

Introducción

La historia de la mineralogía es parte de la historia de las ideas y del conocimiento humano organizado que denominamos ciencia, una parte muy significativa de las ciencias de la Naturaleza.

El reino mineral comprendía todo el mundo inanimado, es decir: minerales, rocas, suelos y aguas de la tierra. Dado que los colores brillantes, la regularidad de forma, transferencia y algunas propiedades físicas visibles han llamado siempre la atención, no es de extrañar que los minerales, con su gran variedad de colores y formas hayan sido uno de los primeros objetos estudiados por el hombre primitivo.

Aunque el desarrollo de la mineralogía es relativamente reciente (mucho más que el de la astronomía), los minerales, cristales, y rocas fueron los primeros materiales utilizados para el desarrollo de la civilización. En la edad de piedras las rocas se moldeaban a diferentes formas y se utilizaban para diversos fines. También se utilizaron como armas. Al Principio se utilizaban las piedras sin pulir, pero con el tiempo se fueron descubriendo métodos que permitían pulimentarlas. Por eso este periodo se ha dividido en dos épocas, La edad de piedra sin pulir y la edad de piedra pulida, Paleolítica y neolítica respectivamente.

Minerales y rocas

El exterior de la tierra está constituido por cuerpos sólidos, líquidos e inclusiones gaseosas. Los sólidos se llaman corrientemente rocas. Nosotros vamos a tratar ahora especialmente de reconocer y dar un ejemplo de cómo los minerales pueden dar origen a una roca. Describiremos unas de las varias características generales de varias de las rocas comunes. Así, si en este caso examinaremos una muestra de granito se ve enseguida que tiene un carácter heterogéneo; es decir, está constituida por varios componentes. En general, se pueden distinguir fácilmente tres componentes en una muestra manual; (1) un material cristalino, granular, incoloro, llamado cuarzo; (2) una sustancia de superficies planas, conocida como feldespato; y (3) un materia en escamas color oscuro, que comúnmente se llama mica. Si estos tres componentes cristalinos se analizan, se sabrá que se les puede asignar una composición química diferente a cada uno de ellos única para cada uno. Al cuarzo SiO_2 ; el feldespato $KAlSi_3O_8$, y a la mica, $K(mgFe)_3(OH)_2AlSi_3O_{10}$. Al examinar otra roca corriente, tal como la sienita, se encuentra que tiene, casi siempre, dos componentes, mica y feldespato.

Por otra parte, rocas como la arenisca y el mármol consisten en un solo componente, cuarzo y calcita ($CaCO_3$) respectivamente.

A los componentes de las rocas se le llaman minerales. Los minerales se encuentran en forma muy diversa en la naturaleza, es decir, poseen forma externa definida, limitada por superficies planas naturales.

Composición mineralógica de la corteza terrestre

Todo ambiente geológico está formado por cierto número de minerales y elementos, dependiendo aquellos de la clase y carácter geoquímico de estos. Ante todo ha de notarse que la corteza terrestre está formado por unos 80 elementos, excluyendo los radiactivos de corta vida; pero aun contiene más allá de 2000 especies minerales es decir, compuestos químicos, la mayoría de ellas muy escasas. Por supuesto, el número real de compuestos inorgánicos es mucho más elevado, pero la mayor parte no existe en la corteza. Sino solo los más estables, ya que los demás no se forman o se descomponen enseguida. Otra limitación respecto al número de

minerales radica en la asociación geoquímica de los elementos, así por ejem. No hay minerales de rubidio, aunque se trate de un elemento relativamente abundante, porque los procesos geológicos no logran separarlo del potasio, que lo es muchísimo más; de aquí que el rubidio de la corteza terrestre de halle disperso en los minerales potásicos. Del mismo modo, los quince elementos de las tierras raras forman muy pocos minerales; en realidad, todos ellos juntos, menos que el antimonio, que sin embargo, es mucho más escaso que la mayoría de ellos. Esto se debe principalmente a la casi igualdad de los radios iónicos de los metales de las tierras raras y a su carácter uniforme. Por lo que sus propiedades cristalográficas son en esencia de un elemento iónico.

La mineralogía de la corteza terrestre es mucho más sencilla de lo que podría esperarse de su composición elemental. Las limitaciones existentes en la variación mineralógica se acentúan más cuando pasamos de la corteza como un todo a los distintos ambientes específicos. En lo general se reconocen tres tipos principales de ambientes: magmático, sedimentario y metamórfico. Cada uno de los cuales se compone de varios subtipos según las condiciones físicas y químicas. La mineralogía de cada ambiente depende de la temperatura y presión a que se han producido la cristalización, así como las variaciones experimentadas por la composición química de los minerales.

Generalidades:

Minerales.

Un mineral es un sólido natural que posee una determinada composición química, o una escala definida de composiciones químicas y propiedades físicas igualmente determinadas.

El número de minerales conocidos sobrepasan los 2000, citando algunos autores cifras superiores a los 4000, debiéndose esta diferencia a que estas últimas aplican con menor rigor las características anteriormente aludidas.

Cada mineral tiene una composición constante de elementos en proporciones definidas.

Los minerales poseen generalmente una estructura interna organizada como consecuencia de un ordenamiento sistemático de sus átomos constitutivos, es decir, **son cristalinos**. Algunos sólidos naturales carecen de esta propiedad de ordenación y son amorfos (vidrios volcánicos, ámbar, gales, carbones, asfaltos). Muchas de estas sustancias amorfas, que algunos autores denominan mineraloides, no constituyen en realidad especies estables definitivas, sino fases intermedias de reestructuración, cuyo estado final son minerales perfectamente cristalinos.

Estructura mineral:

Al enfriarse la tierra a partir de una masa fundida, tuvieron lugar cambios relevantes simples. Como se dice que la tierra fundida se enfrió, se quiere decir que los iones comprendidos en ella pasaron a un estado de menor actividad. Esta pérdida de actividad permitió a muchos de los átomos reaccionar a sus atracciones eléctricas. Algunos se agruparon en moléculas de gases para constituir la atmosfera, otros formaron compuestos, pero retuvieron fluidez en las aguas del océano; muchos otros se reunieron en posiciones fijas constituyendo los sólidos.

La composición del sólido resultante es la misma que la de un líquido, pero en el estado sólido, los iones se agrupan de una manera definida, esta disposición de los átomos de los elementos en un mineral constituye su *estructura cristalina*, o arreglo ordenado, de sus átomos. Cada mineral posee una estructura cristalina única que permite distinguirlo de otro mineral, aunque los dos estén formados por el mismo elemento o elementos, más adelante se mencionan los grupos cristalinos en los que cristalizan los minerales.

Cada mineral tiene una forma cristalina característica producida por su estructura cristalina interna.

Rocas.

Las rocas son agregados naturales formados por uno o más minerales y/o mineraloides. No se trata en cada roca de una agrupación casual de minerales, sino que tales agrupaciones responden a unas condiciones de formación que se manifiestan con frecuencia y en extensiones importantes en la estructura de la corteza terrestre.

Dentro del conjunto de minerales que forman una roca determinada se distinguen los minerales esenciales y accidentales. Los primeros son los que se presentan de una manera constante en la composición de la roca y la ausencia de uno de ellos hace que la combinación de los minerales se clasifique como una roca diferente a la anterior.

Minerales metálicos:

- Metales ferrosos (Hierro, Manganeso, Cromo, Molibdano, Vanadium, etc.).
- Metales preciosos (Oro, Plata, Platino, etc.).
- Metales raros (Uranio, Radium, Monacita, etc.).

Minerales no metálicos:

- Materiales para construcción (Arena, Cemento, etc.).
- Materiales químicos (Azufre, Sal, etc.).
- Materiales refractarios (Cromo, Magnesita, etc.).
- Materiales aisladores (Mica, Asbesto, etc.).
- Materiales cerámicos (Arcillas, Feldespatos, etc.).
- Fertilizantes (Nitratos, Fosfatos, Potasio, etc.).
- Pigmentos y rellenos (Baritina, Barro, etc.).
- Materiales raedores o abrasivos (Diamante industrial, etc.).
- piedras preciosas (Diamante, Ámbar, etc.).

Balestrini (1959) ha presentado una clasificación de los minerales en correspondencia a parámetros geopolíticos y de desarrollo industrial agrupándolos a saber:

• Minerales estratégicos:

Son aquellos que no se pueden producir en el país, o cuya producción no logra satisfacer la demanda nacional, bien sea está causada por necesidades militares o industriales en general. En un sentido restringido, son aquellos minerales que en tiempo de guerra la oferta no alcanza a satisfacer las

necesidades mínimas de la industria en un país. Cada país tiene su propia lista de minerales estratégicos y una política de restricción en el uso civil de aquellos que no se encuentran en cantidades suficientes para cubrir las necesidades domésticas en tiempo de guerra. Es por ello el término de estratégico aunque tiene su excepción propia en esta disciplina científica, se vincula aquí directamente con el aspecto militar de los minerales.

Divisiones de la mineralogía.

Un curso elemental de mineralogía se puede dividir en cristalografía, mineralogía física, **mineralogía óptica**, estructura cristalina y análisis por rayos x, mineralogía química, mineralogía descriptiva, gemología (mineralogía de las piedras preciosas) y mineralogía determinativa.

- **Cristalografía.** Este tema sirve para familiarizar al estudiante con las formas cristalinas corrientes que aparecen en los minerales, primero estudiando modelos cristalinos, y después reconociendo las diferentes formas que aparecen en los cristales naturales.
- **Mineralogía física.** Incluye el examen de diferentes propiedades físicas de las sustancias sólidas, por ejemplo dureza, exfoliación, color, brillo, raya, densidad.
- **Mineralogía óptica.** Esta fase de la mineralogía se ocupa de las propiedades ópticas de los sólidos, así como de la descripción de los diferentes instrumentos ópticos y métodos necesarios para la determinación de cristales y minerales.
- **Estructura cristalina y análisis por rayos x.** esta sección incluye un breve examen de la teoría del desarrollo de la moderna teoría de la estructura cristalina. Se describen los métodos de rayo y se ofrecen algunos resultados obtenidos por análisis con rayos.
- **Mineraloquímica.** Esta parte considera las propiedades químicas de los minerales y también su origen y formación. Se explica la determinación de sus componentes químicos, especialmente por el método de soplete.
- **Mineralogía descriptiva.** Hay un capítulo en donde se describen los minerales más corrientes y su cristalografía, propiedades químicas y físicas, modo de aparición y asociaciones y usos.
- **Gemología.** Se destaca el estudio de las propiedades de los minerales usados como joyas. Se desarrollan nuevos métodos e instrumentos para la identificación de gemas naturales y sintéticas y para reconocimiento de materiales que se puedan usar como gemas.
- **Mineralogía determinativa.** contienen unas tablas determinativas para cerca de 300 minerales importantes, con las cuales puede adquirirse facilidad en el reconocimiento rápido de minerales, según sus propiedades físicas.

CAPITULO I

Antecedentes Prehistóricos y la Antigüedad Clásica

El uso de los minerales por el hombre precedió largamente al establecimiento de la Mineralogía como ciencia. Los datos de la antropología, con la documentación asociada a los sitios habitados por el hombre primitivo, permiten comprobar este aserto y enumerar una larga lista de minerales empleados en la vida cotidiana de las antiguas sociedades humanas. El diseño de utensilios, armas, joyas y objetos de culto, registran el uso de cuarzo,

obsidiana, ópalo, turquesa, malaquita, oro, cobre, plata, granates, corindón, topacio, hemetita, olivino, jadeíta, alabastro, lazurita, entre algunas decenas de especies minerales con características muy apreciadas para estas finalidades prácticas. Antecede al Holoceno y al *Homo sapiens*, y es conocida en las comunidades de prehomínidos (*Homo habilis*, *Homo erectus*) como utensilios y ornamentos en asentamientos entre 0,9 y 1,2 Ma.

Los atisbos de una mineralogía incipiente aparecen en la Grecia clásica del siglo IX a.C., se utiliza en la Odisea el vocablo **krystallos** para aludir al hielo. Casi un siglo más tarde PLATÓN (428-348 a.C.) le adjudica en el Timeo el doble significado de hielo y cristal de roca con origen etimológico en *kryos* = frío y *halas* = sal. Estas raíces griegas se conservan al presente en ciencias tan distantes como la cristalografía y la criogenia. **Grecia es el umbral de esta historia de la mineralogía.**

El Medievo

La decadencia de la civilización grecorromana sumerge a Europa en la oscuridad del misticismo y la sinrazón por los siguientes quince siglos, lapso donde cobran singular fuerza las religiones semitas que bajaron del Arca de Noé y tuvieron su primer referente en el patriarca Abraham.

Trescientos años más tarde de La Regla de Avicena, en Persia vivió **Yahya Zakariya ibn Muthammad ibn Mahmud al-Qazwini** (1203-1283), físico, geógrafo y jurista musulmán que nació en el pueblo de Qazvin, en el Irán actual. Hacia 1233 se trasladó a estudiar a Damasco, Siria, y en 1240 se incorporó de jurisconsulto en la corte del último califa abásida Al-Mousta' sim bi Allahh en Bagdad, califa ejecutado al ocaso de esa dinastía en 1258, durante el saqueo e incendio de la ciudad por los mongoles del Hulagu Khan, nieto del legendario Genghis Khan. Al-Qazwini practicó ciencia en astronomía, física, mineralogía, geología y geografía, a la par de su cargo formal de abogado y de hombre de letras o notario en la corte de su sucesor árabe, Ata-Malik Juwayni, hasta su fallecimiento en 1283.

Dos siglos más tarde aparecen algunos otros precursores de la ciencia mineralógica. Vannoccio Biringuccio (1480-1537) fue un italiano hábil en minería y metalurgia que nació en Siena. Su única obra conocida, *De la Pirotechnia* (1540), tuvo gran influencia en su tiempo y fue publicada tres años después de su muerte. A más de cuatro siglos de su desaparición, el mineral **biringuccita**, borato de sodio, recuperado del campo geotermal de Lardarello, Italia, fue descrito y nominado a su memoria por Cipriani en 1961.

La Ilustración Renacentista

De los Países Bajos de Europa arribó un notable impulso sobre la óptica y la cristalografía, en parte, por la disponibilidad de hermosos cristales del llamado espato de Islandia, una calcita incolora y transparente procedente de esa isla atlántica que, junto con Groenlandia, dependían en esta época de la corona de Dinamarca.

Christiaan Huygens (1629-1695), nacido y muerto en La Haya, destacado físico, astrónomo, matemático y biólogo, describió la luz generada por ondas. Enfrentó así a la teoría de la luz generada por partículas defendida por Isaac Newton (1642-1727).



Birrefringencia en calcita

El siglo XVIII

Carl Friedrich Christian Mohs (1773-1839) fue un mineralogista alemán nacido en Gernrode, Sajonia y educado en Freiberg. A los 25 años estudió matemáticas, química y física en la Universidad de Halle y en el año 1801 trabajó en las minas de plomo de Neudorf. Como Breithaupt, publicó una clasificación de minerales con criterio biológico y nomenclatura binaria intitulada Historia Natural del Reino Mineral (1804). Se le reconoce hasta hoy por su exitosa Tabla de Mohs (1812) o tabla de dureza relativa al rayado entre diez minerales ordenados con dureza creciente, desde el talco (1) al diamante (10). En el mismo año que publicó su tabla de dureza mineral, Mohs ocupó la plaza de profesor en la Cátedra de Mineralogía de la Universidad de Graz, Austria, donde ejerció largos años.



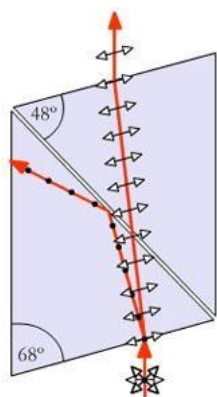
Óptica mineral en el siglo XIX

En el siglo XIX acontece una revolución con el empleo de la microscopía de polarización en la Mineralogía y la Geología. Transcurrieron dos siglos desde que el holandés van Leeuwenhoek inventara el microscopio y la microbiología hasta que nació el microscopio de luz polarizada, el notable instrumento que impulsó en forma extraordinaria el estudio de los cristales minerales y el conocimiento de las rocas por medio de la petrografía. Si bien el mérito mayor le cabe a la inspiración del italiano Amici, que adaptó una fuente de luz plano-polarizada al viejo microscopio simple de los biólogos, creando así el microscopio petrográfico (1827), y al talento del escocés Nicol que diseñó el prisma que hoy lleva su nombre para proporcionar una fuente segura de luz plano-polarizada (1829), ambos pioneros saltaron desde los hombros de unos gigantes intelectuales que —a excepción de Fermat, Huygens y Newton— aún no habían nacido cuando Anton Leeuwenhoek vendía sus nuevos y exclusivos microscopios por Europa. Estos científicos aportaron un progreso esencial en el conocimiento de la física de la luz.

El
una

El físico
prisma
en

y en la



Prisma de Nicol

físico, médico, lingüista y egiptólogo inglés THOMAS YOUNG (1773-1829) aportó evidencia sólida sobre la naturaleza ondulatoria de la luz al demostrar por primera vez la interferencia de las ondas luminosas en rendijas.

y geólogo escocés WILLIAM NICOL (1771-1851) fue el inventor, en 1828, del de calcita para proporcionar luz polarizada que hoy lleva su nombre. Estudió Edinburg y fue el ayudante-lazarillo de un ciego y conocido profesor de ciencias, Henry Moyes (1749-1807), que lo alentó en sus emprendimientos filosofía natural.

Los microscopios de polarización y su producción industrial

La producción industrial de microscopios de polarización se desarrolló muy pronto, a fines del siglo XIX y en la primera mitad del siglo XX, frente a una demanda mundial generalizada tras las nuevas técnicas de la óptica mineral y la petrografía. El estudio de las rocas en secciones delgadas con luz polarizada generó una demanda de instrumental que la esmerada producción artesanal de los pioneros como Amici, Talbot, Nachet, Dick.

El fabricante alemán CARL ZEISS (1816- 1888), inició la producción en serie de microscopios y sus accesorios. Estudió en Weimar y asistió a las clases de mecánica del profesor Friedrich Körner (1778-1847) en la Universidad de Jena donde se graduó en matemáticas hacia 1838. Su microscopio número 1000 y su precio se había más que duplicado, pero la diferencia de calidad a su favor era tan grande que la competencia devino inexistente ubicando la producción de antemano. Hacia 1878 inició la fabricación en serie del microscopio de polarización con los últimos adelantos de la técnica.

Las aplicaciones petrográficas de la óptica mineral

Hacia la mitad del siglo XIX y con el microscopio de polarización como herramienta básica, se inició en la Geología un creciente movimiento mundial por la investigación de los minerales y las rocas mediante refracción de la luz plano-polarizada. Pierre Louis Antoine Cordier (1777-1861) ingeniero de minas francés, a veces llamado el padre francés de la óptica mineral microscópica descubrió la cordierita y describió sus propiedades al microscopio en fecha tan temprana como 1813 y 1815, mucho antes de usar prismas polarizadores y con el empleo del dicroísmo característico del mineral. Hacia el final de su vida fue un gran entusiasta de la naciente petrografía microscópica.

En Alemania Karl Heinrich Ferdinand Rosenbusch (1836-1914) Y Ferdinand Zirkel (1838-1912) fueron nominados los padres europeos de la petrografía microscópica tras una gigantesca labor conjunta al clasificar, describir y sistematizar las rocas por su contenido mineral en secciones delgadas.

El ingeniero de minas francés Auguste Michel-Levy (1844-1911) dejó una marca indeleble en la microscopía de polarización aplicada a la descripción de las rocas y sus minerales. Describió las mirmequitas como el crecimiento vermicular de cuarzo por reacción en los contactos entre plagioclasas y feldespatos potásicos (1874). También definió las bases teóricas para medir la birrefringencia de los minerales entre nicols cruzados (1880), diseñando la famosa tabla de colores de interferencia que hoy lleva su nombre (1888), tabla que ha sido difundida después en casi todos los manuales de mineralogía óptica y por todas las fábricas importantes de microscopios de polarización.

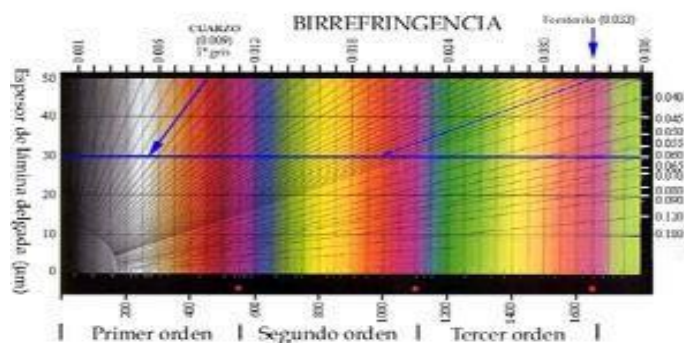
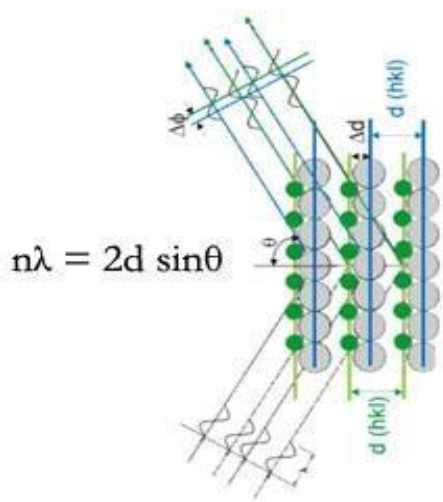


Tabla de Michel-Levy

Los rayos X y la cristalografía estructural avanzan en el siglo XX

En el cambio de siglo aconteció también un profundo cambio con los métodos de trabajo y con las herramientas disponibles en cristalografía. Desde los goniómetros de la cristalografía morfológica, las primeras décadas del siglo XX asistieron al empleo masivo de la difracción de los rayos X por los cristales y al auge dominante de la cristalografía estructural y la cristalquímica. WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845-1923) fue el físico alemán que descubrió los rayos X en el año 1895.



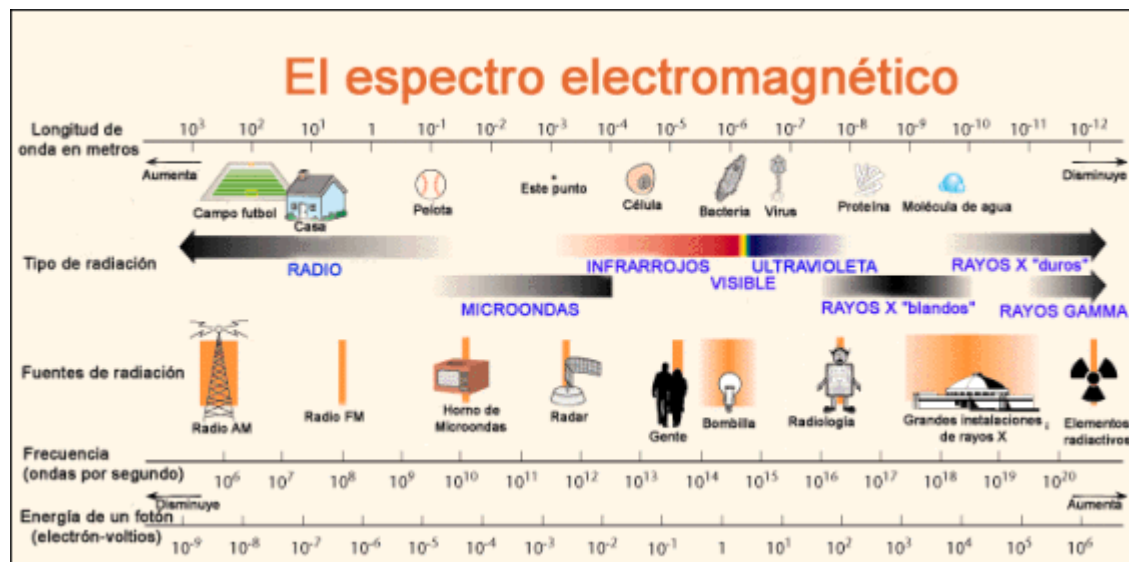
Ecuación de Bragg

En el desarrollo posterior de las técnicas röntgenográficas aplicadas a la cristalografía se destacan William Henry Bragg (1862–1942) y William Lawrence BRAGG (1890–1971), dos físicos australianos, padre e hijo, quienes recibieron por sus trabajos el premio Nobel de física del año 1915. Apenas Laue comunicó su experiencia desde Munich, los Bragg desde Cambridge se ocuparon de estudiar de modo integral el tema: William Henry se interesó más en la naturaleza de los rayos X y por el diseño de equipos experimentales de difracción; William Lawrence prefirió abordar las estructuras cristalinas de la materia sólida y los fundamentos de la cristalquímica. En el año 1913 presentaron $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$, la conocida ley de Bragg, ecuación que vincula el ángulo θ formado por el rayo difractado con los planos cristalográficos difractantes, el espaciado d entre esos planos reticulares y la longitud de onda λ de los rayos X utilizados.

Naturaleza de los rayos X. En 1895, dos años después de que Muthm expusiera su idea de los ejes tópicos, Roentgen descubrió los rayos X en aquel tiempo era profesor de física en la universidad de Wurzburg, donde estos rayos se estudiaron a fondo y con espíritu crítico, su naturaleza exacta permaneció ignorada por espacios de dos décadas.

Se vio que los rayos X Se parecían de algún modo a la luz tras que en otros se comportaba de manera diferente.

En la **tabla 18** se exponen tipos diferentes de ondas electromagnéticas con las amplitudes *aproximadas* a las longitudes de ondas, según recientes determinaciones. La clasificación es algo arbitraria, siendo imposible encontrar líneas de división bien definidas, ya que los diferentes tipos de ondas pueden solaparse notablemente entre sí. Se habrá visto que las ondas de la luz visible ocupan una banda muy pequeña en el llamado espectro de onda.



Descubrimiento de Laue: Estudiando la naturaleza de los rayos X Laue llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) Si los nudos de las rejillas espaciales tienen que considerarse como átomos.
- 2) Si Los Rayos X son como la luz, pero con una longitud de onda muy pequeña, comparables a las distancias existen **entes** entre la separación entre los átomos, entonces un cristal debería comportarse frente a los rayos X como una rejilla de difracción tridimensional. En este caso tendría lugar una difracción y se producirían fenómenos de interferencia a través de los Rayos X en el cristal. En 1912, Laue, en cooperación con Friedrich y Knipping, realizaron este experimento demostrando que era cierta la teoría.

Las longitudes de onda de luz visible se expresan generalmente en milimicras (millonésimas de centímetros). Estas longitudes de ondas varían desde 350m μ para la luz violeta hasta 770m μ para la luz roja en los extremos del espectro visible. Las longitudes de ondas de los Rayos X se dan en función en unidades angstrom ($X 10^{-8}$ cm).

El Experimento tuvo lugar en Munich, donde Sohnke y Groth había trabajado mucho tiempo desarrollando y enseñando teorías de estructura cristalina, y los célebres físicos Roentgen y Sommerfeld fueron también profesores de física de universidad además Munich fue donde Muthmann realizó sus investigaciones desde 1893, dieron lugar a la teoría de los ejes tópicos.

La mineralogía y la petrología experimentales también avanzan en el siglo XX

Junto con el auge de la petrografía microscópica, entre los siglos XIX y XX, también surge con fuerza

la petrología experimental, el estudio del comportamiento de magmas fundidos sintéticos en el laboratorio y el conocimiento de la ecuación de estado, con sus diagramas isobáricos (T-X) de estabilidad de fases, en los minerales formadores de las rocas ígneas.

La fundación de la Carnegie Institution, en Washington D.C. (1903) con su Geophysical Laboratory, brindó el marco institucional donde se llevaron adelante, en las cuatro décadas siguientes, importantes programas de petrología experimental. Finalmente el petrólogo norteamericano Charles Whitman Cross (1854-1949) encabezó la famosa sigla CIPW, al respetar el orden alfabético entre autores, todos ellos muy buenos amigos. Cross estudió petrografía en Alemania enviado por Clarence King (1842-1901), primer director del U.S. Geological Survey, en una pasantía a la cátedra de Zirkel en Leipzig. En 1903 fundó el Petrologist's Club en Washington, publicó *The texture of igneous rocks* (1906) junto con Iddings y colaboró en diseñar el programa científico inicial del Geophysical Laboratory.

La mineralogía y las nuevas Ciencias de la Tierra en el siglo XX

El avance de la ciencia entre los siglos XIX y XX generó disciplinas nuevas con raíces en la química, la física, la mineralogía y la astronomía, las cuales configuran hacia 1920, ciencias independientes como la geoquímica, la astrofísica y la cosmoquímica. La exploración directa del espacio exterior, a partir de la segunda mitad del siglo XX, transformó la geología en planetología comparada. El conocimiento creciente sobre los diferentes núcleos de la materia, la nucleosíntesis estelar de los elementos químicos y la composición promedio de las estructuras mayores, en los numerosos objetos astrofísicos observados, alimenta el notable desarrollo de las nuevas ciencias. El químico nacido en Boston y considerado el padre americano de la geoquímica, Frank Wigglesworth Clarke (1847–1931), fue el primero en calcular la composición de la corteza terrestre en términos de abundancia relativa promedio de elementos químicos (1889).

Capítulo 2

La química de los materiales.

La química de los materiales se inicia como ciencia en los primeros años del siglo pasado, tras haber propuesto Proust, en 1799, su ley de las proporciones constantes; haber enunciado Dalton en 1805, su teoría atómica y haberse desarrollado métodos exactos de análisis cuantitativo. Los avances teóricos suministraron la clave para interpretar los resultados obtenidos al determinar experimentalmente las proporciones de los diversos elementos que entran en las condiciones.

Dado que la química mineral se basa en conocer la composición de los minerales, es preciso comprender ante todo las posibilidades y limitaciones del análisis químico de tales cuerpos. El análisis químico cuantitativo trata de identificar los elementos contenidos en una sustancia así como determinar sus cantidades relativas. Para

que un análisis sea completo es necesario que se hayan averiguado todos los elementos contenidos que hay en el mineral, y para que sea exacto, que se hayan precisado masas presentes de los mismos. La exactitud depende de la calidad, los métodos analíticos empleados y de la destreza con que trabaje el analista. Incluso los mejores métodos tienen siempre un margen de error aunque sea insignificante, y, por otra parte, se puede afirmar con razón que un análisis no es mejor que el analista que lo haya llevado a cabo.

En el resultado de un análisis se expresan las cantidades por sus porcentajes en peso, por lo que, si el análisis este bien hecho, la suma de todos los porcentajes deben de dar 100. En la práctica, como consecuencia de los errores experimentales, es solo casual que el resultado de la suma de exactamente ese valor; en general se considera que el análisis es bueno cuando la suma oscila entre 99.5 y 100.5. Hay que advertir, empero, que puede a verse obtenido resultado entré esos números y no tener resultados certeros., bien porque en la suma se hallan compensados los valores negativos y positivos, bien por el análisis no haya apreciado la presencia de algunos elementos o los haya identificado mal. Así, por ejem. La bavenita, mineral raro descubierto en 1901, se describió como silicato cálcico aluminico hidratado a base de un análisis cuyo total de porcentaje sumaba 99.72. Repetido el análisis treinta años más tarde, se comprobó que la bavenita contenía berilio, elemento determinado anteriormente por haberse precipitado y perdido junto con el aluminio en el primer análisis.

Interpretación de análisis: En la definición dada es que un mineral posee una composición química característica, composición que puede expresarse por una formula en la cual se indican los elementos presentes y las proporciones en las que están combinados. Así, la composición de la halita se expresa con la formula NaCl, indicadora de que los iones de sodio y de cloro de combinan pero en igual número en este mineral. Del mismo modo la fórmula de la brucita, compuesto de un átomo de magnesio con dos de hidroxilicos, es $\text{mg}(\text{OH})_2$. Las formulas pueden ser sencillas o complejas, según el número de elementos que estén presentes y la proporcionen la que estén combinados. El testimonio oficial para asegurar que una fórmula es correcta está basada en un análisis químico. Sin embargo, este puede no ser suficiente, puesto que si bien indica los elementos presentes y sus proporciones, no nos dice nada acerca de cómo están dispuestos estructuralmente en el mineral. Esta incertidumbre se ve muy bien al reflexionar sobre el papel del agua en el análisis. El agua puede hallarse en un mineral como impureza, es decir adsorbido por él; puede estar como agua de cristalización puede haberse formado a partir de los hidroxiliones o hidrogeniones que forman parte de esa estructura. En general, las pequeñas cantidades de agua que se desprenden a temperaturas no elevadas (inferiores a 105° C) se consideran como agua de adsorción, aunque esta regla no siempre es válida. Para decidir con seguridad la formula en por la que se halla combinada con el agua que el análisis pone de manifiesto en un mineral hace falta de una detenida investigación de laboratorio.

Para determinar la fórmula del mineral es preciso convertir los porcentajes en peso, que resultan de los análisis, en datos que den las proporciones numéricas de distintos átomos. Esto se consigue dividiendo cada tanto por ciento por el peso del atómico del elemento correspondiente, como se ve en el siguiente sencillo ejemplo de análisis, referente a un ejemplar de marcasita del condado de jasper (Missouri)

Porcentaje en peso		Peso atómico	Proporción en número de átomos
Fe	46.55	55.85	0.834 = 1
S	53.05	32.07	1.654 = 1.988
total	99.6		

Dentro del error experimental, la fórmula de la marcasita resulta FeS_2 .

El proceso contrario, calcular la composición porcentual a partir de la fórmula, se efectúa como sigue: la fórmula de la marcasita es FeS_2 y, puesto que los pesos atómicos del hierro y el azufre son 55.85 y 32.07 respectivamente, la molécula-gramo de marcasita será $55.85 + 2 \cdot 32.07 = 119.99$, luego:

$$\% Fe = \frac{55.85}{119.99} 100 = 46.54$$

$$\% S = \frac{64.14}{119.99} 100 = 53.46$$

Es interesante comprobar los análisis de distintos ejemplares de marcasita con la composición teórica deducida de la fórmula.

	1	2	3	4	5
Fe	46.54	46.55	45.53	47.22	46.56
S	53.46	53.05	53.30	52.61	53.40
sumatoria	100	99.60	99.83	99.83	99.96

El núm. 1 es la composición calculada para el FeS_2 , los demás son resultados analíticos de marcasitas procedentes de: 2, condado de Jasper (Missouri); 3, Joplin (Missouri); 4, Osnabrück (Alemania); 5, Loughborough Township (Ontario). Todos los análisis mencionados son buenos puesto que oscilan entre 99.5 y 100.5, pero se desvían ligeramente de la composición deducida de la fórmula. Estas desviaciones deben atribuirse a la imperfección de los métodos analíticos y no a que la composición de la marcasita se separe de la de la fórmula FeS_2 . Teniendo en cuenta los errores experimentales, los análisis indican que la marcasita, proceda de donde proceda, tiene una composición química fija. Esto es excepcional entre los minerales, pues la mayoría no poseen composición fija, sino que solo característica, si bien en grado suficiente para ser expresable por una fórmula.

	1	2	3	4
Fe	0.15	7.99	11.05	18.25
Mn	-----	----	----	2.66
Cd	-----	1.23	0.30	0.28
Zn	66.98	57.38	55.89	44.67
S	32.78	32.99	32.63	33.57

sumatoria	99.91	99.59	99.87	99.43
-----------	-------	-------	-------	-------

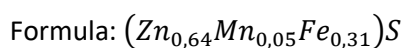
(1, de Sonora (México); 2, de Gadoni (Cerdeña); 3, de Bodenmais (Alemania); 4, de Isere (Francia)).

