

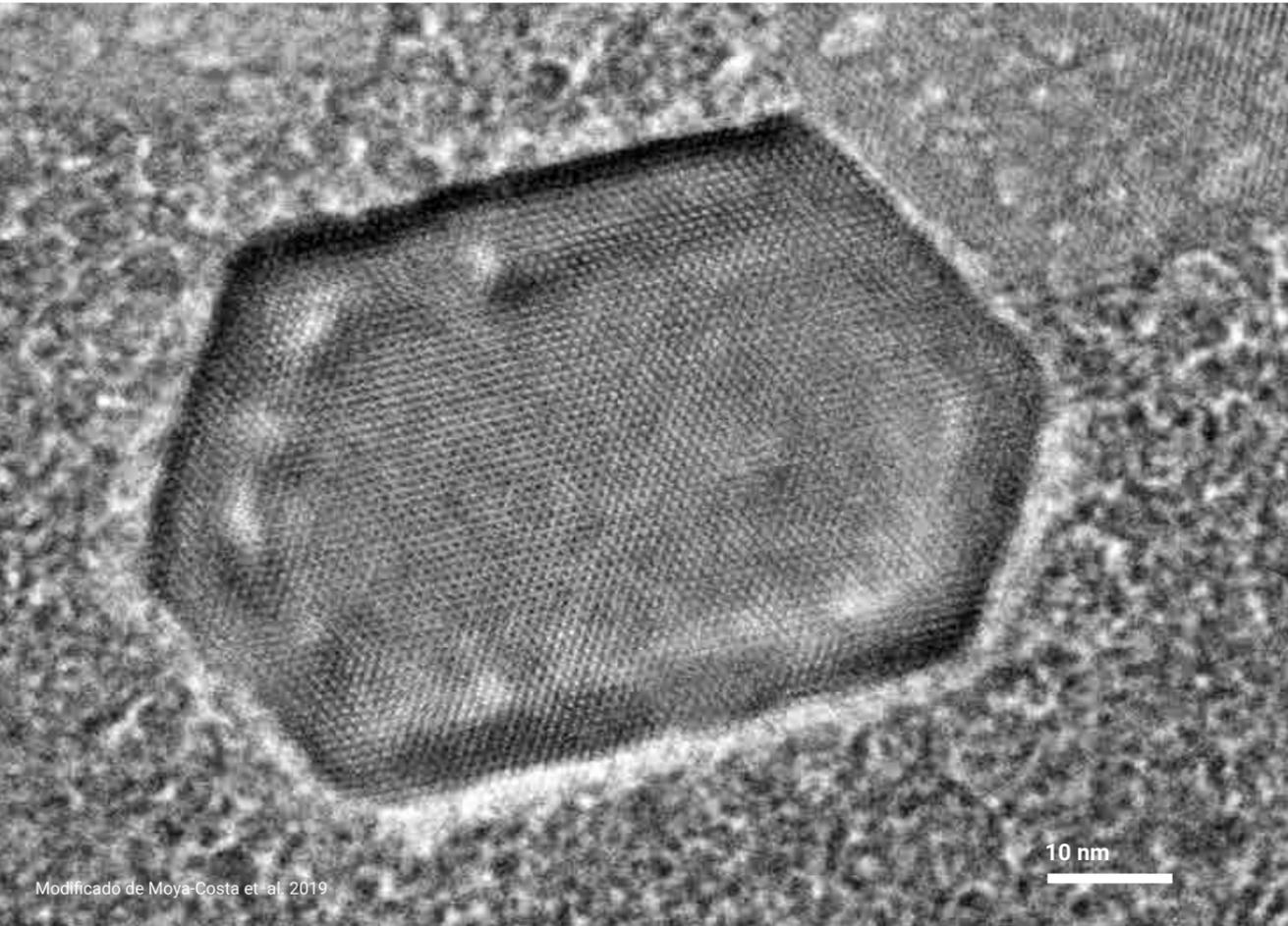
Cristalografía y biominerales

“Los seres vivos estamos
formados por cristales
y también somos capaces
de producirlos”.

