

Sobre un icosaedro de pirita

Matías Raja

1. Motivación

El verano de 2013 me encontraba pasando las vacaciones con mi mujer en el norte de León, concretamente en Puebla de Lillo. En los alrededores de esta localidad se encuentra una mina de talco a cielo abierto (La Respina) que ha proporcionado muy buenos cristales de pirita (sulfuro de hierro). De hecho, aquí se encontró un octaedro bastante completo de ocho centímetros de arista que se expone en el museo del IGME en Madrid [3]. Los cristales de pirita se desarrollan en el seno del talco masivo y rocas adyacentes, pero de éste y otros detalles técnicos nos ocuparemos más adelante.



Fig. 1. Icosaedro de pirita

No es por casualidad que al poco de llegar a Puebla de Lillo decidiera pasearme por La Respina en busca de algún cristal de pirita, a pesar de que el histórico yacimiento se considera destruido por las propias labores de la explotación. Pero tras varias horas de búsqueda infructuosa, encontré este objeto en una torrentera (Fig. 1).

Se trata de un cristal icosaédrico de pirita, es decir, veinte caras triangulares aunque de forma aproximada, ya que no todas están desarrolladas por igual. La existencia de estos icosaedros no me era desconocida. Ya había visto este hábito en piritas de las minas de Águilas (Murcia). Sin embargo, el hallazgo de un cristal aislado, casi perfecto y de buen tamaño, cercano a los cuatro

centímetros de diámetro, es siempre motivo de alegría. Es fácil comprobar con Google que rara vez superan el centímetro de diámetro. La capa de óxido que lo recubre, fruto de la exposición a la intemperie no resta espectacularidad a la pieza.

Así que es este curioso ejemplar de mi colección el que motiva la escritura de la presente nota. Las divagaciones que siguen son fruto de mi doble condición de profesional de las matemáticas y aficionado a la geología, y pretenden ser accesibles al no especialista de ninguna de estas disciplinas.

2. Un poco de cristalografía

Las formas limitadas por planos que presentan con frecuencia los minerales se llaman cristales, independientemente de que presenten transparencia o no. Digamos que la palabra cristal en mineralogía no tiene nada que ver con el vidrio de buena calidad. Los cristales son consecuencia del empaquetamiento regular de las moléculas que componen el mineral, que debe tener una composición química bien definida. Este empaquetamiento ordenado favorece la aparición de caras, y todas ellas conjuntamente delimitan el cristal. No siempre los minerales presentan aspecto cristalino a simple vista. Con frecuencia son amasijos de cristales que no se han desarrollado completamente al molestarse unos a otros durante su crecimiento. En otras ocasiones, las caras no aparecen por falta de espacio, a pesar de estar perfectamente empaquetadas las moléculas.

Cuando se presentan las caras, estas lo hacen siempre siguiendo algún tipo de patrón, que se manifiesta en la constancia de los ángulos correspondientes, paralelismo, simetrías, etc. La observación paciente muestra que ese patrón consiste en la imitación más o menos lograda, y casi siempre parcial, de una forma geométrica definida ideal. Esto es el llamado *hábito*. Por ejemplo, uno de los hábitos de la pirita es el cubo, lo que quiere decir que los cristales tratan de

desarrollarse en forma de cubos, pero en la práctica lo que se observa, son fragmentos de ortoedros o "cajas". Esto se explica por el desarrollo desigual de las caras. Nadie vigila que durante el desarrollo de un cristal todas las zonas reciban igual aporte de moléculas para su crecimiento.

