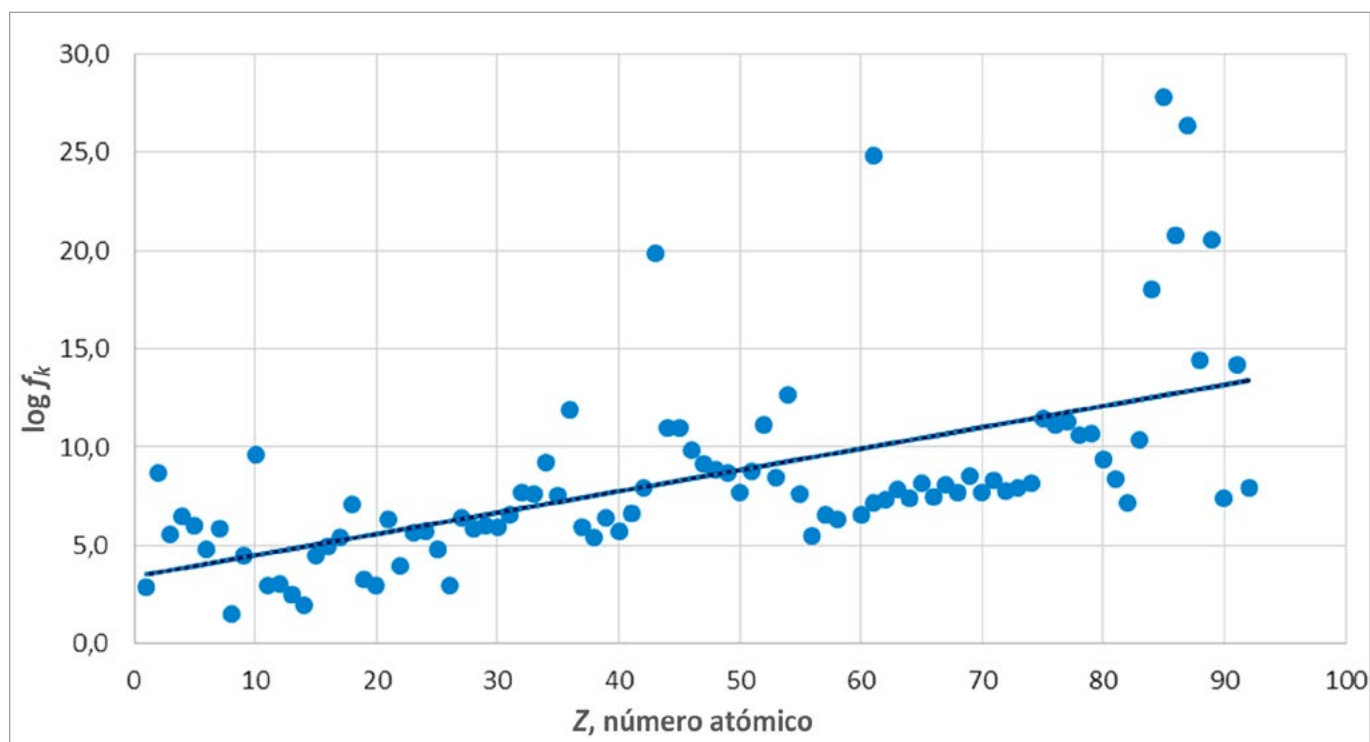
Una tabla que recoge esta abundancia aparece en la figura 4. Esta tabla ha servido de punto de partida para desarrollar el método de determinación objetiva de la rareza de un mineral basado en su abundancia. Los datos de esta tabla se expresan en mg/kg de la corteza terrestre, pero para poder utilizarlos adecuadamente en los cálculos del índice de rareza, hay que transformarlos en partes por uno.

Para mantener esta objetividad y obtener un parámetro que sea independiente de criterios arbitrarios, se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

1. Partir de la abundancia relativa de los minerales.

Por eso hay que utilizar datos contrastados y solventes. Es el conjunto de datos que permite establecer la base de cálculo. Además es un marco suficientemente estable para que no sufra cambios

Figura 6. Representación del logaritmo del factor f_k en función del número atómico de los elementos entre $Z=1$ i $Z=92$. Fuente: elaboración propia.



sustanciales en el tiempo. En este artículo se ha utilizado la información de la [figura 4](#).

2. Funcionalidad logarítmica. Suaviza la función teniendo en cuenta que los órdenes de magnitud de las diferentes abundancias es muy dispar. Por ejemplo, el oxígeno representa el 46% de los elementos mientras que el telurio es solo el 0,0000001%, es decir, 8 órdenes de magnitud menos. Aplicar logaritmos facilita la manipulación de los datos y de las distancias decimales entre ellas.

3. Número de átomos de cada elemento en cada fórmula. Se ha considerado que la presencia de dos átomos en vez de uno (o tres en vez de dos o uno) en la molécula significa una dificultad añadida, por lo tanto un incremento en la "rareza" del compuesto. Como que disponer del doble de átomos no significa el doble de rareza, la misma estructura logarítmica del cálculo también sirva de herramienta para limitar y controlar el resultado.

Justo es decir que, por el contrario, no se han considerado algunos factores que podrían tener incidencia pero que su inclusión en el método supondría un esfuerzo científico importado que no es objeto del presente estudio. Además, ya se ha señalado que el sistema se basa en la abundancia relativa y no en otros criterios objetivos, que pueden tener su peso, por supuesto, pero que en este caso, no aportan más información. Así, pues, no se ha tenido en cuenta el tipo de enlace, las energías libres de formación, de cristalización..., aspectos que pueden ser objeto de otro estudio.

En definitiva, la combinación de los factores escogidos hace que el cálculo sea suficientemente independiente de las variaciones o actualizaciones de los valores de la abundancia relativa, además de una marcada simplicidad en su cálculo y uso. La manipulación de los valores se ha conducido de forma que se mantengan en un rango de gestión y uso sencillo, evitando la aparición de números muy grandes o muy pequeños. El parámetro obtenido se ha denominado *índice de rareza*, i_R .