Acantilados de Dover.
Rocas calizas formadas
por caparazones
de organismos
planctónicos.

Raquel Moya





Tsester commons.wikimedia.org. Licencia: CC0 1.0

Cristal de apatito en esmalte dental (izquierda) y cálculo renal (arriba).

La Cristalografía es la ciencia que se ocupa del estudio de los cristales, que pueden ser de origen natural, es decir minerales, o sintéticos. Podemos encontrar cristales en diversos contextos, en medicamentos, materiales (no confundir con el vidrio), joyería, en la naturaleza... Están incluso formando parte de nosotros mismos, de los seres vivos, a estos les llamamos biominerales.

A continuación vamos a ver cómo se generan, qué forma adquieren y qué papel juegan en una gran variedad de organismos.

Pero... ¿qué es exactamente un cristal? Un cristal es un sólido cuyos componentes presentan un orden interno que se repite en las tres direcciones del espacio. Estos componentes pueden ser cualquier tipo de elemento o

“Los cálculos renales se producen por la precipitación de sales de calcio, oxalatos y ácido úrico al ser filtrada la sangre en los riñones”.

de molécula y su ordenamiento se produce por distintos procesos y en distintos ambientes. El proceso de cristalización parte, en numerosas ocasiones, de un fluido o una disolución, es decir, con sus componentes desordenados y bajo unas determinadas condiciones de presión, temperatura, concentración y pH. Al modificar estas condiciones, los componentes se pueden empezar a unir entre sí de forma ordenada y pasar al estado sólido, formando el cristal.

Si nos centramos en los cristales naturales, las condiciones y el ambiente de crecimiento dependen de la naturaleza, ya sea geológica o biológica.

Los minerales tienen un origen geológico, es decir, que las condiciones físicas y químicas de formación dependen del ambiente en que se encuentran como,

por ejemplo, el proceso por el que los minerales de las rocas ígneas y volcánicas se forman al ascender desde la cámara magmática hasta la superficie, o los cristales de yeso que cristalizan al evaporarse el agua de lagos en condiciones de aridez.

Los cristales de origen biológico pueden dividirse según su composición en orgánicos e inorgánicos. Entre los cristales orgánicos, encontramos las proteínas o los aminoácidos, que se pueden estudiar gracias a sus propiedades cristalográficas. Hay otros inorgánicos, a los que denominamos biominerales, como los que forman las conchas de los bivalvos o las cáscaras de huevo. Un ejemplo de elementos formados por cristales, tanto orgánicos como inorgánicos de origen biológico, son los cálculos renales. Se producen por la precipitación de sales de calcio, oxalatos y ácido úrico al ser filtrada la sangre en los riñones (Gràcia-Garcia et al., 2011).

Los biominerales, al igual que los minerales, se pueden clasificar por su composición según su estructura y composición química (elementos nativos, sulfuros y sulfosales, óxidos e hidróxidos, haluros, carbonatos, nitratos y boratos, sulfatos, cromatos, wolframatos y molibdatos, fosfatos, arseniatos y vanadatos, y silicatos), aunque los que nos resultan más familiares sean solo unos pocos (Skinner, 2005). Estos biominerales más comunes son los carbonatos, especialmente la calcita y el aragonito (CaCO_3), y los fosfatos, fundamentalmente el apatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$]. Otros son óxidos como la magnetita (Fe_3O_4), goethita [$\text{FeO}(\text{OH})$], hematites (Fe_2O_3) o disulfuros como la pirita (FeS_2)... A continuación se van a describir algunos ejemplos de biominerales producidos por diversos grupos de seres vivos para los cuales representan distintas ventajas adaptativas.

La formación de biominerales por parte de seres vivos puede ser por precipitación mineral bioinducida o precipitación mineral biocontrolada (Päßler et al., 2018).

La precipitación mineral bioinducida consiste en la formación de biominerales como consecuencia de la actividad –generalmente metabólica– de algún organismo. Al no ser el propio organismo el que regula la cristalización, los cristales que se forman son heterogéneos, tienen distintas formas y tamaños y se distribuyen desordenadamente.