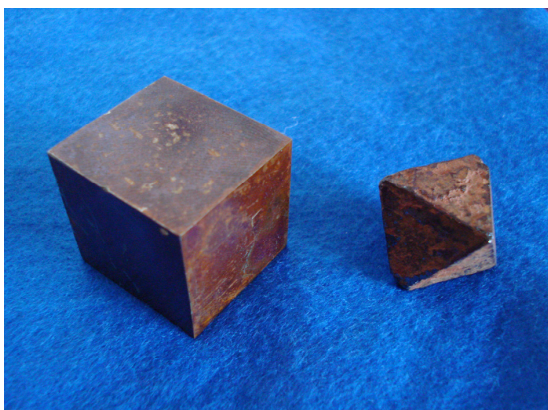


Fig. 2. Formas del sistema cúbico: cubo y octaedro

Los posibles hábitos de los minerales, representados por formas geométricas ideales, se agrupan en los llamados *sistemas cristalinos*, ordenándolos de acuerdo a criterios de *simetría*. Un *plano de simetría* es un plano que si fuera un espejo que atraviesa el cristal, seguiríamos viéndolo completo con el reflejo de éste. Un *eje de simetría* permite rotaciones en las que el cristal se ve exactamente igual un cierto número de veces (2, 3, 4 o 6) a lo largo de una vuelta completa. Por ejemplo, un cubo y un octaedro (ver Fig. 2) tienen exactamente los mismos elementos de simetría: nueve planos de simetría, tres ejes cuaternarios, cuatro ejes ternarios, seis ejes binarios y *centro*. Por eso, el octaedro se engloba dentro del *sistema cúbico*. Hay muchos hábitos agrupados en sistemas y clases dentro de cada sistema, pero las posibilidades son limitadas debido a que estas formas proceden del empaquetamiento regular de moléculas. Por eso las caras no pueden presentar orientaciones arbitrarias, y de hecho, los planos que las delimitan cortan a los ejes del cristal a distancias que guardan entre sí proporciones sencillas. No hablaremos aquí de todas las posibilidades que ofrece la cristalografía. Para ampliar información el lector puede consultar [2].

La pirita cristaliza en el sistema cúbico, pero dentro de una clase que no tiene todos los

elementos de simetría del cubo, sino que algunos de ellos se reducen a la "mitad" (hemiedría). Por ejemplo, los cubos de pirita pudiendo ser bastante perfectos, presentan un estriado longitudinal en las caras que sugiere que el eje de simetría cuaternario es sólo aparente. Es más fácil ver los elementos de simetría de la clase a la que pertenece la pirita en una de sus formas típicas, el *piritoedro*.

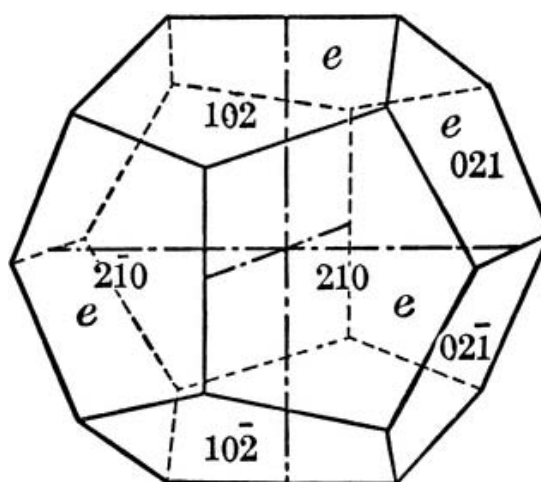


Fig. 3. Piritoedro

El piritoedro es un pentágono-dodecaedro, i.e. tiene doce caras pentagonales. Los pentágonos de las caras tienen cuatro lados iguales entre sí, y otro algo mayor, que en la posición mostrada en la Fig. 3 son las aristas paralelas a los ejes del cristal (dibujados dentro de éste). Si el cristal se inscribiera en un cubo, paralelo a estos ejes, las aristas largas quedarían englobadas en las caras del mismo. Observe que por los puntos de concurrencia de las aristas cortas (uno en cada octante) pasan ejes de simetría ternarios, es decir, este elemento de la simetría del cubo se conserva.