Índice de rareza de un mineral, i_R

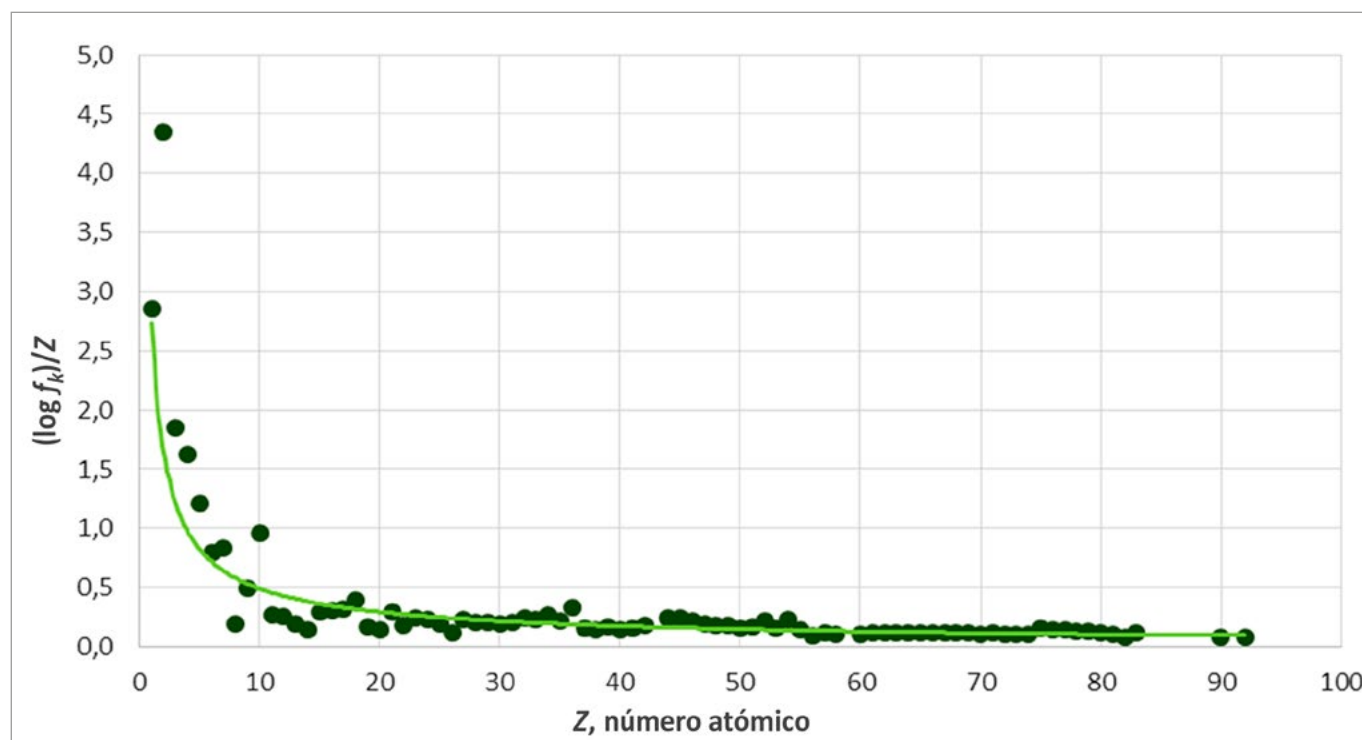
El parámetro índice de rareza, i_R , interesa que aumente cuando menor sea la abundancia. Por eso, habrá que imponer que esta sea la inversa y, por tanto, se encuentre como cociente en la expresión que lo describe. Dado que la abundancia es una medida relativa de la masa del elemento, para reducir la dependencia de la medida del átomo, lo multiplicará por la masa atómica del elemento, como expresión de identificación, de forma que se obtiene el factor inverso de abundancia f_k :

$$f_k = A_k / p_k$$

A_k es la masa atómica en g/mol del elemento k , y p_k la abundancia relativa, según la [figura 4](#), pero en tanto por uno del mismo elemento k . Este factor identifica cada elemento y es el pilar básico para construir el índice de rareza, i_R .

Si se aplica el logaritmo decimal, se reduce el rango numérico de los valores, facilitando su utilización y comprensión. Así, se obtiene el parámetro intermedio

Figura 7. Representación del logaritmo del factor f_k dividido por Z en función del número atómico de los elementos entre $Z=1$ i $Z=92$. El coeficiente de correlación es de $r^2=0,79$. Fuente: elaboración propia.



Lf_k (después se verá que este se denomina índice de rareza individual básico, i_R^k):

$$Lf_k = \log f_k$$

La tabla de la figura 5 recoge algunos valores que sirven de ejemplo para hacer el seguimiento de la demostración.

Mediante este mecanismo se consigue el efecto buscado de invertir la abundancia, convirtiéndola en rareza, y normalizar los valores Lf_k en un rango bastante manejable; en el ejemplo de la figura 5, entre 1,5 y poco más de 11. Tomando todos los elementos químicos, los valores se encuentran entre 1,5 y 27,8, es decir, un rango numérico de un solo orden de magnitud (no confundir con el valor real, que son potencias de 10).

Si se representa el $\log f_k$ respecto al número atómico Z (figura 6) se aprecia una cierta dependencia lineal ascendente que da a entender que cuanto más pesados sean los elementos, más complicada será su localización en la Tierra y que, por lo tanto, los minerales que los contengan presentarán mayor rareza. Esto es coherente con la dificultad de síntesis de elementos en el Universo en función de su número atómico.

La dispersión que se observa (el coeficiente de correlación es $r^2 = 0,43$), a pesar de que la tendencia ascendente es clara, se puede minimizar si se representa el logaritmo de f_k dividido por Z , lo que supone un $r^2 = 0,79$. El gráfico de la figura 7 lo recoge.

El siguiente paso es implementarlo para los compuestos químicos, es decir, los minerales, e interpretarlo.

Se partirá de un par de minerales, la eritrita, un bonito arseniato hidratado de cobalto, que responde a la fórmula $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (figura 8), y la vinciennita, $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_4\text{SnAsS}_{16}$ (figura 9). Se multiplicará el valor f_k de cada elemento por su número de átomos en la fórmula química del mineral. Los valores se suman y al resultado se le aplica el logaritmo decimal, proporcionando el índice de rareza i_R buscado:

$i_R = \log \sum (v_k \cdot f_k)$, donde el sumatorio va desde $k=1$ hasta $k=n$.

$i_R = \log \sum (v_k \cdot 10^{Lf_k})$, donde el sumatorio va desde $k=1$ hasta $k=n$.

Siendo v_k la cantidad de átomos del elemento k presente en la composición del mineral.

Ambas expresiones son idénticas y se pueden aplicar indistintamente, pero permiten utilizar unos datos de base u otros en función de la comodidad y necesidades del investigador.