Estos análisis muestran que la esfalerita puede ser sulfuro de cinc casi puro o puede contener cantidades considerables de hierro e indicios de manganeso y de cadmio. La cuestión se aclara más si los resultados en peso de los análisis se convierten en proporciones relativas del número de átomos:

	1	2	3	4
Fe	0.003	0.143	0.198	0.327
Mn	-----	----	----	0.048
Cd	-----	0.011	0.003	0.003
Zn	1.026	0.879	0.856	0.684
Sumatoria	1.029	1.033	1.057	1.062
S	1.024	1.032	1.020	1.049

En los cuatro análisis la relación átomos metálicos-átomos de azufre es 1:1, que corresponde a la formula ZnS, pero algunos átomos de cinc están remplazados por otros de hierro, manganeso o cadmio. Es evidente que la formula ZnS representa una simplificación de la composición cuantitativa de la esfalerita. Este mineral puede ser prácticamente ZnS puro (análisis 1), pero también puede llegar a tener un tercio o más de cinc sustituido por el hierro, fenómeno común en los minerales y que se expresa (en este caso) escribiendo la formula (Zn, Fe) S, donde el total de átomos de cinc y hierro es igual al de los átomos de azufre, siendo en cambio variables los números de cada uno de los materiales. Cuando se desea expresar en formula de composición correspondiente a un análisis particular, las proporciones atómicas de los elementos que se sustituyen mutuamente se reduce a fracciones de la unidad. Así, el análisis 4 se puede expresar con la siguiente formula (en la que se omite el cadmio por su escasez):

Proporciones atómicas		Fracciones decimales
Fe	0.327	$\frac{0.327}{1.062} = 0.31$ $\frac{0.048}{1.062} = 0.05$ $\frac{0.684}{1.062} = 0.64$
Mn	0.048	
Cd	0.003	
Zn	0.684	
	1.062	
S	1.049	



Página 176

Esta fórmula constituye un caso particular de la formula general $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ y expresa la composición del ejemplar analizado de esfalerita.

Otro ejemplo de lo mismo lo suministra el olivino, del que se han dado los siguientes análisis:

	1	2	3	4
SiO_2	40.99	38.11	33.72	31.85
FeO	8.58	31.48	47.91	58.64
MnO	0.20	0.22	0.41	0.85
MgO	50.00	30.50	18.07	8.49
	99.77	100.31	100.11	99.83

1, de Cerdeña; 2, 3 y 4 de Kangerdlugssuak (Groenlandia)

Estos resultados manifiestan claramente una importante limitación de la técnica analítica cuando se aplica a compuestos que contienen oxígeno. No hay, en efecto, procedimiento analítico que permita determinar la cantidad total de oxígeno de un compuesto. De aquí que los resultados del análisis se refieran a los óxidos de los distintos elementos en vez de referirse a estos mismos; en lugar de pasar los porcentajes en peso a relaciones entre números de átomos, se pasan en relación entre números de moléculas, dividiendo las cifras resultantes del análisis por el peso molecular de cada óxido. El peso molecular del SiO_2 es por ejem. $28.06 + 2(16.00) = 60.06$.

Los anteriores análisis del olivino difieren tanto entre sí que podrían pensarse que se refieren a minerales distintos. Pasando los resultados a relaciones entre números de moléculas, se ve que todos son variantes de una misma fórmula.

	1	2	3	4
FeO	0.119	0.438	0.667	0.816
MnO	0.003	0.003	0.006	0.012
MgO	1.240	0.756	0.448	0.211
Sumatoria	1.362	1.197	1.121	1.039
SiO_2	0.680	0.635	0.561	0.530

Pese a la amplia variación en las cantidades de MgO y FeO, la relación entre el número de moléculas de FeO + MnO + MgO y el de SiO_2 es siempre 2: 1, que corresponde a la fórmula $(\text{mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. Despreciando la insignificante cantidad de manganeso, sus análisis se puede expresar con precisión por la fórmula general

$(Mg_x, Fe_{x-1})_2SiO_4$, que en cada caso particular es: 1, $(Mg_{0,91}Fe_{0,79})_2SiO_4$; 2, $(Mg_{0,63}Fe_{0,37})_2SiO_4$; 3, $(Mg_{0,40}Fe_{0,60})_2SiO_4$, y 4, $(Mg_{0,21}Fe_{0,79})_2SiO_4$.

Otro método que se utiliza a veces para indicar las composiciones particulares, dentro de un mineral de composición variable, consiste en dar los porcentajes de los minerales componentes. Para el olivino estos son la forsterita Mg_2SiO_4 (en abreviatura, Fo), y la fayalita, Fe_2SiO_4 (abreviatura, Fa) Así, las composiciones resultantes de los análisis antes estudiados se pueden expresar del modo siguiente: 1, $Fo_{91}Fa_9$; 2, $Fo_{63}Fa_{37}$; 3, $Fo_{40}Fa_{60}$ y 4, $Fo_{21}Fa_{79}$ puesto que la suma de ambos porcentajes han de ser 100, puede omitirse uno de los componentes sin que se produzca ambigüedad; así, "olivino (Fo_{15})" se refiere a un olivino con un 15% de Mg_2SiO_4 y un 85% de Fe_2SiO_4 . La composición ponderal (en peso) de estos porcentajes moleculares puede calcularse como sigue: SiO_2 ; la de Fe_2SiO_4 contiene 143.70 g de FeO y 60.06 g de SiO_2 , de donde resulta que la molécula-gramo de olivino (Fo_{15}) contendrá:

MgO.... 80.64 (0.15) = 12.10	Porcentaje en peso
FeO.... 143.70 (0.85) = 122.14	6.23
SiO_2 60.06 (1) = 60.06	62.86
= 194.30	30.91
	100.00

Las densidades de los olivinos analizados son: 1, 3.35; 2, 3.69; 3, 3.88 y 4, 4.16. Evidentemente hay una relación directa entre la densidad y el contenido en hierro, ya que aquella aumenta al aumentar este. Esta relación puede apreciar mucho mejor en una gráfica de densidad en función de la composición. Llevando a las abscisas el contenido en Fa – Fo y a las ordenadas la densidad resulta una línea recta, hecho demostrativo de que la densidad es en el olivino función lineal de su composición, permitiendo deducir está directamente de la gráfica conociendo el valor de aquella **n** un ejemplar dado, o recíprocamente, la densidad cuando se conoce la composición, así, por ejem: en la figura se ven las densidades del Mg_2SiO_4 y del Fe_2SiO_4 son 3.22 y 4.4, respectivamente, conforme las obtenidas experimentalmente para ambas sustancias puras.

Estas graficas que relacionan la composición con las propiedades físicas se aplican a numerosos minerales que presentan aquella variable, utilizándose para determinar con rapidez una composición sin necesidad de acudir a un análisis químico. Un ejemplo práctico de su utilidad es su aplicación para averiguar al contenido en niobio y en Tántalo de los minerales de la serie columbita-tantalita. Es difícil determinar por análisis químicos ambos metales, pues requiere, tiempo y laboratorios muy bien equipados, mientras que las determinaciones densimétricas se llevan a cabo con útiles sencillos. He aquí porque se acude especialmente al método de las densidades cuando se quiere estimar con rapidez el contenido en niobio de muestras concentradas de columbita y tantalita.

La composición química y el contenido de la celda unidad

La celda unidad de una sustancia contiene el conjunto de los átomos indicados en la formula o bien un múltiplo de este conjunto. En la mayoría de los materiales y de las sustancias inorgánicas, la formula unidad no corresponde estructuralmente a una molécula. En escasos minerales el azufre de moléculas anulares, S_8 --y en

casi todas las sustancias orgánicas solidas de pueden reconocer las moléculas como individuos. Estructurales. Cuando se conocen las dimensiones de la celda unidad (determinadas con rayos X) y la densidad de la sustancia resulta posible calcular el contenido de aquella. En cuando al volumen de la celda, se deduce del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
 &\text{Regular..... } V = a^3 \\
 &\text{Tetragonal... } V = a^2c \\
 &\text{Hexagonal.... } V = a^2c \text{ sen } 60^\circ \\
 &\text{Ortorrombico..... } V = abc \\
 &\text{Monoclinico..... } V = abc \text{ sen } \beta \\
 &\text{Triclinico..... } V = abc (1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma)^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

La masa total, M de los átomos contenidos en la celda unidad se deduce de $M = VG$, donde G es la densidad. Si las dimensiones de la celda unidad se dan en unidades Angstrom ($1 \text{ A} = 10^{-8} \text{ cm}$), el volumen vendrá dado en A^3 , y para obtener M en gramos basta con multiplicar por el factor 10^{-24} ; es decir, $M = VG \cdot 10^{-24} \text{ g}$.

Sabiendo la masa M en la celda unidad en gramos se puede calcular el número de átomos contenidos en ella a partir de los análisis químicos. Si un mineral contiene P% de elemento X de masa atómica N, la masa del total de los átomos de ese elemento contenido en la celda será $\frac{PM}{100}$ y para hallar el numero de átomos de ese total bastara dividir dicho cociente por la masa de uno; es decir, por $1.6602 \times 10^{-24} N$, ya que el factor $1.6602 \times 10^{-24} \text{ g}$ es la masa real de un átomo de masa atómica relativamente uno, luego:

$$\text{número de átomos de X} = \frac{PM}{100} \frac{1}{1.6602 \times 10^{-24} N}$$

Y substituyendo M por el producto VG (volumen de la celda por densidad) resulta:

$$n = \frac{PVG}{1.6602 \times 10^{-24} N}$$

Y expresando V en centímetros cúbicos, en vez de en unidades A cubicas:

$$n = \frac{PVG}{166.02 N}$$

Dado el resultado del análisis de porcentajes de los elementos, el numero atómico de cada uno contenido en la celda unitaria se obtiene dividiendo su porcentaje por la masa atómica, N, y multiplicando el cociente por $\frac{VG}{166.02}$. Como los análisis químicos no suelen dar una suma exactamente igual a 100, las cifras obtenidas no representan los porcentajes verdaderos, que deben modificarse para que el total tenga aquel valor. El ejemplar analizado, núm. 4 de esfalerita (pago. 174), nos sirve para aclarar el procedimiento:

	1	2	3	4	
Fe	18.25	18.26	0.3287	1.23	4.07—4
Mn	2.66	2.68	0.0488	0.18	
Cd	0.28	0.28	0.0025	0.09	
Zn	44.67	44.92	0.6875	2.57	

S	33.57	33.76	1.0530	3.93	3.93—4
	99.43	100.00			

Columnas: 1, porcentaje dado por análisis; 2, íd. Modificados porcentualmente para que sumen 100; 3, números relativos de átomos; 4, átomos en la celda unidad (producto de los números anteriores por $\frac{VG}{166.02}$). La arista de la celda es 5.41 Å, y la densidad, 3.92.

Resulta así que en la celda unidad de la esfalerita hay cuatro átomos metálicos y cuatro de azufre, siendo las pequeñas desviaciones (± 0.07) debidas a errores en el análisis y en la determinación de la densidad y dimensiones de la celda. Esta contiene, pues, cuatro grupos (Zn, Fe)S número que se designa generalmente por el símbolo Z.

El mismo método se sigue para hallar el contenido de la celda unitaria cuando el resultado del análisis se expresa en tanto por ciento de óxidos. La única variable consiste en que los porcentajes en peso de estos se convierten en números relativos de moléculas dividiéndolos por las masas moleculares de los óxidos. Se obtiene así el número total de cada moléculas de cada óxido contenido en la celda, y de dicho número se pasa al de átomos de oxígeno y demás elementos según las proporciones que de estos contienen dichos ácidos. El análisis de la muestra 1 de olivino (pág. 176) sirve de otro ejemplo ilustrativo.

	1	2	3	4	5	
SiO ₂	40.99	41.08	0.6835	4.01	Si....4.01	8.02
FeO	8.58	8.60	0.1197	0.70	Fe.... 0.70	
MnO	0.20	0.20	0.0028	0.02	Mn... 0.02	
MgO	50.00	50.12	1.2430	7.30	Mg.... 7.30	
	99.77	100.00			O...80.02+0.70+0.02+7.30=1604	

Columnas: 1, porcentajes dados por el análisis; 2, íd. Modificados proporcionalmente para que sumen 100; 3, números relativos de moléculas; 4, moléculas de óxidos contenidos en la celda unidad ($V = 4.76 \cdot 10.21 \cdot 5.99 \text{ Å}^3$; $G=3.35$); 5, átomos contenidos en la celda. Así, pues, en la celda unidad del olivino resulta indudablemente $Z = 4$; es decir, hay en ella cuatro grupos $(Mg, Fe)_2SiO_4$.

El procedimiento indicado se utiliza para comprobar la exactitud de la fórmula asignada a un mineral determinado o de la densidad hallada experimentalmente.

Componentes y fases.

Lo indicado al estudiar la composición del olivino nos ilustra sobre el uso del término *componente*, cuyo concepto es de gran importancia en mineralogía. La composición de un sistema **materias** (una cantidad limitada de sustancia sólida, líquida, gaseosa o mezcla de los tres estados) se puede expresar en función de sus componentes. Son estos el menor número de entidades químicas independientes (elementos o compuestos) que permiten expresar la composición de un sistema. En el caso del olivino los componentes son

Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4 , por lo que el sistema se denomina binario. Según el número de componentes se dice también monaria, ternario, cuaternario, etc.

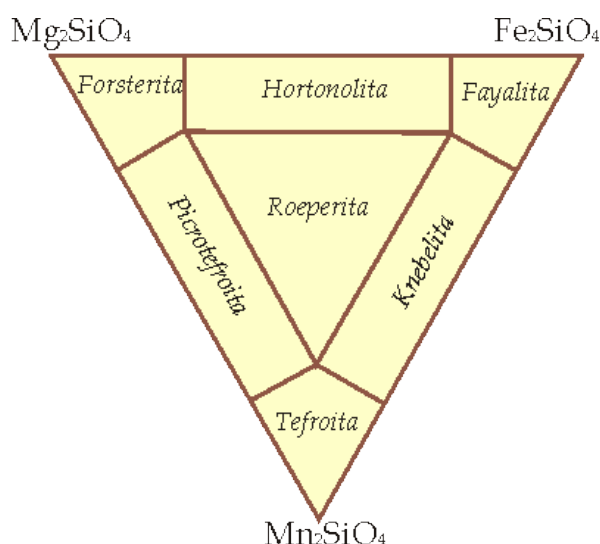
Otro concepto importante es el de *fase*: parte de un sistema que es físicamente homogénea y mecánicamente separable de las restantes porciones. Así por ejém: si un recipiente está lleno en parte de agua en la que flota hielo, el contenido es un sistema trifásico, puesto que está formado por hielo, agua líquida y aire. Un mineral puro consta de una sola fase; una roca es un sistema con tantas fases cuyos minerales la formen. En todo sistema, el número de fases se relaciona con el de componente por la llamada regla de las fases.

Los diagramas que expresan las relaciones entre compuestos, fases y propiedades físicas de estas se utilizan extensamente en mineralogía. La figura 4-1 es un ejemplo muy sencillo que relaciona la densidad con la composición de la fase olivino en un sistema binario $Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$. En todo sistema de este tipo cada composición particular se representa por un punto en el eje horizontal del diagrama, y la propiedad de que se trate, por otro punto en el eje vertical. En los sistemas ternarios se indica la composición por un punto de un triángulo equilátero. Cada vértice representa un componente puro; cada arista, un sistema binario cuyos componentes puros son sus extremos, y cada punto interior, una composición particular en la que intervienen los tres componentes.

Estos diagramas se pueden indicar las propiedades físicas, bien por alturas sobre el plano (tomadas en el modelo tridimensional), bien representando dichas alturas por curvas de nivel en el mismo plano del triángulo.

La distinción entre componente y fase es fundamental y debe quedar completamente clara. Por desgracia, en mineralogía se acostumbra utilizar los componentes nombres de minerales: por ejém: $Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$, se suele denominar sistema forsterita-fayalita, que son aquí consideradas como componentes. En cambio hay minerales de composición aproximadas Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4 que se llaman respectivamente, forsterita y fayalita, en cuyo caso estos se refieren a las fases.

En general, el contexto permite aclarar el significado.



A veces los componentes se denominan miembros ternarios, para acentuar el hecho de que poseen las composiciones extremas del sistema.

También es frecuente utilizar el término molécula en igual sentido que el de componente, costumbre que debe eliminarse, para la mayoría de los minerales no existen moléculas.

Principios de cristalografía

En este momento conviene estudiar los principios que regulan la composición química de los minerales y determinar si dicha composición es fija o si varía ampliamente. Dado que los minerales son cristales, su química será parte de una ciencia más extensa, la *cristalografía*. Haüy fue quien, a finales del siglo XVIII, sugirió por vez primera la idea de que en las sustancias cristalinas la distribución de los átomos está ordenada simétricamente. Después, otros investigadores desarrollaron esta hipótesis, que fue finalmente confirmada en 1912 al descubrirse que los cristales provocan ya difracción de los rayos X. Este fenómeno es el instrumento que ha hecho posible determinar la distribución de los átomos en los cristales, distribución que es una característica fundamental, ya que determina en gran parte las propiedades de la sustancia cristalina.

La unidad esencial en todo edificio cristalino es el *átomo*, que, sin embargo, puede estar asociado con otros formando un grupo que se comporta como una unidad estructural simple. Los átomos están constituidos por un núcleo muy pequeño cargado positivamente y rodeado de una o más capas de electrones, comportándose el conjunto como una esfera cuyo radio eficaz es del orden 1 Å. Este radio no depende solo de la especie del elemento, sino también de su estado de ionización y del modo como está ligado con los átomos próximos.

Enlaces entre los átomos

- **Enlace metálico:**

A este tipo de enlace se debe la cohesión de los metales. Son estos elementos cuyos átomos dejan en libertad los electrones exteriores. Su estructura cristalina está determinada por el empaquetamiento de los átomos cargados positivamente (iones positivos), mientras que los electrones desprendidos se dispersan y mueven libremente entre ellos. Tal movilidad es la causa de que los metales sean buenos conductores del calor y de la electricidad. Entre los minerales, el enlace metálico se presenta en los metales nativos y, en cierto grado, en escasos sulfuros y arseniuros.

- **Enlace homopolar o covalente.**

La configuración de máxima estabilidad de un átomo se produce cuando su capa electrónica externa está completa (saturada de electrones). Tal es la estructura atómica de los gases inertes, y a ella se debe su casi total ausencia de capacidad para reaccionar químicamente. Una forma de conseguir esta configuración en un grupo de dos o más átomos es que comportan alguno de los electrones de sus últimas capas. Así por ejém; los átomos del gas del cloro están siempre enlazados en moléculas biatómicas. Cl_2 . Cada átomo posee siete electrones externos, por lo que la configuración estable de ocho se puede alcanzar si cada átomo comparte con el otro uno de sus electrones.

Este tipo de enlace es común en los compuestos orgánicos, pero raro en los minerales, al menos en forma no modificada. El mejor ejemplo mineralógico es el diamante, en el que cada átomo de carbono está rodeado por otro 4, cada uno de los cuales comparte un electrón con aquel. Esta ordenación se repite en todas las direcciones a través del edificio estructural, por lo que el cristal resulta ser, en su totalidad, una molécula gigantesca.

- **Enlace polar o iónico:**

Otra forma de que un átomo complete su capa electrónica exterior consiste en que gane o pierda un número conveniente de electrones y enlace la configuración del gas inerte más próximo. Así, cuando un átomo de cloro adquiere un electrón de más se convierte en un ion negativo, pero con una configuración electrónica que es de la misma del argón. Como es lógico, esto requiere la presencia de otro átomo capaz de suministrar tales electrones, o, dicho en otros términos, un átomo que alcance la configuración estable perdiéndolos. El sodio por ejemplo: un elemento que por pérdida de un electrón se transforma en un ion positivo con la configuración del neón. De aquí que el cloro y el sodio puedan reaccionar fácilmente combinándose para dar una estructura de iones de carga opuesta que se mantiene en virtud de las atracciones electrostáticas. Cada ion está rodeado por otros de signo contrario, dependiendo del número de estos de sus tamaños relativos. No existen aquí parejas individuales de iones positivos y negativos que forman verdaderas moléculas como las que se encuentran en los compuestos covalentes.

El enlace iónico es común en los compuestos inorgánicos, y por ello de enorme importancia en la estructura de los minerales. Con excepción de los elementos y de algunos sulfuros, todos los minerales son compuestos iónicos.

- **Enlaces de Van der Waals**

Se Presenta típicamente este modo de enlace en los cristales de los gases inertes. Resultado de la total saturación electrónica que se da en la capa exterior de sus átomos es la incapacidad para que existan enlaces de este tipo metálico, covalente o iónico. En consecuencia, las fuerzas atractivas interatómicas son aquí muy débiles, hecho que se refleja en las bajísimas temperaturas y presiones elevadas que se necesitan para que estos gases se torneen líquidos y sólidos.

Los cuatro tipos de enlaces nos permiten clasificar las estructuras cristalinas. No obstante, debe comprenderse que si bien cada forma de enlace posee propiedades bien definidas, la clasificación es arbitraria, ya que los enlaces en muchos compuestos pueden ser más o menos intermedios. Así, por ejemplo; los del silicio-oxígeno en la sílice y en los silicatos no son estrictamente iónicos o covalentes, sino de dicho carácter intermedio. Todo sólido tiende a adquirir una estructura tal que en el sistema formado por los núcleos y electrones se ordene en el estado de mínimo contenido energético.

En una sustancia pueden existir varios tipos de enlace. En el azufre, por ejemplo; cada ocho átomos están ligados homopolarmente formando una molécula anular, y estas moléculas están unidas entre sí en el cristal por las fuerzas de van der Waals. Ciertas propiedades físicas, como la dureza y la tenacidad, están determinadas por los enlaces más débiles, los primeros en desecharse bajo las fuerzas mecánicas o térmicas. En el grafito por ejemplo; los átomos de carbono de la misma capa se unen por enlaces covalentes, mientras que unas capas se alcanzan con otras por las fuerzas de Van der Waals. Estas son las más débiles y fácilmente de interrumpir; de ahí la escasa dureza del grafito y su pronta exfoliación paralela a las capas de átomos de carbono.

Según la naturaleza del enlace, la estructura de los compuestos iónicos se puede referir a dos formas: *isodésmica* y *anisodésmica*. En los compuestos isodésmicos, los enlaces tienen toda la misma fuerza; tal sucede en los óxidos e hidróxidos y en los halogenuros simples. En los compuestos anisodésmicos existe pronunciada diferencia en la fuerza de los distintos enlaces, hecho que resulta de la presencia de los grupos discretos en el edificio estructural. Tales grupos son los aniones de los oxácidos CO_3^{2-} , SO_3^{2-} , PO_4^{3-} , etc., cuyos enlaces internos son más fuertes que los que unen a los cationes. Estos grupos actúan como unidades estructurales.

Tamaño de los iones

En los minerales domina la estructura iónica; unos 1800, de un total de 2000 especies minerales que existen aproximadamente, son compuestos iónicos. Las estructuras de casi todos los minerales están, pues, determinadas por el número y tamaño de los iones que entran en su composición, pudiendo estos considerarse aproximadamente esféricos, con un radio característico de cada elemento y con carga correspondiente al ion. En el apéndice y en la figura 4-3 se dan los tamaños de algunos de los iones más comunes. Se observará que el hidrogeno no está incluido en la figura; esto se debe a sus propiedades singulares: costa de un núcleo positivo, un protón, sin electrones orbitales unidos a él, por lo que resulta sumamente pequeño y actúa más bien como un punto sin dimensiones cargado positivamente. El radio del ion OH^{-1} es en esencia el mismo que el del ion O^{-2} , pues el hidrogeno queda embebido en el átomo de oxígeno, resultando ser prácticamente esférico el grupo OH.

Pegar imagen

Puesto que el radio de un ion depende de su estructura atómica, ha de estar relacionada con la posición del elemento en la tabla periódica (tabla 4-1). Respecto a ello se pueden considerar válidas, en general, las reglas siguientes:

Tabla Periodica de los Elementos

1 IA

2 IIA

13 IIIA

14 IVA

15 VA

16 VIA

17 VIIA

18 VIIIA

1 H Hydrogen 1.0079

3 Li Lithium 6.941

4 Be Beryllium 9.01218

11 Na Sodium 22.989768

12 Mg Magnesium 24.305

19 K Potassium 39.0983

20 Ca Calcium 40.078

37 Rb Rubidium 85.4678

55 Cs Cesium 132.90543

87 Fr Francium 223.0187

21 Sc Scandium 44.95591

22 Ti Titanium 47.88

23 V Vanadium 50.9415

24 Cr Chromium 51.9961

25 Mn Manganese 54.938

26 Fe Iron 55.847

27 Co Cobalt 58.9332

28 Ni Nickel 58.6934

29 Cu Copper 63.546

30 Zn Zinc 65.39

31 Ga Gallium 69.723

32 Ge Germanium 72.64

33 As Arsenic 74.9216

34 Se Selenium 78.96

35 Br Bromine 79.904

36 Kr Krypton 83.80

39 Y Yttrium 88.90585

40 Zr Zirconium 91.224

41 Nb Niobium 92.90638

42 Mo Molybdenum 95.94

43 Tc Technetium 98.9062

44 Ru Ruthenium 101.07

45 Rh Rhodium 102.9055

46 Pd Palladium 106.42

47 Ag Silver 107.8662

48 Cd Cadmium 112.411

49 In Indium 114.818

50 Sn Tin 118.71

51 Sb Antimony 121.760

52 Te Tellurium 127.6

53 I Iodine 126.90547

54 Xe Xenon 131.29

56 Ba Barium 137.327

57-71 Lanthanides

72 Hf Hafnium 178.49

73 Ta Tantalum 180.9479

74 W Tungsten 183.85

75 Re Rhenium 186.207

76 Os Osmium 190.23

77 Ir Iridium 192.22

78 Pt Platinum 195.08

79 Au Gold 196.9665

80 Hg Mercury 200.59

81 Tl Thallium 204.3833

82 Pb Lead 207.2

83 Bi Bismuth 208.98037

84 Po Polonium [209]

85 At Astatine [209]

86 Rn Radon [222]

104 Rf Rutherfordium [261]

105 Db Dubnium [262]

106 Sg Seaborgium [266]

107 Bh Bohrium [264]

108 Hs Hassium [269]

109 Mt Meitnerium [269]

110 Ds Darmstadtium [269]

111 Rg Roentgenium [272]

112 Cn Copernicium [277]

113 Uut Ununtrium [unknown]

114 Uuq Ununquadium [289]

115 Uup Ununpentium [unknown]

116 Uuh Ununhexium [286]

117 Uus Ununseptium [unknown]

118 Uuo Ununoctium [unknown]

89-103 Actinides

108 Hs Hassium [269]

109 Mt Meitnerium [269]

110 Ds Darmstadtium [269]

111 Rg Roentgenium [272]

112 Cn Copernicium [277]

113 Uut Ununtrium [unknown]

114 Uuq Ununquadium [289]

115 Uup Ununpentium [unknown]

116 Uuh Ununhexium [286]

117 Uus Ununseptium [unknown]

118 Uuo Ununoctium [unknown]

Alkali Metal

Alkaline Earth

Transition Metal

Basic Metal

Semimetals

Nonmetals

Halogens

Noble Gas

Lanthanides

Actinides

1.^a para elementos del mismo grupo de la tabla el radio iónico aumenta con el numero atómico: $\text{Be}^{2+} = 0.35$; $\text{Mg}^{2+} = 0.66$; $\text{Ca}^{2+} = 0.99$; $\text{Sr}^{2+} = 1.12$ y $\text{Ba}^{2+} = 1.34$. es lógico, puesto que en los elementos de un mismo grupo el número de capas electrónicas en torno al núcleo se hace mayor al descender de la columna.

2.ª Para iones positivos con igual número de capas electrónicas el radio decrece al aumentar la carga. Consideremos los elementos del tercer periodo horizontal de la tabla, cuyos iones tienen todas dos capas electrónicas, con dos electrones en la interna y ocho en la externa. $\text{Na}^1 = 0.97$; $\text{Mg}^2 = 0.66$; $\text{Al}^3 = 0.51$; $\text{Si}^4 = 0.42$; $\text{P}^5 = 0.35$; $\text{S}^6 = 0.30$. Así, pues, al avanzar hacia la derecha en el periodo, el radio iónico decrece en general,

debido a que al perder los electrones por ionización el núcleo ejerce una atracción tanto más intensa sobre los que quedan cuanto mayor es una carga positiva.

3.^a En los elementos que presentan valencia variable, es decir, que originan iones con diferentes cargas, el radio iónico decrece al aumentar la carga positiva: $Mn^{2+} = 0.80$; $Mn^{3+} = 0.66$; $Mn^{4+} = 0.60$, ya que al ser mayor la pérdida de electrones por ionización, los restantes serán atraídos con más fuerza por el núcleo, dando lugar a la contracción de la capa externa y al acortamiento del radio iónico.

El oxígeno es el elemento más abundante en la corteza terrestre prácticamente todos los minerales son compuestos oxigenados. De aquí se deduce que el ion más común ha de ser el O^{2-} , hecho que se relaciona significativamente con su gran tamaño: 1.40 Å. la corteza terrestre contiene alrededor del 47% de oxígeno en peso; pero cuando se pasa a porcentaje por volumen se llega al 90%. En los minerales oxigenados el volumen que corresponda a este elemento excede a mucho a todos los demás; consecuencia de ello es que la estructura de tales compuestos está generalmente determinada por la distribución de los voluminosos iones de oxígeno, al par que de los otros elementos se limitan a llenar los intersticios que aquellos dejan.

La estructura de cualquier compuesto iónico en función del tamaño de los iones y de su carga (esta, expresada por su valencia). Dicho de otro modo, los factores que controlan las estructuras de los compuestos heteropolares son sus exigencias de estabilidad geométrica y eléctrica. Para satisfacer a la primera es preciso que los tamaños relativos de los iones y su modo de empaquetamiento sean tales que se puedan mantener más o menos rígidamente unidos en el edificio estructural, al igual que en una casa cada bloque íntegramente debe soportar a sus inmediatos. La estabilidad eléctrica exige que la suma de las cargas de signo opuesto este equilibrada, hecho de que sirve de una vez como prueba de que una fórmula sea correcta, en especial cuando se trata de minerales muy complejos como los anfíboles y las micas.

En la estructura de un compuesto iónico cada catión a rodearse de aniones, y el número de estos, llamado *número de coordinación* del catión, depende de los tamaños relativos de ambas clases de iones. Esta relación suele expresarse con más claridad por la *razón radial*, es decir, por el cociente entre el radio del catión y el radio del anión.

Mineralogía y cristalografía

La mayoría de los cristales tienen composiciones que corresponden a compuestos químicos. Algunos aparecen como elementos y se llaman Nativo, como el oro nativo, cobre nativo y azufre nativo.

Muchas veces es difícil preparar sustancias químicamente puras en el laboratorio. En la naturaleza, los minerales se encuentran normalmente en un ambiente complejo, y esta es la razón por la que las composiciones nunca corresponden a una fórmula química. Por eso en la pág. 5 composición química característica para definir un mineral.

Formulas químicas. Los métodos de soplete son muy útiles para determinar rápidamente los principales compuestos de un mineral. Estos métodos los estudiaremos con detalle en el capítulo siguiente. La determinación de la composición cuantitativa de los minerales entra al campo de la química, empleándose para ello métodos pertenecientes a la química analítica. Las formas que representan la composición química de los minerales se calculan lo mismo que las de cualquier otra sustancia química. Por ejemplo, Laspeyres obtuvo los siguientes resultados, analizando una calcopirita de Müsen, Alemania:

I		II		III	IV	V
---	--	----	--	-----	----	---

	análisis %		pesos atómico	=	relaciones de combinación		
Cu	34,89	/	63,54	=	0,5491	1,021	1
Fe	30,04	/	55,85	=	0,5378	1	1
S	34,51	/	32,07	=	1,0768	2,002	2
	99,44						

Dividimos los porcentajes (I) de los diversos componentes por sus pesos atómicos (II), se obtienen sus relaciones de combinación. Se puede expresar en números enteros aproximados (IV), de los que resulta su siguiente relación: Cu: Fe: S = 1: v1: 2 (V).

Se notara que la suma de la columna (I) no da el total del cien por ciento. Un análisis complejo dataría huellas de otros elementos, pero no tienen relación con la identificación del mineral como calcopirita.

En el caso de minerales más complejos, donde se indica la composición dando los porcentajes de los diversos óxidos que tiene, el procedimiento es el mismo, con la excepción de que en este caso se emplean los pesos moleculares de los óxidos, es decir, la suma de los pesos atómicos de sus elementos. Brax, al analizar un Berilio de Paavo, Finlandia, obtuvo el siguiente resultado.

	I		II		III	IV	V
	análisis %		pesos atómico		relaciones de combinación		
SiO ₂	66,37	/	60,1	=	1,1043	5,846	6
Al ₂ O ₃	19,26	/	101,9	=	0,1889	1	1
BeO	14,01	/	25	=	0,5604	2,967	3
	99,64						

Estos óxidos se combinan en la siguiente relación: BeO : Al₂O₃ : SiO₂ = 3 : 1 : 6, del cual se obtiene para el Berilio la formula siguiente: 3BeO Al₂O₃ 6SiO₂ o Be₃Al₂Si₆O₁₈.

Composición porcentual. Una vez establecida la fórmula de cualquier mineral es posible calcular que porcentaje tendrá teóricamente de cada uno de sus componentes. El grado de pureza de un mineral se calcula fácilmente comparando su análisis con la composición porcentual teórica, calculando a partir de la formula generalmente aceptada. Volviendo otra vez a la calcopirita, cuya fórmula se ha calculado como CuFeS₂, podemos determinar su composición porcentual teórica averiguando que porcentaje de peso molecular total del mineral corresponde al peso de combinación de un componente dado, es decir,

Componentes	Pesos atómicos	Relación de combinación	Pesos de combinación	Proporción del peso molecular del mineral	Composición porcentual teórica
-------------	----------------	-------------------------	----------------------	---	--------------------------------

Cu	63,54	1	63,54	63,54 + 183,53	=	34,62
Fe	55,85	1	55,85	55,85 + 183,53	=	30,43
S	32,07	2	64,14	64,14 + 183,53	=	34,95
			183,53			100
			Peso molecular del mineral			

Preexistentes, filones metalíferos o cualquier otra clase de minerales de la corteza. Los ambientes magmáticos se caracterizan por temperaturas entre altas y moderadas, así como por una variación muy amplia de presión, minerales que la composición química es muchísimo más constante. Los ambientes metamórficos abarcan una amplia gama de temperaturas y presiones, pudiendo ser materiales rocas preexistentes de cualquier clase. Conviene siempre, cuando se estudia el origen de asociaciones de los minerales, encajarlos en uno de estos tres grupos sistemáticos principales de 1×10^{-8} ó 1×10^{-9} cm, es decir, alrededor de una diezmilésima de longitud de onda de la luz sodio.

Enlaces homopolar o covalente.

Entre los minerales hay pocos ejemplos de compuestos estrictamente homopolares. Se caracterizan por compartir uno o más electrones. Un átomo de carbono neutro tiene solamente cuatro electrones exteriores. En el diamante, cada uno de los cuatro está compartido con átomos vecinos, completando la capa exterior de electrones. Las formas dimorfas de ZnS, blenda y wurtzita, y la zincita ZnO, son otros ejemplos de este tipo de enlace. Tienen estructuras más densas que los tipos iónicos o metálicos, y es corriente una coordinación cuaternaria.

Debe aclararse que los últimos grupos de minerales descritos en enlace iónico, los que tienen radicales CO_3 , SO_4 , PO_4 , y SiO_4 , son ejemplos de intermedios entre enlaces iónicos y homopolares. Por ejemplo, el $CaCO_3$, aunque se compone de iones de Ca^{+2} y $(CO_3)^{-2}$, no hay el simple cambio de electrones tal como ocurre con el Na^+Cl^- , para formar el CO_2^{-2} los tres oxígenos deben compartir cuatro electrones recibidos del carbono y dos del calcio, como se ve en la formula $Ca^{+2}C^{+4}O_2^{-6}$. Donde compuestos tienen características mixtas iónicas y covalentes.