En la Fig. 3 vemos que las caras están designadas con un código de tres cifras (102, 210, 210, . . .), algunas con una rayita arriba. Son los llamados índices de Miller, empleados en cristalografía para indicar de manera precisa la posición e inclinación de las caras respecto a los ejes. Como dijimos más arriba, en los cristales no es posible cualquier plano arbitrariamente tomado como cara. Gracias a esta limitación la información puede codificarse de manera sencilla. Interpretemos los ejes del

crystal como se hace normalmente en Geometría Analítica: eje z vertical, eje y extendido de izquierda a derecha, eje x apuntando aproximadamente al observador. Con esta herramienta geométrica podremos dar un sentido cuantitativo preciso a los índices de Miller. Una cara denotada con 102 viene representada por un plano cuya ecuación es

$$1 \cdot x + 0 \cdot y + 2 \cdot z = C$$

donde C es una constante que depende indistintamente de lo lejos que esté el plano del origen o de la unidad que estemos usando en los ejes. Si suponemos que los ejes del piritoedro de la Fig. 3 encuentran a las aristas largas a distancia 1 del centro (u origen de coordenadas), la ecuación de la cara 102 quedará así

$$x + 2z = 2$$

Así mismo, la cara 210 estará representada por el plano $2x + y = 2$ y la 021 por $2y + z = 2$. El punto donde estas tres caras se encuentran es la única solución del sistema lineal que resulta de reunir las tres ecuaciones. Tras unos cálculos que omitimos, sus coordenadas son $(2/3, 2/3, 2/3)$. Procediendo de esta manera podemos obtener información precisa sobre el piritoedro de la Fig. 3. Por ejemplo, las aristas largas miden 1, mientras que las cortas miden aproximadamente 0,76.

Hablaremos ahora de las formas compuestas. Con frecuencia un determinado hábito cristalino se puede interpretar como una combinación de hábitos más simples. En otras palabras, en un cristal conviven caras de dos o más hábitos como intersección de ellos. No hay que confundir esto con las maclas que son las uniones de cristales. Por ejemplo, en la pirita podemos encontrar combinaciones de cubo con piritoedro (ver Fig. 4), cubo con octaedro, y sobre todo, la que más nos interesa en esta ocasión, la de piritoedro con octaedro, que es la que produce los cristales icosaédricos, como veremos enseguida.



Fig. 4. Combinación de piritoedro y cubo.

La figura resultante de la combinación de piritoedro y octaedro tendrá $12 + 8 = 20$ caras, pero para entender porqué puede esto dar lugar a un icosaedro tendremos que descender hasta los detalles técnicos. La cara del octaedro que se sitúa en el octante principal (el englobado por los semiejes positivos) tiene índice de Miller 111 porque corta los tres ejes exactamente a la misma distancia del origen de coordenadas. Los tres extremos de las aristas largas del piritoedro que caen en este octante tienen coordenadas $(1, 0, 1/2)$, $(1/2, 1, 0)$ y $(0, 1/2, 1)$. El hecho de que sumen $(3/2, 3/2, 3/2)$ revela que por ellas pasa el plano $x + y + z = 3/2$, es decir, la cara 111 del octaedro. Si quitamos la pirámide resultante, además de mutilar tres caras pentagonales que ahora quedarían con sólo cuatro lados, aparecerá un triángulo equilátero como nueva cara (marcado en rojo en la Fig. 5 izquierda), cuyos lados miden aproximadamente 1,22. Si esto mismo se hace en cada uno de los octantes, las caras pentagonales quedarán reducidas al triángulo formado por la arista larga y el vértice opuesto, doce triángulos isósceles de base 1 y lados iguales de longitud 1,22, que acompañan a los ocho triángulos equiláteros proporcionados por las caras del octaedro (Fig. 5 derecha). El hecho de que la razón $1,22/1$ esté más próxima a 1 que $1/0,76$ indica que el icosaedro cristalográfico es más parecido al icosaedro regular que el piritoedro al dodecaedro regular.