Desde el punto de vista de la contribución de cada elemento a la fórmula, también se puede obtener el índice de rareza del elemento en un mineral concreto, que aporta información sobre el peso del elemento en el mineral a partir, tanto de su abundancia/escasez, como de la cantidad de átomos que se encuentran involucrados en la fórmula química. Este último aspecto también es importante, puesto que no es el mismo un mineral con un átomo de cromo, por ejemplo, que con cinco, dado que esta última composición es bastante menos frecuente que la primera.

La expresión que lo relaciona es:

$$i_R^{k, \text{mineral}} = \log (v_k \cdot f_k)$$

donde $i_R^{k, \text{mineral}}$ es el índice de rareza básico del elemento k (1 átomo) en el mineral.

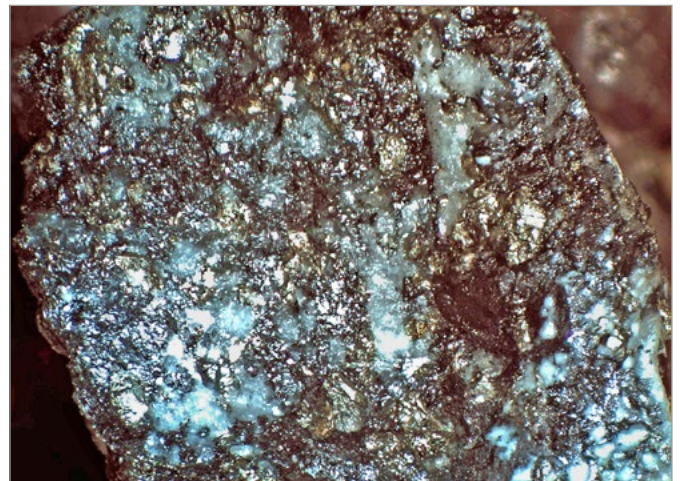
Si se vuelve al gráfico de la figura 7, la correlación de puntos es muy clara entre el número atómico y $\log f_k/Z$, de forma que a partir de Z superiores a 10 se iguala el cociente y, por lo tanto, la incidencia de $\log f_k$ es compensada por el crecimiento de Z , de lo que, si se desglosan los parámetros, se deduce que las abundancias, p_k , de los elementos con Z entre 1 y 10, es decir, los más comunes, tienen menos incidencia en este factor y, por tanto, se confirma que cuanto más escaso sea un elemento más destacado será el suyo un peso en i_R , pero atenuado por su masa atómica.

Los datos parciales y los valores de los índices de rareza se recogen en la figura 10 para los dos minerales de ejemplo mencionados.

Figura 8. Eritrita (C.V. 4 cm) de Bou Azzer, Ouarzazate, Marruecos. Foto y ejemplar: José Luis Garrido.



Figura 9. Vinciennita (con piritita y otros) (C.V. 9 mm) de Chalmoux, Saona y Loira, Francia. Foto y ejemplar: Rolf Luetcke.



Eritrita - $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$				
Elemento	Número de átomos, v_k	f_k	$v_k \cdot f_k$	$i_R^{(k,eritrita)}$
Hidrógeno	16	722,2	11.556	4,1
Oxígeno	16	34,81	557,01	2,7
Cobalto	3	2.364.685	7.094.056	6,9
Arsénico	2	41.753.381	83.506.761	7,9
			$\Sigma:$ 90.612.930	
			$\log:$ $i_R = 8,0$	
Vinciennita - $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_4\text{SnAsS}_{16}$				
Elemento	Número de átomos, v_k	f_k	$v_k \cdot f_k$	$i_R^{(k,vinciennita)}$
Hierro	4	995,0	3.980,1	3,6
Azufre	16	91.901	1.470.408	6,2
Cobre	10	1.062.409	10.624.090	7,0
Arsénico	1	41.753.381	41.753.381	7,6
Estaño	1	51.774.302	51.774.302	7,7
			$\Sigma:$ 105.626.162	
			$\log:$ $i_R = 8,0$	

Figura 10. Determinación del índice de rareza i_R de los minerales eritrita y vinciennita, a partir del factor inverso de abundancia (f_k) i del número de átomos de cada elemento en la fórmula (v_k). Fuente: elaboración propia.

De la lectura minuciosa y comparativa de estos datos se extraen diversas consecuencias, que vemos seguidamente.

Universalidad del valor del índice rareza i_R

Para la eritrita, el índice de rareza i_R siempre será el mismo, es decir 8,0, con independencia del número

de yacimientos existentes y de los que se puedan localizar en el futuro, de su composición que, obviamente, no variará, etc. Solo habría un constituyente que podría hacer cambiarlo: la actualización de datos sobre la abundancia de un elemento en la Tierra, siempre que se diera la circunstancia de que el estado de las técnicas de prospecciones o de estimaciones

Figura 11. Callaghanita (C.V. 8,5 mm) de Gabbs, Nevada, EE.UU. Foto y ejemplar: José Luis Garrido.

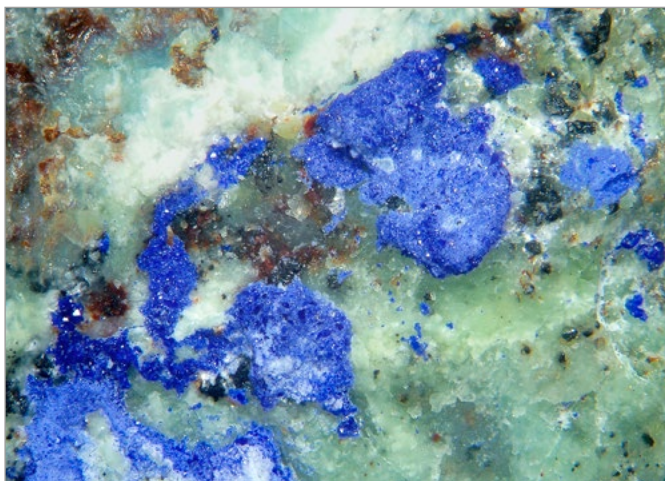


Figura 12. Polidimita (C.V. 3,5 mm) de Schutzbach, Renania-Palatinado, Alemania. Foto y ejemplar: Stephan Wolfsried.