Estructuras moleculares: Pocos minerales tienen estructura molecular, aunque esto es muy común entre compuestos orgánicos. Los cristales de azufre rómbico están compuestos por moléculas de S_8 que forman un anillo fruncido. La senarmonitita, Sb_2O_3 , tienen moléculas fijas de Sb_4O_6 , cada ocho de las cuales están ordenadas en una celda cubica. EL As_2O_3 tiene una estructura similar. El grafito, tiene una estructura laminar, en la que una lamina se puede considerar como una molécula individual de extensión infinita.

El tipo de enlace de un cristal está muy relacionado con muchas de sus propiedades físicas, tal como la dureza, punto de fusión, solubilidad, índice de refracción y conductividad. Sin embargo, estas relaciones son demasiadas complejas para incluirlas en un estudio elemental.

Capítulo 3

Cristalografía

En general, la ciencia de la cristalografía incluye el estudio de las diferentes propiedades de los sólidos cristalinos; el carácter, disposición y clasificación de las superficies planas naturales observadas en los cristales, así como las leyes que gobiernan su crecimiento; y la determinación e interpretación de la disposición ordenada interna de los átomos.

Los elementos de simetrías son operaciones geométricas que determinan en los cristales la repetición de porciones geométricas y físicamente homogéneas. El grado de simetría por su parte, queda determinado por

el conjunto de los elementos de simetría comunes a todas sus propiedades. Conviene ante todo diferenciar entre la simetría aparente (**singonía**), que se deduce del examen de las formas geométricas externas que muestra un cristal en cuestión, y la simetría real (o simetría verdadera) que solo es reconocible después de someter al cristal a una serie de experiencias fisicoquímicas y que puede ser distinta de la simetría aparente. La simetría verdadera de un cristal es la mínima presente y es común a todas sus propiedades.

En los cristales se presentan tres elementos de simetría a saber: plano de simetría: que corresponde a un plano imaginario que divide el cristal en dos porciones simétricamente especulares (como la imagen reflejada en un espejo); eje de simetría: constituye una línea imaginaria que pasa a través del cristal, alrededor de la cual, al realizar este giro completo, repite dos o más veces el mismo aspecto y centro de simetría: punto interior del cristal que al unirlo con cualquiera de la superficie, repite, al otro lado del centro y a la misma distancia, un punto similar. Todas las redes cristalinas, igual como sucede con los cristales, que de hecho son la manifestación externa de la estructura de las redes, presentan estos elementos de simetría como consecuencia de su naturaleza. Si clasificamos los 230 grupos espaciales según los elementos de simetría que poseen, obtendremos 32 clases de simetría (cada una de las cuales reúne todas las formas cristalinas que poseen los mismos elementos de simetría), los cuales, a su vez, se agrupan en siete sistemas cristalinos: regular o cubico, tetragonal, hexagonal, romboédrica, rómbico, monoclinico y triclínico.

Subdivisiones de la cristalografía. Esta rama de la mineralogía se ocupa del estudio de los cristales y de las sustancias cristalizadas. Las diferentes ramas de la ciencia son: geometría, física, química, óptica, cristalografía estructural.

La cristalografía geométrica, como indica su denominación, describe las diferentes formas en que aparecen los cristales. Se llama también a veces cristalografía morfológica. Para reconocer y determinar rápidamente los cristales y minerales es preciso dominar los fundamentos de esta rama de la ciencia. Las relaciones que existen entre la forma del cristal y sus propiedades físicas y químicas se discuten en la segunda y tercera ramas de la cristalografía. La cuarta y quinta subdivisiones tratan de las propiedades ópticas y de la estructura de los cristales, respectivamente.

El estado cristalino:

Los minerales se presentan en estado sólido y, por lo tanto, es este estado de la mineralogía el que nos interesa primordialmente.

Formación de la materia cristalina:

La materia cristalina de forma de tres maneras principales. Una sustancia en estado gaseoso está compuesta por unidades, moléculas generalmente, en estado de continua agitación. Estas unidades están separadas por distancias relativamente grandes y tienen un rápido movimiento de vaivén en el espacio en el que están

contenidas. Al aumentar la temperatura, las moléculas adquieren mayor energía, se desplazan con mayor rapidez y están separadas entre ellas por distancias a la vez mayores. A medida que la temperatura desciende, las moléculas pierden energía, disminuye su velocidad y se van aproximando; al ponerse en contacto permanente con sus contiguas, pero conservando su orientación arbitraria, la sustancia deja de ser un gas y se convierte en un líquido. Si la temperatura sigue bajado, el movimiento disminuye llegando a casi cesar; tiene lugar al mismo tiempo el punto de congelación y pasado de este, quedan ordenadas en un modelo regular tridimensional. En la mayoría de los casos, estas unidades han variado algo y se encuentran en el sólido en estado de iones, átomos o moléculas parciales más bien como moléculas completas y son mantenidas en sus posiciones por unas más fuertes fuerzas químicas de enlace.

Un segundo modo de formación de la materia cristalina es por sublimación. En este proceso, la sustancia pasa directamente de un estado gaseoso, muy desordenado, al estado sólido, muy ordenado, sin pasar por el estado líquido intermedio. Un buen ejemplo de esto, es el de los vapores calientes de azufre al encontrar una superficie fría sobre la que se condensan directamente al estado de azufre cristalino.

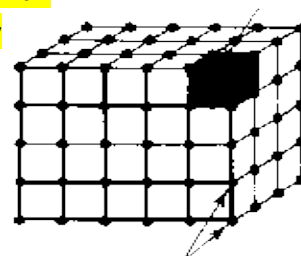
También se obtienen cristales a partir de una solución sobresaturada. Cuando existe un número suficiente de moléculas de un disolvente para mantener separadas las partículas de la solución disuelta y en estado de desorden, no hay cristalización, pero al evaporarse el disolvente las partículas de cristales en torno a los cuales se acumulan las partículas del soluto con arreglo a un modelo ordenado, obteniéndose un producto verdaderamente cristalino. Este proceso es fácil de comprobar, basta ver en agua sal común o alumbre y dejar evaporar el agua. Se forman cristales de la sustancia disuelta que crecen al alcanzar el estado de saturación.

Son pocos los elementos que se encuentran libres en la naturaleza, pues la mayoría de los minerales están formados por la unión química de los átomos de dos o más elementos. Los átomos rara vez se presentan solos, pues por lo general se unen con otros semejantes o con los de otros elementos para formar moléculas, y aunque generalmente decimos que estas forman los elementos compuestos, rara vez existen como tales en el estado sólido o cristalino. Al formarse las sustancias cristalinas, como ya se ha dicho anteriormente, las partículas constituyentes quedan rígidamente ordenadas en el espacio, habiendo demostrado los estudios realizados que los componentes de los minerales son átomos, iones o moléculas parciales, pero rara vez moléculas completas.

El concepto de la naturaleza de las sustancias cristalinas sólo puede ser adquirido mediante el estudio de su estructura interna; las unidades que componen una sustancia determinada están dispuestas de una manera ordenada y definida, hecho que venía sospechando y que faltaba por probar hasta que en 1912 Friedrich, Knipping y Laue demostraron que los rayos X eran difractados por las masas cristalinas. Para este fenómeno pudiera tener lugar, era necesario que las sustancias cristalinas estuvieran formadas por minúsculas unidades dispuestas según el modelo periódico definido, con espaciamentos del mismo orden de magnitud que las longitudes de onda de los rayos X. Como cada ejemplar de una especie mineral daba siempre el mismo modelo de difracción de rayos X, se llegó a la conclusión de que una especie quedaba caracterizada por la disposición geométrica interna de las partículas que la constituían. Posteriores investigaciones debidas a W. H. Bragg, W. L. Bragg y otros que continuaron esta labor, indicaron que la estructura interna de la materia cristalina podía ser investigada directamente con los métodos de análisis por rayos X.

Redes espaciales. Todos los cuerpos cristalinos están formados por “puntos” dispuestos con arreglo a modelos espaciales definidos en los que cada punto puede ser considerado como el centro de gravedad de un átomo, ion o molécula parcial o completa. En un espacio, lo que rodea a un punto es idéntico en orientación y disposición a lo que lo rodea a otro punto cualquiera. Los modelos de puntos son llamados *redes espaciales* que pueden ser consideradas como extendiéndose indefinidamente en las tres dimensiones. Cada red espacial es un conjunto de unidades o celdas elementales cada una de las cuales contiene el menor número de unidades que determina por completo una red espacial como la representada por la figura 14 en que la celda unidad esta dibujada trazos gruesos.

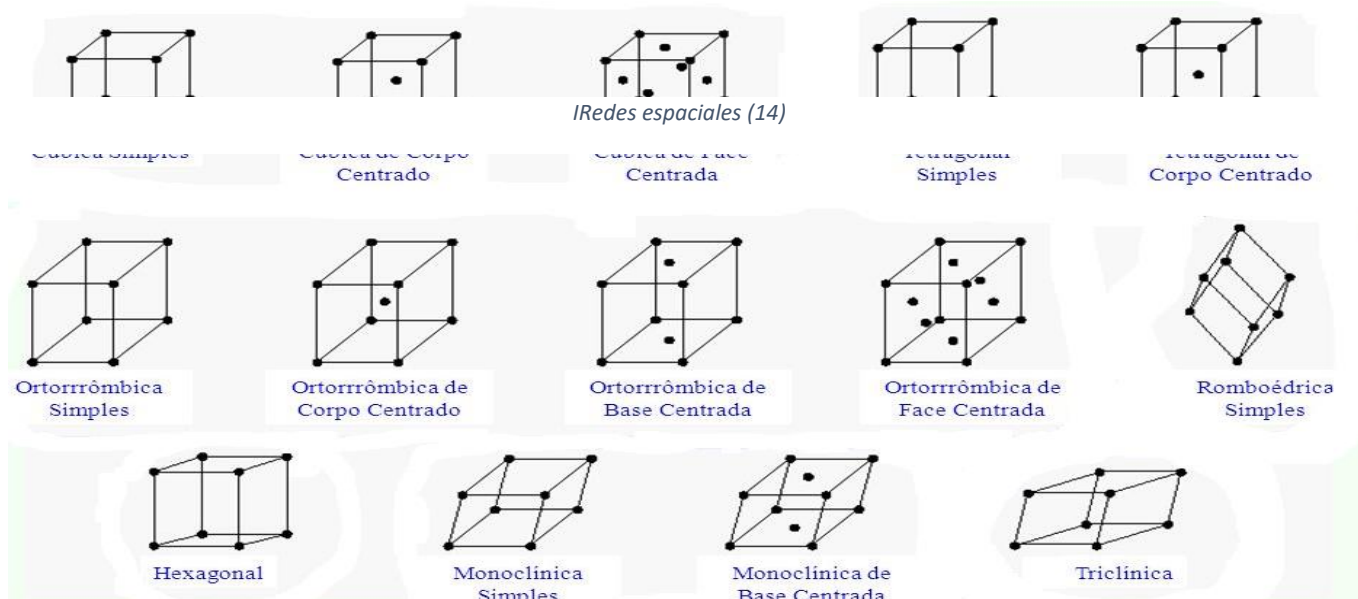
Celda Unitaria



Modelo de red espacial.

En las rejas tridimensionales, hay también conjuntos similares de planos paralelos equidistantes. Las caras cristalinas son siempre paralelas a dichos planos; por lo tanto, deben tener índices racionales. Igualmente para una reja, dada, se pueden fijar las relaciones angulares entre los planos. Se explican Así las leyes de los *índices racionales y de la constancia de los ángulos interfaciales*.

Ejes cristalográficos.



La forma cristalina eterna de toda sustancia depende de la disposición de sus átomos. Debido al gran número de sustancia químicas diferentes y de disposiciones estructurales, es posible una variedad casi infinita de formas de cristalinas. Para estudiar estas formas y definir la posición de las caras que aparecen en ellas, supondremos que por el centro ideal de cada cristal se entre cruzan unas líneas rectas. Estas líneas son los ejes cristalográficos. Su intersección forma la cruz axial. Cuando estos ejes son idénticos, cada uno se denomina con la misma letra a. las extremidades de los ejes se diferencian usando los signos más y menos. Cuando los ejes no son iguales, el que va de delante atrás se denomina eje a, el que va de derecha a izquierda, eje b, y el eje vertical se llama eje c.

Sistemas cristalográficos.

Aunque hay una gran variedad de formas cristalográficas, está demostrado que todas las formas pueden clasificarse en seis grandes grupos, llamados sistemas cristalográficos. Para agrupar en sistema las formas cristalográficas, nos sirven de gran ayuda en los ejes cristalográficos. La diferenciación de los sistemas por medio de los ejes se hace como sigue:

- **Sistema cubico.** Tres ejes idénticos que se cortan en ángulo recto. Los ejes se designan con las letras a, a, a .
 - En otras palabras: Tres ejes cuaternarios que pasan por los centros de las caras; 4 ejes ternarios que pasan por los vértices; 6 ejes binarios que pasan por los centros de las aristas; 3 planos de simetría que contienen los ejes cuaternarios; 6 planos de simetría que contienen los ejes binarios y centro de simetría.

En el sistema cubico hay tres rejillas espaciales posibles, el cubo simple (P), el cubo centrado en el cuerpo (I), y el cubo centrado en las caras (F). Hay cinco clases de simetría en el sistema cubico, $m\bar{3}m$, $m\bar{3}$, $4\bar{3}m$, 432 y $2\bar{3}$. Los grupos atómicos que tienen cualquiera de estas cinco simetrías pueden aparecer en cualquiera de las tres celdas cubicas, dando lugar a 15 grupos especiales, designados con los siguientes símbolos:

$Pm\bar{3}m$	$Pm\bar{3}$	$P\bar{4}m$	$P432$	$P2\bar{3}$.
$Im\bar{3}m$	$Im\bar{3}$	$I\bar{4}m$	$I432$	$I2\bar{3}$.
$Fm\bar{3}m$	$Fm\bar{3}$	$F\bar{4}m$	$F432$	$F2\bar{3}$.

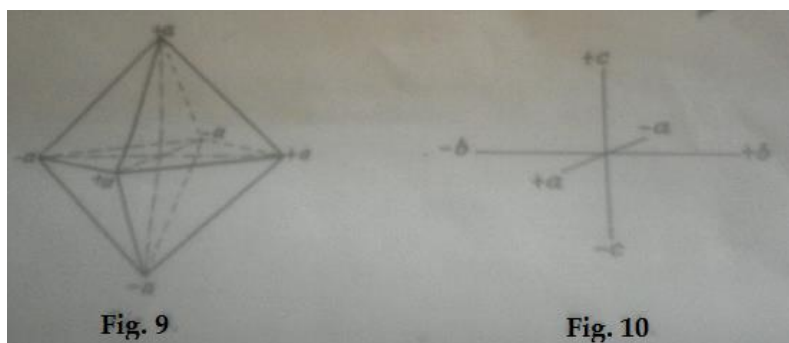
La primera parte del símbolo defina la celda en el espacio, y la segunda llamada a veces grupo de puntos o puntual, define la simetría del conjunto atómico. El armazón geométrico de un cristal (grupo espacial) se compone de un grupo de elementos de simetría (grupo puntual) repetida en una red tridimensional.

Realmente, Realmente existen más grupos espaciales cúbico que los 15 de la lista anterior, si un cristal tiene un plano de simetría, cada grupo atómico tendrá un plano similar. Pero, en vez de ser simple un simple de reflexión con los átomos en los dos lados como objetivo e imagen en un espejo, puede ser un plano de plano de deslizamiento, Los planos de deslizamiento reúnen la reflexión a través del plano. Combinada con un cambio de posición paralelo al plano. Este cambio, llamado traslación, normalmente es paralelo a uno de los ejes, e igual en amplitud a la mitad de la distancia entre rejillas en una dirección particular. Estos planos de desplazamiento se indican con las letras n, a, b, c o d , según la dirección de traslación. Así por ejemplo; además del grupo en el espacio $Pm\bar{3}m$, hay también $Pm\bar{3}n$, $Pn\bar{3}m$ y $Pn\bar{3}n$. Por añadidura, en vez de un simple eje de simetría manifestado por el desarrollo de la cara externa, un grupo atómico puede tener un eje helicoidal, en el cual se combina un giro angular con una traslación paralela al eje. Para un eje cuaternario, esta traslación puede ser $1/4, 2/4$ o $3/4$ de la dirección entre rejillas en la dirección del eje. Así pues, adentro del grupo espacial $P432$, existen también los $P4\bar{1}32$, $P4\bar{2}32$ y $P4\bar{3}2$ donde los símbolos $4\bar{1}, 4\bar{2}, 4\bar{3}$, indican ejes helicoidales. La introducción de todos estos grupos espaciales adicionales en las cinco clases de simetría en el sistema cubico aumentan a 36 el número total de grupos espaciales cúbicos. Cuando este procedimiento se lleva a los seis sistemas cristalinos, resulta un número total de 230 de grupos espaciales, como se ha visto anteriormente, la idea de 230 grupos espaciales se estableció basándose en fundamentos

teóricos. Esta teoría se expuso mucho antes que los rayos X demostraran experimentalmente que el orden atómico de los cristales, se amolda realmente a estos grupos espaciales.

- **Sistema hexagonal.** Formado por cuatro ejes, tres de los cuales son idénticos y se cortan en un plano horizontal en ángulo de setenta grados. Estos tres ejes se llaman a veces ejes laterales y se designan con las letras a, a, a . perpendicular al plano de los ejes laterales se encuentra el eje vertical, que puede ser mayor o menos que los ejes a . este cuarto eje se llama eje principal o eje c .
 - En otras palabras: Un eje senario que pasa por el centro del prisma y es paralelo a sus caras; 3 ejes binarios que pasan por los centros de las caras del prisma; tres ejes binarios que pasan por los centros de las aristas laterales; 1 plano que contiene todos los ejes binarios; 3 planos que pasan por las aristas del prisma; 3 planos que pasan por los centros de las caras y centro de simetría.
- **Sistema tetragonal.** Formado por tres ejes, dos de los cuales son idénticos, perpendiculares y en el plano horizontal. El eje vertical, c , es perpendicular a los ejes laterales a , y puede ser mayor o menor que ellos. El eje vertical se llama eje principal.
 - En otras palabras: Un eje cuaternario que pasa por el centro del prisma y es paralelo a sus caras; 2 ejes binarios que pasan por los centros de las caras del prisma; 1 plano que contiene todos los ejes binarios; 2 planos que pasan por las aristas del prisma; 2 planos que pasan por los centros de las caras, y un centro de simetría.
- **Sistema rómbico.** Formado por tres ejes distintos que se cortan en ángulo recto. Se designan a, b, c , como se ve en la Fig. 10.

En otras palabras: Un eje ternario que pasa por dos vértices del romboedro y coincide con su altura; 3 ejes binarios perpendiculares al eje ternario y pasan por los centros de las aristas; 3 planos que pasan por las aristas, y centro de simetría.



Sistema monoclínico. Tres ejes distintos, dos de los cuales (a, c) se cortan en ángulo oblicuo, siendo el tercer eje (b) perpendicular a estos dos.

En otras palabras: Un eje binario que pasa por el centro de dos aristas; 1 plano perpendicular al eje binario, y centro de simetría.

Sistema triclínico. Formado por tres ejes (a, b, c) todos ellos diferentes y que se cortan en ángulos diferentes. Solo cuenta con centro de simetría.

Relaciones axiales. La relación entre las longitudes de los ejes de los cristales de una sustancia dada es constante. Esta relación se llama relación axial. En el sistema cubico, donde los tres ejes son idénticos, la relación es $a : a : a$, ó $1 : 1 : 1$, y no necesita, evidentemente, ser expresada. En los sistemas hexagonal y

tetragonal, la longitud de eje vertical c es distinta de la de los ejes laterales a , todos iguales. En cada uno de estos sistemas se toma como unidad la longitud del eje a , y la relación de la longitud del eje c a la del eje a es característica de cada sustancia que cristaliza en estos sistemas. Por tanto:

Cuarzo (SiO_2), hexagonal, $a : c = 1 : 1,099$ ó $c : a = 1,099$.

Circón (ZrSiO_4), tetragonal, $a : c = 1 : 0,6404$ ó $c : a = 0,6404$.

En los sistemas rómbico, monoclinico y triclínico hay tres ejes de longitudes, a , b , c , se toma como unidad el eje b . por tanto, para el azufre, que pertenece al sistema rómbico, la relación es:

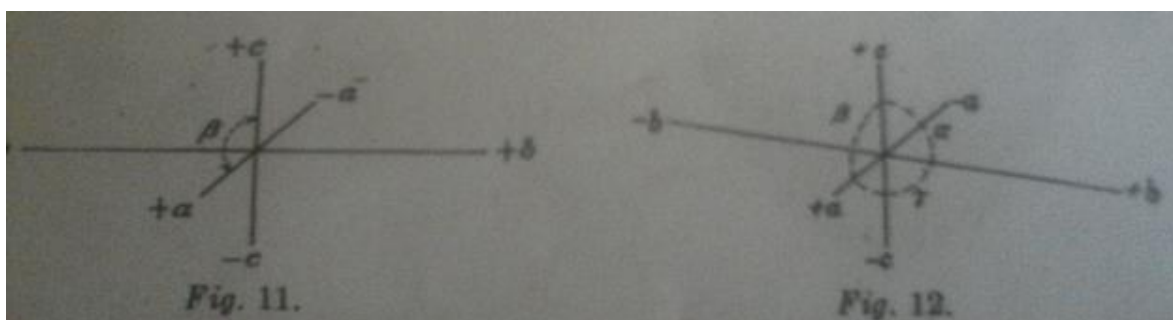
$$a : b : c = 0,8131 : 1 : 1,9034$$

En el sistema monoclinico, además de la relación $a : b : c$, es necesario indicar el ángulo β que forma los ejes a y c (Fig. 11.) luego para el yeso que es monoclinico, los valores son:

$$a : b : c = 0,4133; \beta = 98^\circ 58'$$

En el sistema triclínico, como los ejes se forman formando ángulos diferentes, es necesario también conocer el valor de estos ángulos, que están colocados como se ve en la Fig. 12, $b \wedge c = \alpha$, $a \wedge c = \beta$, $a \wedge b = \gamma$.

Aquí me quede el 17 de junio de 2016



Elementos de cristalización.

La relación axial y los ángulos que muestran la inclinación de los ejes se llaman elementos de cristalización. Por ejemplo, la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) que pertenece al sistema triclínico, tiene los siguientes elementos de cristalización:

$$a : b : c = 0,6330 : 1 : 0,5573$$

$$\alpha = 94^\circ 5'$$

$$\beta = 116^\circ 27'$$

$$\gamma = 88^\circ 7'$$

Si los ángulos entre los ejes cristalográficos son de 90° , no se señalan. En consecuencia, en los sistemas tetragonales, hexagonal y rómbico, las relaciones axiales constituyen ellas solas los elementos de cristalización desconocidos.

Parámetros y relación paramétrica. Para determinar la posición de la cara de un cristal, debe referirse a los ejes cristalográficos. La Fig. 13. Muestra la cruz axial del sistema rómbico. Los ejes a , b , c son desiguales y perpendiculares entre sí. El plano ABC corta a los tres ejes en los puntos A, B, y C, a las distancias $OA = a$, $OB = b$, $OC = c$. del centro O. las distancias OA, OB, y OC, se llaman parámetros, y la razón $OA : OB : OC$, razón paramétrica del plano ABC. Esta razón se expresa abreviadamente como $a : b : c$. difiere de la relación axial que hemos descrito más arriba, la cual de las longitudes numéricas de los ejes en función de uno de ellos, tomada como unidad.

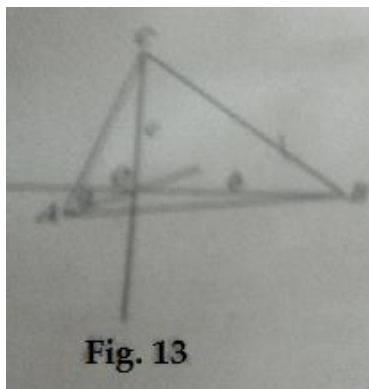


Fig. 13

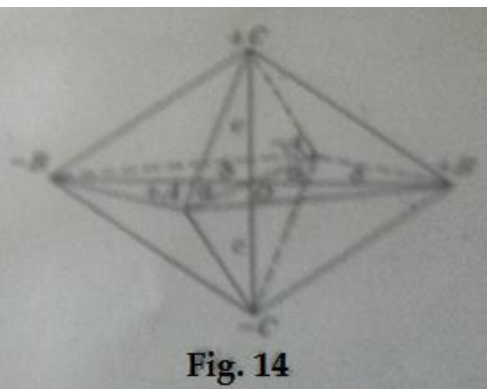


Fig. 14

Hay otros siete posibles planos alrededor de la misma cruz axial, que tiene iguales longitudes de parámetros que los del plano ABC (Fig. 14.) las razones simplificadas de tales planos son.

$$a : \bar{b} : c$$

$$a : b : \bar{c}$$

$$a : \bar{b} : \bar{c}$$

$$\bar{a} : b : c$$

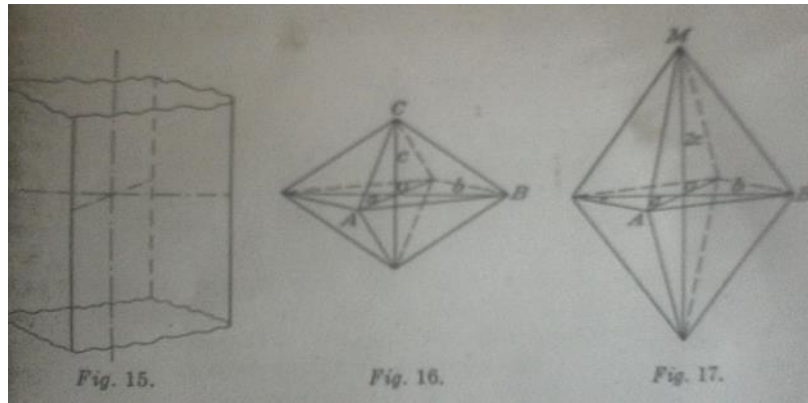
$$\bar{a} : \bar{b} : c$$

$$\bar{a} : b : \bar{c}$$

$$a : \bar{b} : \bar{c}$$

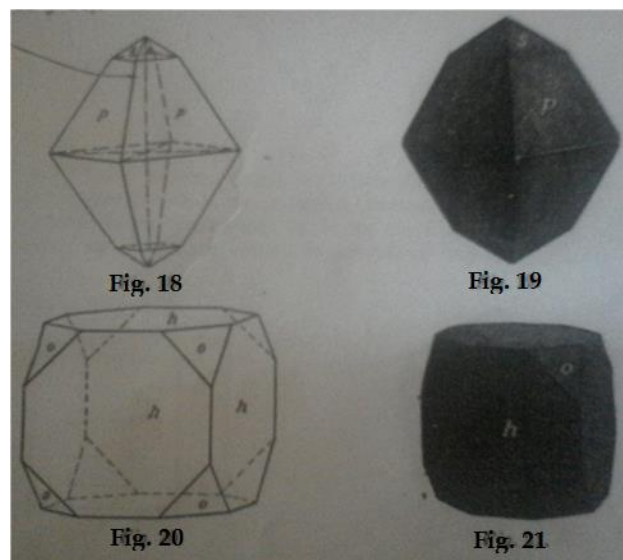
Estos ocho planos están colocados similarmente respecto a los ejes cristalográficos. Constituyen una forma cristalina denominada bipirámide rómbica. Se representa por la razón general $(a : b : c)$. el número de caras de una forma cristalina depende no solo de las intersecciones o parámetros, sino también de los elementos de simetría que posea el cristal (véase Pág. 16.). Toda forma que encierra un espacio se llama forma cerrada. La Fig. 14. Representa una forma cerrada. Aquellas formas que no cierran por completo un espacio, como la Fig. 15. Se llaman formas abiertas.

Formas fundamentales y modificaciones. Las figuras 16 y 17 representan dos formas cerradas del sistema rómbico. En la Fig. 16, cada una de las ocho caras corta los ejes a , b , y c , a distancias unitarias.



La razón o relación es, pues $(a : b : c)$ y la forma se denomina fundamental y bipyramide unitaria. La forma de la Fig. 17 difiere de la anterior en que si bien cada plano corta a los ejes a y b a distancias unitarias, en cambios, corta al eje c a una distancia doble de la unitaria, es decir, a la distancia $2c$. Por ello su razón paramétrica es $(a : b : 2c)$, y la forma se llama bipyramide modificada.

Combinaciones. En el cristal pueden presentarse simultáneamente diferentes formas, dando lugar a una combinación. Las figuras 18 y 19 muestra la combinación de dos bipyramides en un cristal de Azufre: $p = a : b : c$ (unitario) y $\delta = a : b : \frac{1}{3}c$ (modificado). Las figuras 20 y 21 representan las formas $o = \alpha : \alpha : \alpha$, y $h = \alpha : \infty : \alpha$ (véanse páginas 23 y 24).



Racionalidad de coeficiencias. Las caras de un cristal no son fenómenos arbitrarios superficiales. Dependen directamente de la constitución atómica interna del cristal, y sus posiciones posibles están perfectamente definidas. Las intersecciones de cada cara del cristal con los ejes resultan ser siempre múltiplos racionales de las unidades básicas axiales. En el sistema cubico, estas unidades son iguales, y la razón general puede escribirse $(n\alpha : n\alpha : m\alpha)$. En el sistema rómbico, la razón general es $(n\alpha : pb : mc)$. Otros sistemas cristalinos tienen razones similares. Los coeficientes n , p , y m siempre tienen valores racionales, ya sean enteros o fracciones sencillas. Nunca pueden tener valores irracionales, tales como $\sqrt{2}$, $2,6578\dots$, ó $3,1416\dots$ (π). Esta es la ley de los coeficientes racionales o de segmentos racionales. La explicación de este hecho se basa en la

constitución del cristal. Se puede comprender fácilmente viendo la Fig. 422 y el teto correspondiente de la Pág. 153, en el capítulo que trata de la estructura cristalina.

Símbolos. La relación paramétrica del plano ABM (Fig. 17) se escribe como se indica a continuación:

$$N\alpha: pb: mc$$

Pero como en este caso, $n = 1$, $p = 1$, $m = 2$, la relación se convierte en: $a: b: 2c$

Sin embargo, si los coeficientes tienen el valor $\frac{1}{2}$ $a: \frac{2}{3} b: \frac{4}{3} c$

Cuando esto se expresa en función de b , se obtiene,

$$\frac{3}{4}: b: 2c$$

De esta forma, la relación,

$$n\alpha: b: mc$$

Expresa el símbolo o relación más general para formar que pertenezcan a los sistemas rómbico, monoclinico y triclinico. En el sistema tetragonal, como los ejes α y b son iguales, este símbolo general se reduce a,

$$\alpha: n\alpha: mc$$

La Fig. 23 representa una forma, la bipirámide ditetragonal, cuyo símbolo es $\alpha: 2\alpha: \frac{3}{2}c$. En el sistema hexagonal hay tres ejes horizontales iguales, y la relación general es,

$$n\alpha: p\alpha: \alpha: mc$$

En el sistema cubico, los tres ejes son iguales, y el símbolo general resulta,

$$\alpha: n\alpha: ma$$

Por ejemplo, la relación $\alpha: \infty\alpha: \infty\alpha$, simboliza una forma del sistema cubico que se compone de seis caras, que cortan un eje y son paralelas a los otros dos. Dicha forma es un cubo. La relación $\alpha: 2\alpha: \infty\alpha$ representa una forma con 24 caras; cada cara corta un eje, a una distancia y se extiende paralela al tercer eje. El tetrahedro, Este sistema de notación cristalográfica se conoce con el nombre de sistema de Weiss. Estos símbolos son muy fáciles de comprender y muy adecuados para los principiantes.

Elementos de simetría

Los elementos de simetría son operaciones geométricas que determinan en los cristales la repetición de posiciones geométricas y físicamente homólogas. El grado de simetría por su parte, queda determinado por el conjunto de los elementos de simetría comunes a todas sus propiedades. Conviene ante todo diferenciar entre la simetría aparente (singonía), que se deduce del examen de las formas geométricas externas que muestra un cristal en cuestión, y la simetría real (o simetría verdadera) que solo es reconocible después de someter al cristal a una serie de experimentos fisicoquímicos y que puede ser distinta de la simetría aparente. La simetría verdadera de un cristal es la mínima presente y es común a todas sus propiedades. En otras palabras. Es una suposición muy plausible que cuando la cristalización se produce sin la existencia de causas perturbadoras, todos los átomos iguales deben producir acciones iguales a su alrededor. El examen de los cristales por medio de los rayos X demuestra que esta idea es aceptable y que los átomos iguales generalmente rodeados en la estructura del mismo modo (salvo para aquellos que se encuentren en la superficie). Estas repeticiones de la disposición son la causa de la simetría, que estructuralmente se refiere a la repetición de

las propiedades en direcciones distintas, y en la forma se expresan por la repetición de las caras limitantes y de los ángulos que ellos forman. Para definir esta repetición se parte a una posición determinada arbitraria y se fija cada punto del cristal por medio de tres coordenadas x, y, z , se dice que se ha realizado una coincidencia y nada permite distinguir la segunda posición de la primera.

Un cambio de posición puede ser un desplazamiento (traslación) o una rotación. Si se trata de un cuerpo finito, no se puede nunca llegar a una coincidencia con una operación de primer tipo.

Para darnos cuenta de cómo puede llevarse un cuerpo a coincidir consigo mismo por una operación de simetría, debemos hacer notar que en esta coincidencia no solo debe conservarse las tres coordenadas de los diferentes puntos, sino que también las distancias entre ellos. Estas distancias son de la forma

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

Es posible obtener las mismas distancias dando un signo opuesto a todos los x (o y o z), o también simultáneamente a todos los x e y (o x y z , etc.) o finalmente a todos los y, x y z . la primera operación se llama *reflexión* sobre un plano; la segunda, *rotación de 180°*, y la tercera, *reflexión sobre un punto* (inversión).

Las operaciones de simetría posibles para un cuerpo finito son, por consiguiente: rotación, reflexión e inversión y sus combinaciones, rotación + reflexión, rotación + inversión, (que da el mismo resultado que una rotación + una reflexión), reflexión + inversión (da el mismo resultado que una rotación) y rotación + reflexión + inversión (que equivale a la comparación de dos rotaciones, o sea a otra rotación).

Las leyes de simetría en un cristal se refieren a la distribución de ángulos y caras correspondientes. Por esta razón, la presencia de ejes, planos, o un centro de simetría llamados todos ellos elementos de simetría-- es de gran importancia para la correcta clasificación de un cristal. Solamente tenemos en cuenta aquí los elementos de simetría que son útiles para el reconocimiento de desarrollo geométrico de los cristales, Se hace necesario ahora exponer el concepto de simetría que tal como se aplica en cristalografía se refiere a la regularidad geométrica. Para describir las regularidades de forma de los cristales se emplean cuatro tipos principales de simetría.

Clases de simetría: Un cristal puede tener uno o más elementos de simetría o carecer por completo de estos elementos. Se puede demostrar geoméricamente que el número de combinaciones es limitado; resultan 32 combinaciones o clases de simetría y cada combinación posee una configuración especial (Hessel, 1830):

Para obtener este resultado se deben tener en cuenta los siguientes teoremas:

1º - Los elementos de simetría deben tener por lo menos un punto en común.