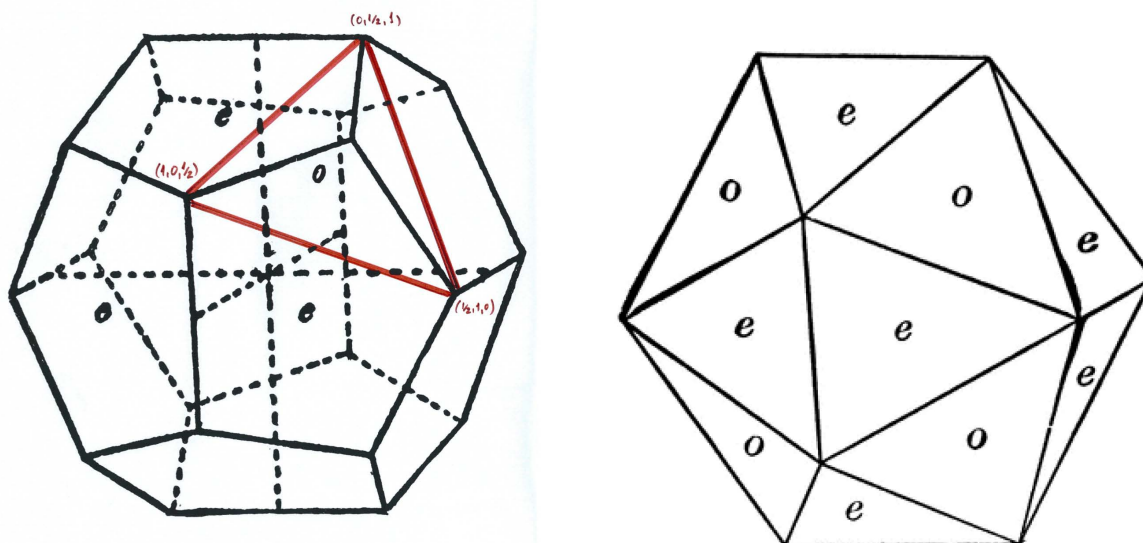


Fig. 5 Obtención del icosaedro a partir del piritoedro.

3. El yacimiento de La Respina

La pirita es un mineral frecuente en todo tipo de terrenos. Para su formación sólo requiere hierro y azufre, dos elementos muy corrientes en la corteza terrestre a todos los niveles, incluso podemos encontrarlos en cantidades apreciables en la materia orgánica. Por ejemplo, en la formación de los *ammonites piritizados* (moldes en pirita de un ammonite) el aporte de azufre procede de la propia descomposición de la materia orgánica. Podemos encontrar cristales (o agrupaciones de los mismos) de pirita en rocas sedimentarias cuyo origen se debe a las reacciones químicas en la transformación de la materia orgánica en ambientes reductores. Es así mismo frecuente la pirita acompañando al carbón, lo que rebaja su calidad. En las rocas ígneas y metamórficas, aparece la pirita como mineral accesorio. Pero, sobre todo, aparece la pirita en los yacimientos de minerales metálicos, filones, masas o impregnaciones, formados en distintas condiciones de temperatura o presión (hidrotermales, pirometasomáticos, etc.). Aquí las masas de pirita pueden alcanzar tamaño brutales, como las que aparecen en la llamada faja pirítica de Huelva. También encontramos mucha pirita masiva en las minas de la Unión (Murcia).



Fig. 6. Rombododecaedro.

Los cristales se desarrollan en la medida que tienen espacio para la formación de caras. En los filones, el mineral comienza a depositarse en la roca encajante y el crecimiento ocurre básicamente en un sólo sentido, permaneciendo los cristales siempre ligados por una de sus partes. Con suerte un cristal puede mostrar muchas de sus caras, pero no todas. No obstante, pueden verse ejemplos muy bellos, como el de la Fig. 6 mostrando hábito rombododecaédrico. Dentro de las piritas cristalizadas en forma de *drusa* (superficies cubiertas de cristales) fueron famosos los grandes piritoedros de Elba y Gavorrano (Italia). Actualmente las drusas más espectaculares proceden de Perú.