Mineral	Fórmula empírica	Índice de rareza, i_R Todos los errores $\pm 0,1$	Índice de rareza individual (elemento) más grande, i_R^{vk} Todos los errores $\delta i_R^{vk} = \pm 0,0$
Acantita	Ag_2S	9,5	$i_R^{2Ag} = 9,2$
Baritina	$Ba(SO_4)$	5,6	$i_R^{Ba} = 5,5$
Berilo	$Be_3Al_2(Si_6O_{18})$	7,0	$i_R^{3Be} = 7,0$
Calcita	$Ca(CO_3)$	4,8	$i_R^C = 4,8$
Callaghanita	$Cu_2Mg_2(CO_3)(OH)_6 \cdot 2H_2O$	6,3	$i_R^{2Cu} = 6,3$
Carminita	$PbFe^{3+}_2(AsO_4)_2(OH)_2$	7,2	$i_R^{2As} = 7,2$
Cavansita	$Ca(V^{5+}O)(Si_4O_{10}) \cdot 4H_2O$	5,6	$i_R^V = 5,6$
Celestina	$Sr(SO_4)$	5,6	$i_R^{Sr} = 5,4$
Conicalcita	$CaCu(AsO_4)(OH)$	7,6	$i_R^{As} = 7,6$
Cuarzo	SiO_2	2,2	$i_R^{Si} = 2,0$
Dumortierita	$Al_7(BO_3)(SiO_4)_3O_3$	6,0	$i_R^B = 6,0$
Elbaíta	$Na(Li_{1,5}Al_{1,5})Al_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(OH)_4$	6,6	$i_R^{3B} = 6,5$
Espodumena	$LiAl(Si_2O_6)$	5,5	$i_R^{Li} = 5,5$
Fingerita	$Cu_{11}(VO_4)_6O_2$	7,2	$i_R^{11Cu} = 7,1$
Franckeíta	$Pb_4Sn_4FeSb_2S_{15}$	9,2	$i_R^{2Sb} = 9,1$
Goethita	$Fe^{3+}O(OH)$	3,3	$i_R^{Fe} = 3,0$
Hazenita	$KNaMg_2(PO_4)_2 \cdot 14H_2O$	4,9	$i_R^{2P} = 4,8$
Ichnusaíta	$Th(MoO_4)_2 \cdot 3H_2O$	8,3	$i_R^{2Mo} = 8,2$
Kernita	$Na_2[B_4O_6(OH)_2] \cdot 3H_2O$	6,6	$i_R^{4B} = 6,6$
Kotoíta	$Mg_3(BO_3)_2$	6,3	$i_R^{2B} = 6,3$
Köttigita	$Zn_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	7,9	$i_R^{2As} = 7,9$
Manganita	$Mn^{3+}O(OH)$	4,8	$i_R^{Mn} = 4,8$
Ortoclasa	$K(AlSi_3O_8)$	3,4	$i_R^K = 3,3$
Ottoíta	$Pb_2(TeO_5)$	11,1	$i_R^{Te} = 11,1$
Polidimita	Ni_3S_4	6,4	$i_R^{3Ni} = 6,3$
Rodocrosita	$Mn^{2+}(CO_3)$	5,1	$i_R^C = 4,8$
Rutilo	TiO_2	3,9	$i_R^{Ti} = 3,9$
Schüllerita	$Na_2Ba_2Mg_2Ti_2(Si_2O_7)_2O_2F_2$	5,9	$i_R^{2Ba} = 5,8$
Torbernita	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$	8,3	$i_R^{2U} = 8,2$
Uvarovita	$Ca_3Cr^{3+}_2(SiO_4)_3$	6,0	$i_R^{2Cr} = 6,0$
Zircón	$Zr(SiO_4)$	5,7	$i_R^{Zr} = 5,7$

Figura 13. Algunos minerales de ejemplo con los índices de rareza de cada uno y con los individuales de los elementos de máxima rareza, para comparativa. Fuente: elaboración propia.



Figura 14. Algunos de los minerales de la figura 13 ordenados de menor a mayor rareza, en función de su i_R : 1 cuarzo ($i_R=2,2$) de Cataluña, España; 2 rutilo ($i_R=3,9$) de Minas Gerais, Brasil; 3 calcita ($i_R=4,8$) de Asturias, España; 4 baritina ($i_R=5,6$) de Murcia, España; 5 dumortierita ($i_R=6,0$) de California, EE.UU.; 6 elbaíta var. rubelita ($i_R=6,6$) de California, EE.UU.; 7 berilo var. aguamarina ($i_R=7,0$) de Gilgit-Baltistán, Pakistán; 8 torbernita ($i_R=8,3$) de Galicia, España; 9 acantita (9,5) de Guanajuato, México. Fotos y ejemplares: José Luis Garrido.

geoquímicas hiciera variar este valor. Pero el método presentado ya tiene en cuenta este hecho y su arquitectura matemática hace que estas variaciones queden amortiguadas y no tengan efecto práctico en el valor de i_R . Lo mismo sucede con la vinciennita, con un i_R de 8,0, que está sometida a las mismas consideraciones.

Un ejemplo ilustrativo puede ser el siguiente: supóngase que se descubren nuevas e importantes minas de cobre en Australia y que se verifica que, a raíz de este hallazgo, la abundancia de este metal en la corteza terrestre aumenta en un 10%, un valor muy elevado, ciertamente. Así, se pasa de 0,00598% al 0,00658%. Obviando la alteración de % en el resto de elementos, el valor de un mineral donde el Cu no es lo más extraño, como la vinciennita, su efecto sería nulo, puesto que el recálculo da un i_R también de 8,0 (concretamente 8,020 vs. 8,024 actual). Así mismo, si en estas mismas circunstancias se estudia la rareza de otro mineral donde el cobre sea, en este caso, el elemento más extraño, como la callaghanita (figura 11) (véase figura 13), la i_R tan solo sufre un ligero des-

