

LOS MINERALES 4

Los elementos nativos son aquellos minerales integrados por elementos que no están unidos químicamente a otros elementos. Este grupo incluye minerales metales nativos, semi-metales y no metales, y varias aleaciones sólidas y soluciones. Los metales se mantienen unidos por enlaces metálicos, lo que les confiere propiedades físicas distintivas, como su lustre metálico brillante, ductilidad y maleabilidad, y conductividad eléctrica. Los elementos nativos se subdividen en grupos por su estructura o atributos químicos.

El grupo del oro, con una estructura cercana al empaquetamiento cúbico, incluye metales como el oro, la plata y el cobre. El grupo del platino es similar en estructura al grupo de oro. El grupo del hierro-níquel se caracteriza por tener varias especies de aleaciones de hierro-níquel. Dos ejemplos son la kamacita y la taenita, que se encuentran en meteoritos de hierro; estas especies difieren en la cantidad de Ni en la aleación; la kamacita tiene menos de 5–7% de níquel y es una variedad de hierro nativo, mientras que el contenido de níquel de la taenita es del 7–37%. Los minerales del grupo del arsénico se componen de semi-metales, que tienen solamente algunos metálicos; por ejemplo, carecen de la maleabilidad de los metales. El carbono nativo aparece en dos alótropos, el grafito y el diamante; el último se forma a muy alta presiones en el manto, lo que le confiere una estructura mucho más fuerte que el grafito

La clase de los minerales sulfuros y sulfosales —denominación engañosa pues los sulfuros solo son una parte del grupo— corresponde a la clase 2 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: minerales sulfuros —con el ion S^{2-} —, los seleniuros, telurios, arseniuros, antimoniuros, bismutiuros, sulfoarseniuros y sulfosales. Los sulfuros se clasifican por la relación del metal o del semimetal con el azufre, M:S igual a 2:1, o 1:1.2. A pesar de que los sulfuros son mucho menos abundantes que los silicatos, su química y sus estructuras son muy variadas, lo que explica porque el número de minerales de sulfuro es muy alto en relación a su abundancia.

Se agrupan entre los sulfuros los minerales compuestos de uno o más metales o semimetales con un azufre, que tienen una fórmula de tipo general de M_mS_p , donde M es un metal (Ag, Cu, Pb, Zn, Fe, Ni, Hg, As, Sb, Mo, Hg, Tl, V). Los arseniuros, los antimoniuros, los telurios... se clasifican entre los «sulfuros» *sensu lato* debido a su similitud estructural con los sulfuros.

Los sulfuros minerales se caracterizan por la unión covalente, la opacidad y el brillo metálico; se estudian con el microscopio de reflexión. Los sulfuros tienden a ser blandos y frágiles, con un alto peso específico y la mayoría son semiconductores. Muchos sulfuros en polvo, como la pirita, tienen un olor sulfuroso cuando son pulverizados. Los sulfuros son susceptibles a la intemperie, y muchos se disuelven fácilmente en agua; estos minerales disueltos se pueden después volver a redepositar, lo que crea yacimientos de menas secundarias.

Muchos minerales de sulfuro son importantes económicamente como minerales metálicos; son ejemplos la esfalerita (ZnS), una mena de zinc; la galena (PbS), una mena de plomo; el cinabrio (HgS), una mena de mercurio; y la molibdenita (MoS_2), una mena de molibdeno. La pirita (FeS_2) es

el sulfuro que aparece más y se puede encontrar en la mayoría de entornos geológicos. No es, sin embargo, una mena de hierro, pero puede ser oxidada para producir ácido sulfúrico. Relacionados con los sulfuros están las raras sulfosales, en las que un elemento metálico está unido al azufre y a un semimetal, como antimonio, arsénico o bismuto. Al igual que los sulfuros, las sulfosales son típicamente minerales blandos, pesados y frágiles.

La clase de los minerales óxidos e hidróxidos corresponde a la clase 4 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: óxidos, hidróxidos, vanadatos, arsenitos, antimonitos, bismutitos, sulfitos, selenitos, teluritos y yodatos.