2º - La combinación de dos elementos de simetría no es permitida si su resultado produce una simetría imposible para un cristal, por ejemplo. Si se tienen dos planos de simetría que forman un ángulo de α° , el resultado corresponde a una rotación de $\frac{360^\circ}{2\alpha^\circ}$ alrededor de su recta de intersección; ahora bien, si α° es diferente de $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, o 90° , el eje resultante no será cristalográficamente posible (no es cristalonómico). Tampoco se puede combinar de un modo cualquiera los ejes de simetría: así, por ejemplo: se puede demostrar que si se combinan dos ejes de orden 6, resulta un número infinito de ejes de simetría, lo cual solo es posible para una esfera.

Las clases que tienen solo un eje de rotación se llaman *cíclicas* y se representan sencillamente por un número que expresa el orden del eje: 1, 2, 3, 4 o 6 (de acuerdo con la notación de Schonflies, que todavía utilizan muchos: C_1 , C_2 , C_3 , C_4 o C_6); 1 corresponde a la clase que carece de elementos de simetría o clase asimétrica.

Las clases que tienen un eje de rotación y cierto número de ejes binarios perpendiculares a él se llaman *diédricas*, y se representan por los símbolos: 222, 32, 422 y 622 (de acuerdo con Schonflies, D_2 , D_3 , D_4 y D_6). En las tres últimas clases, se dice que existe un eje principal. Las otras clases que no contienen solo ejes de simetría se llaman *endosféricas*, contienen siempre 4 ejes ternarios y se representan por las letras I y O.

Estas once clases que acabamos de enunciar carecen de elementos de simetría de segunda especie y se llaman *holoaxiales*.

1. **Simetría con respecto a un punto.** Si se trazan líneas que pasen por el centro de una figura geométrica desde puntos de un lado de la misma a otros semejantes y equidistantes del otro lado, se dice que la figura es simétrica con respecto a un punto o que tiene un centro de simetría.
2. **Simetría respecto a un plano.** Se dice que una figura geométrica es simétrica con respecto a un plano cuando cada arista, vértice, o cara de un lado tiene una arista, vértice o cara correspondiente al otro lado de ese plano; en otros términos un lado de la figura es la imagen especular del otro. Este término de simetría se llama *plano de simetría*.

La Fig. 40 presenta un cristal de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con un plano de simetría. Cada plano de simetría es paralelo a alguna cara, al cual es posible o real al cristal del sistema tetragonal con cinco planos de simetría. El plano h es el plano principal o axial horizontal. Los planos verticales son planos de simetría intermedios (β) o axiales verticales (α).

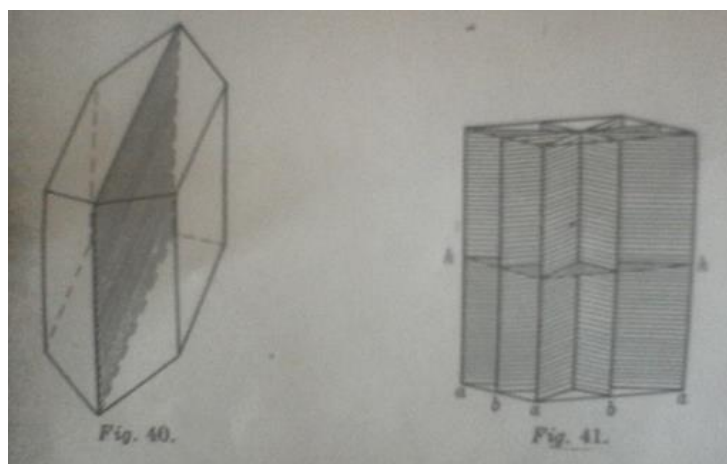
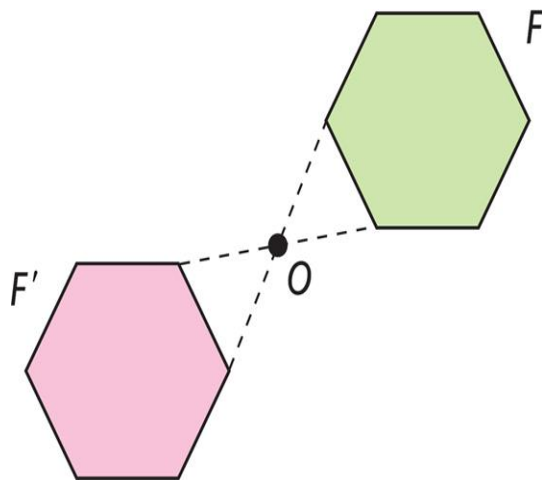
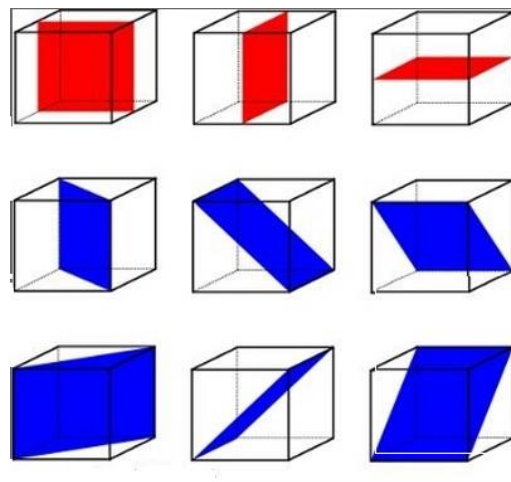


Fig. 40.



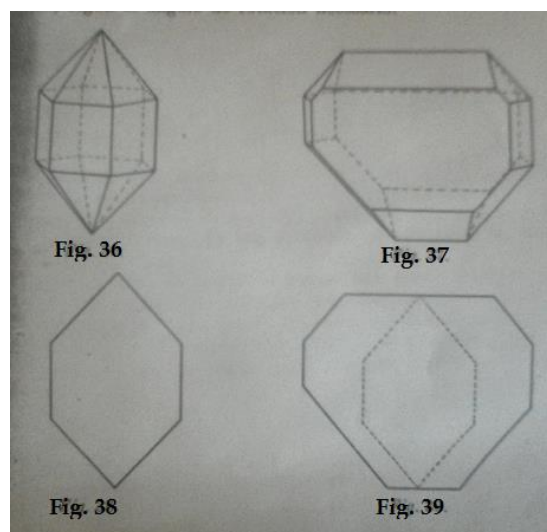
Centro de simetría. La línea FF' pasa por el centro O del cristal. puntos F y F' equidistan de O y ocupan posiciones equivalentes.



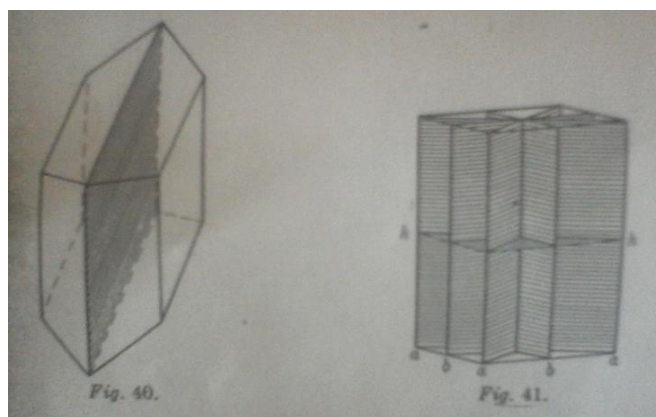
Plano de simetría. El plano de sombreado divide al cristal en dos mitades iguales pero opuestas. Una mitad es imagen especular de la otra mitad.

Los

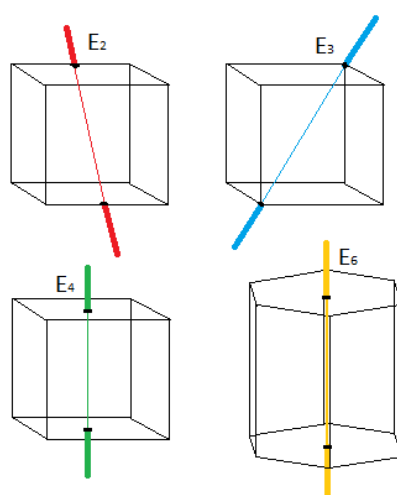
3. **Simetría respecto a una línea.** Cuando el curso de una rotación completa en torno a un eje, una figura geométrica repite su aspecto dos o más veces, se dice que es simétrica con respecto a una línea o que tiene un *eje de simetría*. Si la repetición tiene lugar cuatro veces en un giro de 360° , se dice que tiene un eje de simetría cuaternario. En los cristales son posibles otros ejes de simetría binaria, ternaria y senaria. El análisis matemático de las redes espaciales posibles ha demostrado que los únicos ejes de simetría posibles son los binarios, ternarios, cuaternarios y senarios, pues no puede lograrse una superficie continua acoplando pentágonos u octágonos.
4. **Ejes de simetría.** La línea alrededor de la cual puede hacerse girar el cristal de forma que después de una rotación angular definida tome una posición exactamente igual a la primitiva antes del giro, se llama eje de simetría. En principio en cristalografía son posibles cuatro tipos de ejes de simetría, según el ángulo de rotación necesario:



- Los ejes que requieren una rotación de 60° . Se llama de simetría séxtuple o hexagonal. Se les señala con el símbolo (hexágono). La Fig. 43 muestra un ejemplo de estos ejes.



- Si se requiere una rotación de 90° , el eje posee una simetría cuádruple o tetragonal. Estos ejemplos se representan con el signo (cuadrado), como en la Fig. 44.
 - Los ejes que necesitan una rotación angular de 120° son ejes de simetría triple y trigonal, y se pueden simbolizar por (triángulo). La Fig. 45 ofrece un ejemplo de este tipo de eje.
 - Un eje de simetría doble y binaria necesita una rotación de 180° . Se indica por (elipse) en la Fig. 44. Además estos cuatro tipos de ejes, hay una inversión. Estos ejes se llaman ejes de rotación inversión.
5. **Simetría compuesta.** Cuando por efecto combinado de una rotación en torno a un eje y una inversión con respecto al centro, una figura geométrica produce su aspecto, se dice que tiene un eje de inversión rotatoria. Si se hace girar 180° y se le invierte después, el eje es binario de inversión rotatoria. Otros ejes posibles de esta clase son los cuaternarios y senarios.



Ejes de simetría

Todos los elementos de la simetría compuesta excepto uno, pueden ser expresados rotatoriamente de otros elementos de simetría. Un eje monario de inversión rotatoria es lo mismo que un centro de simetría; uno binario equivalente a un plano de reflexión y uno ternario a una de simetría ternaria combinado con el centro, la inversión rotatoria senaria es lo mismo que un eje ternario con un plano

de simetría perpendicular al mismo. El eje de cuaternario de inversión rotatoria es irreducible; es más que un elemento binario simple, pero no obstante, no expresa una verdadera simetría cuaternaria.

Estas operaciones se pueden describir con ayuda de los *elementos de simetría*, que son: ejes de simetría (o eje de rotación), plano de simetría (o plano de reflexión), centro de inversión (o centro de simetría), ejes de rotación – reflexión y ejes de rotación – inversión.

Cuando al girar una figura un ángulo $\frac{360^\circ}{n}$ alrededor de una recta se obtiene una coincidencia, este eje se llama eje de orden n. un eje de orden n indica la presencia de la posición inicial y de n – 1 operaciones de simetría que producen la posición de partida. Un eje de simetría es uniterminal, o polar, si los dos extremos del eje corresponden a dos partes del cuerpo o figura que se pueden llevar a coincidir por otra operación de simetría: cuando existe este tipo de eje en un cristal, las caras se desarrollan de tal modo que es posible distinguir los dos sentidos del eje. Cuando existe un eje de rotación – inversión de orden n, se obtiene la coincidencia por medio de rotaciones de $2 * \frac{360^\circ}{n}, 4 * \frac{360^\circ}{n} \dots$, mientras que por medio de rotaciones $1 * \frac{360^\circ}{n}, 3 * \frac{360^\circ}{n} \dots$, se obtiene la coincidencia haciendo actuar un eje de inversión.

Se distinguen dos tipos de operaciones de simetría: las rotaciones presentes al primer tipo, mientras que las otras operaciones pertenecen al segundo tipo.

Los ejes de rotación pueden ser solo de orden 2, 3, 4 o 6. Esto se deduce a partir de la estructura reticular de los cristales¹², pero puede también demostrarse a partir de la ley de Hauy. Sea OM un eje de orden n perpendicular al plano T; el ángulo $\frac{360^\circ}{n} = \alpha^\circ$. Una arista cualquiera, no paralela al eje y de la dirección OA, se repite n veces por rotación: se define así una pirámide de n caras cuya intersección con el plano T produce un polígono regular de n lados.

De acuerdo con la ley principal de la cristalografía tendremos que: (Bucar imagen para aca: Apin.Jes.3)

$$\frac{OB}{OH} : \frac{OC}{OK} \text{ debe ser un número racional.}$$

Ahora bien:

$$\frac{OB}{OH} = \frac{BK}{CK} = 1 + 2 \cos \alpha,$$

Para los valores de $2 \cos \alpha$ que corresponden a cosenos racionales son solo $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 240^\circ, 270^\circ$ y 300° , o sea que n solo puede tener los valores 1, 2, 3, 4 o 6, y los ejes de repetición solo pueden ser de ordenes 2, 3, 4 o 6. Su notación es muy sencilla.

Los símbolos abreviados empleados por las cristalografías para designar los diversos elementos de simetría son los siguientes:

Elementos de simetría	Símbolos
Centro de simetría	C o $\bar{1}$
Ejes de simetría	A_2, A_3, A_4, A_6 o 2, 3, 4, 6

Plano de simetría	P o m
Ejes de inversión rotatoria	AP_2, AP_3, AP_4, AP_6 o $\bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{6}$

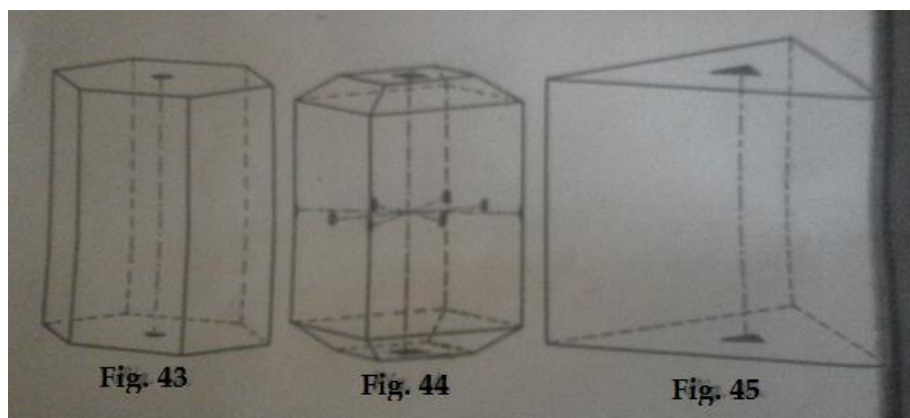
En los dibujos de los cristales y proyecciones estereográficas, los ejes de simetría se representan por los símbolos de la figura. Cuando se indican los planos de simetría, se somborean en los dibujos de cristales y se indican en las proyecciones estereográficas por círculos máximos de trazo lleno.

Nombre	Ejes de orden 2 binarios	Ejes de orden 3 ternarios	Ejes de orden 4 cuaternarios	Ejes de orden 6 senarios
Vista en planta y símbolos				
Vista en alzado y símbolos				
Actuación de los ejes	Repite elementos idénticos cada 180°	Repite elementos idénticos cada 120°	Repite elementos idénticos cada 90°	Repite elementos idénticos cada 60°

Símbolos de ejes de simetría.

Para describir las regularidades en los modelos espaciales se emplean estos mismos elementos de simetría.

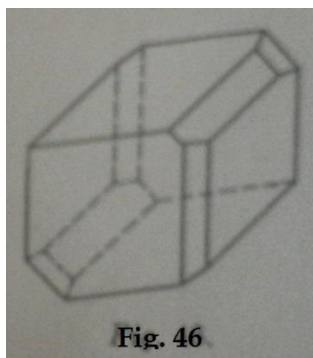
Centros de simetría. Se llama centro de simetría a un punto interior del cristal desde el cual pueden trazarse líneas rectas de forma que se encuentren a uno y otro lado del centro, y a la misma distancia, porciones semejantes del cristal (caras, aristas, ángulos, etc.).



Este centro lleva aparejada la inversión de las caras opuestas paralelas, Fig. 46. Puede no haber más elementos de simetría. Las formas cristalinas representadas en las Figs. 87 a 90, pág. 29, no tienen centro de simetría, pero poseen es planos diagonales de simetría, cuatro ejes de simetría trigonal y tres ejes de simetría binaria.

Posición angular de caras. Como los cristales se encuentran muchas veces rotos o deformados, se deduce que los elementos de simetría no son siempre fáciles de reconocer. La característica esencial es siempre posición

angular de las caras respecto a estos elementos de simetría, y no sus distancias relativas o sus tamaños. Un cristal con un plano de simetría, un eje doble y un centro de simetría.



Construcciones de las redes espaciales.

Las redes espaciales pueden ser construidas mediante una o más operaciones básicas. Suponemos que los puntos que componen una red son unidades o grupos de unidades semejantes y que por un proceso de repetición podemos reproducir un punto a partir de otro punto cualquiera.

Grupos espaciales

Haciendo uso de las diversas operaciones y combinaciones que quedan descritas pueden construirse un número infinito de redes espaciales diferentes, pero en la realidad este número es limitado por tener que satisfacer la condición estipulada en la definición de que el alrededor de cualquier punto a de ser idéntico en orientación y disposición al de otro cualquiera. Además, estamos limitados al hacer uso de los ejes de simetría, a los ejes binarios, ternarios, cuaternarios y senarios. Así, pues, el número de modelos tridimensionales es limitado y si tomamos un grupo representativo de unidades estructurales de cualquiera de estas redes dilatadas, presentara ciertos elementos de simetría. Estos grupos de unidades estructurales se llaman *grupos espaciales*, habiéndose demostrado que existen 230 grupos espaciales diferentes, cada uno de los cuales presenta una simetría singular. Al estudiar un grupo espacial hay que recordar que los elementos de simetría son lo característico y no las unidades estructurales individuales.

Definición de cristal.

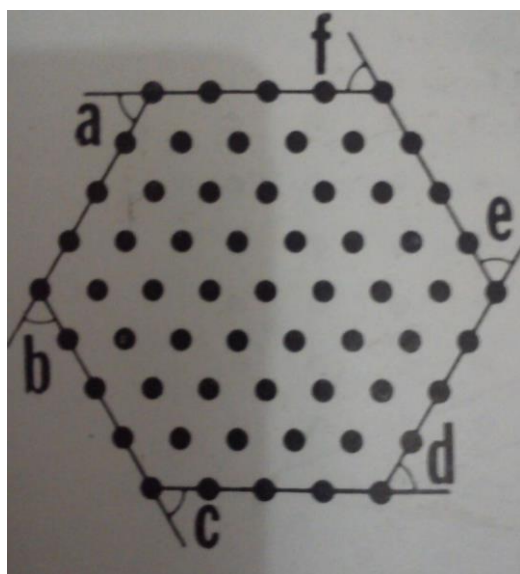
Al formarse una celda unidad durante el curso de la cristalización, se convierte en un centro de cristalización al que se suman otras unidades para dar una red ampliada que, mientras pueda crecer sin interferencias, dará un modelo geométrico regular limitado por superficies planas determinado por la disposición de los puntos

en la red espacial. La forma geométrica resultante, llamada cristal, es la expresión externa de la disposición interna ordenada de las unidades estructurales que la componen.

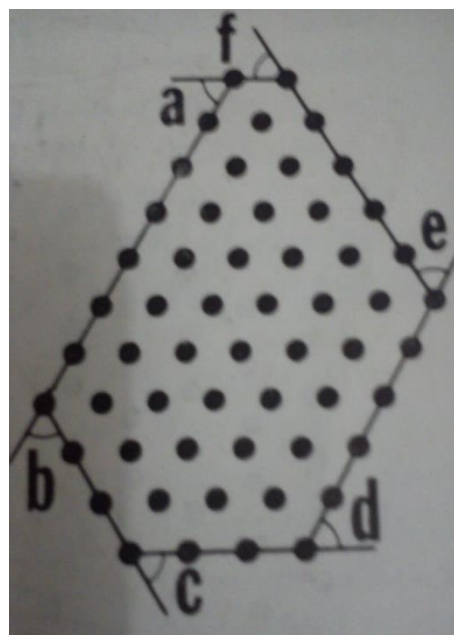
Las caras de los cristales se desarrollan siguiendo las superficies que tienen una elevada concentración de puntos y, en general, las caras dominantes son las de mayor densidad de puntos, y las menos destacadas son aquellas en las que la concentración de puntos es menor. Al multiplicarse en las tres dimensiones una celda unidad, se obtiene una representación muy ampliada de la disposición en el espacio de las unidades fundamentales de una variedad de materia cristalina.

Ley de la constancia de los ángulos interfaciales.

La disposición de los puntos en el espacio es la que rige las posiciones de las superficies planas limitadas o caras cristalinas. Cada especie mineral tiene una red característica. Los ángulos entre las filas de puntos tienen que ser constantes y, por lo tanto, los ángulos entre caras semejantes de todos los ejemplares de una especie mineral dada, serán esencialmente constantes. Esta es la ley de la constancia de los ángulos interfaciales fundamental, en cristalografía. Como los cristales pueden crecer más fácilmente en una dirección que en otra, se forman los llamados *cristales deformados*, pero, no obstante, en los de un mismo mineral, los ángulos interfaciales serán constantes como se aprecia en la figura.



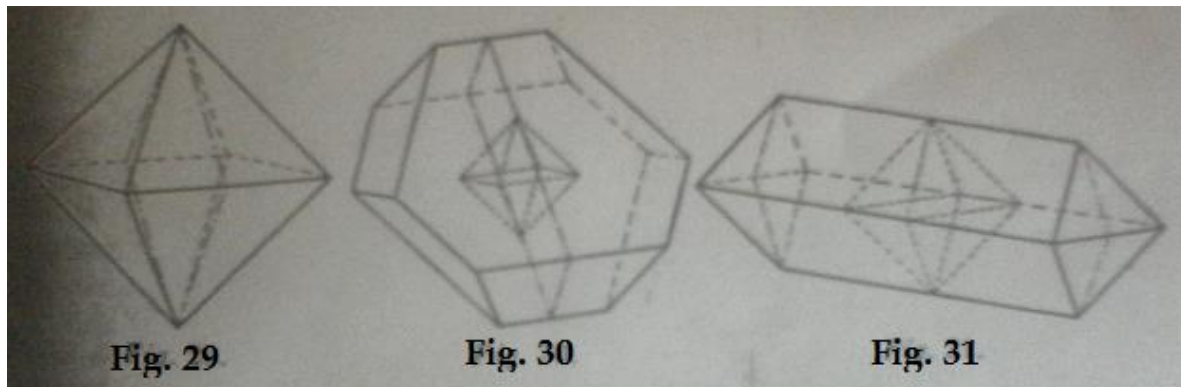
Modelo puntual de un hexágono regular. Todos los ángulos a, b, c, d, e y f valen 60° .



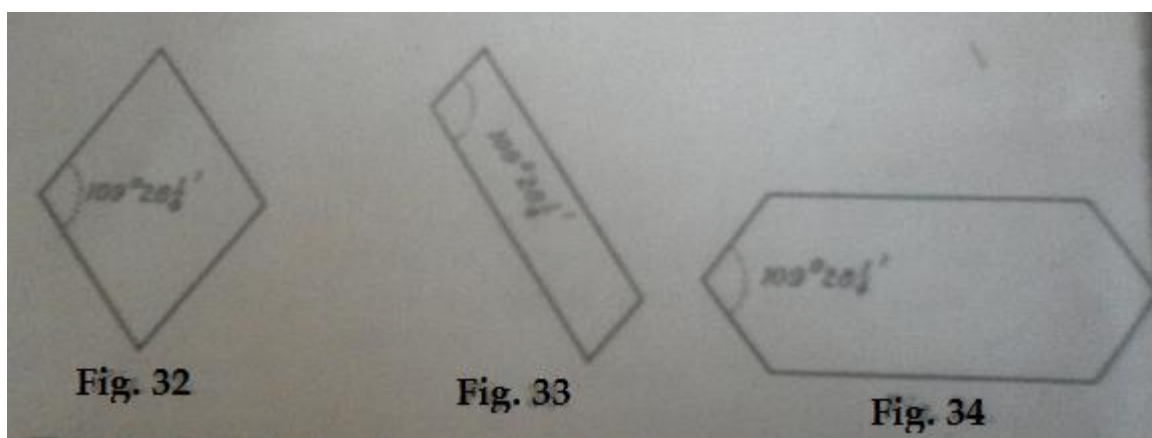
Modelo puntual de un hexágono deformado. Obsérvese que los ángulos interfaciales a, b, c, d, e y f no han variado y siguen siendo de 60° .

Dicho de otro modo, en general, los cristales resultan de la solidificación de una disolución, de una masa fundida o de vapor. Supongamos que se disuelve sulfato de aluminio amónico ($\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (alumbre amónico), en agua, y que se deje evaporar lentamente y que se deje evaporar lentamente la disolución. Cuando el sulfato empieza a cristalizar, se nota que, en su mayor parte, los cristales están limitados por ocho superficies planas. Si estas superficies son todas del mismo tamaño, es decir, desarrolladas igualmente, los cristales serán como se representa en la Fig. 29. Dicha forma se llama octaedro. El octaedro está limitado por

ocho triángulos de lados iguales. El Angulo formado por dos superficies o dos caras adyacentes cualesquiera es el mismo, o sea, $109^{\circ}28'1/4''$. Sin embargo, la mayoría de los cristales se ve que las diversas caras se han desarrollado desigualmente, dando lugar a formas similares a las representadas en las Figs. 30 y 31. En las Figs. 32 y 34 se representan correspondientes secciones transversales de estas formas, y se ve claramente que, aunque ha cambiado el tamaño de las caras, y por tanto, los lados de las figuras correspondientes, permanece constante el ángulo formado por las caras adyacentes, $109^{\circ}28'1/4''$. Se dice que estas formas del octaedro, se han deformado o desfigurado. La deformación es bastante corriente en todos los cristales,



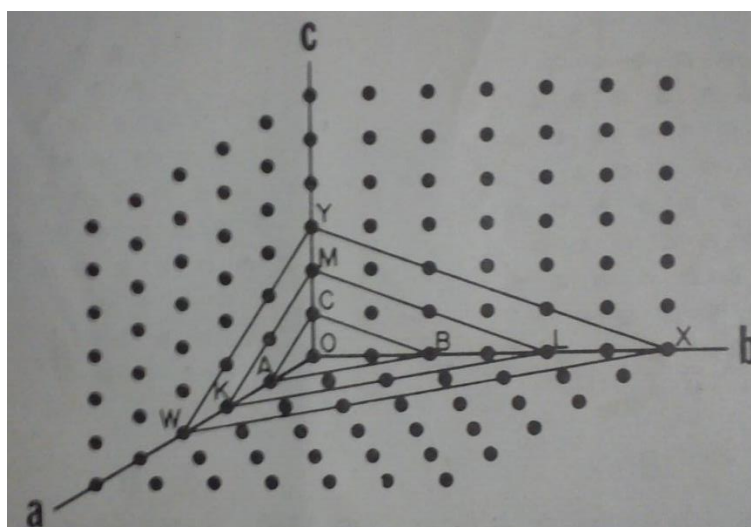
Prescindiendo de su composición química, Nicolaus Steno, físico y licenciado en ciencias naturales danés, fue el primero que mostro que los ángulos formados por caras correspondientes en los cristales de cuarzo permanecían constantes, con independencia de su desarrollo. Las Figs. 36 y 37 representan dos cristales de cuarzo, y dos secciones transversales correspondientes de los símbolos. Esta constancia de ángulos entre caras se aplica no solo al cuarzo, sino también a todas las sustancias cristalizadas, es muy fundamental que se puedan enunciar como sigue: medidos a una misma temperatura, los ángulos correspondientes de cristales de la misma sustancia permanecen constantes sin tener en cuenta el tamaño o forma del cristal.



Ejes de referencia.

Del resumen de las redes espaciales se deducen otros conceptos adicionales importantes. Con el fin de tener una norma para designar la posición de las caras en los cristales se emplean líneas de referencia. La situación de las caras de los cristales se emplea líneas de referencia. La situación geográfica de un plano sobre la superficie de la tierra se fija por medio de un sistema de líneas de referencia llamadas meridianos y paralelos. En los cristales, las caras se refieren a tres o cuatro líneas o ejes que pasan por un punto común a todos ellos: el centro del cristal, y que no tienen que necesariamente estar en un mismo plano. La posición de una cara puede ser clasificada con relación a tres ejes, existiendo en los cristales ciertas direcciones más adecuadas que otras y que son generalmente, paralelas a las aristas de la celda unidad, lo que equivale a decir que son paralela a las aristas de las caras posibles de los cristales. Estas líneas de referencia se llaman *ejes cristalográficos*.

Como regla general, los ejes se escogen de acuerdo a las siguientes condiciones.



Modelo puntual rómbico. Oa, Ob, Oc son los ejes cristalográficos. ABC, KLM, WXY representan una cara posible en tres fases de su desarrollo.

1º- se toman siempre a direcciones paralelas a aristas existentes o posibles del cristal o (dicho de otro modo) se escogen como planos fundamentales cuatro caras, existentes o posibles en el cristal, que formen un tetraedro (ley principal de la cristalografía)

2º - El sistema de ejes cristalinicos, tanto en lo referente a sus direcciones como a sus longitudes, se relacionan con la simetría del cristal, y no se hace ninguna distinción entre las direcciones positivas o negativas de los ejes.

En la mayoría de las clases cristalinicas es posible, sin considerar las caras del cristal, escoger el sistema de ejes *a priori*. Según los elementos de simetría existentes: en las clases m , 2 y $2/m$ solo se pueden fijar parcialmente los ejes; en las clases 1 y $\bar{1}$ no es posible escoger los ejes de acuerdo con la posición de los elementos de simetría, ya que no existe ningún eje ni ningún plano.

Para demostrar esta afirmación hacemos uso de las siguientes propiedades:

1. A) los planos de simetría.
- B) los planos normales a los ejes de simetría son caras posibles del cristal.
- C) si m es un plano de simetría v_1 y v_2 son caras del cristal, existirán dos planos v_1' y v_2' , equivalentes,

producidos por reflexión sobre m . las intersecciones de $v_1 v_1'$ y de $v_2 v_2'$, son aristas posibles del cristal, están situadas en el plano y definen una cara posible que coincida con m .

D) si n es un eje de orden par y v_1, v_2 son caras del cristal no paralelas a él, existen dos caras v_1' y v_2' a 180° de v_1 y v_2 . Las aristas $v_1 v_1'$ y $v_2 v_2'$ definen una cara normal del eje. Si n es un eje de orden 3, esta ley no puede derivar de la ley fundamental de la cristalografía, pero se puede deducir a partir de la estructura del cristal.

2. A) los ejes de simetría.

B) las normales de planos de simetría son aristas posibles del cristal.

C) si n es un eje de orden par y r_1 y r_2 son aristas no paralelas a él, existen dos aristas r_1' y r_2' a 180° de r_1 y r_2 . Las caras definidas por $r_1 r_1'$ y $r_2 r_2'$ determinan una arista que coincide con el eje. Si n es un eje ternario, no es necesario, desde el punto de vista de la ley de los índices racionales, que este sea una arista a este plano y resulta un caso análogo al 1b.

D) si m es un plano de simetría y r_1 y r_2 son dos aristas no paralelas a este plano, por reflexión sobre m se obtienen dos nuevas aristas r_1' y r_2' . Las caras determinadas por $r_1 r_1'$ y por $r_2 r_2'$ definen una arista que coincide con la normal a m .

Solo hay 32 combinaciones diferentes posibles de elementos de simetría, denominados grupos puntuales que pueden ser referidos a disposiciones de ejes que se corten en un punto común. Considerando los cristales como formas geométricas regulares tridimensionales, la simetría externa de cualquier cristal debe corresponder, como así sucede, a uno de los 32 grupos puntuales. Esto constituye una base lógica para la clasificación de los cristales pudiendo ser considerados entonces cada grupo puntual como representante de una clase cristalografía.

Es conveniente aclarar aquí la diferencia existente entre el número de grupos espaciales y el de grupos puntuales. Ya se ha dicho anteriormente que variando la disposición de los puntos estructurales en el espacio es que variando la disposición de los puntos estructurales en el espacio es posible obtener 230 combinaciones diferentes de simetría. Los elementos de simetría son el centro, el eje, el plano de reflexión, el eje de inversión rotatoria, el eje helicoidal y el plano de reflexión deslizante. Estos dos últimos no son distinguibles en forma externa en los cristales del eje ordinario de simetría y del plano de reflexión, respectivamente. Como consecuencia de todo ello, cada grupo puntual o clase contiene un cierto número de grupos espaciales, de modo que los 230 están distribuidos entre las 32 clases cristalinas.

Grupos y subgrupos: en matemáticas se llama *grupo* una colección o conjunto de elementos (cantidades, operaciones) cuya característica principal es que el producto de dos de estos elementos es otro elemento del mismo conjunto.

En cristalografía, los elementos del grupo son las operaciones de simetría. Así, m y i representan cada uno una operación, un eje de orden n , $n - 1$ operaciones. Los elementos de simetría de cada clase cristalina forman un grupo finito; en estos grupos un punto se transmite por las operaciones del grupo en un conjunto finito de puntos. Esto implica que todos los elementos de simetría de una clase tienen un punto común (de aquí que estos grupos reciban el nombre de grupos puntuales). Un grupo puede comprender varios subgrupos; es decir, contener un conjunto de operaciones que forman ellas mismas un grupo. En la clase mmm , por ejem. Existe la identidad E (posición inicial) y siete operaciones: tres rotaciones 180° alrededor de los tres ejes A , B y C ; tres reflexiones según los planos de coordenadas, que son planos m , y una inversión. Un subgrupo de las operaciones de esta clase es el $mm2$, en el cual se encuentra la identidad E , una rotación de 180° alrededor de C y dos reflexiones. Las clases 222 , $2/m$, m , 2 , $\bar{1}$ y 1 son también subgrupos de mmm .

Se puede demostrar que las clases cristalinas son subgrupos de $m\bar{3}m$ o $6/mmm$ (o en ciertos casos de ambas). En cada sistema cristalino existe siempre una clase cristalina de la cual las otras clases del sistema son sus subgrupos; esta clase se llama *holoédrica*; las otras, de simetría inferior, son *meroédricas*. En el sistema hexagonal B la clase $\bar{3}m$ se puede considerar como holoédrica.

Dominios característicos. Un dominio característico es una porción del espacio (o de la superficie de una esfera de construcción) que, por la acción de las operaciones de simetría de la clase cristalina correspondiente, llena todo el espacio (o toda la superficie de la esfera) sin dejar huecos y sin recibir otros dominios.

La tabla indica la proyección estereográfica de las porciones de la superficie esférica que pueden ser elegidas como dominios característicos. Los dominios característicos son simuladamente congruentes o enancomorfos, según que puedan ser llevados a conducir por la acción de una operación de simetría del primero o del segundo tipo.

En cada clase, un dominio característico tiene una magnitud determinada, pero en ciertos casos sus límites pueden ser escogidos entera o parcialmente de un modo arbitrario (por ejem. Las clases 1 y 4). Los elementos de simetría deben siempre estar situados en el límite de los dominios.

Dentro de cada sistema cristalino, los dominios característicos de las clases meroédricas son dos o cuatro veces mayores que en la clase holoédrica. En el primer caso se dice que la clase meroédrica es *hemiédrica* y en el segundo que es *tetartoédrica*. Si las clases del sistema hexagonal B se consideran como meroédricas de $6/mmm$, el dominio fundamental (de la clase 3) es ocho veces mayor (ogdoedría).

Las hemiedrías pueden ser:

1. *Hemimórficas*, el eje principal es polar.
2. *Enancomórficas*, contiene solo los ejes de rotación de la holoedría y carecen de centro de inversión.
3. *Paramórficas*, solo se conserva el eje principal y el plano de simetría perpendicular a él. (En el sistema cubico se consideran tres ejes como principales.)