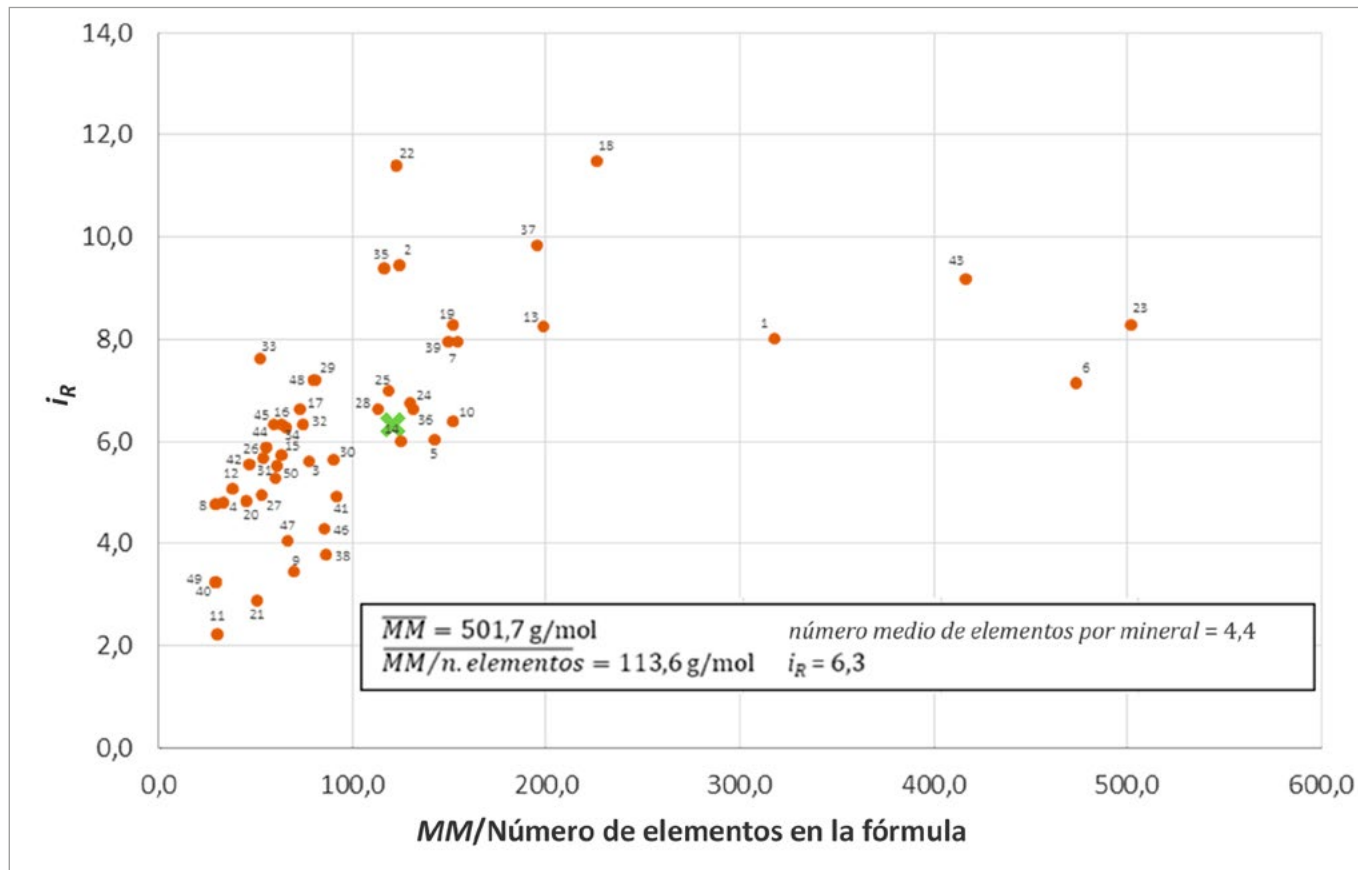
censo del 6,341 actual a 6,301: un cambio bastante importante, como es el 10% en la abundancia, solo supone una variación del 0,6% en el índice de rareza, que no es significativa.

Comparativa entre diferentes índices de rareza

Al comparar dos índices de rareza, i_R , hay que tener en cuenta que los valores, al ser en base logarítmica, presentan diferencias de un orden de magnitud por cada unidad. Así, entre un índice de 4,5 y uno de 6,5 hay dos unidades de diferencia y, por lo tanto, dos órdenes de magnitud, es decir, que el mineral con el índice de rareza $i_R = 6,5$ es 100 veces más raro que el de 4,5.

Por ejemplo, al comparar los dos índices de rareza de la eritrita y de la vinciennita, la pequeña diferencia entre ambos valores indica que este último es solo ligeramente más raro que el primero. Si la comparación es entre dos minerales con índices más lejanos, como por ejemplo la ortoclasa y la polidimita (figura 12) (véase figura 13), con i_R de 3,4 y 6,4, respectivamente, esto equivale a interpretar que la polidimita es 1.000 veces más rara que la ortoclasa.

Figura 15. Representación de la posición de 50 minerales en función del índice de rareza i_R y del cociente entre la masa molecular (MM) e el número de elementos. La cruz verde representa el valor medio de los datos. Los minerales son: 1 vinciennita, 2 acantita, 3 baritina, 4 calcita, 5 dumortierita, 6 fingerita, 7 köttigita, 8 manganita, 9 ortoclasa, 10 polidimita, 11 cuarzo, 12 rodocrosita, 13 torbernita, 14 uvarovita, 15 zircón, 16 kotoíta, 17 kernita, 18 calaverita, 19 ichnusaíta, 20 topacio, 21 corindón, 22 poughita, 23 calcofilita, 24 abelsonita, 25 berilo, 26 baritolamprofilita, 27 bixbyita, 28 brochantita, 29 carminita, 30 cavansita, 31 celestina, 32 callaghanita, 33 conicalcita, 34 crisocola, 35 cinabrio, 36 elbaíta, 37 edoyleyrita, 38 epidota, 39 eritrita, 40 goethita, 41 hazenita, 42 espodumena, 43 franckeíta, 44 polilitionita, 45 libethenita, 46 lorenzenita, 47 moscovita, 48 mottramita, 49 nefelina, 50 marcasita. Fuente: elaboración propia.



Influencia del índice de rareza individual en el general

La última columna de la figura 10 recoge el índice individual, que informa de la contribución de cada elemento a la fórmula empírica, es decir, de la especie mineral de la cual estamos determinando la rareza.

Se puede definir el índice de rareza individual de orden v para un elemento k , i_R^{vk} , como el índice que indica la rareza aportada al mineral por su elemento k y que se encuentra en su fórmula química con un número v de átomos. Si $v = 1$, no hay que indicarlo en el superíndice y se entiende que es el índice de rareza individual básico para el elemento k , es decir, i_R^{vk} .

Por lo tanto, tanto el i_R como los i_R^{vk} son específicos para cada mineral y para cada elemento que lo componen, respectivamente.

Además, se observa una característica muy evidente que es que el índice de rareza del mineral está íntimamente ligado al del elemento o elementos con valores individuales más altos, mientras que el resto no aportan nada, prácticamente.