Los minerales óxidos se dividen en tres categorías: óxidos simples, hidróxidos y óxidos múltiples. Los óxidos simples se caracterizan por O^{2-} como anión principal y enlace principalmente iónico. Se pueden subdividir además por la relación del oxígeno a los cationes. El grupo de la periclasa consta de minerales con una relación 1:1. Óxidos con una relación 2:1 incluyen la cuprita (Cu_2O) y el hielo de agua. minerales del grupo del corindón tienen una proporción de 2:3, e incluye minerales como el corindón (Al_2O_3) y la hematita (Fe_2O_3). Los minerales del grupo del rutilo tienen una proporción de 1:2; la especie del mismo nombre, rutilo (TiO_2) es el principal mena del titanio; Otros ejemplos incluyen la casiterita (SnO_2 , mena de estaño), y pirolusita (MnO_2 , mena de manganeso).

En hidróxidos, el anión dominante es el ion hidroxilo, OH^- . Las bauxitas son la mena principal del aluminio, y son una mezcla heterogénea de minerales de hidróxido de diáspora, gibbsita, y bohmita; se forman en áreas con una alta tasa de meteorización química (principalmente condiciones tropicales).² :663–664 Por último, varios óxidos son compuestos de dos metales con oxígeno. Un grupo importante dentro de esta clase son las espinelas, con una fórmula general de $X_2Y_3 \cdot 2O_4$. Ejemplos de especies incluyen la propia espinela ($MgAl_2O_4$), la cromita ($FeCr_2O_4$) y la magnetita (Fe_3O_4). Esta última es fácilmente distinguible por su fuerte magnetismo, que se produce ya que tiene hierro en dos estados de oxidación ($Fe^{2+}Fe^{3+} \cdot 2O_4$), lo que hace que sea un óxido múltiple en lugar de un óxido simple.

La clase de los minerales haluros corresponde a la clase 3 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: haluros o halogenuros simples o complejos, con H_2O o sin ella, así como derivados oxihaluros, hidroxihaluros y haluros con doble enlace.

Los minerales haluros son compuestos en los que un halógeno (flúor, cloro, yodo y bromo) es el anión principal. Estos minerales tienden a ser blandos, débiles, quebradizos y solubles en agua. Los ejemplos más comunes de haluros son la halita ($NaCl$, sal de mesa), la silvita (KCl) y la fluorita (CaF_2). La halita y la silvita se forman comúnmente como evaporitas, y pueden ser minerales dominantes en las rocas sedimentarias químicas. La criolita, Na_3AlF_6 , es un mineral clave en la extracción de aluminio a partir de la bauxita; Sin embargo, dado que la única ocurrencia significativa está en Ivittuut, Groenlandia, en una pegmatita granítica, ya agotada, la criolita sintética se puede hacer a partir de la fluorita.

La clase de los minerales carbonatos y nitratos corresponde a la clase 5 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen carbonatos, uranilo-carbonatos y nitratos.

Los minerales carbonatos son aquellos en los que el grupo aniónico principal es un carbonato, $[\text{CO}_3]^{2-}$. Los carbonatos tienden a ser frágiles, muchos tienen exfoliación romboédrica, y todos reaccionan con ácido. Debido a la última característica, los geólogos de campo a menudo llevan ácido clorhídrico diluido para distinguir los carbonatos de los no-carbonatos. La reacción del ácido con los carbonatos, que se encuentra más comúnmente como los polimorfos calcita y aragonita (CaCO_3), se refiere a la disolución y precipitación del mineral, que es un elemento clave en la formación de las cuevas de caliza —con elementos como estalactitas y estalagmitas— y los accidentes geográficos kársticos. Los carbonatos se forman con mayor frecuencia en forma de sedimentos biogénicos o químicos en ambientes marinos. El grupo carbonato es estructuralmente un triángulo, donde un catión central de C^{4+} está rodeado por tres aniones O^{2-} ; diferentes grupos de minerales se forman a partir de diferentes disposiciones de estos triángulos.

El mineral de carbonato más común es la calcita, que es el componente principal de la sedimentaria caliza y del mármol metamórfico. La calcita, CaCO_3 , puede tener una impureza de alto contenido en magnesio; en condiciones de alto magnesio, se formará en su lugar su polimorfo, la aragonita; la geoquímica marina se puede describir, en este sentido, como un mar de aragonita o mar de calcita, dependiendo de qué mineral se forme preferentemente. La dolomita es un carbonato doble, de fórmula $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. La dolomitización secundaria de la caliza es común, en la que la calcita o la aragonita se convierten en dolomita; esta reacción aumenta el espacio de los poros (el volumen de la celda unidad de la dolomita es el 88% del de la calcita), lo que puede crear un yacimiento de petróleo y gas. Estas dos especies minerales son miembros de los grupos de minerales del mismo nombre: el grupo de la calcita incluye carbonatos con fórmula general XCO_3 y el de la dolomita la de $\text{XY}(\text{CO}_3)_2$.