Mecánica del crecimiento de los cristales.

Volvamos a la figura anterior (modelo puntual rómbico); cualquiera de los tres planos en ella representados podría corresponder a una cara cristalina. El plano ABC podría representar la cara del cristal al comienzo de su formación; las KLM y WXY representan entonces la misma cara después de una o dos fases de crecimiento, respectivamente. Es importante comprender que el crecimiento tiene lugar por capas y que, como tal, es un proceso discontinuo. Durante el crecimiento, la cara primitiva salta a KLM al sumarse otra capa de puntos, después de KLM a WXY por el mismo procedimiento y así sucesivamente.

Tomemos sobre el eje O_a la distancia entre puntos comunidad de distancia en esa dirección. La distancia a que una cara corta a este eje tiene que ser siempre un múltiplo de la primera porque la cara crece a saltos de esa magnitud. Análogamente, O_c es la unidad de distancia vertical y la distancia a que una cara corta al eje O_c ha de ser siempre un múltiplo de esa misma unidad. Como puede verse, la unidad de distancia del eje O_b es la misma de O_b . En algunos cristales, la distancia unidad son iguales para los tres ejes; en otros, dos pueden ser iguales o todos pueden ser diferentes.

Coordenadas, parámetros y ley de racionalidad de los índices.

Las distancias reales a las que las caras cortan a los ejes cristalográficos, expresadas en una unidad de medida tal como milímetros o pulgadas, llaman *coordenadas*. Cuando dos caras de un cristal cortan los tres ejes cristalográficos, la posición de una de ellas puede ser expresada en función de la otra de un modo muy sencillo. Supongamos, por ejemplo, que una cara sea paralela a la que la corta los ejes a distancias unidad y sean 18, 22.5 y 40.5 mm las coordenadas medidas y 12, 30 y 35.5 mm las coordenadas de segunda cara. La posición de esta última con respecto a la primera puede ser obtenida dividiendo sus coordenadas por la de la primera: 12/18, 30/22.5 y 13.5/40.5. Para simplificar estas relaciones, cada una de ellas se multiplica por el factor que sea necesario para que la relación con respecto a un eje sea unidad. En este ejemplo, se multiplica por 3/2 los coordenadas de la segunda cara y las relaciones se convierten en 18/18, 45/22.5 y 20.25/40.5, o sea 1, 2, 1/2, que equivalen a 2, 4 y 1. Esta última expresión nos dice que la segunda cara corta en el eje *a* a dos unidades de distancia, al *b* a cuatro y a *c* a una, valores que se acostumbra a escribir como 2^a: 4^b: 1^c. Estas distancias relativas son denominadas *parámetros*. Cuando una cara es paralela a un eje, se considera que la corta en el infinito, por ejemplo, el parámetro de una cara paralela al eje *c* es ∞ *c*. sabemos que las posiciones de los puntos en redes espaciales determinan las caras cristalinas del cristal y que los puntos están en disposición ordenada periódica. Por lo tanto, no es de extrañar que *la cara de un cristal pueda ser siempre referida a la de la otra cara del mismo mediante relaciones que pueden ser expresadas por números enteros pequeños, rara vez mayor de 3*. Esta ley fundamental de la cristalografía se llama *ley de racionalidad de los índices*.

Índices de Miller.

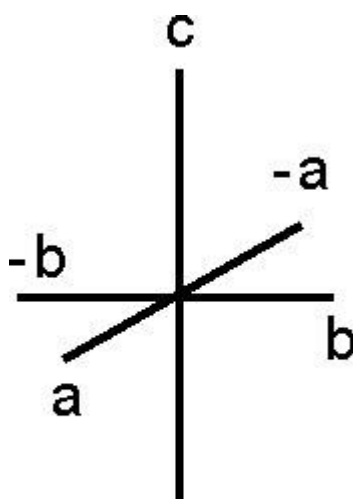
Los valores paramétricos no son muy empleados porque no se prestan fácilmente al cálculo cristalográfico. Actualmente, el sistema de notación de caras universalmente usado, es el propuesto por W. H. Miller a mediados del siglo XIX. Los *índices de Miller* se obtienen a partir de los parámetros, tomando los valores recíprocos de éstos y resolviendo los quebrados cuando sean necesario. A continuación damos algunos ejemplos de esta operación, haciendo notar que cualquier número dividido por ∞ es igual a cero.

Parámetros	Recíprocos	Índices de Miller
1a: 2b: 1c	1/1, 1/2, 1/1	212 (léase: dos, uno, dos)
2a: ∞ b: 1c	1/2, 1/ ∞ , 1/1	102 (léase: uno, cero, dos)
3a: 1b: 3c	1/3, 1/1, 1/3	131 (léase: uno, tres, uno)
1a: ∞ b: ∞ c	1/ 1, 1/ ∞ , 1/ ∞	100 (léase: uno, cero, cero)

Al emplear los índices de Miller hay que recordar siempre que los índices son los valores recíprocos de los parámetros o, dicho de otro modo, cuanto mayor sea el índice, menor es el parámetro. La cara fundamental tiene los índices (111); una cara con índices (211) cortará al eje *a* a la mitad de la distancia fundamental y no al doble de este valor.

Para indicar una cara de posición no definida se emplea el símbolo de Miller (hkl) cuando son desiguales los parámetros correspondientes a los tres ejes; si dos de ellos son iguales, se escribe (hhl). Para cristales con cuatro ejes cristalográficos el símbolo es ($hkil$).

La orientación de los ejes cristalográficos es casi la misma en todos los países. Cuando los tres ejes son desiguales, uno de ellos se orienta en posición vertical y se le llama eje c , otro se proyecta hacia el observador y es el eje a y el tercer eje b queda orientado hacia la derecha.



Ejes cristalográficos o de referencia. Cada eje está dividido en dos partes, una positiva y una negativa, como se indica con el signo.

Cada eje tiene dos extremos: uno positivo y uno negativo. Los extremos superior, frontal y derecho son positivos y el inferior, posterior e izquierdo son negativos. Si una cara corta los extremos positivos de los ejes a y c a la unidad de distancia y al eje b a una unidad de distancia negativa, sus parámetros serán la: $1a: -1b: 1c$ y sus índices de Miller ($1\bar{1}1$). Los índices de Miller son muy importantes por su aplicación casi universal en la cristalografía matemática y estructural.

Proyecciones estereográficas.

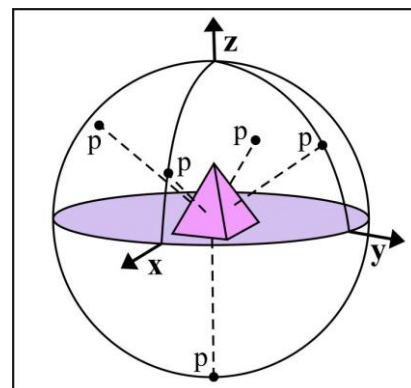
Las proyecciones cristalinicas consisten en una serie de métodos destinados a representar un cristal tridimensional en una superficie plana bidimensional.

Existen diferentes metodologías aplicables a fines distintos y cada una de ellas se efectúa según reglas definidas. Dentro de las más representativas se reconocen las siguientes: esférica, gnomónica y estereográfica.

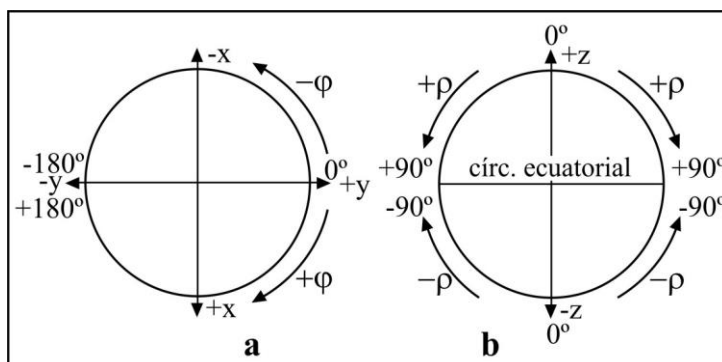
Proyección esférica

Se obtiene ubicando imaginariamente al cristal en el centro de una esfera, a partir de allí se trazan normales cada una de sus caras -que son radiales respecto a la esfera, fig. 1-, cada uno de los puntos de intersección de estas líneas y la superficie de la esfera se denomina polo.

El conjunto de todos los polos -cada uno de ellos representa una cara o plano- conforma la representación gráfica de la proyección esférica del cristal; cada uno de ellos puede quedar definido en el espacio por dos coordenadas polares, las cuales normalmente se denominan φ y p .



φ es el ángulo horizontal -fig. 2a-, y se mide sobre el plano ecuatorial; su valor es 0° en la emergencia del eje $+y$. A partir de allí toma valores positivos hasta $+180^\circ$ en sentido horario y negativos hasta -180° en sentido anti horario, ambas escalas convergen en $-y$. p es el ángulo vertical -fig. 2b-, y se mide sobre los diferentes círculos meridianos de la esfera de proyección; su valor es 0° en los puntos $+z$ y $-z$, a partir de cualquiera de ellos toma valores crecientes hasta 90° en el círculo ecuatorial, son positivos todos los valores de p correspondientes al hemisferio superior y negativos los del hemisferio inferior.



Proyección estereográfica

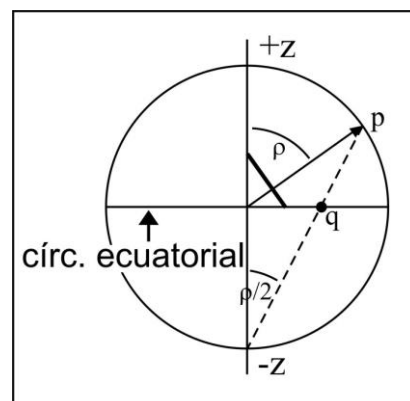
Constituye el sistema de proyección de cristales más utilizado. El plano de proyección lo constituye el círculo ecuatorial de la esfera, para lograr que todos los polos caigan dentro de éste área, se toman como puntos de vista a los puntos de emergencia del eje z ; específicamente $-z$ para todos los polos superiores y $+z$ para todos los inferiores.

Para lograr la representación de un polo en la superficie de proyección se opera de la siguiente manera -fig. 3- :

a. Se traza una normal a la cara que se desea proyectar y se la continúa hasta que intersecte a la superficie de la esfera.

b. Se une este punto de intersección -**p**, polo de proyección esférica- con el punto de emergencia -**z** si éste se sitúa en el hemisferio superior o con **+z** si se sitúa en el hemisferio inferior.

c. El punto de corte **q**, resultante de la intersección del segmento trazado en el ítem anterior con el plano ecuatorial -que contiene a los ejes **x** e **y**- es el polo de la cara en un sistema de proyección estereográfica. Como regla general para diferenciar a los polos del hemisferio superior de los del hemisferio inferior se marcan a los primeros con puntos y a los segundos con círculos.

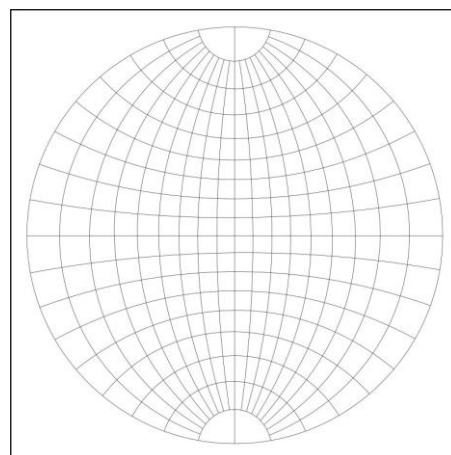


Red de Wulff

En una proyección estereográfica, la medición y el trazado de los ángulos correspondientes a las coordenadas polares de caras cristalinas, y la posterior ubicación de sus respectivos polos, puede verse facilitada mediante el uso de una plantilla circular denominada Red de Wulff. Sobre ella se pueden situar el conjunto de polos correspondientes a la proyección de un cristal y posteriormente leer correctamente los ángulos entre dos caras cualesquiera.

Para ubicar el polo relacionado a una cara cuyos valores de coordenadas polares se conocen, se procede de la siguiente manera:

- Se señala con una marca sobre un papel transparente el valor de φ sobre el círculo máximo -ecuatorial-.
- Se gira el papel transparente hasta hacer coincidir la marca anterior con un círculo vertical -NS o EW-.
- Se marca el valor correspondiente a p teniendo en cuenta que el valor 0° coincide con el centro de la red, este punto es el polo de la cara cuyas coordenadas polares son φ y p .



Formas.

Los objetos que coinciden por multiplicación producida por operaciones de simetría se llaman *equivalentes*.

Si la proyección de una cara cristalina (polo de la cara) está en el interior de un dominio característico, la cara se multiplica y origina lo que se llama una *forma general*.

Si el polo de una cara está en el límite de un dominio, constituido por un elemento de simetría, se origina una forma cristalina especial que contiene menos caras que la forma general (ya que sobre ella no actúa dicho elemento de simetría) y entonces cada cara tiene su simetría propia.

En las clases hemiédricas, la forma general posee la mitad de caras que la holoédrica del mismo sistema; en la tetartoedría, un cuarto y en la octoedría, un octavo. De aquí los nombres de estas clases. También se expresa esta identidad de otro modo: en una hemiedría la forma general holoédrica se desdoble en dos, cuatro u ocho formas correlativas.

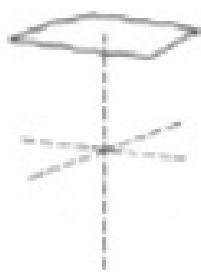
Formas cristalinas.

La palabra *formase* aplica en cristalografía al conjunto de una o más caras semejantes que parcial o totalmente constituyen el aspecto externo de un cristal. Una forma está compuesta por todas las caras exigidas por los elementos de simetría cuando una de ellas está presente, pudiendo ser considerada como un conjunto de caras simétricas. O sea, si una cara es paralela a un eje de simetría cuaternaria, este elemento exige la presencia de otras tres caras dispuestas simétricamente alrededor de ese eje. Estas cuatro caras son todo lo que puede ser exigido por ese y todos los demás elementos de simetría caso de estar presente una de estas

caras. En este caso, las cuatro caras constituyen una forma. Algunas formas limitan por completo una porción del espacio, a la manera como lo hace un cubo, y se llaman *formas cerradas*. Hay otras que no limitan espacio y son llamadas *formas abiertas*. Es evidente que una forma abierta no puede existir por si sola; tiene que combinarse con una o más formas para a completar el cristal. Los símbolos de Miller se aplican por lo tanto se aplican a las formas como a las caras; cuando se utilizan para designar una forma, se encierran en un doble paréntesis, por ejemplo ((110)). Algunos cristalografos emplean corchetes para los símbolos de las formas, como por ejemplo {110}. En los cristales se encuentran 48 formas diferentes, algunas de ellas exclusivas de un grupo o sistema en particular; otras son comunes a varios sistemas.

¿Presentan los minerales forma cristalina?

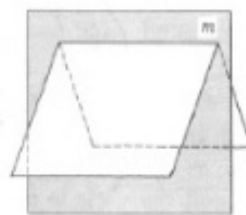
El término forma presenta un significado cristalográfico muy preciso: consiste en el conjunto de caras físicamente equivalentes de un cristal, cuya presencia viene condicionada por sus elementos de simetría. La forma del cristal, tal como se muestra a simple vista, no viene dada en general por una sola forma cristalográfica sino por una combinación de varias de ellas, más o menos desarrollada. Las caras posibles de un cristal determinado vienen fijadas por la disposición interna de los átomos y por lo tanto un aspecto determinado obedece a las relaciones entre las velocidades de crecimiento de las formas simples; contrariamente, la forma que muestra un desarrollo predominante entre todas las posiciones supone una adaptación del cristal a las condiciones imperantes y depende, no solo de la presión y de la temperatura actuantes en el momento de la cristalización, sino también del ambiente químico, de la presencia de tensiones orientadas, de las impurezas y asimismo del crecimiento contemporáneo de otros cristales. Por lo tanto, cristales pertenecientes a una misma sustancia pueden presentar formas dominantes distintas en diversas localidades, o incluso en una misma localidad pero a tiempos distintos.



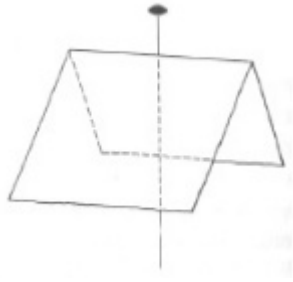
Pedión. Forma constituida por una sola cara.



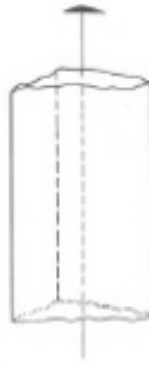
Pinacoide. Forma constituida por dos caras paralelas y opuestas respecto al centro.



Domo. Dos caras no paralelas simétricas con respecto a un plano.



Esferoide. Dos caras no paralelas simétricas con respecto a un eje de simetría binaria.

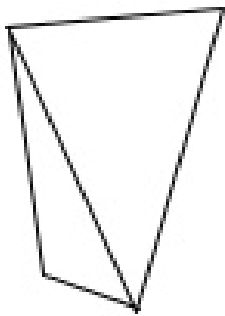


Prisma. Forma compuesta por 3, 4, 6, 8 ó 12 caras todas ellas paralelas a un eje y simetría con respecto al mismo. (en este caso es un prisma trigonal).

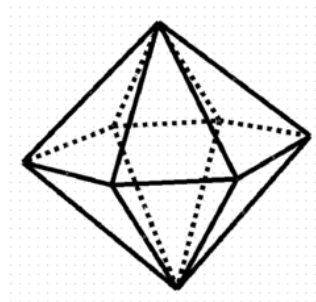


Pirámide. Forma compuesta por 3, 4, 6, 8 ó 12 caras no paralelas que se cortan en un punto en común. (en este caso es una pirámide tetragonal).

Todas las formas que quedan definidas son abiertas: como ejemplo de formas cerradas tenemos los biesfenoides y las bipirámides.



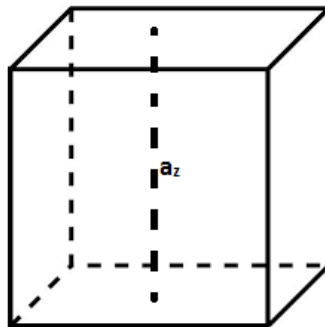
Biesfenoide rómbico.



Bipirámide hexagonal.

Zonas.

En los cristales sencillos o con varias caras se aprecia fácilmente que las líneas de intersección de varios o muchos pares de caras son todas paralelas entre si y entonces se dice que forman una *zona*. Una línea que pasa por el centro del cristal y a la que sean paralelas las aristas de intersección de las caras de una zona, se llama *eje de zona*. En el cubo las caras frontal y posterior derecha e izquierda constituyen una zona, estando indicado el eje de la misma, a_z , por la línea de trazos. En este cristal hay dos zonas, una de las cuales está indicada en la leyenda.



Las caras frontal, posterior y las dos laterales son paralelas al eje a_z y por lo tanto forman parte de una zona. Análogamente, las caras superior, inferior y dos laterales, son paralelas a una línea que pasa por el centro y constituyen una segunda zona. También es posible una tercera zona.

Posiciones relativas.

Las posiciones relativas suelen ser una de las tres siguientes:

1. Todas las caras y aristas del primer individuo son paralelas a las caras correspondientes de los otros. Se trata entonces en realidad de un solo cristal, ya que la estructura se prolonga de un modo homogéneo en los distintos individuos (asociación paralela).
2. Una arista determinada es paralela en todos los individuos, siendo arbitraria la posición mutua de las demás direcciones (fibra cristalina). Ejemplo: serpentina, asbesto y, especialmente, nemalita, una variedad de brucita.
3. La orientación de los individuos esta mutuamente determinada pero no es idéntica: se trata entonces de una *ley de macla*.

En casi todos los casos de cristales maclados, uno de los individuos puede llevarse a coincidir con el otro, bien por una rotación de 180° alrededor de un eje llamado *eje de macla (hemitropía)*, bien por reflexión sobre un plano llamado *plano de macla*. Si el cristal tiene centro de simetría, existe simultáneamente el plano de macla y el eje de macla. Estos dos elementos de simetría son cristalonómicos o están muy cercanos a otros cristalonómicos de índices sencillos. Se debe hacer notar que un eje de simetría par o un plano de simetría del cristal no pueden ser ni eje ni plano de macla, ya que los individuos obtenidos por su acción coincidirían con el de partida.

Dos individuos maclados pueden haber crecido uno junto al otro, de modo que el límite entre los dos sea una superficie plana, *plano de composición*, aunque este límite puede ser también irregular. En el primer caso se dice que se trata de maclas de *contacto*, y en el segundo, de maclas de *penetración*. Ocurre a menudo que el plano de macla y el plano de contacto coinciden.

Las maclas muestran a menudo ángulos entrantes y caras con estrías, en diferentes direcciones. Bajo el microscopio polarizante, presentan direcciones de extinción diferentes para cada uno de los individuos.

Si una ley de macla se repite más de dos veces en un conjunto de individuos maclados entre sí, se dice que existe una *macla repetida* o *macla múltiple*. Las maclas múltiples muestran a menudo (aparente o realmente) una simetría mayor que la de un solo individuo: se dice que son maclas *miméticas*.

Una macla presenta en el edificio cristalino dos o más orientaciones de la estructura. Si los individuos están formados por laminas superpuestas de modo que alternen las orientaciones (las láminas números 1, 3, 5, 7... tienen una orientación y las números 2, 4, 6... otra), se dice que se tratan de una macla *polisintética*.

Un eje de simetría tiene orden n cuando en una rotación de 360° se realiza n veces la coincidencia de los elementos limitantes equivalentes. Más adelante, cuando trataremos de la ley de las relaciones paramétricas racionales (párr... 18), demostraremos fácilmente que en los cristales no puede haber otras rotaciones que las de (360°), 180° , 120° , 90° y 60° . Por consecuencia, los valores de n son 1, 2, 3, 4 y 6. Los ejes se llaman, respectivamente, unitarios, binarios, ternarios, cuaternarios y senarios.

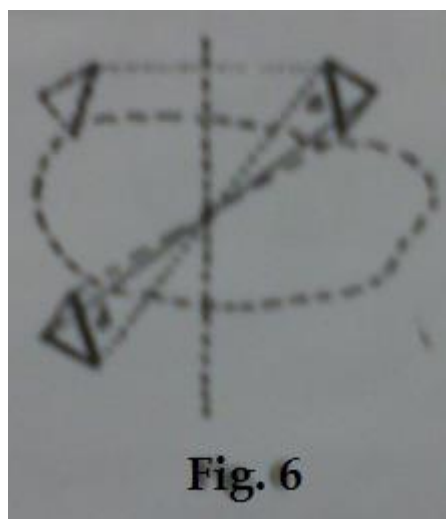


Fig. 6

Un plano de simetría divide al cristal en dos mitades, simétricas como un objeto y su imagen dada por un espejo plano. Todos los elementos limitantes están dispuestos por partes y los ángulos que forman las caras y las aristas correspondientes tienen como plano bisector el de simetría. Los planos de simetría pueden cortarse entre sí solamente bajo ángulos de 90° , 60° y sus mitades.

Un eje de rotación reflexiva no puede tener otros órdenes que los 2, 4 y 6; pero al mismo tiempo ese eje unitario, binario y ternario de simetría ordinaria. El giro de binario da por resultado, cuando no hay otros elementos de simetría, que para un elemento de cristal hay otro equivalente en la mitad opuesta de este. Esta propiedad puede en cierta manera comprenderse imaginando que hay en el centro del cristal un espejo puntiforme. Decimos entonces que el cristal posee centro de simetría (fig. 6).

Las 32 clases de simetría. Por combinaciones de estas operaciones de coincidencia resultan 32 clases de simetría. En la deducción geométrica, metódica, de estas posibles combinaciones, aparecen clases repetidas, como resultados de supuestos diferentes; pero, como es lógico, se toman una sola vez en consideración. Hessel, fue el primero en deducir, hace más de cien años, las 32 clases posibles de simetría cristalina. Y es muy interesante saber que se han encontrado en el mundo de los cristales representativos de cada una de estas clases y solo de ellas.

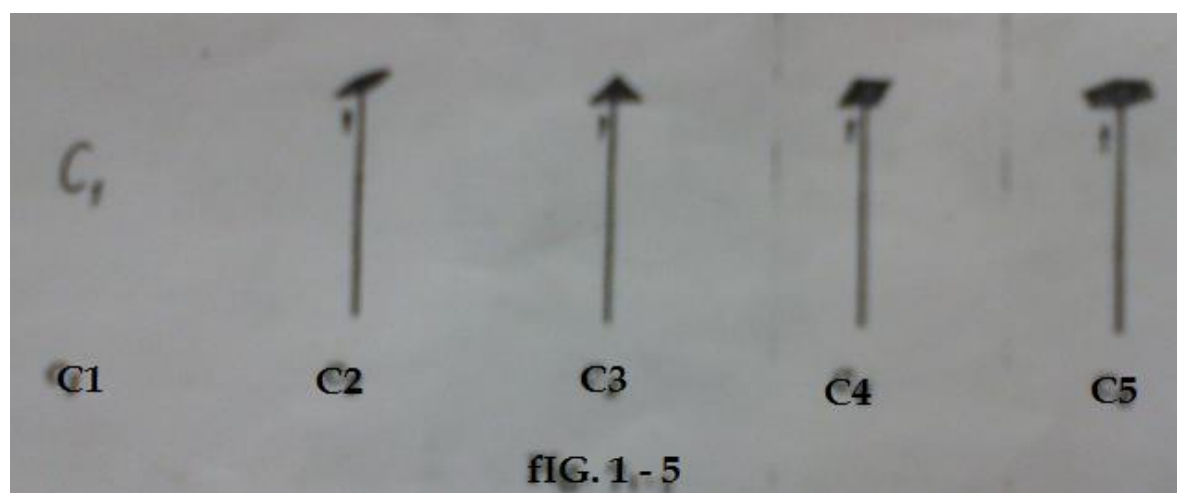
El conocimiento y la deducción efectuada en Marburgo por J. F. Hessel en 1829 (Gehler's Physik. Wörterbuch. Art. Krystall., 1830) y su gran trascendencia, no llegaron al acervo de los mineralogistas hasta que aparecieron los trabajos de Möbius (1849 y 1851), Bravais 1849 (Ostwald's Klassiker) y 1851 y Gadolin 1867 (Ostwald's Klassiker) y dieron nueva publicidad a la cuestión. A finales del siglo las investigaciones de V. Fedorow (1883), Curie (1884), Minnigerode (1886) y Schoenflies (1891) llevaron las demostraciones matemáticas del método deductivo al máximo de precisión y sencillez.

La deducción de las 32 clases de simetría puede efectuarse por un método constructivo consistente en ir añadiendo elementos de simetría, sin que de su consistencia resulten contradicciones de los principios fundamentales, hasta agotar todas las combinaciones posibles.

Este método simétrico, despreocupado de toda relación con los sistemas cristalinos, se apoya en lo fundamental de los antiguos trabajos citados, pero aprovecha también la sencillez expositiva de las investigaciones posteriores, es el procedimiento más radical, pues sale del marco de los viejos conceptos y de la terminología que la ciencia ya no emplea.

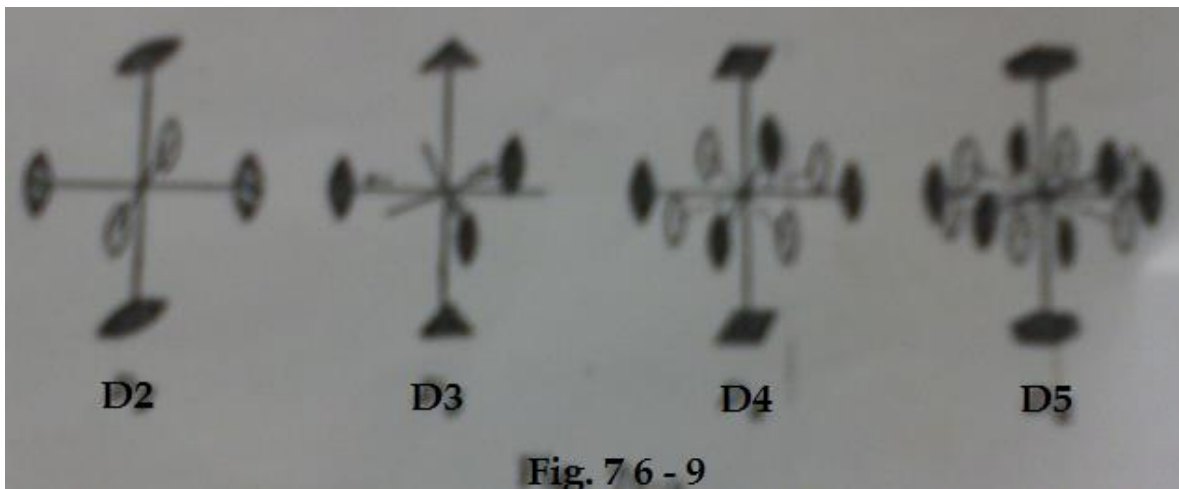
También cabe empezar por la deducción de los elementos de simetría, llegar a los subgrupos de cada uno de los sistemas. Este método analítico que ha seguido la ciencia; se debe de la nomenclatura generalmente usada, que exponemos a partir de párrafo 36.

De los múltiples caminos de deducción sintética daremos breve idea de uno, tomado de Niggli. Mediante un hexágono, un cuadrado, un triángulo y un biángulo representaremos los ejes de órdenes 6, 4, 3, 2; las flechas significan que el eje es polar, o sea, que las caras



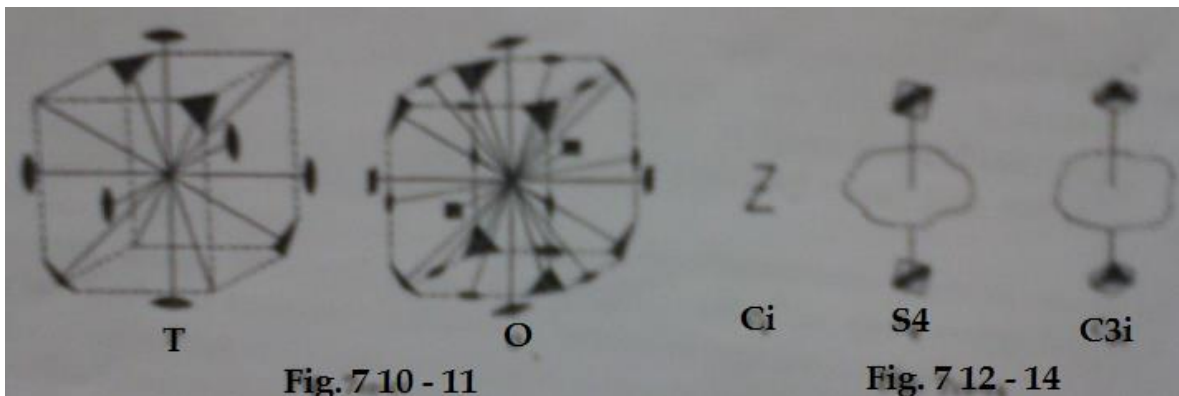
Son diferentes en uno y otro extremo del eje. Un triángulo metido en un hexágono y un biángulo en un cuadrado, señalan hexagiroides y tetragiroides, con Z indicaremos existencia de centro de simetría, y los planos de simetría se dibujan como planos de trazo continuo.

En la Figura 1-5 se representan los casos donde no hay más elementos de simetría que uno de los ejes unitarios, binarios, ternarios, cuaternarios o senarios; la clase C_1 puede considerarse simétrica porque todo cuerpo coincide consigo mismo mediante rotación de 360° alrededor de una recta. En la figura 7, 6-9, a cada una de las clases anteriores se ha

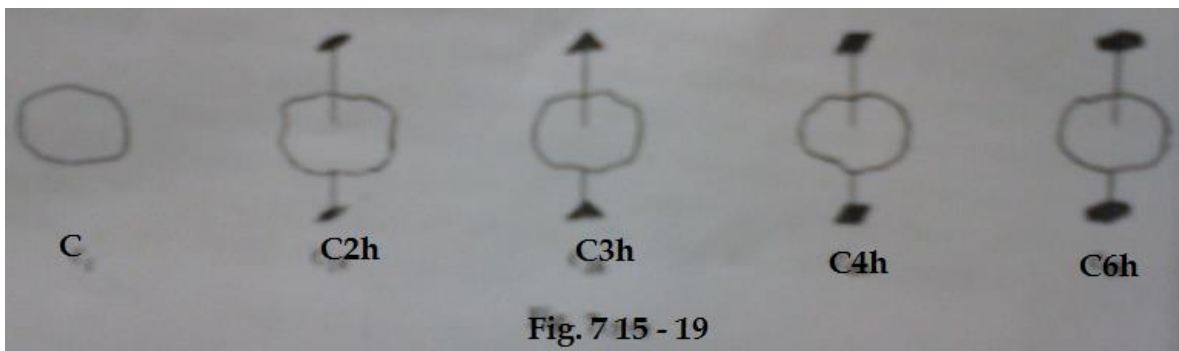


Añadido un eje perpendicular al eje 2,3, 4 y 6. El eje binario queda multiplicado por las operaciones de estos ejes; pero en los casos de los ejes 2, 4, 6 aparecen, por consecuencia de todos estos ejes, otros binarios, también perpendiculares al eje principal. Salvo en la clase D_3 en que los ejes 2 son polares, en las demás bipolares. Cada mitad de estos n ejes binarios perpendiculares al eje n , forma un subgrupo de ejes equivalentes, lo que se indica en las figuras por diferente rayado o manchado.

Las clases T y O aparecen cuando se combinan dos ejes ternarios. Este puede hacerse solamente bajo el ángulo de $109^\circ 28'$ o el 180° , pero este ultimo de la coincidencia de ambos



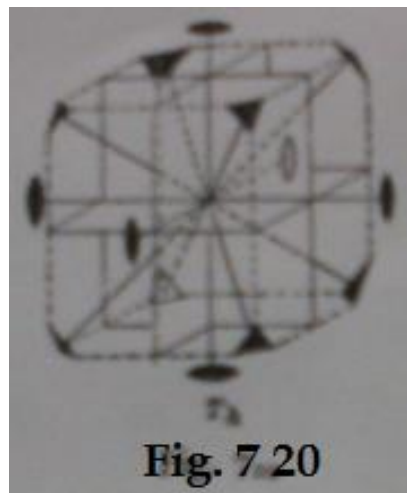
Ejes en una dirección, o, lo que es igual, produce un solo eje ternario bipolar. La existencia de aquellos dos ejes trae por consecuencia la de un tercer eje ternario y tres binarios en el



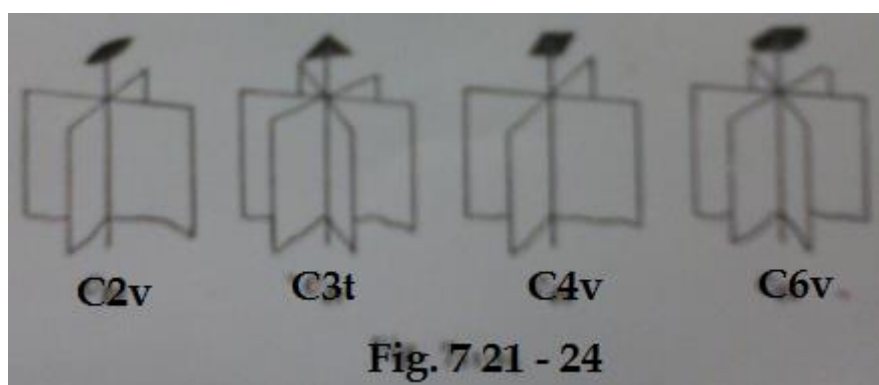
Caso de T, y de tres cuaternarios, y seis binarios en él, que se diferencia de anterior por haber partido de ejes ternarios bipolares, mientras que en aquel se han puesto polares (figura 7₁₀ - 11)-

Las tres clases siguientes (fig. 7₁₂ - 14) se caracterizan por tener solamente un giroide de orden 2, 4, 6.