En la eritrina, por ejemplo, el oxígeno está presente con 16 átomos. Esto hace que el i_R^{16O} pese 2,7 en vez de 1,5, el valor individual de orden 1. Este incremento se da por el número de átomos de oxígeno, que es considerable, a pesar de que no es suficiente para influir en el i_R global del mineral, puesto que está supeditado el alto valor del $i_R^{2As} = 7,9$.

Huella dactilar

A modo de resumen, cada mineral presenta un valor del índice de rareza, i_R , propio que lo identifica y lo

Figura 16. Índices de rareza individuales de diferentes elementos, i_R^k , para cantidades de átomos diferentes en la fórmula química del mineral. Errores (en todos los casos): $\pm 0,0$. Fuente: elaboración propia.

Elemento	1 átomo	2 átomos	3 átomos	5 átomos	10 átomos
	i_R^k	i_R^{2k}	i_R^{3k}	i_R^{5k}	i_R^{10k}
O	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5
Si	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0
Al	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5
H	2,9	3,2	3,3	3,6	3,9
K	3,3	3,6	3,8	4,0	4,3
P	4,5	4,8	4,9	5,2	5,5
C	4,8	5,1	5,3	5,5	5,8
S	5,0	5,3	5,4	5,7	6,0
Ba	5,5	5,8	6,0	6,2	6,5
Cr	5,7	6,0	6,2	6,4	6,7
Cu	6,0	6,3	6,5	6,7	7,0
B	6,0	6,3	6,5	6,7	7,0
Co	6,4	6,7	6,9	7,1	7,4
Be	6,5	6,8	7,0	7,2	7,5
As	7,6	7,9	8,1	8,3	8,6
Sb	8,8	9,1	9,3	9,5	9,8
Te	11,1	11,4	11,6	11,8	12,1

hace único en el aspecto de rareza por abundancia de elementos y su peso en la formulación química.

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS ÍNDICES DE RAREZA

La tabla de la figura 13 reúne un listado de minerales con sus índices de rareza y los individuales con su orden indicado. La figura 14 ilustra nueve de estos minerales.

El mineral más común es el cuarzo con un índice de rareza bajo, de 2,2. La acantita lo tiene de 9,5, valor muy alto y por tanto mineral de elevada rareza, siempre, hay que recordarlo, basado en su composición química y en la abundancia de los elementos en la corteza terrestre. Además, el índice individual de la plata también tiene un valor de 9,2, lo que indica que la rareza del mineral está exclusivamente ligada a este elemento.

De hecho, el otro componente de la acantita, el azufre, tiene un i_R^S de 5,0, que significa que es más de 4 órdenes de magnitud inferior al de la plata. En este sentido, la torbernita presenta un i_R de 8,3, que es prácticamente idéntico al individual del uranio, en este mineral, lo que indica que el resto de elementos que constituyen la torbernita distan mucho en rareza del uranio y solo es este el responsable de esta característica. Una situación análoga sucede con el cromo de la uvarovita o con el zirconio en el zircón.

Si se representa el índice de rareza, i_R , en función del cociente $MM/\text{número de elementos}$ (figura 15), se observa que la mayor parte de minerales se acumulan en una franja compacta de $MM/\text{número de elementos} < 200$ y entre 2 y 10 de índice de rareza. Concretamente, de los 84 minerales recogidos, prácticamente el 90% se encuentran en esta pequeña región, lo que acota la mayor parte de los minerales por su rareza entre estos valores, pero también por la masa molecular por elemento (con un valor medio de 4,4 elementos por mineral) que proporciona una media del orden de 114 g/mol. La cruz verde es el baricentro de los puntos de todos los minerales representados. Esto indica que gran parte de los minerales están conformados por una mayoría de elementos comunes (baja masa atómica) y que la rareza lo aporta la aparición de elementos con una extrañeza mediana de forma puntual pero también habitual en las fórmulas de los minerales.

Figura 17. Índices de rareza para diferentes gemas. Fuente: elaboración propia.

Mineral	Fórmula empírica	Índice de rareza, i_R Errores: $\pm 0,0$
Berilo (var. aguamarina)	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$	7,0
Corindón (var. rubí)	Al_2O_3	2,9
Cuarzo (var. amatista)	SiO_2	2,2
Diamante	C	4,8
Topacio	$\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{F}_2$	4,8
Zircón	$\text{Zr}(\text{SiO}_4)$	5,7

$$\delta Lf_k = \pm 0,04 \text{ para } \forall k$$

$$\delta i_R^{vk} = \pm 0,000 \text{ para } \forall k, v; \text{ excepto oxígeno, } \delta i_R^{vO} = \pm 0,009, \text{ y silicio, } \delta i_R^{vSi} = \pm 0,003 \text{ para } \forall v$$

$$\delta i_R = \pm 0,04 \cdot \forall n$$

$n = \text{número de elementos del mineral, donde } n \in \mathbb{N}$

$n = 1$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,04$
$n = 2$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,06$
$n = 3$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,07$
$n = 4$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,08$
$n = 5$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,09$
$6 \leq n < 11$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,1$
$n \geq 11$	\Rightarrow	$\delta i_R = \pm 0,2$

Figura 18. Errores obtenidos para los diferentes parámetros calculados.

Un segundo grupo, escaso, muestra i_R más altos (mayor rareza, superior a 10) con valores de $MM/\text{número de elementos}$ relativamente bajos, lo que refuerza la explicación anterior e indica que estos minerales contienen elementos mucho más extraños unidos a otros bastante comunes. Finalmente, algunos pocos se desplazan a la derecha del gráfico, manteniendo un índice de rareza intermedio, alrededor de 8, pero con grandes masas moleculares medianas relativas. En este caso, se observan minerales con una cantidad significativa de elementos raros y, consecuentemente, pesados.

Para tener una visión más amplia y precisa de estos datos y extraer conclusiones más universales, habría que incluir en este gráfico muchos más minerales, puesto que esta figura se limita a recoger solo 50.

Profundizando, y de acuerdo con el método expuesto, el mismo elemento tiene pesos diferentes en diferentes minerales porque su presencia no es igual en la fórmula química que la define. Por ejemplo, el boro, con dos átomos en la kotoíta tiene un $i_R^{2B} = 6,3$, mientras que los cuatro átomos de boro en la kernita producen un i_R^{2B} de 6,6. Este valor supone que su implicación en el mineral le aumenta la rareza.

Así, el número de átomos de los elementos en la fórmula provocan diferentes contribuciones, como se recoge en la figura 16.