Un ejemplo es el de los estromatolitos, que son estructuras de distintas formas (en domo, en láminas, columnas...) que se encuentran en la tierra desde hace

3500 Ma y que aún hoy se siguen formando en zonas someras de lagos y mares. Están constituidas por cristales de calcita y por sedimentos que quedan atrapados entre ellos. Los responsables de su formación son cianobacterias y algas que al realizar la fotosíntesis atrapan el CO_2 de la atmósfera y lo hacen precipitar. Como no crecen de forma continua, crean laminaciones de cristales y partículas (Perri y Spadafora, 2011).

Otro ejemplo de precipitación mineral bioinducida es el de las formaciones de hierro bandeado. Están formadas principalmente por bandas alternas de sílex y de minerales de óxidos de hierro, fundamentalmente magnetita y hematites. Estas formaciones representan los primeros indicios de oxígeno libre en la Tierra, que sería liberado por bacterias fotosintéticas desde hace 3800 Ma. Al haber oxígeno libre en grandes cantidades por primera vez, se inició la oxidación del hierro y el depósito de cristales de magnetita y hematites que dieron lugar a capas de minerales (Benedetto 2010).

“Los estromatolitos son estructuras que se encuentran en la tierra desde hace 3500Ma y que aún hoy se siguen formando en zonas someras de lagos y mares”.



A.- Calcita.

B.- Aragonito.

C.- Estromatolitos.

D.- Pirita.



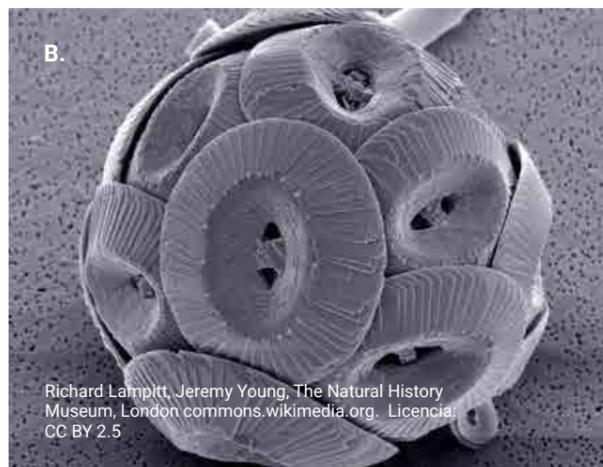
James St. John flicker.com. Licencia: CC BY 2.0

A.- Formación de hierro bandeado.

B.- Cocolitofórido.

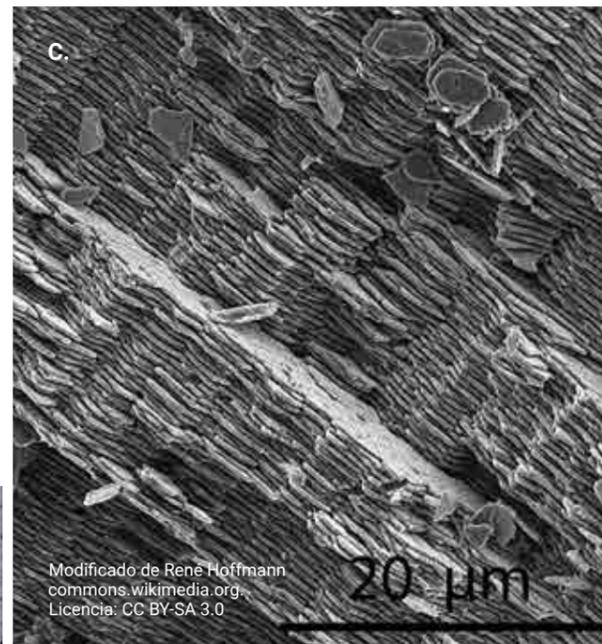
C.- Estructura del nácar de un ammonite formado por cristales de calcita.

D.- Bacteria magnetotáctica.



B.