La clase de los minerales sulfatos corresponde a la clase 7 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: sulfatos, selenatos, teluratos, cromatos, molibdatos y wolframatos.

Los minerales sulfatos tienen todos el anión sulfato, $[\text{SO}_4]^{2-}$. Tienden a ser de transparentes a translúcidos, blandos, y muchos son frágiles. Los minerales de sulfato se forman comúnmente como evaporitas, donde se precipitan de la evaporación de las aguas salinas; alternativamente, los sulfatos también se pueden encontrar en los sistemas de vetas hidrotermales asociados con sulfuros, o como productos de oxidación de sulfuros. Los sulfatos se pueden subdividir en minerales anhidros e hidratados. El sulfato hidratado más común, con mucho, es el yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Se forma como un evaporita, y se asocia con otros evaporitas como la calcita y la halita; si incorpora granos de arena cuando cristaliza, el yeso puede formar rosas del desierto. El yeso tiene muy baja conductividad térmica y mantiene una temperatura baja cuando se calienta a medida que pierde el calor por deshidratación; como tal, el yeso se utiliza como aislante en materiales de construcción. El equivalente anhidro del yeso es la anhidrita; se puede formar directamente de agua de mar en condiciones muy áridas. El grupo de la barita tiene la fórmula general XSO_4 , donde X es un catión grande 12-enlazado. Son ejemplos la barita (BaSO_4), la celestina (SrSO_4), y la anglesita (PbSO_4); la anhidrita no es parte del grupo de la barita, ya que el más pequeño Ca^{2+} sólo tiene enlace ocho veces.

La clase de los minerales fosfatos corresponde a la clase 8 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen fosfatos, arseniatos y vanadatos. Son 51 familias agrupadas en 7 divisiones, un grupo grande y diverso, que sin embargo, tiene solo unas pocas especies relativamente comunes.

Los minerales fosfatos se caracterizan por el anión fosfato coordinado tetraédricamente $[\text{PO}_4]^{3-}$, aunque la estructura se puede generalizar siendo el fósforo sustituido por antimonio ($[\text{SbO}_4]^{3-}$), arsénico ($[\text{AsO}_4]^{3-}$), o vanadio ($[\text{VO}_4]^{3-}$). Los aniones de cloro (Cl^-), flúor (F^-) e hidróxido (OH^-) también encajan en la estructura cristalina.

El fosfato más común es el grupo de la apatita, un nombre genérico que designa fosfatos hexagonales de composición bastante variable, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$. Las especies más comunes del grupo son la fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), la clorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) y la hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$). Los minerales de este grupo son los principales constituyentes cristalinos de los dientes y de los huesos de los vertebrados.

Otro grupo relativamente abundante es el grupo de la monacita, que tiene una estructura general de ATO_4 , donde T es el fósforo o arsénico, y A es, a menudo, un elemento de las tierras raras. La monacita es importante en dos sentidos: en primer lugar, como *sumidero* de tierras raras, puede concentrar la cantidad suficiente de estos elementos para convertirse en una mena; en segundo lugar, los elementos del grupo de la monacita pueden incorporar cantidades relativamente grandes de uranio y torio, que pueden ser utilizadas para datar una roca basándose en la desintegración del U y Th en plomo.

La clase de los minerales compuestos orgánicos corresponde a la clase 10 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen sales y ácidos orgánicos que aparezcan en minas y los hidrocarburos. Son 7 familias agrupadas en 3 divisiones, un grupo escaso.

Estos raros compuestos contienen carbono orgánico, pero se pueden formar también mediante un proceso geológico. Por ejemplo, la whewellitita, $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ es un oxalato que se puede depositar en las venas de menas hidrotermales. Mientras el oxalato de calcio hidratado se puede encontrar en las vetas de carbón y en otros depósitos sedimentarios que comprenden materia orgánica, la ocurrencia hidrotérmica no se considera que está relacionada con la actividad biológica.