Es fácil de observar que dos átomos de un elemento solo aportan un ligero aumento de rareza, mientras que 10 átomos contribuyen en un orden de magnitud, como se desprende de la estructura matemática. Otro efecto es que en un mismo mineral, dos elementos de diferentes i_R^k básicos (de 1 átomo) solo pueden igualarse si la cantidad del de menor valor tiene una gran cantidad de átomos. En definitiva, siempre se cumple que:

$$i_R^{ak} > i_R^{bk} \text{ para todo } a > b, \text{ donde } a, b \in \mathbb{N}$$

Un ejemplo comparativo completo aportará más luz a la aplicación de estos parámetros. Así, volviendo a los minerales eritrita y vinciennita, sus índices individuales de rareza, i_R^{vk} , permiten analizar qué elementos

son los que aportan mayor rareza a estos minerales concretos, tanto por su abundancia en la corteza terrestre como por su significación dentro de la fórmula química.

Si se observa de nuevo la figura 10, para la eritrita se pueden apreciar los valores:

$$i_R^{3Co,eritrita} = 6,9; i_R^{2As,eritrita} = 7,9; i_R^{16H,eritrita} = 4,1; i_R^{16O,eritrita} = 2,7.$$

Teniendo en cuenta la definición del índice de rareza, queda claro que el arsénico es el elemento más extraño en la eritrita, seguido del cobalto. Más comunes son el hidrógeno y, sobre todo, el oxígeno. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la contribución del arsénico a la rareza respecto al resto de elementos es de 10 veces superior a la del cobalto y más de 1.000 y de 10.000 respecto a hidrógeno y oxígeno, respectivamente. Si, además, se compara con el valor i_R del mineral, 8,0, está claro que este es prácticamente igual al índice individual de rareza del arsénico, $i_R^{2As,eritrita}$, lo que se interpreta en que la rareza de la eritrita está condicionada prácticamente de forma exclusiva por la rareza del arsénico, mientras que el resto de elementos hacen una aportación testimonial.

En el caso de la vinciennita, los i_R^{vk} son:

$$i_R^{10Cu,vinciennita} = 7,0; i_R^{4Fe,vinciennita} = 3,6; i_R^{Sn,vinciennita} = 7,7;$$

$$i_R^{As,vinciennita} = 7,6; i_R^{S,vinciennita} = 6,2.$$

Se aprecia similitud entre los índices del arsénico y del estaño, solo separados por 0,1 unidades, es decir, una diferencia de poco más de 2 veces (escala logarítmica). El i_R del mineral es 8,0 y por tanto la rareza está generada por la contribución principal de estos dos elementos. Para ver la influencia del peso relativo de uno de estos elementos en el índice global, se puede hacer la simulación obviando, por ejemplo, el estaño. En este caso, el i_R sería de 7,7. Si solo se elimina el arsénico, $i_R = 7,8$. En cambio, si no tenemos en cuenta el cobre, que, a pesar de tener 10 átomos en la molécula y tener un $i_R^{10Cu,vinciennita}$ de 7,0, que aunque no es pequeño, está lejos de los del arsénico y del estaño, sigue siendo de 8,0. Queda claro, pues, que en los dos casos la rareza está dominada por estos dos últimos elementos (As y Sn).

Casos particulares. Variedades y polimorfismos

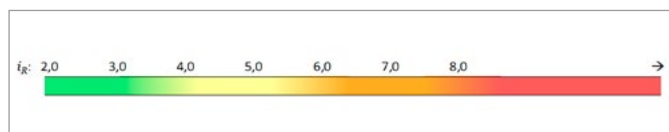
El índice de rareza no se aplica a los polimorfismos ni a las variedades. Básicamente, esto se justifica por la misma naturaleza del parámetro, puesto que no discrimina entre sistemas o clases cristalográficas, sino que atiende exclusivamente a la composición química del mineral.

Como ejemplo, el cuarzo y sus polimorfos como la tridimita, la cristobalita, la coesita..., tienen exactamente la misma formulación, SiO_2 , y, por lo tanto, un mismo valor de i_R (en este caso 2,2), a pesar de la diferente presencia de estas especies a la corteza terrestre (que no de sus elementos).

Lo mismo sucede con las variedades de un mineral. Estas pueden venir dadas por impurezas, inclusiones de elementos en cantidades traza o defectos de la red cristalina. En este caso, la fórmula del mineral tampoco varía; solo pueden aparecer estos elementos o compuestos adicionales que son, desde el punto de vista mineralógico, eventuales, y que no forman parte de la estructura molecular (a pesar de que sí de la cristalina). Siguiendo con el ejemplo del cuarzo, el ágata, la cornalina y la crisoprasa son variedades englobadas bajo la denominación calcedonia en que se presentan diferentes coloraciones a causa de ciertas modificaciones cristalinas. En todos los casos, la fórmula SiO_2 evoca un único índice de rareza. En cuanto al berilo, como segundo ejemplo, muestra diferentes variedades: la aguamarina (con presencia de hierro (II) o hierro (III)), la esmeralda (con cromo y vanadio) o el maxixe (con óxidos de cesio y litio). Todas mantienen su composición general de ciclosilicato de berilio y aluminio, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$, con un $i_R = 7,0$ común para todas las variedades.

Adicionalmente, la rareza asociada al valor económico de algunas gemas no va correlacionada con el índice expuesto, puesto que sus elementos constituyentes son bastante comunes, cosa que puede llegar, incluso, a generar situaciones paradójicas. Es el caso del diamante y del grafito. Se trata de dos formas alotrópicas del carbono, C, y por tanto, con composiciones químicas idénticas. Esto confiere a ambos polimorfismos el mismo índice de rareza, $i_R = 4,8$. Este valor bajo informa que se trata de formaciones bastante comunes a causa de su composición, a pesar de que choca con el diferente concepto que se tiene de uno y otro en el uso cotidiano, como por ejemplo la mina de los lápices hecha de grafito o el anillo de compromiso con un brillante, un diamante pulido.

Figura 19. Índices de rareza representados en una escala cromática, para facilitar la lectura o como referencia rápida. Fuente: elaboración propia.



Algo similar pasa con otras gemas como el topacio, algunas variedades de berilo, de corindón... (como ya se ha descrito en este apartado), que siguen siendo especies poco comunes en nuestra vida diaria a causa de su precio y exclusividad, pero que en cambio presentan unos i_R relativamente bajos, en general, según se observa en la figura 17. En esta figura, el caso de i_R más alto es el del berilo, cuya rareza viene dada por el peso del elemento Be en la fórmula.