Sin embargo, si queremos encontrar cristales individuales es mejor otro tipo de yacimiento, donde la pirita en lugar de presentarse en grandes masas, los cristales puedan crecer en todas direcciones sin entorpecerse los unos a los otros. Esto ocurre en el seno de algunas rocas donde en algún momento de su formación se comportan como fluidos en el que los iones se desplazan sin problemas. En los yesos del Keuper de Caravaca se forman buenos piritoedros, en las margas cretácicas de la Sierra de Ricote se pueden encontrar nódulos compuestos de cubos parcialmente combinados con octaedro, y los cubos de pirita más famosos del mundo son los de Navajún (La Rioja) que se han formado en el seno de unas margas muy compactas que en su día fueron un sedimento de delta fluvial. No sólo las rocas sedimentarias proporcionan buenos cristales individuales, también podemos encontrarlos en algunas metamórficas como pizarras o mármoles.

En general, cada yacimiento tiene tendencia a presentar un determinado hábito. Por ejemplo, en Navajún se observa la predominancia de los cubos sobre los octaedros o los piritoedros. No obstante, estos se pueden encontrar en pequeña proporción en formas combinadas. Es un problema difícil saber que condiciones físico-químicas favorecen un determinado hábito, ya que intervienen muchas variables. Pero es fácil intuir que si un yacimiento presenta piritoedros y octaedros, también puede presentar la forma combinada de ambos, el icosaedro. Esto es lo que ocurre en la mina de talco de La Respina.

La formación llamada *caliza de montaña* es una gran masa de calizas carboníferas que conforma una buena parte de la cordillera Cantábrica, entre

León, Asturias y Cantabria. Estas rocas antiguas han sido mineralizadas durante la orogenia por procesos de metasomatismo [4], que es la sustitución del carbonato cálcico por otros iones llevados por aguas termales profundas que circularon aprovechando fallas y otras fisuras en la roca. Este proceso ha favorecido la aparición de pequeños yacimientos a lo largo de la cordillera, cada uno distinto del siguiente: blenda acaramelada cerca de Fuente Dé, cobres grises en Burón, cinabrio cerca de Tarna y el talco en Puebla de Lillo. Mientras que los yacimientos metálicos son pequeñas masas o impregnaciones en la caliza de montaña, el talco en Puebla de Lillo supuso una sustitución a gran escala en los estratos de caliza por este silicato. Realmente, la geología de este yacimiento es bastante compleja, pero podemos imaginarnos una especie de pantano lleno de caldo de cultivo químico, donde incluso los iones menos abundantes pudieron agregarse para formar buenos cristales, siendo este el caso del cuarzo y la pirita. El mineral más abundante, el talco, se puede encontrar en masas de decenas de metros, en varios colores, blanco, verde manzana, gris, etc. El metasomatismo también ha transformado parte de las calizas en dolomías, que acompañan al talco. Esta impresionante cantera a cielo abierto (Fig. 7) situada a 1500 metros de altitud estuvo en explotación hasta 2010. Antes de la puesta en marcha de la mina de La Respina, el talco se explotaba en unas minas más modestas, ubicadas al norte de Puebla de Lillo donde también se puede encontrar abundante pirita. Actualmente la minería del talco, así como la del cobre, cinc y mercurio, están paradas en esta parte la Cordillera Cantábrica.



Fig. 7. Cantera de La Respina.

Aunque es todavía fácil ver pequeños cristales de pirita en el talco, los mejores estaban en la parte más superficial, hoy día desaparecida. Aquí se encontraron buenos piritoedros y octaedros (como el mencionado al principio) con las caras brillantes de la pirita fresca. Además, debido a lo blando del sustrato debía ser muy agradable el trabajo de extracción cuando el yacimiento estaba en su mejor momento. Desaparecido éste, cabe la posibilidad de que de los restos de la montera de meteorización, en general no explotables, contengan algún cristal. Y así es, pero la mayor parte de ellos se encuentran limonitizados, es decir, la pirita se ha descompuesto y conservando la forma externa del cristal, el interior está compuesto de óxidos e hidróxidos de hierro. No es, por tanto, un auténtico cristal sino un “molde” de un cristal desaparecido. Con suerte, el cristal de pirita se cubre de una capa de óxido negro, como un pavonado, que le protege durante un tiempo de una oxidación profunda posterior. En esta categoría entra el icosaedro de la Fig. 1.