Los silicatos son sales que combinan la sílice SiO_2 con otros óxidos metálicos. La base de la unidad de un mineral de silicato es el tetraedro $[\text{SiO}_4]^{4-}$: en la mayoría de casos, el silicio se encuentra coordinado cuatro veces, o en coordinación tetraédrica, con el oxígeno; en situaciones de muy altas presiones, el silicio estará coordinado seis veces, o en coordinación octaédrica, como en la estructura de perovskita o en el cuarzo polimorfo stishovita (SiO_2). (En el último caso, el mineral ya no tiene una estructura de silicato, si no de rutilo (TiO_2) y su grupo asociado, que son óxidos simples.) Estos tetraedros de sílice son luego polimerizados en algún grado para crear otras estructuras, como cadenas unidimensionales, láminas bidimensionales o armazones tridimensionales. El mineral de un silicato básico sin polimerización de tetraedros requiere de otros elementos que equilibren la base cargada 4^- . En las otras estructuras de silicato son varias las combinaciones de elementos que equilibran esa carga negativa. Es común que el Si^{4+} sea sustituido por Al^{3+} debido a la similitud en radio iónico y en carga; en otros casos, los tetraedros

de $[\text{AlO}_4]^{5-}$ forman las mismas estructuras que lo hacían los tetraedros no sustituidos, pero los requisitos del equilibrio de cargas son diferentes.

El grado de polimerización puede ser descrito tanto por la estructura formada como por el número de vértices tetraédricos (u oxígenos de coordinación) compartidos (por el aluminio y el silicio en sitios tetraédricos): 2 :105 los ortosilicatos (o nesosilicatos) no tienen ninguna vinculación de poliedros, así que los tetraedros no comparten vértices; los disilicatos (o sorosilicatos) tienen dos tetraedros que comparten un átomo de oxígeno; los inosilicatos son silicatos en cadena: los de cadena simple tienen dos vértices compartidos y los de cadena doble dos o tres; los filosilicatos forman una estructura de lámina que requiere tres oxígenos compartidos (en el caso de silicatos de cadena doble, algunos tetraedros deben compartir dos vértices en lugar de tres como harían si resultase una estructura de lámina); los silicatos *en armazón* o tectosilicatos, tienen tetraedros que comparten los cuatro vértices; los silicatos de anillo, o ciclosilicatos, sólo necesitan tetraedros que compartan dos vértices para formar la estructura cíclica.

Se describen a continuación en orden decreciente de polimerización, las subclases de silicato.

Los tectosilicatos son muy abundantes, constituyendo aproximadamente el 64% de los minerales de la corteza terrestre.³⁸ También conocidos como silicatos de *estructura en armazón*, tienen el grado de polimerización más alto y tienden a ser químicamente estables como resultado de la fuerza de los enlaces covalentes. Son ejemplos el cuarzo, los feldespatos, los feldespatoides, y las zeolitas.

Tienen una estructura basada en un entramado tridimensional de tetraedros (ZO 4) con los cuatro vértices ocupados por el ion O^{2-} compartidos, lo que implica relaciones Z:O=1:2.³⁸ La Z es silicio (Si) (la fórmula resultante es SiO_2 , sílice), pero parte del Si^{4+} puede ser reemplazado por Al^{3+} (en raras ocasiones por Fe^{3+} , Ti^{3+} y B^{3+}).³⁹ Al suceder esto, las cargas negativas resultantes se compensan con la entrada de cationes grandes, como el K^+ , el Na^+ o el Ca^{2+} (y con menos frecuencia Ba^{2+} , Sr^{2+} y Cs^+). También pueden tener aniones complementarios F^- , Cl^- , S^{2-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} .

El cuarzo (SiO_2) es la especie mineral más abundante, formando el 12% de la corteza terrestre. Se caracteriza por su alta resistividad química y física. Tiene varios polimorfos, incluyendo la tridimita y la cristobalita a altas temperaturas, la coesita a alta presión y la stishovita a ultra-alta presión. Este último mineral sólo puede formarse en la Tierra por impacto de meteoritos, y su estructura está tan compuesta que había cambiado de una estructura de silicato a la de rutilo (TiO_2). El polimorfo de sílice que es más estable en la superficie de la Tierra es el α -cuarzo. Su homólogo, el cuarzo- β , está presente sólo a altas temperaturas y presiones (a 1 bar, cambia a cuarzo- α por debajo de 573°C). Estos dos polimorfos difieren en un *retorcimiento* de los enlaces; este cambio en la estructura da al cuarzo- β mayor simetría que al cuarzo- α , y por lo tanto también se les llama cuarzo alto (β) y cuarzo bajo (α).