Incidencia del error en la interpretación del índice de rareza

La determinación del error propagado en el cálculo de los diferentes parámetros generados en este estudio se ha establecido considerando que los valores de la abundancia, p_k , van acompañados de un error propio del 10% en la estimación (figura 18). En cuanto a la masa atómica, A_k , al número de átomos de cada elemento, v_k , y la cantidad de elementos por fórmula, n , se consideran constantes o con un error muy pequeño que no afecta a la precisión de este método.

Una vez determinados los errores, su incidencia en los índices de rareza individuales no parece significativa y es importante remarcar que el error es suficientemente bajo para establecer $\pm 0,00$ para todos los casos excepto el oxígeno, que será de $\pm 0,01$. Por lo que respecta al índice general de rareza, sí que tiene un cierto peso y lo mueve entre $\pm 0,04$ y $\pm 0,2$ en función del número de elementos que contiene la fórmula química del mineral.

En todo caso, y dado que se ha optado por fijar el valor del índice de rareza con un solo decimal, se establece el error en $\pm 0,0$ para $n=1$, en $\pm 0,1$ para $2 \leq n < 11$ y en $\pm 0,2$ para $n \geq 11$, lo que también simplifica la expresión matemática.

En la figura 13 se indican los diferentes valores de los índices de rareza con sus correspondientes errores.

Aplicaciones

La aplicación principal para la cual se ha desarrollado este método es la de dotar a los coleccionistas de una herramienta adicional para ayudarlos en la clasificación de sus piezas o en la adquisición de nuevas.

El índice i_R es idóneo para poderse fijar categorías de rareza y desarrollar la colección. Por ejemplo, estableciendo criterios como minerales con índices superiores a 5, o bien menores de 7, entre 5,5 y 6,5... y que se pueden combinar con otros aspectos (elementos concretos, grupos, localizaciones...).

Tal como se ha comentado anteriormente, los valores de i_R se encuentran entre 2,2 (SiO_2) y hasta valores superiores a 20, a pesar de que estos ya corresponden a minerales absolutamente nada comunes (compuestos por iridio, rodio, telurio...). Dentro de este rango se puede crear sus grupos particulares. Así, el coleccionismo basado en los componentes más extraños, o

más comunes, de un mineral, se puede valorar a partir de ahora utilizando su índice de rareza, i_R . Se puede establecer un tipo de ranking de rareza que puede tener un aspecto similar al de la regleta de la figura 19.

En esta se puede representar cada mineral de la colección mediante un marcador (punto) y ver dónde se sitúa el nivel de rareza (u originalidad) de la colección en función de la densidad de puntos. También se puede determinar un valor mediano de los índices para dotar a la colección de un i_R global identificativo. O bien, medias por grupos de minerales, por localizaciones, etc.

TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha determinado el índice i_R para unos cuarenta minerales. Actualmente queda pendiente una tarea importante para calcular este parámetro para todos los minerales aprobados por la IMA, lo que habría que hacer de ahora en adelante.

Cuanto más minerales tengan calculado su índice de rareza, más facilidad habrá para hacer agrupaciones de masas moleculares vs. i_R o bien otros conjuntos (número de átomos, de elementos, grupos sistemáticos...) para extraer conclusiones particulares.

A pesar de que la probabilidad de que la i_R varíe con la actualización de datos de la abundancia de elementos es muy baja, se puede localizar la mejor base de datos para fijarla como punto de partida para la determinación del índice de rareza definitivo.

Para tener una visión más amplia y precisa de estos datos y extraer conclusiones más universales, habría que ampliar el alcance de minerales estudiados a todos los posibles e incluirlos en los diferentes gráficos y tablas expuestos. La representación gráfica según los criterios especificados en este artículo proporcionaría una percepción visual más exacta del conjunto de todos ellos. Eso daría mucha más consistencia,

precisión y exactitud a las explicaciones realizadas.

CONCLUSIONES

El método que se desarrolla en este artículo permite definir, de forma simple, el parámetro llamado índice de rareza i_R , que recoge el grado de rareza de un mineral basado en factores objetivos y cuantitativos, y que, además, son poco o nada mutables, como la fórmula química y la abundancia de sus elementos en la corteza terrestre.

Se trata de un parámetro que caracteriza de forma inequívoca cada mineral según su rareza y que, además, se conserva en el tiempo. Así, se mantiene esencialmente su valor pese puedan darse alteraciones en la precisión de los datos a partir de las cuales se construye.

La estructura logarítmica del método empleado para definir el i_R hace que el rango de valores sea estrecho, encontrándose entre 2 y 16, lo que facilita su manipulación, su comparación y la representación gráfica. Esto evita el uso de las abundancias de los elementos de la corteza terrestre, que es más complicado debido a su elevada dispersión numérica.

Este nuevo parámetro, el índice de rareza (i_R), podría convertirse en un identificador único para cada mineral, al igual que existen otros atributos básicos como la dureza, el color de la raya o la densidad. No es una propiedad física, pero sí una cualidad que puede acompañar siempre al mineral en su descripción. Por lo tanto, puede convertirse en un parámetro universal para cada mineral que permita incorporar un nuevo aspecto en la clasificación mineralógica, tanto desde el punto de vista científico como del coleccionismo. Y todo ello, sin obviar ni excluir otras clasificaciones de rareza ya consolidadas como las recogidas en este artículo.

Agradecimientos

A Jordi Ibáñez y a Marc Campeny, por las lecturas en profundidad del texto durante el periodo de evaluación y por sus valiosas aportaciones. A José Luis Garrido, por su dedicación e interés, por el tiempo empleado en la revisión y por sus contribuciones.

Referencias bibliográficas

- HAYNES, William M. [edit.] (2017): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 97ª ed. (2016-17). Boca Ratón (Florida, EE.UU.): CRC Press.
- HAZEN, R.M. i AUSUBEL, J.H. (2016): "On the nature and significance of rarity in mineralogy", *American Mineralogist*; vol. 101, pp. 1245-1251.
- PAKHOMOVA, Anna, et al. (2020): "Polymorphism of feldspars above 10 GPa", *Nature Communications*; vol. 11, núm. 2721. En <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16547-4>>.
- WEIß, Stefan (2018): *Das Große Lapis Mineralienverzeichnis*, 7ª ed. Munich: Christian Weise Verlag GmbH.

FECHA RECEPCIÓN: 06-05-20. FECHA ACEPTACIÓN: 14-09-20. FECHA INICIO EDICIÓN: 15-01-21.