Terminaremos con una pequeña mención a los fósiles en la caliza de montaña. Existen dos versiones de la misma: la rojiza, correspondiente al carbonífero inferior y muy rica en fósiles, cuyo ejemplo más significativo podría ser la basílica del santuario de Covadonga; y la gris, formada en el carbonífero superior y donde se ubican las mineralizaciones de talco y metales citadas anteriormente. La caliza de montaña gris es pobre en fósiles, pero puede dar alguna agradable sorpresa como el cáliz de crinoideo (Fig. 8) que encontramos en la escombrera de una mina de cobre de Burón (León).



Fig. 8. Cáliz de crinoideo

4. Simetría de quinto orden

Los cinco *sólidos platónicos* (denominación poética de los poliedros regulares) son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro. Estos son los únicos poliedros convexos cuyas caras son polígonos regulares iguales y tales que en cada vértice concurre el mismo número de caras. Si marcamos el centro de cada cara de un poliedro regular con un punto y los unimos con líneas obtendremos otro poliedro regular. Por ejemplo del cubo se obtiene el octaedro y viceversa; del dodecaedro se obtiene el icosaedro y viceversa. Estos pares se dice que están en dualidad, o que uno es el *dual* del otro. Tenemos así que el tetraedro es autodual, esto es, la operación de dualidad lo reproduce, aunque en otra posición. En un par de poliedros en dualidad coincide el número de caras de uno con el de vértices del otro, y gracias a la *fórmula de Euler* ($\text{caras} + \text{vértices} = \text{aristas} + 2$) ambos tienen el mismo número de aristas. Por ejemplo, un dodecaedro tiene 20 vértices, que coincide con el número de caras del icosaedro, y ambos tienen 30 aristas. Los poliedros en dualidad también comparten los elementos de simetría, así dodecaedros e icosaedros tienen ejes de rotación de quinto orden.

Hemos hablado anteriormente de la forma dodecaédrica e icosaédrica en la pirita, mostrando que estas formas difieren de las de dodecaedros e icosaedros regulares. El motivo por el que dodecaedros y el icosaedros regulares no aparecen en cristalografía se debe a que la simetría de quinto orden presente en estos poliedros no puede ser producida por el empaquetamiento ordenado y periódico de moléculas de alguna sustancia química. Este resultado, consecuencia del Teorema de Restricción Cristalográfica [1, pag. 88], se suele argumentar a un nivel elemental de la siguiente forma: el plano se puede *teselar* (cubrir completamente sin solapamientos) de manera periódica con triángulos equiláteros, cuadrados y hexágonos regulares, pero no puede ser teselado con pentágonos regulares. Esto produce ejes de simetría de orden 3, 4 y 6 pero no de orden 5. Consecuentemente no encontraremos este tipo de simetría en minerales, y en particular, los dodecaedros e icosaedros de pirita serán meras aproximaciones.

Eso no significa que la simetría de quinto orden esté prohibida en la naturaleza, lo que no podemos es buscarla en los cristales minerales. Por ejemplo, se puede observar una aparente simetría de orden 5 en algunas estructuras vegetales como flores y frutos. También podemos ver bonitos pentágonos estrellados como sección de tallos de alguna especie de crinoideo. Entre los equinodermos, phylum que engloba los crinoideos, tenemos las estrellas de mar y algunas especies de erizos marinos como *cidaris* y *clypeaster* que logran una gran simetría externa de quinto orden. Esta simetría no se reproduce internamente por la disposición de los órganos, al igual que la aparente simetría especular exterior de nuestros cuerpos (unas veces más lograda que otras) no ocurre a nivel de órganos (estómago, hígado, intestino, etc.).