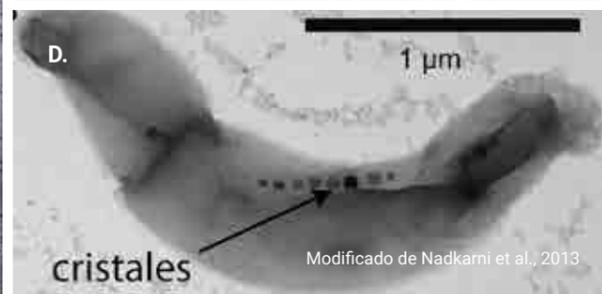
Richard Lampitt, Jeremy Young, The Natural History Museum, London commons.wikimedia.org. Licencia: CC BY 2.5



C.

Modificado de René Hoffmann commons.wikimedia.org. Licencia: CC BY-SA 3.0

20 μm



D.

1 μm

cristales

Modificado de Nadkarni et al., 2013

“Otro ejemplo de precipitación mineral bioinducida es el de las formaciones de hierro bandeado”.

Sección de concha de *Nautilus*.



Por otro lado, la precipitación mineral biocontrolada implica que el organismo tiene control total sobre la cristalización. Los cristales forman parte de sí mismo, funcionando en algunos casos como tejidos propios. Estos biominerales forman parte de cualquier ser vivo, como por ejemplo de algunos organismos unicelulares.

Buena parte del plancton que se encuentra en el océano está formado por organismos unicelulares como son los foraminíferos (protistas) o los cocolitofóridos (algas). Ambos están protegidos y soportados por diminutos y complejos caparazones de calcita y aragonito, milimétricos en el caso de los foraminíferos y nanométricos en el de los cocolitofóridos. En el caso de los cocolitofóridos, los cristales de calcita constituyen plaquitas que se ordenan de una forma determinada según la especie. Cuando estos organismos mueren, sus caparazones caen al fondo y allí se acumulan llegando a formar rocas calizas (Molina 2004).



commons.wikimedia.org Licencia: CC BY SA 3.0.

Los biominerales en organismos suelen tener una función de soporte o de defensa como en el caso anterior, pero no es la única, como ocurre con las bacterias magnetotácticas. Estas bacterias segregan una serie de cristales individuales de biominerales con propiedades magnéticas, como la magnetita. Estos cristales se alinean en su interior formando una cadena que se comporta como un imán y que utilizan como brújula para orientarse según el campo magnético terrestre y desplazarse en función de este (Faivre y Schüller, 2008).

Algunas plantas también son capaces de formar biominerales llamados fitolitos. Entre sus posibles funciones están la de dar más soporte a la planta, servir como almacenes de algunos elementos o como defensa frente a los animales herbívoros. Estos fitolitos suelen estar compuestos por sílice o por carbonatos (Zurro 2006) y, en estudios paleontológicos, son útiles para determinar especies de plantas ya que es fácil que se conserven, pero también para estudiar dietas de animales herbívoros a partir de las marcas que dejan en sus dientes. Los animales que se alimentan de ellas están adaptados al fuerte desgaste que producen en sus dientes, algunos tienen un esmalte dental muy grueso o muy duro y, otros, coronas altas o incluso de crecimiento continuo que les permiten alimentarse.

Pasando a los biominerales del reino animal, entre los invertebrados hay una gran variedad de estructuras biominerales que se utilizan como soporte esquelético y protección.

Un tipo de estructura de soporte y protección es el esqueleto de los corales coloniales que está formado por calcita y cada individuo vive en una cavidad. Cada especie forma un esqueleto diferente y con unas estructuras determinadas. Por otra parte, las conchas y los caparazones también están formados por biominerales.

Los moluscos suelen tener conchas formadas por cristales de calcita o de aragonito. Tienen distintas formas de ordenarse y, normalmente, están rodeados o unidos

“Este gasterópodo incorpora pirita en su estructura, disulfuro de hierro, lo que le proporciona gran resistencia”.

Chrysomallon squamiferum.
Gasterópodo con pirita en el caparazón.