A continuación se introducen ya los planos de simetría. Se empiezan por suponer que el plano es perpendicular al eje de las C; en la primera quedara solamente plano de simetría; en las el eje pasa a ser bipolar (fig. 7₁₅ - 19). En el estudio ya cristalográfico es costumbre orientar los cristales pertenecientes a las clases Cs y C_{2h} de modo que el plano de simetría sea vertical y anteroposterior; para no romper la analogía de la deducción se aquí horizontal.



clases
otras,
a las
coloca

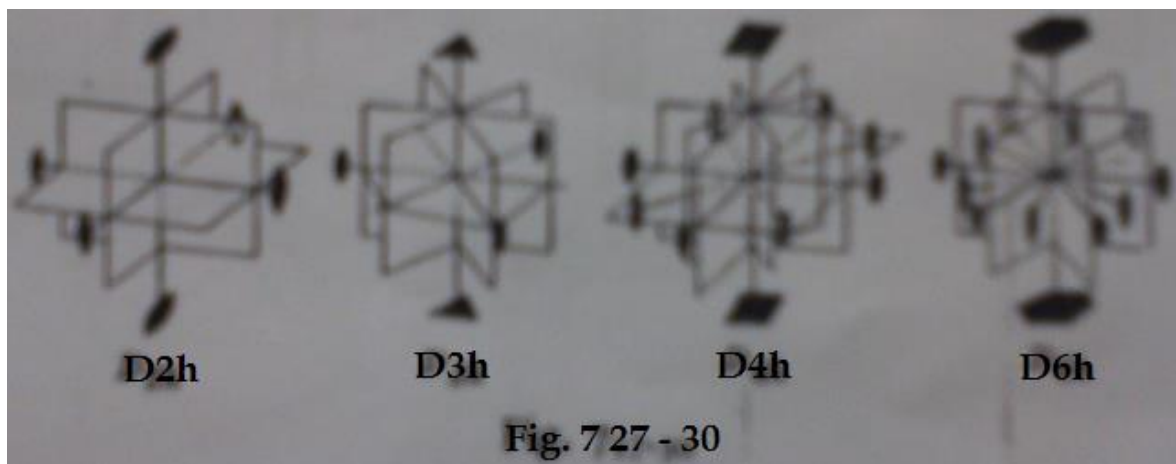


Suponiendo que la clase T (fig. 7₁₀) planos perpendiculares a los ejes binarios, obtenemos la Th (fig. 7₂₀).

Las figuras 7₂₁ - 24 muestran el resultado de colocar planos en la otra posición posible: pasando por los ejes de las clases C₂, C₃, C₄, C₆ y T. de esta combinación resultan otros elementos de simetría.

En las clases S₄ y C_{3i} derivan las D_{2d} y D_{3d}, haciendo, igualmente, pasar planos por los ejes de simetría (fig. 7₂₅ - 26).

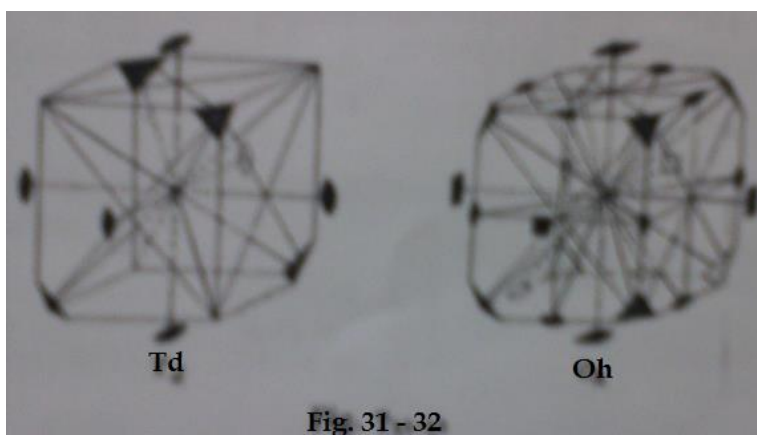
Las clases restantes contienen planos de simetría paralelos y perpendiculares a los ejes. La simetría en tal grado, por la coexistencia de otros elementos resultantes, que su representación



Grafica (como, por ejemplo, en la figura 7_{31 - 32}) es ya poco clara y comprensible

Todas las demás combinaciones que pueden suponerse dentro de los postulados cristalográficos, conducen a resultados que son los mismos registrados en las 32 clases expuestas: nada nuevo aportan.

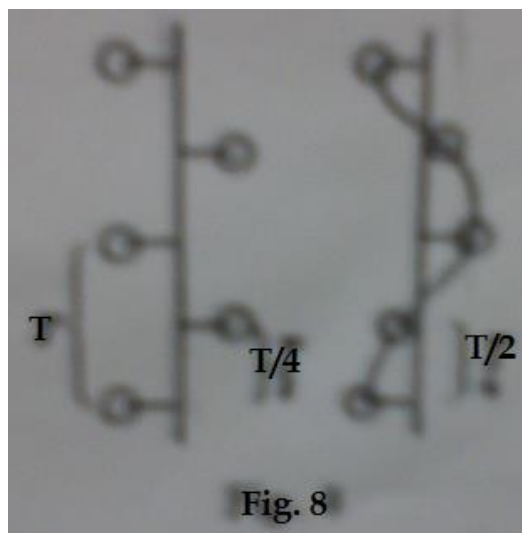
El estudio detenido y particular de las condiciones de las propiedades de las 32 clases de simetría se hace a partir del párrafo 36.



Sistemas cristalinos. Por sus evidentes analogías y para facilitar su estudio, 32 clases se reúnen habitualmente en seis o siete grupos, llamados, desde los primeros de esta ciencia, sistemas cristalinos; designación que modernamente se ha substituido por la de **singonias**, que da mayor precisión al verdadero concepto cristalográfico de estas agrupaciones de categoría superior, es posible prescindir de ellas cuando se trata de presentar sintéticamente las clases (pág. 14).

Los 230 grupos de operaciones de simetría la deducción de las 32 clases cristalinas se lleva a cabo con la rotación, reflexión y la combinación de ambas que hemos llamado rotación reflexiva.

En los cristales no hay señal externa, simplemente que las formas estén producidas por estas nuevas operaciones de simetría; mas, de largo tiempo observaciones de orden físico advertían la necesidad de admitir en la simetría de la estructura además de los elementos considerados para la deducción de las 32 clases, los ejes helicoidales y los deslizamiento. Más adelante mostraremos que la de las traslaciones que afectan a la estructura ($T/2$ y $T/4$ en la figura 8) están muy por debajo del nuestra capacidad visual, pues son del orden 10^{-8}



visible, de
ciertas
cristalina,
plano de
magnitud
cristalina
límite de
cm.

Mucho antes que se tuviera sospecha de las dimensiones reales de estas traslaciones, dedujo

Schoenflies en 1892 los grupos posibles que pueden formarse asociando las rotaciones, reflexiones, rotaciones reflexivas, rotaciones helicoidales y reflexiones traslativas, sin admitir, como es lógico, otros ordenes que distribuidos en número variable (de 1 - 28) entre las 32 clases cristalinas. La notación adoptada para ellos consiste en el símbolo de la clase a que pertenecen con un exponente que indica el lugar que les corresponde, por virtud del orden de la deducción, dentro de su clase. Nos alejaríamos excesivamente de nuestro propósito si entrásemos aquí en la derivación de los 230 grupos; pero si los presentáramos en una tabla, distribuidos por clases y singonias. Los exponentes de los símbolos literales expresan el número de grupos de aquella clase; así en la Oh hay 10 grupos, en la $D2h$ 28 grupos. $Oh^5 D2h^8$, son símbolos de otros tantos grupos de las respectivas clases.

La notación fue establecida por Schoenflies y no es, en verdad, muy lógica y comprensible. C, inicial de cyclisch, palabra griega escrita al modo latino, indica simetría cíclica; V, en cambio, Es la primera letra del termino alemán Vierer gruppe, que significa grupo cuaternario, lo que es completamente erróneo, porque no implica simetría tetratoganal; D se ha tomado de Diedergrupe, grupo diagonal; O de octaedro; T de tetraedro, también símbolo impropio, pues la clase Th no es tetraédrica; h expresa plano de simetría horizontal; u plano de simetría vertical; i con centro de inversión (centro de simetría); etc.

Las redes elementales. Frankenheim dedujo la posibilidad de 14 redes elementales, o redes de traslaciones con la misma simetría de las clases holoédricas de las singonias cristalinas. Por entrecruzamiento de cierto número de redes resultan redes complejas, o conjuntos reticulares, cuya simetría es la de los 230 grupos de operaciones.

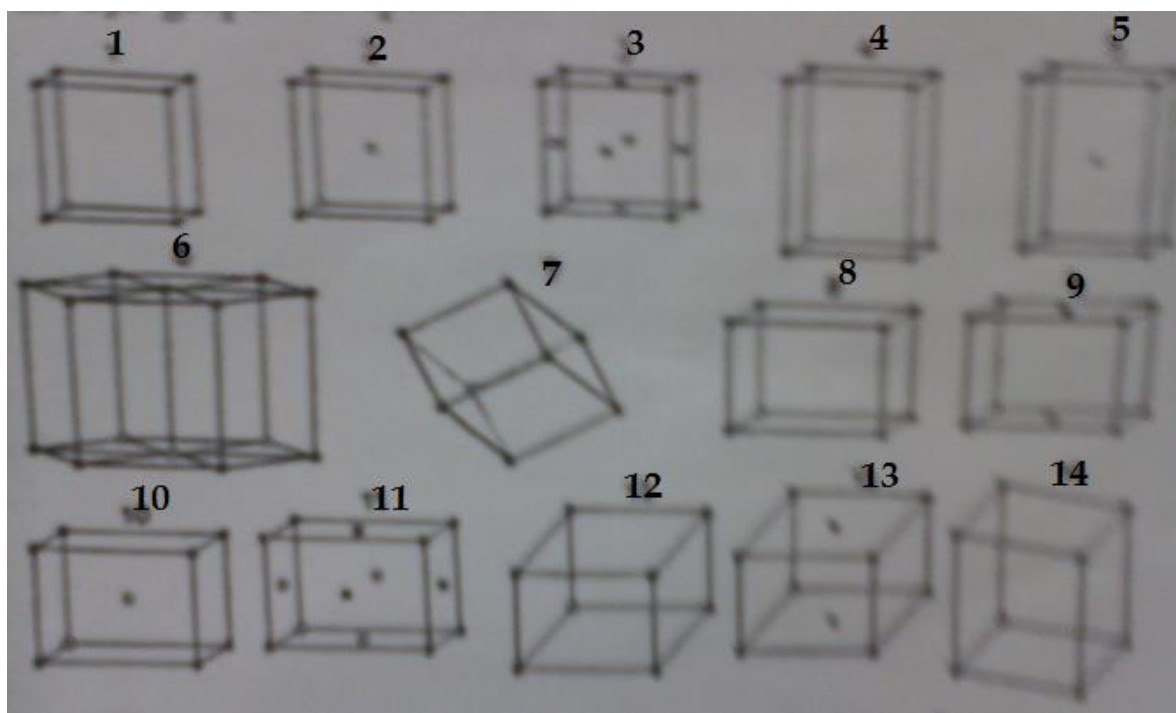


Figura 9 1-14

El paralelepípedo simple importantísimo para la descripción y el cálculo de las estructuras reticulares. En la **figura 9 1-14** se presentan los paralelepípedos de las 14 redes. La nomenclatura de las redes que se hallan en la bibliografía es, desgraciadamente, poco sencilla, tanto en las nominaciones como en los símbolos.

En la red 6 la reunión de prismas rómbicos de 60° da prismas hexagonales de bases centradas; pero también puede considerarse otro cuerpo más elemental, que es el prisma recto de base triangular equilátera.

Las redes 9 y 13 pueden descomponerse, sin pérdida de su simetría, en paralelepípedos de base rómbica y volumen mitad que la del paralelepípedo dibujado. En las 2 y 3 el paralelepípedo propiamente elemental, esto es, que solamente tiene puntos de la red en los vértices, es un romboedro, como ocurre en la red 7; pero los valores especiales del ángulo de aquellos romboedros (120° , $70^\circ 32'$), produce la simetría superior cubica. Análogamente en las redes 5, 10 y 11 el cuerpo considerado en el dibujo no es el del paralelepípedo elemental; este, si bien es del tipo 14 posee en cada uno de los tres casos igualdad de algunas aristas o de algunos ángulos, por virtud de lo cual la simetría de la red sube al grado de las singonias tetragonal y rómbica. Solo cuando el paralelepípedo elemental, o generador, tiene total generalidad en sus elementos, se originan redes triclínicas.

Las abreviaturas que se emplean para simbolizar las redes elementales, tienen las siguientes significaciones:

P: primitiva sencilla.

A, B, C: red centrada en sus caras anteriores, laterales o posteriores.

I: red centrada.

F: red con todas las caras centrales.

M: plano de dimetria.

1, 2, 3, 4, 6, ejes de rotación de orden $n = 1, 2, 3, 4, 6$.

-1, -4,... ejes de rotación reflexiva.

Cuando se trata de 230 grupos de operaciones de simetría o de los correspondientes conjuntos reticulares, se usan, además, estas abreviaturas:

A, b, c, d, d, planos de deslizamiento.

$2_1, 3_1, 3_2, \dots$ ejes helicoidales.

En cuanto al concepto del conjunto reticular y sus relaciones con las redes elementales y los 230 grupos de operaciones de simetría, véase el **párrafo 59**.

A. Las formas de los cristales

(Las formas del crecimiento de los cristales)

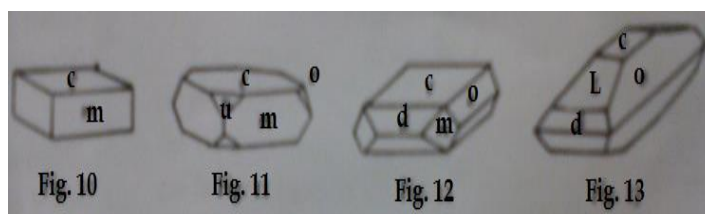
Las leyes geométricas en general

Los minerales son cristales sólidos cuyas propiedades dependen, de modo regular, de la dirección que se observan. Esto es consecuencia de la disposición reticular de sus partículas constitutivas. Un cristal se conoce, ante todo, por la regularidad del proceso de su crecimiento, esto es, por su forma.

En términos diferentes, pero con el mismo sentido en su fondo, se han establecido dos o tres leyes fundamentales de la cristalografía geométrica, las cuales, por su esencia, son forzosamente consecuencia de la estructura reticular de los cristales; pero antes del reconocimiento y representación de esta, eran leyes experimentales de extraordinaria importancia.

En lo que a continuación vamos a exponer, y en tanto otra cosa no se advierta, supondremos formas cristalinas idealizadas, desarrolladas por todo el contorno del cristal, en las cuales las caras equivalentes del punto considerado como centro del cristal. Se prescindirá, pues, de las irregularidades en la aparición de las caras y demás circunstancias de su desarrollo.

Los cristales de una misma sustancia, que en términos fisicoquímicos se llama fase, no siempre tienen igual forma, el mismo número de caras ni estas presentan contorno semejante. En medio de su gran variedad hay entre las



Diversas formas cristalinas estrechas, comprendientes en las llamadas leyes fundamentales. Así, en las figuras **10 a 13** podemos ver diferentes formas de cristales de baritina.

1. La ley de la constancia de los ángulos nos dice que en los cristales de la misma substancia los ángulos entre caras y aristas correspondientes son iguales, a igualdad de temperatura y presión. La forma y magnitud de las caras, tanto relativa como absoluta, no tiene influencia.
2. La ley de la racionalidad, o ley de los parámetros, expresa que las numerosas caras existentes o posibles en los cristales de una misma substancia tan elegidas entre sí geométricamente por números racionales y sencillos.
3. Por la ley de zonas, o, mejor dicho, del desarrollo zona, sabemos que todas las caras posibles en un cristal pueden deducirse de cuatro caras que no pertenecen a la misma zona. Esta ley, la de la racionalidad de la relación anarmónica y la ley de la compilación están comprendidas en la ley de la racionalidad y pueden deducirse, sin más, de ella.
4. La ley de la simetría, según la cual los cristales de la misma especie presentan siempre igual simetría, independientemente de las formas que los constituyan esta también incluida en las demás; más que ley es principio, íntimamente relacionado con el concepto de los conjuntos reticulares.
5. El desarrollo de estas leyes fundamentales constituyen el objeto principal de la cristalografía geométrica.

La ley de la constancia de los ángulos y sus aplicaciones

Contorno de los cristales. Los cristales están limitados por caras, aristas y vértices. Entre estos elementos limitante del poliedro cristalino, lo mismo que en todo poliedro con vértice, existe la relación, conocida por el teorema Euler o Descartes, de que

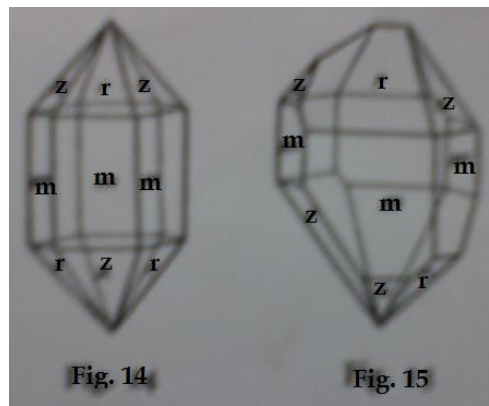
El número de caras + el de vértices = al de aristas + 2.

Las caras, aristas y vértices de un cristal son equivalentes cuando presentan el mismo comportamiento físico. Cualquiera que sea el desarrollo del cristal, los elementos limitantes cristalográficos equivalentes son geométricamente iguales.

Las caras de un cristal pueden ser triángulos (equiláteros, isósceles, escalenos), cuadriláteros (cuadrados, rectángulo, rombos, paralelogramos, deltoides, y trapecios), pentágonos; pero, más generalmente, polígonos de formas variadísimas.

Además de los elementos limitantes, tiene importancia en un cristal los ángulos entre caras (diedros) y los de aristas (ángulos planos).

La ley de la constancia de los ángulos. Cuando se comportan diversos cristales del mismo mineral tomados de una drusa, sobre todo si esta proviene de yacimientos diferentes se advierte por lo común, que presentan discrepancias no despreciables ante la forma total y cuantía de los elementos limitantes.



Así, los cristales de la **fig. 14 y 15** son del mismo mineral, cuarzo; están limitados por las mismas caras, pero las de un cristal tienen forma y magnitud muy diferentes de esos correspondientes del otro cristal. Estas observaciones son de tal generalidad que han llegado a concretarse en la siguiente proporción experimental: la forma y número de las caras, aristas y vértices carecen de importancia trascendental para el estudio geométrico de los cristales de la misma minera, se encuentra iguales valores angulares, si están sometido los cristales a la misma presión y temperatura. Por lo visto de estos los cristales de cuarzo de la **(fig. 14 y 15)** poseen los mismos ángulos entre las caras de las mismas letras, y análoga colocación en el poliedro.

De este hecho experimental nació, en un principio, la ley de la constancia de los ángulos. Cuando los cristales presentan buena conformación, la medición de los ángulos es el medio más seguro para identificar la especie cristalina.

La ley en cuestión fue descubierta por el danés Nicolas Stensen “STENO”. Midiendo cristales de cuarzo (de solido infrasonido naturalite contento disertationis prodromus. Florenci, 1669. In Plano axis laternum et longitudinem varie mutari, non mutatis angulis), si bien con anterioridad GESSNER la hubo presumido por la sola apariencia. Un siglo después, las numerosas mediciones efectuadas por Rome de Lisle le dieron completa validez.

Como se ha dicho, la ley es cierta si la temperatura es constante, circunstancia que descubría MITSCHERLICH en 1823. Los cristales térmicamente anisótropos es decir, todos a excepción de los cúbicos manifiestan diferente dilatación con el calor según las direcciones, y esto se traduce en las variaciones de los ángulos (hasta de 0,5°) cuando se miden a diferentes temperaturas, en general, estas variaciones son despreciables, la influencia de la presión es todavía menor.

De la constancia de los ángulos de los cristales resulta que para consideraciones puramente geométricas, las formas naturales, dependientes de las contingencias del crecimiento, pueden ser sustituidas por poliedros idealizados, en los que las caras tienen la misma distancia central. De esta manera todas las caras equivalentes, las aristas y las aristas y los vértices adquieren el mismo campo con que se ven los dibujos y modelos de los cristales que se emplean para su estudio y descripción. En los cristales naturales es muy frecuente que los elementos limitantes equivalentes sean parcialmente desiguales; se dice que en tales caso que los cristales están deformados. Así, por ejemplo, el cristal de cuarzo de la fig. 15 esta deformado con respecto a **la idea de la fig. 14.**

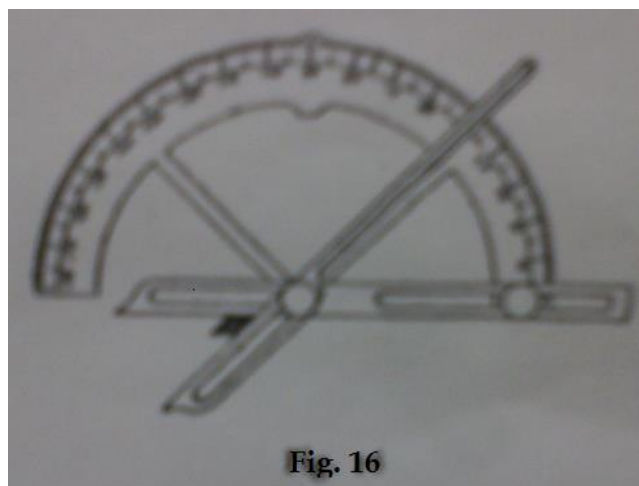
En consecuencia de la ley de la constancia de los ángulos la licitud de trasladar las caras paralelamente a sí mismas y, por ello, la posibilidad de tratar los cristales como haces de planos. La geometría analítica del

espacio, aplicable al estudio de las formas cristales, puede entonces ser sustituida en general, por la trigonometría esférica. La geometría de los cristales se transfiere a la superficie esférica por que mediante ciertas operaciones únicamente importantes de caras y de aristas aparecen en aquella como lados y ángulos de triángulos esféricos.

Medición de los ángulos e instrumentos para efectuarla. Las direcciones de caras y aristas que forman entre si son lo datos esenciales para la descripción de las formas cristalinas; gracias a la medición de estos ángulo reconocemos cada cristal y con el mineral que pertenece. La Goniometría es parte importantísima de los trabajos de mineralogista. Los instrumentos de que se vale para efectuarla se llaman goniómetros.

La apreciación del ángulo de las caras mediante los instrumentos cristalográficos, se consigue con mucha más exactitud que para el ángulo entre aristas, y de aquí proviene que el valor de los diedros tenga en la cristalografía tan extraordinario interés práctico. Es evidente que mediante el cálculo cabe deducir del ángulo de las caras de las aristas, como así mismo se comprende que los valores angulares constituyen el medio de conseguir los demás datos geométricos.

Los ángulos de las caras se miden directamente haciendo uso de goniómetros de aplicación o reflexión, pero también se emplean goniómetros de 2 y 3 limbos con los cuales se fijan la posición de las caras mediante dos coordenadas angulares y los ángulos resultan directamente o por resolución de triángulos esféricos.

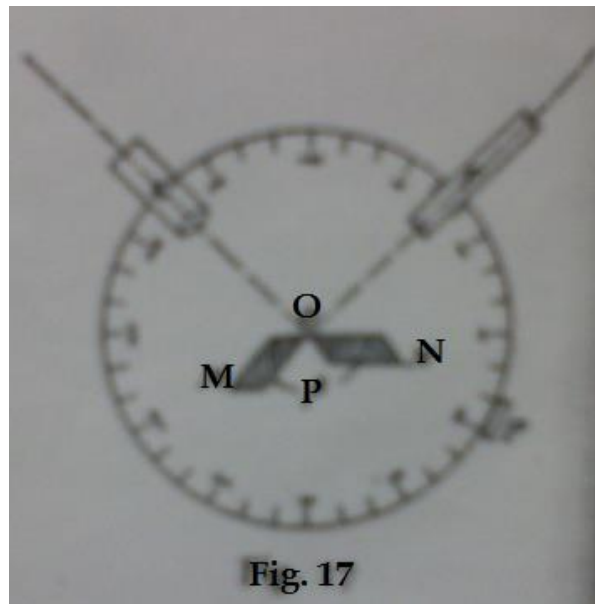


El goniómetro de aplicación.

Este instrumento fue ideado en 1783 por Sarangeot, quien construía modelos cristalográficos para Rome de L'isle; con el efectuó Haüy sus mediaciones fundamentales. Consiste el goniómetro (fig. 16). En dos reglillas metálicas articuladas como una tijera, que pueden correrse una sobre otra y en algunos modelos se parece y están unidas por un transportador. El deslizamiento de las reglillas permite medir cómodamente cristales de diferentes grosores por simple aplicación del diedro a las reglillas se ve en el limbo su valor ángulo. El instrumento permite solo aproximaciones de 1°, o algo menos, y las mediaciones que con el se realizan sirven únicamente de orientación.

PENFIEND ha introducido en el comercio transportadores muy prácticas, hechos con cartón o celuloide, que por su baratura están al alcance de todos.

El goniómetro de reflexión de un limbo. Fue inventado por Wollaston en 1809; su disposición se ve fácilmente en la figura 17



El cristal OM se sitúa de tal manera sobre el limbo que la arista del diedro que se ha de medir pase por el centro O del limbo (centrado) y sea paralela así eje de rotación (ajuste). El haz de rayos luminosos que salen del tubo C (colimador) incide sobre una de las dos caras, se refleja y penetra en el anteojo de observación F. como se comprende con solo ver la figura si giramos el limbo del ángulo b cuando la otra cara del diedro llegue a coincidir con el plano del anterior, volverá a efectuarse la reflexión de haz luminoso. El ángulo b se averigua por diferencia entre las lecturas hechas en el limbo, mediante el nonio p ., antes y después del giro. Este ángulo vale $180^\circ - a$, llamando a al rectilíneo del diedro; por consiguiente el goniómetro nos da el ángulo de las normales a las caras. Por esto ya de las obras más antigua se consigna siempre el ángulo suplementario de las caras en vez del directo. Las condiciones esenciales de una buena medición son: centrado y ajustes perfectos, paralelismo de haz del color emitido de la imagen reflejada para situarla con precisión del anteojo.

El cristal se fija sobre un aparato que va unido al eje del limbo y sirve para centrar y ajustar aquel. Consiste al accesorio en dos correderas planas que se desliza una sobre otra y permiten así centrar el cristal; otras dos correderas cilíndricas, situada por encima de aquellas, gracias a las cuales se corrige la inclinación de las aristas hasta lograr su ajuste, ya finalmente una platinita donde se fija con cera el cristal.

El haz luminoso sale del colimador A en el que hay una rendija que se ilumina exteriormente y está situada en el foco de una lente biconvexa con lo cual el haz es de rayos paralelos. La rendija o señal del colimador suele ser alidada por Websky, que consiste en el espacio que dejan libres dos discos circulares casi tangente.

Reproduce un goniómetro sencillo, pero suficiente para la mayor parte de las investigaciones. El limbo llega graduación de medios grados; se le hace girar mediante la rueda de timo f y los nonios a precian un minuto. La medición ha de efectuarse en un cuarto oscuro para extinguir bien los reflejos débiles producidos por caras imperfectas o muy pequeñas. Se empieza por elevar el cristal a la altura del antiojo de observación, que ha de llevar puesta la lente d . se centra y ajusta con los tornillos que lleva las

correderas planas y cilíndricas, operaciones que consideran acabadas cuando están bien enfocada la vista del ángulo que se ha de medir al imprimir al cristal un giro amplio produce el efecto de estar unida al hilo vertical del retículo. Se eleva la lente d, se ilumina la señal y se observa su los reflejos de las caras pasan coincidentes con el hilo horizontal del retículo; la discrepancia en esto halla se corrigen con los movimientos de las correderas cilíndricas. Se fija el eje al limbo y se gira este hasta pasar de un a otra imagen. En una vuelta completa se irán encontrando los reflejos de todas las caras de la zona¹ de la arista ajustada; cada uno de los reflejos se sitúa en el retículo del anteojo de observación y se lee con el nonio suposición.

La imagen de la señal del colimador no siempre es única y precisa, si no compuesta por varias imágenes, a veces difuminadas. Esto proviene de imperfecciones de las caras (escalonamientos, estrías etc.). Las caras estrechas y largas dan imágenes muy débiles y ensanchadas en sentido transversal por efecto de la dirección de la luz.

Con buenos goniómetros y cristales de conformación perfecta se obtienen los ángulos con error de ρ . Los cristales de 0,5 a 3 mm de diámetro son más convenientes que los de mayores dimensiones para las mediciones de ángulos.

Los pormenores del manejo de los goniómetros de un limbo se encontrarían en: Websky, Zeitschrift für Kristallographie, IV, 545; Groth, Physikalische Kristallographie, 1905.

Goniómetros de más de un limbo, o goniómetros teodolíticos.

El goniómetro de reflexión ordinario requiere pegar el cristal platina, centrado y ajustado cada vez que se mide una zona diferente. Estas molestias se evitan empleando goniómetros más de un limbo. En ellos, análogamente a como se opera teodolito, la posición de las caras se determina por dos coordenadas esféricas, equivalentes a la longitud y latitud geográficas, tomadas con referencia a un primer meridiano, una sola posición del cristal en la platina del goniómetro.

Se constituyen goniómetros teodolíticos con dos y con tres El más sencillo y corriente de los primeros (fig. 19) consiste goniómetro de limbo horizontal, semejante al descrito antes, lleva otro limbo vertical con el sistema óptico. La explicación partes del aparato y su funcionamiento nos llevara demasiado Estos instrumentos ahorran mucho trabajo en las mediciones cálculos cuando se tiene alguna práctica de su manejo.



Fig. 19 Goniometro teodolitico de Czapski

a la
con
con un
y para
limbos.
en un
que
de las
lejos.
y los

Ley de la racionalidad

(Notación, perspectiva, proyección y cálculo de los cristales)

La ley de las relaciones es la más importante de la cristalografía geométrica por ella las relaciones de posición entre las caras en cada especie cristalográfica quedan exactamente definidas y expresadas numéricamente. Esta ley se llama también ley de los parámetros, de los cocientes paramétricos racionales

y de la racionalidad de la relación anarmónica; contiene, aunque con expresiones diferentes, la ley de las zonas y de la ley de la complicación.

Ley de la racionalidad (o, simplemente, ley fundamental). Si aplicamos a un cristal los métodos de la geometría analítica y establecemos un sistema de tres ejes de coordenadas, prolongando convenientemente todas las caras hasta que corten a estos tres ejes, los segmentos a , b , c que se determinan en los tres ejes fijan la posición geométrica de la cara. Puesto que se trata de caras de un cristal, necesitamos conocer solamente la relación de $a : b : c$, pues cualquiera que sea los valores absolutos de los parámetros no variarían las orientaciones en el espacio y se cumplirá la ley de la constancia de los ángulos. De estos valores absolutos depende la mayor o menor distancia de la cara original del sistema de coordenado, circunstancia que para nada ha de tenerse en cuenta.

Cuando los ejes coordenados no son rectas arbitrarias, sino paralelas a tres ejes de simetría o de tres aristas posibles del cristal, o, lo que es igual, son las secciones de tres caras que se cortan en un vértice, la presidencia nos enseña que los cocientes de los parámetros sobre un mismo eje de todas las caras del mismo cristal, vienen expresados por números racionales casi siempre muy sencillos.

Aclaración. habiendo establecido un sistema de coordenado paralelo a tres aristas, determinamos sucesivamente las relaciones paramétricas de una serie de n caras, y sus segmentos sobre los ejes los expresamos con subíndices correlativos., podremos escribir:

Para la cara I, $a_1 : b_1 : c_1$

Para la cara II, $a_2 : b_2 : c_2$

Para la cara III, $a_3 : b_3 : c_3$

Para la cara N, $a^n : b^n : c^n$

Nos dice la ley que las relaciones $a_1 : a_2 : a_3 : \dots : a^n ; b_1 : b_2 : b_3 : \dots : b^n ; c_1 : c_2 : c_3 : \dots : c^n$ son siempre racionales y sencilla como $1 : 2 : 3 \dots$; ó $1 : 2/3 ; 3/4 \dots$

Los parámetros de las caras, existentes o posibles, en un mismo eje dan siempre en un mismo cristal relaciones; pero las relaciones de los parámetros de una cara en los tres ejes, como $a_1 : b_1 : c_1$, $a^n : b^n : c^n$ son, en general, irracionales.

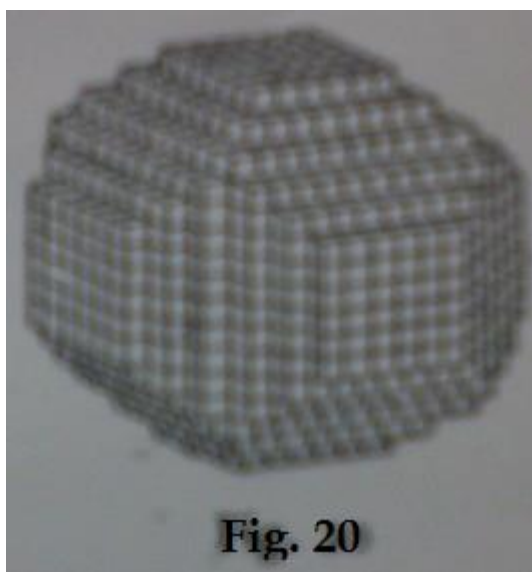
Los ejes coordenados suelen llamarse ejes cristalográficos y representarse por, Y , Z y X , también se emplean las letras a , b , c ; pero estas deben reservarse excesivamente para designar parámetros, de lo contrario se establece confusión entre los ejes y los segmentos que en ellos se consideran. Es costumbre cristalográfica que sea el eje ante posterior (sus parámetros, a) Y , el transversal (parámetros, b) y el eje vertical (parámetros, c) hasta hace poco tiempo no era posible determinar en valores absolutos, directos, las longitudes de los parámetros; se lograba solamente obtener valores relativos entre sí, partiendo para su cálculo de valores angulares, la investigación röntgenográfica ha permitido conocer en fracciones de centímetro los parámetros al poder medir de esta manera las dimensiones de paralelepípedo elemental de la estructura.

En un cristal son posibles todas aquellas caras cuyos parámetros están en relación racional con los parámetros de las caras existentes demuestran que los números racionales correspondientes a las

relaciones paramétricas son muy sencillos: 0, 2, 3, 4, 6, 8; raras veces se encuentran 5, 9, 10, 12. Esta segunda parte de la ley tiene importancia en la práctica de las mediciones; se considera discrepancia de la ley común suele provenir de anomalías del crecimiento.

Por la ley de la racionalidad las formas de los cristales muestran ser de especie singular, y se destacan de todos los demás cuerpo por tener tan notable propiedad. Así, por ejemplo de los cinco poliedros regulares platónicos solamente el tetraedro, cubo y octaedro pueden presentarse entre las formas de los cristales, pues el dodecaedro y el icosaedro tienen caras de parámetros irracionales la ley de la racionalidad tubo desde un principio carácter puramente experimental. La práctica de las mediciones con lo goniómetros de reflexión la comprueba, pero no de manera rigurosa. Las caras pocos brillantes y no siempre plana, la variaciones pequeñas de los ángulos, pero frecuentes, y las llamadas caras vecinas, dan en la práctica números que discrepan algo de los absolutamente racionales. Prueba indirecta ilegítimamente aceptable de la validez de esta ley la tenemos viendo que sus consecuencias y posibles predicciones se cumplen satisfactoriamente en la totalidad de las observaciones cristalográficas. Demostrado ya que los cristales consisten en partículas dispuestas en son juntos reticulares, la ley de la racionalidad no es si no consecuencia natural de la estructura reticular.