Si queremos ver sorprendentes objetos relacionados con la simetría de quinto orden, dodecaedros, icosaedros y similares tendremos que descender al terreno de lo no visible a simple vista. Las diatomeas y los granos de polen proporcionan bellos ejemplos. Descendiendo algo más en el nivel de lo observable, aparecen icosaedros entre los virus, como la "cabeza" del famoso *bacteriófago T4*, e incluso en la estructura del virus del SIDA. Pero, la estructura molecular de ciertas sustancias encierra una sorpresa. Son los llamados *cuasicristales*. La repetición periódica de moléculas impide la aparición de la simetría de quinto orden, pero es posible que algunas moléculas puedan agruparse de manera compacta siguiendo un patrón no periódico. Esto se consigue con ciertas aleaciones metálicas enfriadas rápidamente para no dar tiempo a la formación del empaquetamiento cristalino, también conocidos como *vidrios metálicos*. La técnica de difracción de rayos X reveló patrones de agrupación mostrando simetría de orden 5, y actualmente se cree que el empaquetamiento atómico en estas sustancias sigue una estructura similar a los *mosaicos de Penrose*, con la salvedad de que estos son en dos dimensiones. Terminaremos estos ejemplos mencionando una familia de moléculas de carbono descubiertas en 1985 que son los *fullerenos*. Entre ellas es muy

llamativa la C_{60} (formada por 60 átomos de carbono) que tiene una curiosa estructura (Fig. 9) consistente en un icosaedro al que se le han truncado los vértices de manera paralela a las caras de su dodecaedro dual. Así cada uno de los 12 vértices produce 12 caras pentagonales y las 20 caras triangulares se convierten en hexágonos regulares si el truncamiento se produce a la distancia adecuada. Los carbonos se ubican en los 60 vértices del nuevo sólido geométrico.

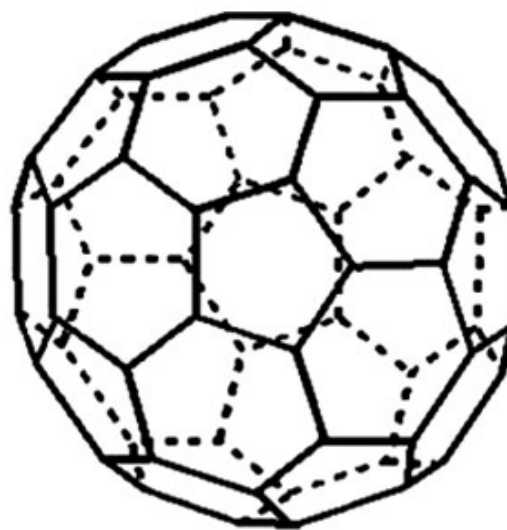


Fig. 9. Fullerenos -balón de fútbol.

Curiosamente, esta estructura geométrica es conocida desde hace mucho tiempo y es bastante popular en el diseño de balones de fútbol.

5. Epílogo

En el verano de 2014, con este artículo casi terminado, mi mujer y yo volvimos a Puebla de Lillo para escapar de la canícula murciana, entre otros objetivos. Un paseo por La Respina me proporcionó otro ejemplar espectacular: una macla de varios icosaedros (Fig. 10) de porte similar al anterior. Esta pieza está algo más estropeada por la meteorización, pero sigue siendo esencialmente pirita.



Fig. 10. Macla de varios icosaedros.

Referencias

- [1] H. S. M. COXETER, *Fundamentos de Geometría*, Limusa (1988).
- [2] C. S. HURLBUT, C. KLEIN, *Manual de Mineralogía de Dana*, Tercera edición, Reverté (1988).
- [3] E. GALÁN, S. MIRETE, *Minerales de España IGME* (1979).
- [4] B. MELÉNDEZ, J. M. FUSTER, *Geología*, Paraninfo (1994).