Modificado de:
Nakamura et al., 2012
Licencia: CC Attribution 2.5
Generic license.

por alguna sustancia orgánica. Por ejemplo, el nácar de algunos nautiloideos, bivalvos y gasterópodos está compuesto por pequeños cristales hexagonales planares de aragonito. Están apilados y entrelazados con la misma orientación, lo que provoca que al refractarse la luz se produzca su característico brillo iridiscente (Tan et al., 2004). Este apilamiento de placas cristalinicas ayuda a disipar los esfuerzos mecánicos en la concha, por lo que la hace muy resistente frente a depredadores que puedan intentar partirla o perforarla.

Los artrópodos también tienen caparazón. La mayor parte tiene una composición fundamentalmente orgánica, pero en algunos de ellos, como los extintos trilobites, es calcítica. Se ha observado que a estos animales les servían para ver, además de para protegerse, ya que los cristales de calcita que cubrían sus ojos funcionaban como pequeñas lentes (Towe 1973). Estas composiciones carbonatadas son las más habituales en los moluscos y artrópodos, pero hay especies que desarrollan estrategias más específicas.

Hay una especie de caracol marino que vive en las profundidades oceánicas soportando una enorme presión hidrostática. La razón por la que no se aplasta es, en parte, la composición de su caparazón. Este gasterópodo incorpora pirita en su estructura, disulfuro de hierro, lo que le proporciona gran resistencia (Nakamura et al., 2012). Además forma escamas de este mineral alrededor de la parte carnosa que le sirven como protección.

Los vertebrados producen también calcita y aragonito como biomineral. No como parte de su cuerpo, sino como protección para los embriones. Lo hacen como cáscaras de huevo. Su composición y su forma de organizarse permiten que la cáscara sea permeable a la par que protege al embrión. La composición y la estructura son distintas en cada grupo animal de forma que, con un pequeño fragmento, se puede determinar si procede de lagarto, tortuga, dinosaurio o ave (Hincke et al., 2012).

Nosotros, los vertebrados, tenemos biominerales que forman parte del cuerpo. Un tejido que nos caracteriza es el óseo, compuesto principalmente por apatito, además de por agua y colágeno (Pasteris et al., 2008). Al formar los huesos se constituye un soporte imprescindible para nuestro cuerpo. Es un tejido vivo que crece y se regenera cuando se daña, está formado por distintas células óseas y está continuamente irrigado por fluidos que lo mantienen vivo.

REFERENCIAS

- Benedetto J. L. (2010). «Capítulo 2. El tiempo profundo: El Eón Arcaico». El continente de Gondwana a través del tiempo. Una introducción a la Geología Histórica. Academia Nacional de Ciencias, 373 p.
- Gràcia-García S., Millán-Rodríguez F., Rousaud-Barón F., Montañés-Bermúdez R., Angerri-Feu O., Sánchez-Martin F., Villavicencio-Mavrich H. y Oliver-Samper A. (2011). Por qué y cómo hemos de analizar los cálculos urinarios. Actas Urológicas Españolas, 35: 354.
- Faivre D, Schuler D (2008) Magnetotactic Bacteria and Magnetosomes. Chemical Reviews 108: 4875.
- Hincke M., T., Nys Y., Gautron J., Mann K., Rodríguez-Navarro y McKee M.D. (2012). The eggshell: structure, composition and mineralization. Frontiers in Bioscience 17: 1266.
- Molina E. (editor) (2004) Micropaleontología. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 704 p.
- Moreno-Azanza M., Bauluz B., Canudo J.I., Gasca J.M. y Torcida Fernández-Baldor F. (2016). Combined Use of Electron and Light Microscopy Techniques Reveals False Secondary Shell Units in Megalolithidae Eggshells. PLoS ONE 11(5): e0153026.
- Moya-Costa R., Cuenca-Bescós G., Bauluz B. y Rofes J. (2018) Structure and composition of tooth enamel in quaternary soricines. Quaternary International, 481: 52.
- Moya-Costa R., Bauluz B. y Cuenca-Bescós G. (2019). Structure and composition of the incisor enamel of extant and fossil mammals with tooth pigmentation. Lethaia, en prensa.
- Nadkarni R., Barkley S., Fradin C. (2013). A Comparison of Methods to Measure the Magnetic Moment of Magnetotactic Bacteria through Analysis of Their Trajectories in External Magnetic Fields. PLoS ONE 8(12): e82064.
- Nakamura K., Watanabe H., Miyazaki J., Takai K., Kawagucci S., Noguchi T., Nemoto S., Watsuji T., Matsuzaki T., Shibuya T., Okamura K., Mochizuki M., Orihashi Y., Ura T., Asada A., Marie D., Koonjul



Huevo de gallina (arriba) y mandíbula de musaraña de dientes rojos (abajo).