Datos históricos. Es interesante saber que la estructura reticular de los cristales, que nos proporciona hoy la demostración de la ley de la racionalidad como último término de un razonamiento, en los primero tiempos cuando era concepto puramente hipotético, dio pie al establecimiento de la ley.



Se debió esto a Justo Rene Huy (Essai d'une sur la structure des cristaux, 1781), quien interpretando el fenómeno de la exfoliación de los cristales convino que estaban constituidos por partículas por partículas extremadamente pequeñas, congruentes (moléculas integrantes; v. párr. 59), de forma constante para cada especie cristalina, de cuya primera asociación resultaban las primeras formas primitivas, de igual configuración en todos los cristales. De la forma primitiva derivaban las restantes, que llamaba formas secundarias, por supresión (decrecimiento) de un número entero de planos de moléculas sobre las aristas o los vértices de las formas primitivas. Así, en la fig. 20 puede verse como resulta el rombododecaedro sobre el cubo consecuencia natural de esto era de las aristas de las sucesivas formas y la originaria debía a ver relaciones racionales. Se comprende pues, que la ley de la racionalidad se llama también ley de HUY. La enunciación de esta ley haciendo intervenir la cruz axial, o sistema de ejes de coordenadas, fue idea de Cristian Samuel Wess.

Constantes biométricas de un cristal. Se averigua la situación de las caras existentes o posibles de un cristal, con solo conocer las tres caras cuya intersección son las aristas coordenadas, la relación entre los parámetros de una cara que corte a los tres ejes y las relaciones paramétricas de las demás caras y aquel cristal. De estos datos se vale la notación cristalográfica, o manera de simbolizar la cara de los cristales.

Si designamos por a, b, c , (fig. 21) los parámetros de una cara ABC, los de otra cara HKL tendrán las expresiones ma, nb, pc , en las que m, n, p son conforme a la ley fundamental números racionales sencillos, enteros o fraccionarios (en la fig. los tres son fraccionarios) la cara inicial ABC que determina en los ejes los parámetros abc se denominan cara fundamental o cara unidad, porque sus parámetros son las unidades de los ejes.

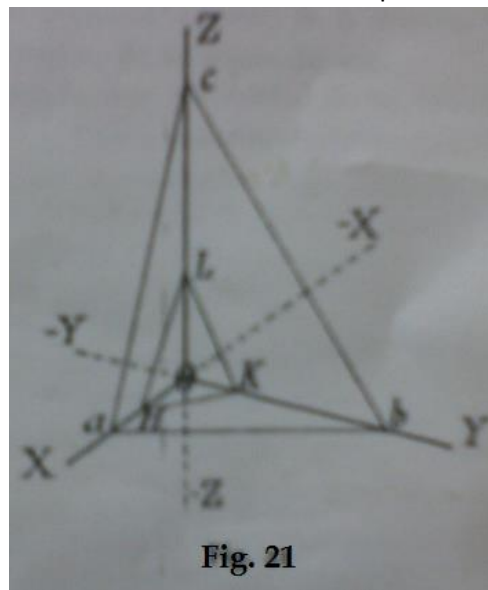


Fig. 21

La relación paramétrica $a : b : c$ de la cara fundamental y los ángulos que forman entre si las aristas coordenadas $\alpha = \angle YZ, \beta = \angle ZX, \gamma = \angle XY$, son las constantes geométricas del cristal, llamadas así por ser las mismas para todos los cristales de una especie mineral.

Las tres caras cuyas intersecciones proporcionan los ejes coordenados y la cara fundamental forman un tetraedro irregular podemos pues, decir que las constantes geométricas de un cristal vienen dadas por un tetraedro tomado de entre sus caras que con tal denominamos tetraedros fundamental y también tetraedro elemental; y que la dirección de todas las caras de un cristal se deduce de un tetraedro cualquiera elegido en aquel cristal (v. ley de la zona, párr. 21)

Una cara libremente elegida, con tal que corte los tres ejes puede ser cara fundamental; mas por ciertas razones de conveniencia que iremos viendo, se toma aquella cara que da a los coeficientes m, n, p de las demás caras los valores más sencillos es decir, los menores.

20. notación cristalográfica de las caras. Coeficientes y símbolos de Weiss índices y símbolos de Miller. Con lo expuesto hemos llegado a una notación o simbolismo de las caras, fundada en la ley de la racionalidad y referida a una cara fundamental.

La notación de Weiss consiste en expresar que los parámetros de una cara son múltiplos enteros de los parámetros de la cara unidad; lo cual es siempre realizable por convenientes multiplicaciones de los números racionales si a' , b' , c' son los parámetros de una cara y a , b , c , los de la cara unidad, supongamos por ejemplo, que los cocientes racionales son

$$a'/a = 2/3 ; b'/b = 1 ; c'/c = 1/2$$

Tendremos la relación

$$a' : b' : c' = 2/3a : b : \frac{1}{2}c$$

Que multiplicada por el producto de los denominadores se transforma en

$$4a : 6b : 3c.$$

La notación general de la cara la expresaremos por $ma : nb : pc$. Los coeficientes m , n , p , pueden tomar todos los valores enteros y también (infinito). Esta manera de simbolizar las caras constituye la notación de los coeficientes (Weiss, Berliner Akad. D. Wss. 1816 – 1817) la notación de Weiss es la más sencilla e inteligible de las notaciones cristalográficas: pero no es tan cómoda para los cálculos como la de Miller o notación de los índices. Estos se obtienen estableciendo los cocientes paramétricos recíprocos de los de Weiss y reduciendo también su relación a la de tres números enteros utilizando el ejemplo anterior, escribiremos

$$a/a' = 3/2 ; b/b' = 1 ; c/c' = 2$$

Y tendremos

$$3/2 : 1 : 2 = 3 : 2 : 4$$

Estos tres índices se representan en general por h, k, l ; como se enuncian siempre en el orden X, Y, Z , de los ejes coordenados se prescinde de las letras a, b, c , y de los signos: el símbolo de una cara es hkl ya se escriba así, ya encerrado en paréntesis (hkl) . Al coeficiente (infinito) de Weiss corresponde aquí su **rescripto 0**.segun la notación de Weiss, los parámetros de una cara vienen dados por

$$a' = ma : b' = nb ; c' = pc$$

Mientras que son en la de Miller:

$$a' = a/h ; b' = b/k ; c' = c/l$$

Por la primera notación la cara resulta situada fuera de la cara unidad; por la segunda, entre esta y el origen de coordenadas.

Se pasa de los coeficientes de Weiss a los índices de Miller tomando los recíprocos $1/m, 1/n, 1/p$; hallando su mínimo común denominador y multiplicando por e. los tres números enteros que resultan son hkl .

Índices y ecuación de una zona. Así como la dirección de una cara resulta fijada por sus índices $h k l$, cabe simbolizar la posición de una arista, eje de zona, ó, brevemente dicho, zona, por tres índices **$[h \times k \times l]$** . La dirección de una arista queda completamente determinada cuando supuesta pasando por el origen O de coordenadas se conoce la relación entre las tres coordenadas paralelas de uno cualquiera de sus puntos P .

las coordenadas paralelas de P son OH, OK, OL; su relación OH: OK: OL la expresamos por los índices de la zona $[\eta \times \lambda]$. Este símbolo se encierra entre corchetes para diferenciarlo del de una cara o de un conjunto de caras equivalentes, que los escribimos aislados y encerrados en paréntesis, respectivamente.

Para una cara h k l perteneciente a una zona $[\eta \times \lambda]$, o, lo que es igual, para una arista $[\eta \times \lambda]$ contenida en una cara h k l, existe la siguiente ecuación zonal.

$$h \eta + k x + l \lambda = 0$$

Cuya deducción se encontrara en los tratados especiales de Cristalografía.

Los índices $[\eta \times \lambda]$ de la arista intersección de las caras h k l, h' k' l', se obtiene de las dos ecuaciones

$$h \eta + k x + l \lambda = 0$$

$$h' \eta + k' x + l' \lambda = 0$$

Asimismo, los índices h k l de una cara que yace en dos zonas $[\eta \times \lambda]$, $[\eta' \times \lambda']$ se deduce de las dos ecuaciones

$$h \eta + k x + l \lambda = 0$$

$$h \eta' + k x' + l \lambda' = 0$$

La ley de la racionalidad, expuesta como ley de la complicación. De la ecuación zonal (I) se desprende que si sumamos correlativamente los índices de una cara con los de otra, obtendremos el símbolo de una tercera tautozonal de aquellas dos. Así, por ejemplo: de las caras 123 y 230 se deduce la 353, que está en zona con ellas. Esta adecuación de caras por sucesivas adicionales de índices, ha sido llamada por V. Goldschmidt complicación. Aplicando el proceso de la complicación al tetraedro elemental, esto es, a las cuatro caras con los símbolos sencillos 100, 010, 001, III, podemos derivar, con el mismo resultado de la deducción zonal, todas las caras posibles de un cristal. Sentaremos la siguiente ley. *La totalidad de las caras posibles de una arista se obtiene por complicación entre los índices de las caras de un tetraedro elemental.*

Minerales amorfos.

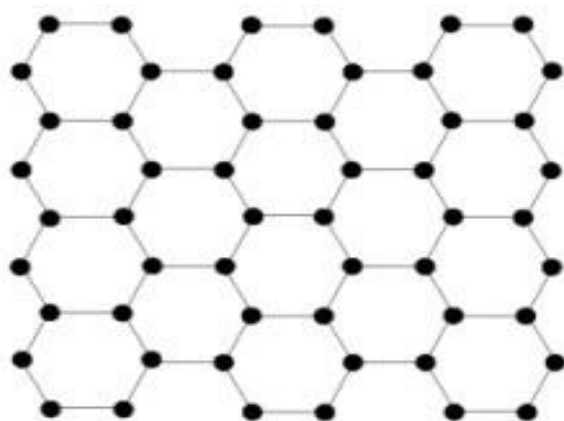
Existen algunas sustancias que aunque clasificadas como minerales no son sólidos en el sentido estricto que hemos dado a esta palabra, es decir, no son cristalinas. Se dice que estas sustancias son *amorfas*, faltando en ellas la disposición interna regular de las partículas que las constituyen y la forma externa regular geométrica. Los vidrios naturales y los gales son amorfos y denominados *mineraloides* por algunos autores.

En algunos **respectos**, el vidrio parece una autentica sustancia cristalina, pero en otras se diferencia de estas. Los átomos u otras unidades constituyentes de un vidrio están dispuestos en una red tridimensional y mantenidos en su posición por fuerzas semejantes a las que actúan en los verdaderos sólidos, pero no obstante, reinante la arbitrariedad reinante en la disposición de las unidades hace que no exista periodicidad y que falte la simetría. Los átomos no son equivalentes estructuralmente y para desplazarlos se necesitan de energías diferentes; el resultado es la ausencia de un punto de fusión definido, pues el tránsito de solido a liquido tiene lugar dentro de un amplio campo de temperaturas. La composición de un verdadero solido puede ser representada por una formula química; la del vidrio, no.

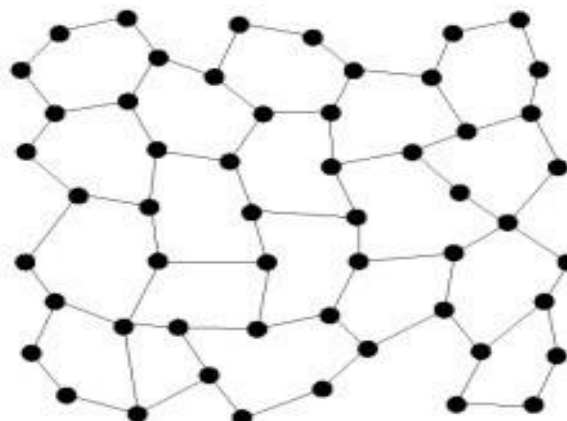
Los gales son más coherentes de partículas de tamaño coloidal cuyo empaquetamiento varía desde muy denso a muy flojo y abierto, siendo frecuente que los espacios intersticiales estén ocupados por líquidos.

A continuación, una lista parcial de minerales que, en parte al menos, se presentan en estado amorfo:

Nombre	Composición
Ópalo	Sílice hidratada
Crisocola	Silicato de cobre hidratado
Glauconita	Silicato hidratado de potasio y hierro
Garnierita	Silicato hidratado de magnesio y níquel
Sepiolita	Silicato hidratado de magnesio
Colofana	Fosfato de calcio hidratado
Limonita	óxido hidratado de hierro



Cristal



vidrio

Capítulo 4

GEMOLOGIA

Conceptos Generales

Gemología, definición y objetivos

La gemología es la ciencia que se ocupa del estudio de las piedras preciosas (gemas). Pero el gemólogo no solo aprende a identificarlas, sino también a distinguirlas de las obtenidas por síntesis y de sus imitaciones, y también a detectar los diversos tratamientos que se utilizan para mejorar su aspecto.

En el sentido amplio, podemos definir como objeto de la Gemología todo tipo de materiales decorativos utilizados en joyería, con excepción de los metales. Estudiaremos su composición y propiedades, origen y yacimientos, los tratamientos de diversa naturaleza y tipos de tallas que realzan su belleza. También

conoceremos los procedimientos de fabricación de los materiales sintéticos y las características y propiedades de los productos que imitan a las gemas naturales.

Podemos decir, por tanto, que la Gemología es una ciencia aplicada que se basa en gran medida en algunas ramas de las Ciencias Geológicas, sobre todo en la Mineralogía y la Cristalografía (propiedades de las gemas y métodos diagnósticos, yacimientos y síntesis), pero también abarca un abanico amplio de temas que se quedan fuera del ámbito de la Geología, como son los tratamientos especiales, procesos de talla, gemas orgánicas, temas histórico-culturales, comerciales, etcétera.

Se definen como gemas aquellas sustancias naturales que presentan las cualidades de belleza, durabilidad y rareza. La primera de ellas suele estar ligada a sus propiedades ópticas: color, transparencia, brillo, dispersión, etcétera. La segunda a su inalterabilidad frente a diversos agentes, en la que juegan un papel importante la dureza, tenacidad, resistencia a ácidos o álcalis, etcétera. La tercera, a su escasez natural y también a su demanda en el mercado en un determinado momento.



Combinación de belleza, durabilidad y rareza en una aguamarina

El estudio de la Gemología es indispensable para los joyeros y comerciantes de gemas, ya que adquieren una serie de conocimientos que les capacitan para conocer la naturaleza y calidad de los materiales que manejan, también para el lapidario y el engastador, que estudian determinadas propiedades que hacen más fácil y seguro su trabajo, y para el público en general que conocerá, en cada caso, la naturaleza de las gemas que pueda adquirir.

1.1 Tipos de materiales gemológicos

La materia está constituida por partículas sometidas a fuerzas de cohesión. Según sean estas fuerzas, las sustancias se pueden presentar en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. En los gases y líquidos las partículas están desordenadas. En los sólidos podemos encontrar dos estados:

- **Amorfo o vítreo** con una distribución de partículas desordenada.
- **Cristalino** con ordenación regular de las partículas. La ordenación interna de estas partículas condiciona la estructura y la forma externa.

Mineral. Es un sólido natural, inorgánico, con estructura interna ordenada y composición química definida. Se identifica por:

- **Especie.** Tiene una composición química, estructura y propiedades definidas.

- **Grupo.** Conjunto de minerales de similar estructura pero en los que varía en algo la composición. Por ejemplo el grupo del Granate.
- **Variedad mineralógica.** Misma especie pero con variaciones de aspecto, color y transparencia. Por el ejemplo el Bort como variedad de diamante.
- **Variedad gemológica.** Variedades mineralógicas usadas en gemología.

Roca. Agregados naturales de minerales. Por su origen se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas. La mayoría de las gemas son minerales, aunque algunos otros materiales, como sustancias orgánicas, rocas, vidrios naturales y artificiales, etcétera, pueden usarse como gemas.

En base a la normativa elaborada por la Comisión de Piedras de Color de CIBJO (Confederación Internacional de Bisutería, Joyería, Orfebrería, Diamantes, Perlas y Piedras), los materiales utilizados en joyería se pueden dividir en los siguientes grupos: materiales naturales y productos artificiales.

1.2.1 Materiales naturales

Son materiales formados completamente por la naturaleza, sin intervención humana, y posteriormente modificados mediante corte, pulido y otros procesos. Incluyen los siguientes tipos:

- **Inorgánicos naturales.** Piedras preciosas, gemas y piedras ornamentales a excepción de los metales.
- **Sustancias orgánicas.** Perlas, coral, marfil, carey.
- **Gemas modificadas.** Materiales antes descritos sometidos a algún tratamiento de mejora de color, pureza y otras propiedades.

1.2.2 Productos artificiales

Son productos parcialmente o completamente fabricados por el hombre. En este grupo se encuentran:

- **Gemas reconstituidas o sinterizadas:** Fabricadas de polvo o trozos de gemas naturales. Método utilizado en ámbar, concha de tortuga (carey), a veces turquesa y otros.
- **Piedras compuestas.** Pegado de capas de diversos materiales para imitar gemas naturales. Por ejemplo, doblete de granate almandino – vidrio artificial o zafiro natural – zafiro sintético.
- **Piedras sintéticas.** Tienen la misma composición química y propiedades que las naturales pero están fabricadas por el hombre. Por ejemplo rubíes, zafiros, esmeraldas y diamantes sintéticos.
- **Materiales artificiales.** Confeccionados por el hombre y sin análogos naturales conocidos. Por ejemplo, granate de gadolinio y galio (GGG), granate de ytrio y aluminio (YAG), zirconita (óxido de zirconio cúbico).
- **Las imitaciones.** Son productos que imitan el aspecto de gemas o sustancias orgánicas naturales, y pueden corresponder a cualquiera de los cuatro grupos anteriormente descritos. Por ejemplo, los tres materiales artificiales mencionados en el apartado anterior se utilizan como imitaciones de diamante.

1.3 Nomenclatura en el comercio de las gemas

Existen una serie de normas básicas de nomenclatura a tener en cuenta:

- No es correcta la utilización de dos o más nombres de gemas o variedades para referirse a una sola gema, incluso para describir su tono de color. Por ejemplo: cuarzo topacio, topacio citrino, rubí espinela, zafiro alejandrita, etcétera.
- No es correcto utilizar el “nombre de un tipo de talla” para referirse a una gema, a excepción del término "brillante" que puede usarse sin más para designar a los diamantes tallados en ese tipo de talla.
- El término "semiprecioso", es inexacto y está totalmente prohibido.
- Las gemas que presenten efectos ópticos especiales deben designarse con su respectivo nombre de gema más el del tipo de efecto que presenten. Por ejemplo: rubí estrella, turmalina ojo de gato, etcétera.
- El nombre de gema solo puede utilizarse para referirse a sustancias naturales.
- Los términos "auténticos", "**finos**" y similares, solo pueden usarse para referirse a sustancias naturales.
- Los productos artificiales, tanto sintéticos como de imitación, deberán designarse claramente como tales, de manera que no exista confusión sobre su verdadero origen. Por ejemplo: corindón sintético, imitación de alejandrita, esmeralda sintética Chatham, ópalo sintético Gilson.
- Los productos artificiales con nombres comerciales deberán designarse claramente como tales, de forma que no queden dudas sobre su verdadero origen, añadiendo el término "producto artificial" si no existe en la naturaleza. Por ejemplo: ópalo Slocum, imitación de ópalo; perlas Majorica, imitación de perla; fabulita – producto artificial imitación de diamante, etcétera.
- Cuando se indique el “peso total” de una piedra o joya, deberá añadirse "peso total" para evitar confusiones con el precio por quilate o total de la piedra central o principal.
- El nombre de "perla" sin más, debe utilizarse exclusivamente para perlas naturales o finas, si se trata de perlas cultivadas es necesario añadir siempre ese calificativo.

ORÍGENES DE LOS MATERIALES GEMOLÓGICOS

2.1 Yacimientos de gemas naturales

Se entiende por yacimiento el lugar donde se encuentra de forma natural una concentración de minerales económicamente rentable para su explotación. Los yacimientos pueden ser de dos tipos:

- **Primarios.** Cuando los minerales se encuentran en la roca donde se formaron.
- **Secundarios.** Cuando han sido objeto de procesos de erosión, disgregación de minerales y sedimentación que han producido la acumulación en zonas fuera de la roca madre.

Yacimientos primarios. Existen numerosos tipos de yacimientos primarios asociados a distintos procesos geológicos. Los tipos de yacimientos más importantes para las gemas son los siguientes:

- **Vetas de pegmatitas.** Cuerpos de rocas ígneas formados por cristales muy grandes y normalmente de composición granítica, formadas a partir de las porciones del magma más tardías en cristalizar y enriquecidas en componentes volátiles y determinados elementos químicos. En este tipo de yacimientos se forman, por ejemplo, berilo, turmalina, topacio, espodumena.
- **Vetas hidrotermales.** El agua a altas presiones y temperaturas en el interior de la Tierra es capaz de disolver minerales que en la superficie se presentan insolubles. Circulando por cavidades y fracturas, los fluidos termales pueden precipitar su carga mineral formando vetas hidrotermales. Son importantes en la formación de cuarzo cristal de roca, amatista, calcedonia, jaspe, esfalerita, fluorita, etcétera.
- **Yacimientos metamórficos.** Existen distintos tipos de procesos metamórficos relacionados con la presión y la temperatura, pero para las gemas es de especial importancia un tipo particular que denominamos metamorfismo hidrotermal. En este caso el agente de metamorfismo no es tanto la presión y la temperatura como la acción de los fluidos calientes provenientes de una intrusión ígnea cercana que altera las rocas encajantes permitiendo la combinación de elementos de ambos. Por ejemplo, una intrusión de un magma granítico rico en sílice sobre mármoles o calizas puede dar lugar, en zonas cercanas a la intrusión, a minerales como granate grosularia, diópsido, vesubiana, epidota, zoisita. En otros tipos de rocas se puede formar esmeralda, corindón (rubí y zafiro), almandino, espinela, apatito, etcétera.
- **Chimeneas diamantíferas.** Ciertas rocas volcánicas (kimberlitas y lamproitas) llegan a la superficie en forma de chimeneas volcánicas arrastrando minerales formados en grandes profundidades en el manto terrestre en condiciones de alta presión y alta temperatura. Constituyen los yacimientos primarios del diamante.

2.2.1 Métodos de sustancia fundida

Procesos de síntesis donde se funde el material original con la composición química de la gema a sintetizar y colorante. Al enfriarse el fundido cristaliza el material sintético.

Se utilizan para fabricar alejandrita, zirconita, fluorita, rubí y zafiro (también con efecto estrella), corindón para imitación de alejandrita, espinelas de varios colores, YAG, GGG, etcétera.

Existen varios métodos que se basan en esta técnica. Uno de los métodos más utilizados es el método **Verneuil**, en el que el colorante y el material en polvo son colocados en un depósito superior del que van cayendo regularmente. El calor necesario para fundir el polvo lo produce un soplete formado por dos tubos concéntricos. En el extremo, la llama, que alcanza 2.200°C, funde el polvo. Éste gotea sobre un soporte móvil dotado de movimiento descendente y de rotación, que lleva adosada en su parte superior una semilla cristalina para dirigir el crecimiento. La masa funde, se enfría y comienza a cristalizar sobre la semilla. Se obtiene de esta forma una bola con aspecto de pera alargada.

2.2.2 Métodos de mezcla fundida (flux)

Se utilizan los componentes del producto a sintetizar y un fundente de punto de fusión más bajo que el de todos los componentes que intervienen en el proceso. La mezcla se introduce en un crisol de platino y se calienta hasta que el material utilizado como fundente pase a estado líquido. Los componentes del material a sintetizar se disuelven en la sustancia fundida y luego cristalizan sobre una semilla colocada en el crisol en una zona de temperatura más baja.

Se utiliza para esmeralda, rubí, zafiro, alejandrita, espinela.

2.2.3 Método hidrotermal

El método de crecimiento hidrotermal lleva implícito el uso de agua, calor y altas presiones. Se utiliza para materiales de baja solubilidad, que se incrementan en un medio ácido o alcalino, con temperaturas no muy altas (400-700°C) y altas presiones (500-1.500 atmósferas, según los compuestos a obtener). Se utiliza un autoclave, de gruesas paredes de acero, normalmente recubierto de un metal noble.

Utilizado fundamentalmente para esmeralda, cuarzo, berilo, aguamarina, cuarzo citrino y también rubí.

2.2.4 Alta presión y alta temperatura (HPHT)

Método utilizado para sintetizar el diamante industrial y gema a partir de carbono, en presencia de metales utilizados como fundentes. Para realizar este proceso son necesarias presiones de alrededor de 55 kbar y temperaturas de unos 1400°C.

2.2.5 Deposición química de vapor (CVD)

Método de síntesis de diamante a baja presión consistente en la ionización por plasma de mezcla de gases metano e hidrógeno para llevar al estado libre los iones de carbono y depositarlo en una semilla de diamante o superficies de otro tipo.

2.2.1 Métodos cerámicos

La tecnología cerámica emplea compuestos inorgánicos reducidos a polvo que se calientan, a veces con presión, para producir un fino granulado de sólido policristalino. Utilizado para turquesa y lapislázuli.

2.2.2 Técnica del ópalo

El procedimiento es utilizado por P. Gilson y consta de tres fases: Primeramente es necesario producir esferas de sílice, todas del mismo tamaño. En segundo lugar, estas esferas deben de empaquetarse ordenadamente. Por último, hay que rellenar los espacios que quedan vacíos entre las esferas y aplicar presión, para compactar al ópalo y que se vuelva consistente

PROPIEDADES DE LAS GEMAS

El estudio de las características físicas y ópticas específicas de cada material, nos permite identificar las gemas y diferenciarlas.

3.1 Propiedades físicas de las gemas

Las propiedades físicas que consideramos son:

- **Dureza.** Oposición que un cuerpo presenta a ser rayado.
- **Tenacidad.** Oposición que un cuerpo presenta a ser partido.
- **Exfoliación.** Propiedad de romperse según ciertos planos estructurales.
- **Fractura.** Superficie que queda en un mineral al romperse sin exfoliar.
- **Peso específico.** Número de veces que un material es más pesado que su volumen de agua.
- **Conductividad térmica.** Capacidad de transmisión del calor de un material.
- **Dureza en gemas.**

La dureza de un mineral se determina por la escala de Mohs, comparativa con materiales de dureza conocida. Hay que probar a qué mineral raya él y cual le raya, quedando su dureza fijada entre la de ambos. Si su dureza coincide con la de uno de la escala se rayarán mutuamente.

En gemas, la comprobación de dureza es una prueba destructiva que no se utiliza en piedras talladas. No obstante, es importante conocer la dureza de las gemas ya que es la principal característica que determina su durabilidad una vez montadas en joyas.

Una gema dura puede sin embargo ser frágil al presentar exfoliación o irregularidades internas.

Dureza de las gemas más importantes

Diamante	10	Aguamarina	7,5 - 8	Cuarzo	7
Rubí	9	Heliodoro	7,5 - 8	Tanzanita	6,5 - 7
Zafiro	9	Morganita	7,5 - 8	Peridoto	6,5 - 7
Crisoberilo	8,5	Esmeralda	7,5 - 8	Ópalo	5 - 6
Espinela	8	Granates	7,5	Turquesa	5 - 6
Topacio	8	Turmalina	7 - 7,5	Coral	3,5 - 4

• Exfoliación

Propiedad física derivada de la estructura del mineral de romperse según determinados planos estructurales más débiles. Propiedad muy importante en el proceso de lapidación de gemas. En gemas talladas puede observarse por la orientación de las fisuras internas.

• Peso Específico

Determinante para la identificación de muchas gemas. Para su cálculo puede utilizarse una balanza de precisión aplicando el método hidrostático, o bien se utilizan líquidos pesados de peso específico conocido.

• Conductividad térmica

La comprobación de esta propiedad se emplea fundamentalmente para la separación del diamante y sus imitaciones mediante los habitualmente denominados "diamond- testers". Hay que tener en cuenta que actualmente existe una imitación de diamante–moissanita– que no se distingue mediante los testers de conductividad convencionales.

3.2 Propiedades ópticas de las gemas

• Color

Al iluminar un cuerpo con luz blanca se produce la absorción de algunas radiaciones del espectro visible y la transmisión de las restantes. La sensación de color se debe a la radiación o al conjunto de radiaciones transmitidas.

El color de la gema depende de la naturaleza de la luz que trasmite por reflexión y transparencia. El color depende de la presencia de ciertos elementos en su composición química y a la estructura interna de la gema.

En la actualidad existen sistemas para describir el color de las gemas de forma objetiva, como **el sistema GemeWizard**.

- **Brillo**

Luz reflejada en el interior de una gema. El brillo dependerá de la transparencia de la gema y, sobre todo, de la calidad de talla que tiene.

No se debe confundir con el lustre que es la luz reflejada en la superficie de una gema tallada.

- **Transparencia**

Se denomina transparencia a la mayor o menor facilidad que tiene la luz para atravesar un cuerpo. En las gemas la transparencia depende sobre todo de la cantidad de inclusiones que poseen. También influye el grosor de la piedra. Normalmente las gemas se clasifican en transparentes, traslúcidas y opacas.

- **Refracción**

Refracción es el fenómeno por el que un rayo de luz que atraviesa la frontera entre dos medios (por ejemplo, entrando del aire en la gema) se desvía de su dirección inicial. Los valores de los índices de refracción de las gemas se obtienen utilizando el **refractómetro** y son fundamentales para el análisis gemológico.

- **Birrefringencia**

Birrefringencia es el fenómeno por el que un rayo de luz incidente da lugar a dos rayos refractados dentro de la gema. Las gemas birrefringentes presentan dos índices de refracción y la diferencia entre ellos proporciona el valor de la birrefringencia, característico para cada gema.

- **Naturaleza óptica**

Comportamiento de la luz al atravesar la piedra. Las gemas pueden ser:

- **Isótropas**. No tienen birrefringencia. Se comportan frente a la luz de igual modo en todas direcciones. Pertenecen a este grupo las sustancias amorfas y los minerales que cristalizan en el sistema cúbico.
- **Anisótropas**. Tienen birrefringencia. Presentan un comportamiento diferente en función de la dirección del paso de la luz. Así son todas las demás gemas. Las sustancias anisótropas pueden ser uniaxiales o biaxiales y tener signo óptico positivo o negativo.

Para determinar la birrefringencia y naturaleza óptica se utiliza el polariscopio y el refractómetro.

- **Dispersión**

La propiedad de descomponer la luz blanca en los colores del arco iris al atravesar una sustancia y refractarse. Se aprecia a simple vista. Las gemas con dispersión alta, por ejemplo, el diamante, tienen destellos de colores del arco iris que se llaman “fuego”.

- **Pleocroismo**

Propiedad de minerales anisótropos de absorber luz de distinta longitud de onda según la dirección, mostrando, por lo tanto los colores algo distintos en función de la dirección. Para observar el pleocroismo se utiliza el dicroscopio o el polariscopio.

- **Espectro óptico**

Absorciones características en el espectro electromagnético del rango visible. Para observar el espectro óptico se utiliza el espectroscopio de mano. Para lecturas especiales hay que recurrir a espectrofotómetros de laboratorio que proporcionan lecturas mucho más exactas.

- **Luminiscencia UV**

Comportamiento ante la exposición a luz ultravioleta. Para observarla se utilizan lámparas de luz ultravioleta (de ondas larga y corta).

Características generales de las gemas más importantes

Nombre de la gema	Sistema Cristalino	Naturaleza óptica	Índice de refracción	Birrefringencia	Dureza	peso específico
Diamante	Cúbico	isótropo	2,417	-	10	3,52
Corindón (Rubí, Zafiro)	Trigonal	uniáxico (-)	1,762-1,770	0,008	9	4,00
Berilo	Hexagonal	uniáxico (-)	1,570-1,579	0,005-0,009	7,5-8	2,67-2,78
Berilo	Hexagonal	uniáxico (-)	1,575-1,582	0,005-0,009	7,5-8	2,71
Espinela	Cúbico	isótropo	1,718	-	5	3,60
Crisoberilo (Alejandrita,	Rómbico	biáxico (+)	1,746-1,755	0,009	8,5	3,73
Cuarzo (Amatista, Citrino, Ágata)	Trigonal	uniáxico (+)	1,544-1,553	0,009	7	2,65-2,70
Turquesa	Triclínico	biáxico (+)	1,610-1,650	0,040	5-6	2,40-2,85
Jadeíta	Monoclínico	biáxico (+)	1,660-1,680	0,020	6,7-7	3,33
Topacio (Azul, incoloro)	Rómbico	biáxico (+)	1,609-1,617	0,008	8	3,56
Topacio (Amarillo, rosa)	Rómbico	biáxico (+)	1,629-1,637	0,008	8	3,53
Turmalina	Trigonal	uniáxico (-)	1,624-1,644	0,020	7-7,5	3,05
Peridoto	Rómbico	biáxico (+)	1,654-1,690	0,036	6,5-7	3,34
Granate (Almandino)	Cúbico	isótropo	1,760-1,820	-	7,5	4,05
Granate (Grosularia)	Cúbico	isótropo	1,735	-	7	3,34-3,73
Granate (Demantoide)	Cúbico	isótropo	1,875	-	6,5-7	3,84
ópalo	Amorfo	isótropo	1,450	-	5-6	2,15-2,20

3.1 Efectos ópticos especiales.

Fenómenos producidos por inclusiones, defectos o características estructurales. Se nombran según el efecto que producen.

- **Ojo de gato (Chatoyancy):** El efecto se produce debido a inclusiones en forma de agujas o tubos finos (capilares) orientados en una sola dirección. Al reflejarse la luz de ellos se produce una línea o zona estrecha luminosa móvil. Las piedras con este efecto se tallan en cabujón. *Crisoberilo, cuarzo, turmalina, apatito, escapolita, berilo, diópsido, etcétera.*



Efecto de ojo de gato en un apatito

- **Asterismo (Estrella).** Inclusiones en forma de agujas orientadas en dos o tres direcciones. Al reflejarse la luz en se produce una luminosidad en forma de estrella. En ocasiones pueden aparecer varias estrellas en una sola piedra. La estrella puede presentar cuatro o seis puntas. Es necesario que las piedras estén talladas en cabujón. *Rubí, zafiro, cuarzo, granate, diópsido, enstatita, etcétera.*



ellas

Rubí estrella

- **Efecto Aventurinado (Aventurescencia).** Inclusiones de plaquitas de mica u oligisto (hematites). Se producen pequeños resplandores al mover la piedra. *Feldespatos (piedra sol), cuarzo aventurina, obsidiana dorada o plateada.*



Piedra sol pulida

Adularescencia. Estructura laminar o partículas dispersas. Causan un resplandor azulado o blanquecino que parece flotar en el interior de la piedra. *Feldespatos (piedra luna -adularia-).*



Feldespato. Piedra luna con presencia de adularscencia.

- **Opalescencia.** Partículas dispersas que causan turbidez o aspecto lechoso. *Ópalo, cuarzo, etcétera.*



Opalescencia presente en ópalo amarillo.

- **Iridiscencia (Efecto arco iris).** La iridiscencia es una propiedad que tienen algunos materiales de mostrar diferentes colores al cambiar el ángulo de observación o el ángulo de incidencia de la luz. Esto ocurre porque la luz blanca reflejada se descompone en los colores del arco iris por diferentes causas. Fenómenos de interferencia producidos en fisuras, fracturas o exfoliaciones. *Cualquier piedra, con frecuencia en cuarzo (cuarzo iris).*



Ópalo iridiscente.