Fotografía cedida por la autora.

Los dientes también son de apatito. Un diente está compuesto por dentina, cemento y esmalte. Los dos primeros tienen características muy similares a las del hueso, sobre todo la dentina que está vascularizada, pero el esmalte es muy diferente. Aquí su función es la de procesar el alimento. Es muy compacto y prácticamente inorgánico. Para ello forma unos entramados de haces de cristales de apatito que son diferentes según las especies. En los mamíferos es muy complejo, tiene capas diferentes con distintas estructuras que se adaptan al tipo de diente y a cada una de sus partes.

Aun así, algunos mamíferos han desarrollado adaptaciones en los dientes que implican la formación de biominerales distintos. Dos ejemplos son los roedores y los sorícidos o musarañas.

Si observamos los incisivos de una rata, un hámster o un castor, podremos apreciar que tienen un color entre anaranjado y marrón oscuro. Esto es debido a que su esmalte dental contiene cristales de hidróxidos de hierro que, al parecer, le aportan resistencia mecánica, algo muy importante al utilizarlos continuamente para roer.

Menos conocidas son las musarañas de dientes rojos. Mientras que los roedores solo tienen pigmentados los incisivos, estas tienen las puntas de todos los dientes de color normalmente rojo aunque en algunas especies es naranja y, en otras, prácticamente negro. El color también se debe a la incorporación de biominerales de hierro que forman cristales nanométricos y se localizan entre los cristales de apatito (Moya-Costa et al., 2019).

Después de ver diversos ejemplos de biominerales, y las formas que adquieren en los seres vivos, podríamos concluir que los seres vivos estamos formados por cristales y que somos capaces de producirlos; que los biominerales tienen distintas funciones como de protección, sostén o herramientas para procesar el alimento; y que los más comunes son carbonatos y fosfatos, aunque existen numerosos tipos, casi tantos como minerales.

Raquel Moya
Aragosaurus-IUCA
Dpto. de Ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza.

M., Singh M., Beedessee G., Bhikajee M., Tamaki K. y Schnur J. M. (2012). "Discovery of New Hydrothermal Activity and Chemosynthetic Fauna on the Central Indian Ridge at 18–20S". *PLoS ONE* 7(3): e32965.

- Päßler J.P., Jarochovska E., Bestmann M. y Munnecke A. (2018). Distinguishing between biologically induced and biologically controlled mineralization in fossil organisms using electron backscatter diffraction (EBSD). En: *Abstract Book. 1st Palaeontological Virtual Congress*, p. 120.
- Pasteris J. D., Wopenka B. y Valsami-Jones E. (2008). Bone and Tooth Mineralization: Why Apatite?. *Elements*, 4: 97.
- Perri E. y Spadafora A. (2011). Evidence of microbial biomineralization in modern and ancient stromatolites. En: *Tewari, V., Seckbach (Eds). Stromatolites: Interaction of Microbes with Sediments*, Springer.
- Skinner H.C.W. (2005). Biominerals. *Mineralogical Magazine*, 69: 621.
- Tan, T.L., Wong, D. y Lee, P. (2004) Iridescence of a Shell of mollusc *Haliotis Glabra*. *Optical Society of America*, 12 (20).
- Towe K. M. (1973). Trilobite Eyes: Calcified Lenses in vivo. *Science*, 179, 1007.
- Zurro D. (2006). El análisis de fitolitos y su papel en el consumo de recursos vegetales en la prehistoria: bases para una propuesta metodológica materialista. *Trabajos de prehistoria* 63: 35.