- **Juego de colores.** Difracción de luz producida en el ópalo debido a la ordenación de glóbulos de sílice amorfa en de capas. Se observan áreas de diversos colores que se o apagan, y cambian de color al mover la piedra. *Ópalo.*
- **Labradorescencia.** Estructura laminar por maclado polisintético. Causa un reflejo de varios colores de aspecto metálico, que en ocasiones presenta la totalidad de del espectro. *Feldespatos (labradorita), korita, etcétera.*
- **Oriente.** Reflexión de la luz en capas de aragonito. Resplandor típico de las *perlas*.



noble
forma
iluminan

colores

Juego de colores en un ópalo noble



Labradorita (espectrolita)



Oriente en perlas cultivadas

3.2 Inclusiones en gemas

El estudio de las inclusiones es fundamental para el análisis gemológico. El estudio se realiza mediante una lupa de bolsillo de 10 aumentos o usando una lupa binocular.

Importancia del estudio de las inclusiones

Inclusión es todo tipo de irregularidad, material, heterogeneidad óptica o defecto, que se presenta en el interior de una gema. En Geología las inclusiones permiten conocer mejor el origen y el proceso de formación de los minerales. El estudio de las inclusiones en Gemología es de una importancia extraordinaria, ya que permite:

- Identificar una gema, pues existen algunas inclusiones características para determinadas gemas (granate demantoide, peridoto, piedra luna, amatista, etc.).
- Determinar en ocasiones el país o yacimiento de origen de una determinada gema, ya que algunas inclusiones son exclusivas de una mina o localidad (parisita en esmeralda de Muzo, zircón con halo en rubíes de Ceylan, etcétera).
- Distinguir el origen natural o sintético de una gema. En este caso la observación de las inclusiones es determinante pues el resto de propiedades y características de identificación son similares o idénticas. No obstante, el medio en el que se han formado las gemas naturales o las piedras sintéticas son muy distintos y dejan huellas diferentes inclusiones en el interior de los cristales.

- Determinar la presencia de tratamientos aplicados a la gema para mejorar su color y/o pureza. Los tratamientos alteran las inclusiones dentro de las gemas o añaden características internas nuevas que permiten detectar piedras tratadas mediante el estudio microscópico.

Tipos de Inclusiones

- **Clasificación por su estado físico**
 - Las inclusiones se dividen en sólidas, líquidas y gaseosas. También son muy frecuentes las inclusiones que contienen más de una fase, por ejemplo, líquidas con una burbuja de gas. Las inclusiones polifásicas se forman cuando en una cavidad del cristal se atrapa un fluido homogéneo del que se va formando el cristal y posteriormente, al bajar la temperatura y la presión se separa en varias fases. Estas inclusiones también se llaman inclusiones fluidas.
- **Clasificación genética**
 - **Proto-genéticas:** Siempre son sólidas. Formadas antes de la generación del cristal y englobadas dentro de su interior durante el crecimiento. Ejemplos: actinolita en esmeralda, diamante en diamante, pirrotina en espinela, etcétera.
 - **Sin-genéticas:** Estas inclusiones se formaron durante el proceso de cristalización del cristal que las contiene, siendo englobadas por éste. Pueden ser sólidas o fluidas. Ejemplo: olivino en diamante, calcita en corindón, dolomita en esmeralda, inclusiones trifásicas en esmeraldas colombianas, etcétera.
 - **Epigenéticas:** Son inclusiones que se forman una vez terminada la formación del cristal huésped. Suelen ser fracturas, halos, minerales secundarios, relleno de fracturas o huecos, etc.

TRATAMIENTOS DE LAS GEMAS

Los tratamientos son modificaciones que se realizan en las gemas para mejorar su aspecto: color, transparencia y textura fundamentalmente. Cualquier modificación aplicada a la gema aparte de los procesos de corte y pulido tiene que advertirse debidamente al comprador.

4.1 Principales tipos de tratamientos.

- Térmicos (aplicación de calor)
- Tinción (teñido)
- Impregnación superficial
- Relleno de fisuras
- Recubrimiento
- Láser
- Irradiación (bombardeo de partículas radioactivas)
- Difusión térmica
- Alta presión y temperatura (HPHT)

▪ Tratamientos térmicos (aplicación de calor)

Mejoran o cambian el color original. Es similar a lo que sucede habitualmente en la naturaleza, en general es aceptado como una práctica comercial y no es necesario indicarlo. El tratamiento es generalmente estable

(permanente) y puede no ser identificable. Se aplica en cuarzo amatista, cuarzo citrino, topacio rosa, zircones incoloros o azules, tanzanitas, aguamarinas, calcedonias, zafiros, rubíes, etc.).

▪ **Tratamientos por tinción (teñido)**

Tratamientos que se utilizan desde la antigüedad en materiales porosos con la ayuda de sustancias colorantes (ágatas, crisoprasas, corales, turquesas, jadeitas, marfiles, etcétera). También se emplea en esmeraldas y rubíes fisurados de baja calidad. El tratamiento es relativamente estable y debe indicarse siempre, pues incluso en el caso de los aceites teñidos es una práctica fraudulenta.

▪ **Tratamientos por impregnación superficial**

Algunos materiales se impregnan superficialmente con ceras o plásticos para darles mayor consistencia y evitar modificaciones de color, bien por evaporación del agua que contienen, bien para evitar alteraciones de sus componentes (turquesas, malaquita, etc.).

▪ **Tratamientos por relleno de fisuras**

Las gemas que tienen fisuras y cavidades con frecuencia se impregnan con distintos materiales (aceites, resinas artificiales, vidrios de distinta composición) para disimular los defectos internos y aumentar la transparencia de la gema. En función del tipo y cantidad del material de relleno este tratamiento puede considerarse leve o grave. Por ejemplo, el relleno de fisuras con aceite en esmeraldas es muy aceptado en el comercio y no se considera grave, mientras que los rellenos de vidrio de plomo en corindones o rellenos vítreos en diamantes son tratamientos muy graves y requieren una advertencia específica al comprador.

▪ **Tratamientos por recubrimiento**

Consiste en la aplicación de una fina capa de pintura en toda la piedra, o más frecuentemente solo en la culata (esmeraldas, rubíes, diamantes, topacios, etcétera). Antiguamente se utilizaba también la aplicación de finas capas de papel o laca teñida (talcos) a la culata de ciertas gemas, para proporcionarles un mejor aspecto y mayor brillo.

▪ **Tratamientos con rayo láser**

Es un tratamiento que solo se emplea en el diamante, para mejorar su aspecto eliminando inclusiones oscuras. Aunque el aspecto mejora, el tratamiento provoca una perforación en la piedra que normalmente se aprecia sin dificultad a la lupa.

▪ **Tratamientos por irradiación (bombardeo de partículas radioactivas).**

Procesos similares pueden suceder también en la naturaleza y por eso en muchas ocasiones es difícil, y a veces imposible, saber si ha existido o no tratamiento artificial (topacio, espodumena, turmalina, berilo, cuarzo, corindón, escapolita, etcétera).

Combinado con posteriores tratamientos térmicos, se aplica al diamante consiguiéndose colores fantasía. Es muy importante detectar la verdadera naturaleza del color pues la diferencia de precio es muy grande. Para ello normalmente hay que recurrir a laboratorios gemológicos especializados. También es muy importante controlar que el proceso de irradiación no haya dejado señales de radioactividad activa en las gemas tratadas por este método.

▪ **Tratamientos por difusión térmica**

En este tratamiento la gema se sumerge en un medio que contiene altas concentraciones de elementos cromóforos u otros metales que pueden afectar a su color y se somete al calentamiento hasta temperaturas

muy elevadas (hasta 1800°C) para que estos elementos difundan en la estructura cristalina de la gema, proporcionándole un color atractivo. El color producido por este tratamiento puede estar concentrado en la capa superficial (zafiros, fáciles de detectar) o más profundo (rubíes y zafiros tratados por difusión de berilo, extremadamente difíciles de detectar).

▪ **Tratamientos por alta presión y temperatura**

Es un tratamiento que solo se emplea en el diamante para mejorar su color. La piedra se somete a presiones y temperaturas extremadamente altas, lo que permite eliminar algunos efectos estructurales que afectan negativamente al color.

Tratamiento muy difícil de detectar.

4.2 Tratamientos y el comercio de las gemas

Existen tratamientos más o menos graves, tratamientos más o menos aceptados por el comercio. En cierta medida la gravedad del tratamiento depende del grado en que el tratamiento permite mejorar la calidad del material inicial. No obstante, algunos tratamientos que mejoran drásticamente la calidad, por ejemplo, el color de los zafiros mediante el calentamiento, son comúnmente aceptados y no se consideran graves.

Hay que tener en cuenta que por muy grave que sea el tratamiento, el material puede ser comercializado siempre y cuando se le advierta al comprador del tratamiento de forma adecuada. Al contrario, cualquier tratamiento puede convertirse en “fraudulento” si su presencia no se advierte debidamente al comprador. Para regular la información que hay que proporcionar al comprador, la Confederación Internacional de Joyería (CIBJO) diferencia dos tipos de tratamientos:

- **Aquellos que solo requieren una información general sobre el tratamiento aplicado.** Por ejemplo, vendiendo una esmeralda con relleno de fisuras de aceite hay que informar que a la mayoría de esmeraldas se les aplica dicho tratamiento. Son tratamientos menos graves y muy comunes en el comercio. Los laboratorios gemológicos expiden para estas gemas el dictamen de “gema natural”, las observaciones sobre el tratamiento pueden aparecer en los comentarios si los rasgos son evidentes.

Los tratamientos clasificados en este grupo son:

- Rellenos de fisuras con sustancias incoloras no vítreas
 - Impregnación superficial con sustancias incoloras
 - Calentamiento
 - Blanqueado (utilizado para perlas)
- **Aquellos que requieren información específica sobre el tratamiento aplicado a la gema concreta.** Son tratamientos más graves. Los laboratorios gemológicos expiden en este caso dictámenes de “gemas tratadas”. A la hora de realizar la venta hay que informar inequívocamente al comprador que la gema que se vende está tratada por un determinado proceso.

Los tratamientos que requieren información específica son:

- Irradiación
- Tratamientos de difusión
- Tinciones e impregnaciones con sustancias coloreadas
- Relleno de fisuras abiertas y cavidades (observables a 10x)
- Impregnación profunda de sustancias porosas con plásticos o similares
- Recubrimientos

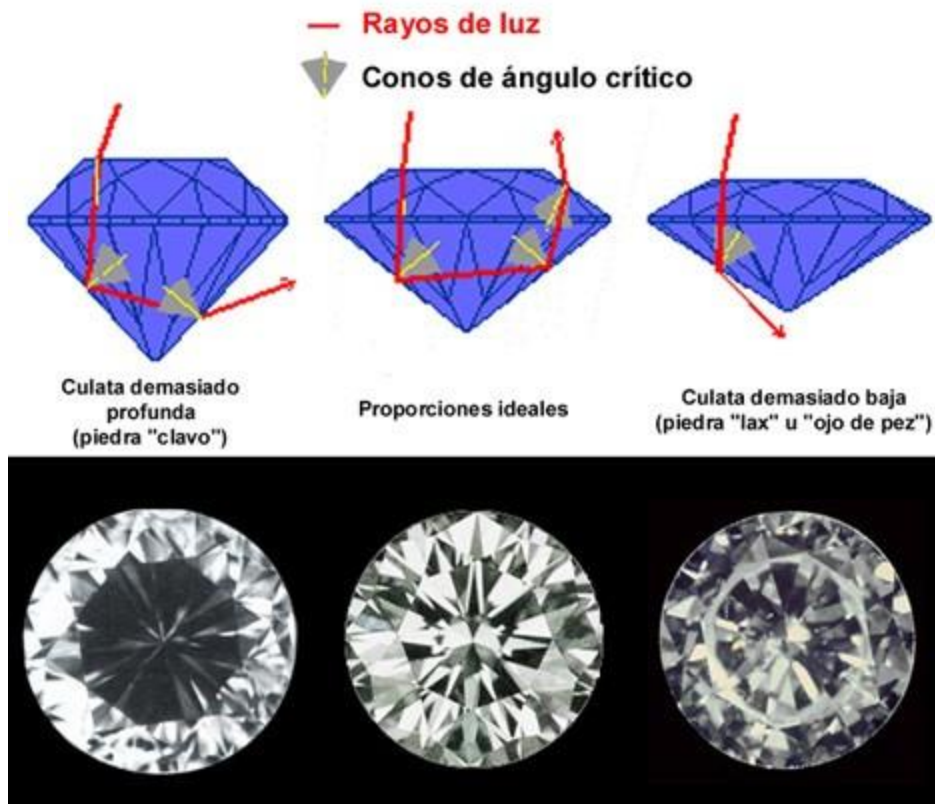
En la actualidad, debido a la proliferación de tratamientos de todo tipo, existe una demanda bastante elevada de gemas de gama muy alta sin ningún tipo de tratamiento, por muy leve y aceptado que sea. Algunos laboratorios expiden certificados con un comentario explícito para las gemas que no tienen tratamiento alguno.

TALLAS DE LAS GEMAS

La talla y pulido son operaciones que se realizan en las gemas para resaltar al máximo sus propiedades de transparencia, color, brillo, lustre, dispersión, etc., destacando su belleza. El arte de dar forma a una gema se denomina lapidación. Ya desde el antiguo Egipto se utilizaban técnicas de grabado y corte de gemas, que se han ido perfeccionando a lo largo de los siglos. Según fueron avanzando las técnicas de lapidación, se fueron consiguiendo nuevas formas de tallas. Los conocimientos más modernos de las propiedades ópticas de los minerales proporcionaron una base científica para resaltar todas sus propiedades de color, brillo, transparencia, dispersión, etc., debido a la reflexión de la luz en ellas.

Por ejemplo, en el año 1919 se describió por primera vez el modelo ideal de la talla brillante moderna, calculando las proporciones ideales de la piedra tallada para que todos los rayos incidentes salgan por la corona, proporcionando mayor brillo y dispersión al diamante. La obtención de ángulos adecuados de facetas de culata tiene suma importancia para el aspecto final de la piedra. Las gemas talladas correctamente (en el centro) devuelven toda la luz que entra por la tabla.

Paso de luz en un brillante



5.1 Proceso de lapidación

El proceso de lapidación de una piedra está íntimamente ligado con el conocimiento y determinación de las propiedades físicas y ópticas de la piedra. De esta forma la dureza, la tenacidad, la fractura, la exfoliación pueden condicionar el método y los procesos de corte y pulido. Del mismo modo las propiedades ópticas del mineral, distribución de color, etc. condicionarán las proporciones idóneas para aprovechar la luz, efectos ópticos y resaltar la belleza de la gema.

Podemos considerar de forma general tres operaciones para lapidación.

- **Corte del mineral**
- **Desbastado**
- **Facetado y Pulido**

Corte. El primer proceso de la lapidación es el corte del mineral usando la cortadora o sierra. La máquina de cortar consta de un disco de diamante y un depósito de agua, para la refrigeración. Con esta máquina se pueden realizar solo cortes en línea recta. En minerales con una exfoliación muy marcada, como el diamante, a veces se utiliza esta

propiedad para el corte. Antes de realizar la operación hay que hacer un estudio cuidadoso de la piedra. Una vez estudiada y tomada la decisión, se marca con tinta china la dirección por la que se va a exfoliar. Se fija con una laca especial a un fuste de madera, se hace una pequeña muesca en el lugar señalado y apoyando una cuchilla de acero sobre ella, se golpea con una barra de metal o madera. Si la operación ha sido correcta el cristal se parte en dos según el plano de exfoliación.

Además, en aquellas piedras con buena exfoliación hay que procurar no tallar facetas en las caras de exfoliación, ya que en ellas no se puede obtener un buen pulido.

▪ **Desbastado, facetado y pulido**

En la fase de desbastado se consigue una importante pérdida de materia, dejando la piedra próxima a las proporciones deseadas. Se utiliza una máquina combinada que consta de cuatro discos y se utiliza para desbastar, refinar y pulir.

Los discos tienen diferente dureza y tamaño de grano para ir refinando la superficie. El primer desbastado se realiza con abrasivo de carborundo de grano grueso. A medida que el lapidario se va acercando a la forma deseada, utiliza los abrasivos cada vez más finos para trabajar con mayor precisión.

En el diamante debido a sus características especiales de dureza tras el corte y antes del desbastado se efectúa el paso del **torneado o redondeado**. Mediante este proceso se redondean los cristales cuando se va a tallar en brillante o en alguna talla fantasía (oval, pera o marquís).

▪ **Facetado y pulido**

Se tallan las facetas definitivas que va a tener la piedra y se pulen hasta obtener superficies totalmente lisas y brillantes. Estas dos operaciones y la anterior se efectúan con un plato horizontal, y que está impregnado con aceite y abrasivo de polvo de diamante. Aunque a veces en un mismo plato hay dos o tres zonas con distinto poder abrasivo, lo habitual es que se realicen las tres operaciones en la zona del plato en la que se esté trabajando en ese momento.

5.2 Tipos de tallas

Se pueden diferenciar dos grupos diferentes de talla:

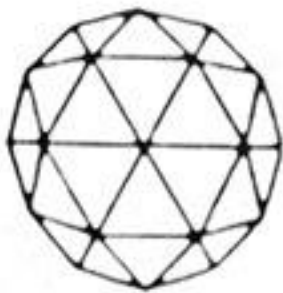
- **Tallas facetadas.** con facetas planas en la mayoría de los casos, generalmente utilizadas para piedras transparentes.
- **Cabujones.** con superficies curvas, usados habitualmente en piedras opacas, traslúcidas o para resaltar efectos ópticos especiales (ojo de gato, asterisco, etc.).

▪ **Tallas facetadas.** Para su estudio dividiremos las diferentes clases de talla en los siguientes grupos:

- **Tallas sencillas**
- **Talla brillante**
- **Tallas derivadas del brillante**

- Tallas en galerías
- Tallas en tijera o cruzadas
- Tallas mixtas
- Otras tallas facetadas
- Tallas con facetas cóncavas

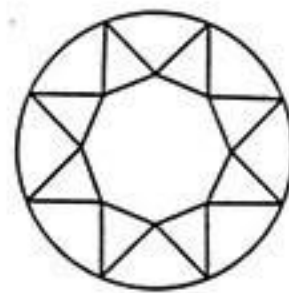
Tallas sencillas. Utilizadas antiguamente para los diamantes pequeños. En la actualidad los diamantes muy pequeños se tallan a máquina y presentan facetado completo de la talla brillante. Ejemplos de tallas sencillas: talla rosa, talla 8/8, talla suiza (16/16).



Talla rosa



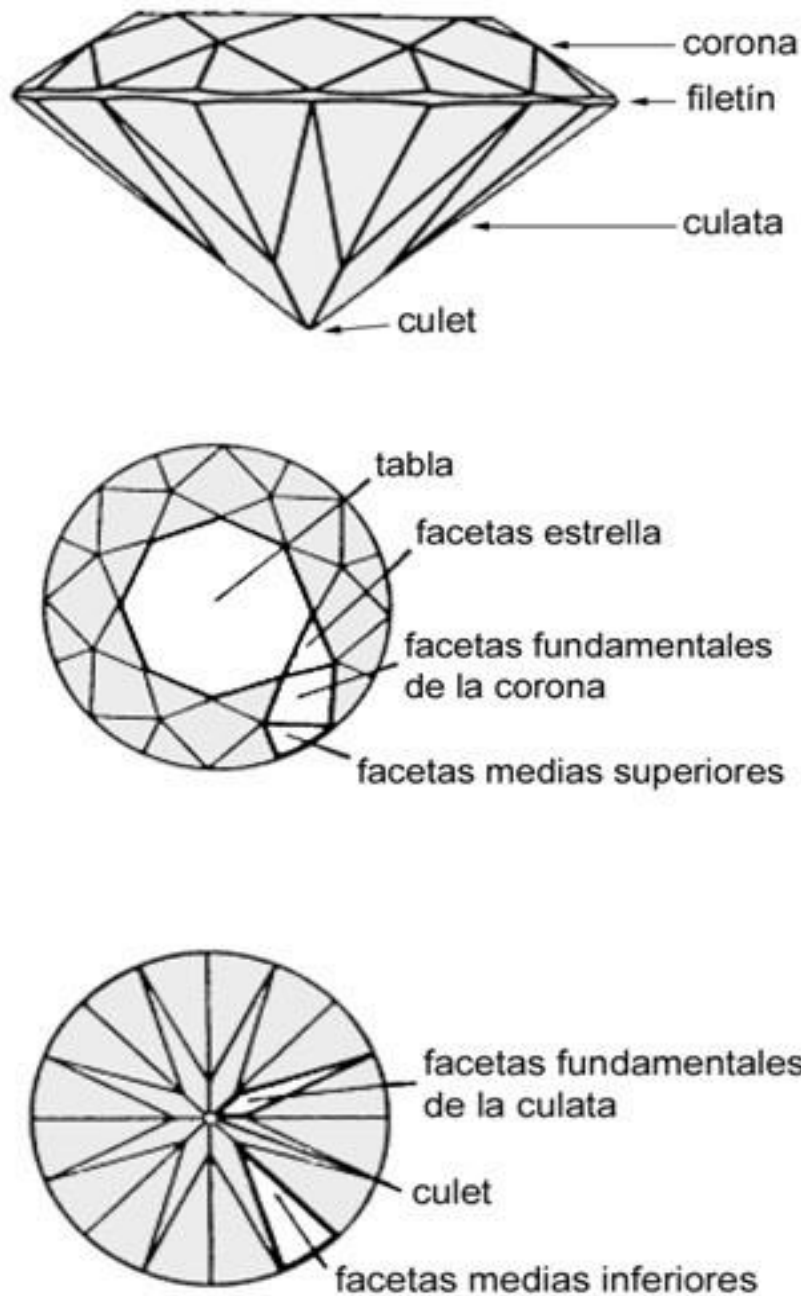
Talla 8/8



Talla suiza

Talla brillante. La talla brillante es la más clásica y utilizada para el diamante, aunque también puede usarse en otras gemas. Consta de 58 o 57 facetas, según se trunque o no el vértice inferior, creando una faceta adicional que se denomina *culet*. Las facetas están distribuidas en dos partes fundamentales denominadas corona y culata (o pabellón), unidas entre sí por el filetín.

La disposición y nomenclatura de las distintas facetas se indica en la figura siguiente.

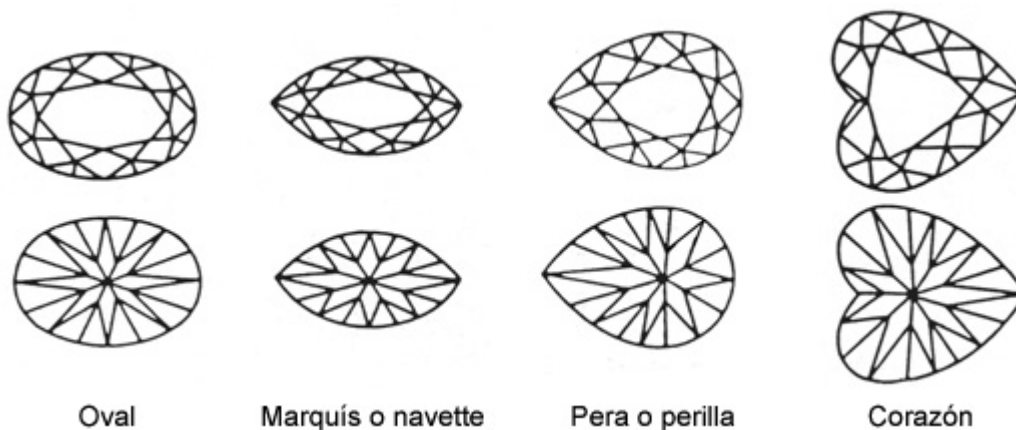


Hasta principios del siglo XX, la evolución de la talla de los diamantes se desarrolló de forma empírica. En 1919 Marcel Tolkowsky publicó el primer estudio técnico teniendo en cuenta las propiedades ópticas del diamante y el paso de la luz al refractarse en su interior y estableció las medidas "ideales" para la talla brillante.

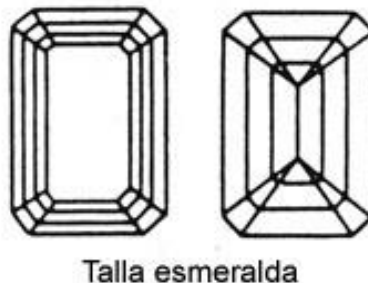
En las tallas brillante antiguas suele apreciarse falta de redondez, filetín muy grueso y perjudicado, la culata muy abierta (culet muy grande) y las facetas medias de la culata muy cortas. Sus proporciones presentan una corona muy alta, una tabla muy pequeña y una culata excesivamente profunda. Todo ello demuestra un elevado aprovechamiento del material bruto y se traduce en un deficiente aspecto, con poco brillo y dispersión.

Hay que tener en cuenta la denominación “brillante” solo puede referirse a un diamante con talla brillante. Otras gemas talladas con esta talla tienen que denominarse con el tipo de la gema, por ejemplo, “zafiro de talla brillante”. Por otro lado, un diamante tallado de otra forma tiene que denominarse, por ejemplo, “diamante de talla corazón”.

Tallas derivadas del brillante. Tienen la misma o muy parecida distribución de facetas que la talla brillante, pero su forma no es redonda (oval, marquís, corazón, pera o perilla, cojín).

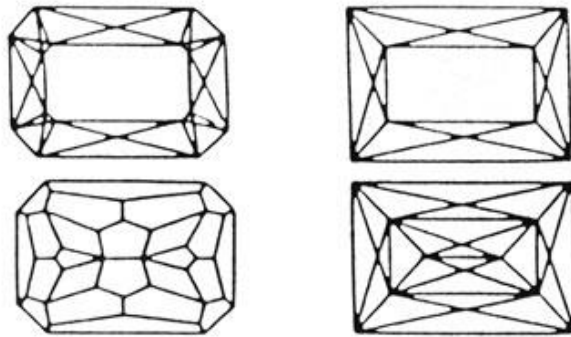


Tallas en galerías. Son unas tallas en la que las facetas tienen forma de trapecios alargados, con las aristas paralelas al filetín denominadas habitualmente galerías. La talla más importante de este grupo es la talla esmeralda, utilizada especialmente para esta gema. Tiene forma octogonal en el plano del filetín, pudiendo ser rectangulares y cuadradas. Se utilizan generalmente en piedras de color. Reciben distintos nombres según la forma: talla esmeralda, baguette, cuadrada o carré, trapecio, rombo, pentágono, etc.



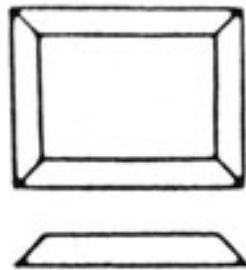
Tallas en Tijera o Cruzada. De forma rectangular con los vértices cortados; las facetas que rodean a la tabla tienen forma de triángulos cruzados. Se utilizan sobre todo en piedras de

imitación o gemas coloreadas.



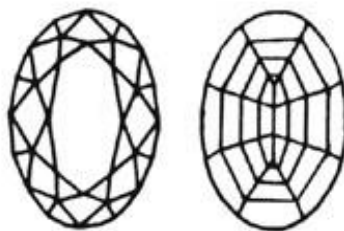
Tallas en tijera

Tallas en sello. Presenta una tabla muy grande, con una estrecha faceta trapezoidal alrededor y generalmente sin culata. Se usa para tallar piedras translúcidas u opacas.



Talla sello

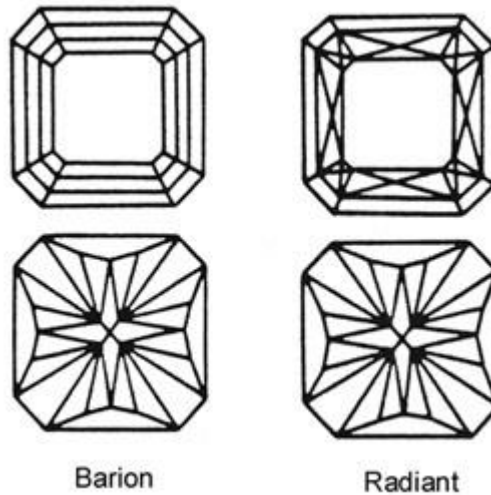
Tallas mixtas. En estas tallas la parte superior es de tipo brillante y la culata se talla en galerías paralelas, como en a talla esmeralda. Actualmente la inmensa mayoría de zafiros y rubíes que se tallan en Tailandia, India o Sri Lanka tienen tallas de este tipo, ya que las culatas talladas en galerías permiten mayor aprovechamiento del bruto, a costa de la apariencia estética de la piedra.



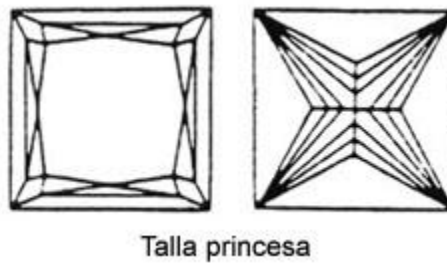
Talla briolette. Es una talla
Suele utilizarse en colgantes.

periforme facetada en toda su superficie.

Tallas Barión y Radiant. Utilizadas para el diamante. El contorno es octogonal, con las facetas de la corona de la talla esmeralda en el tipo barión, y con facetas cruzadas en el tipo radiant.



Talla Princesa. La talla princesa puede ser cuadrada o rectangular. La base puede tener distinto número de facetas. Se utiliza sobre todo en diamantes y permite mayor aprovechamiento del bruto.



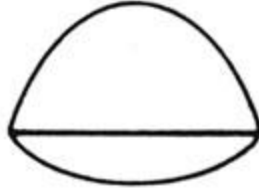
Tallas con facetas cóncavas. Recientemente se ha desarrollado una técnica nueva de tallar, en la cual la disposición de las facetas puede ser idéntica a las tallas tradicionales, pero las facetas no son planas, sino cóncavas. Estas piedras tienen un aspecto novedoso y bonito, ya que el brillo de las facetas cóncavas es muy diferente a las tallas tradicionales.

▪ **Tallas en Cabujón.** Son tallas no facetadas con superficies curvas. Se suele utilizar para piedras translúcidas u opacas. Podemos destacar tres tipos diferentes:

- **Cabujón sencillo.** Una cara es convexa y la otra plana.
- **Cabujón doble.** Ambas caras curvadas, convexas.
- **Cabujón hueco o hundido.** Una cara cóncava y la otra convexa



Sencillo



Doble



Hueco

OTRAS GEMAS IMPORTANTES

Como en el capítulo relacionado a la clasificación de minerales vienen descritas las características de algunas de las principales gemas, a continuación le presentaremos una relación de gemas que no se encuentran en ese capítulo y son comúnmente utilizadas en joyería.

Perlas. Las perlas son las gemas de origen orgánico que tienen mayor grado de utilización en el comercio de joyería. Cuentan con un mercado muy amplio y gozan de mucha aceptación entre los consumidores. Perla es cualquier concreción, nacarada o de otra naturaleza, encontrada en diversas especies de moluscos, marinos o de agua dulce. Su origen puede ser natural o cultivado. En la actualidad prácticamente todas las perlas que se comercializan son perlas cultivadas.

Los moluscos que producen las perlas constan de dos valvas unidas por una bisagra o charnela, y un cuerpo blando recubierto por un manto que es el responsable de producir el nácar que recubrirá la parte interna de la concha, así como las partículas que sirven de núcleo para la perla. La perla se forma cuando algún elemento irritante penetra en la ostra y esta no es capaz de expulsarlo. A partir de ese momento el manto comienza a segregar capas de aragonito y conchiolina que formarán el nácar, y que acabará recubriendo el elemento extraño. Cuanto más tiempo permanezca esa perla en el interior de la ostra, más capas de nácar se depositarán sobre ella.

El nácar que recubre a las perlas presenta un efecto especial, debido a la interacción de la luz en las diversas capas. Este efecto se denomina "oriente" y junto a otras características (color, tamaño, forma, etc.) marcarán la belleza y calidad de la perla.

Tipos de perlas. Por su formación dentro de la concha y su aspecto podemos distinguir básicamente tres tipos de perlas:

- **Perla quiste:** La que se origina en el saco perlífero y que tiene un aspecto redondeado, ovoide o en forma de pera, presentando su superficie totalmente recubierta de nácar.
- **Perla blister:** La que crece adherida a la cara interna de la concha, con aspecto de media esfera, y nacarada únicamente en su parte superior.
- **Perla barroca:** Aquellas quiste que presentan forma irregular.

Berilo. Ciclosilato de aluminio y berilo. Dentro del grupo del Berilo además de la esmeralda podemos encontrar otras variedades de interés gemológico como:

Aguamarina Heliodoro (Berilo oro)	color azul color amarillo	Fe ²⁺ Fe ³⁺
Morganita (Berilo rosa)	color rosa	Mn

Otras variedades menos importantes son: goshenita (incolora), bixbita (roja), berilo verde y berilo maxixe (de azul intenso). El berilo verde, a diferencia de la esmeralda, tiene color verde pálido que se debe al hierro y no al cromo o vanadio.

La aguamarina, el heliodoro y el berilo rosa son gemas muy cotizadas; la intensidad del color, la transparencia y la calidad de la talla marcarán diferencias de calidad. El berilo rojo es una gema muy rara que se cotiza mucho como piedra de colección.

Topacio. Es un silicato de aluminio. Se presenta en diversos colores, siendo el incoloro el más abundante. En la actualidad a la inmensa mayoría de topacios incoloros se les aplica un tratamiento de irradiación para producir el color azul. También existen topacios de color rosa, naranja (topacio imperial), amarillo y marrón. El topacio imperial y rosa son las variedades más cotizadas. Debido a su perfecta exfoliación los topacios son difíciles de tallar.

Turquesa. Es un fosfato de aluminio y cobre, que puede variar del azul celeste claro al azul verdoso, dependiendo de su origen. Generalmente se presenta como agregado criptocristalino en masas arriñonadas, capas finas e incrustaciones. Se talla en cabujón de formas diversas y también en figuras artísticas. A muchas turquesas se les aplica el tratamiento de impregnación superficial de cera o plástico para proporcionarles mayor consistencia y potenciar el color.

Ópalo. Es la sílice amorfa hidratada. El ópalo noble presenta un efecto óptico inexistente en cualquier otra piedra llamado juego de colores. Presenta distintas variedades de color, de ellas el llamado ópalo negro es el más cotizado. Otras variedades son el ópalo de fuego, transparente de color amarillo, anaranjado o rojizo, el ópalo de agua incoloro amarillo o pardo, el ópalo blanco de color blanco grisáceo o amarillento a veces lechoso, el ópalo matrix, etc.

Crisoberilo. Oxido de aluminio y berilio. El crisoberilo se presenta en tres variedades diferentes, siendo la variedad de alejandrita la más cotizada:

Crisoberilo color amarillo-verdoso, debido al hierro.

Ojo de gato (Cimófono). Color amarillo-verdoso-pardo. El color se debe al hierro. Tallada en cabujón presenta el efecto “ojo de gato” y es la única que puede denominarse simplemente por este efecto, Ojo de Gato. Es más apreciado cuanto más claro e intenso es el efecto, y cuanto más distinto es el color de la piedra a ambos lados de la línea del "ojo" (en inglés milk and honey = leche y miel).

Alejandrita. Es una gema que cambia de color según la fuente de luz que la ilumine. Las mejores aparecen verdes a la luz diurna y rojas a la luz incandescente. La mayoría muestran tonos lilas o morados. El color se debe al cromo. En el mercado es muy frecuente una piedra que pretende imitar este efecto de cambio de color. Es un corindón sintético con efecto alejandrita, debido al vanadio. El cambio de color de esta piedra, con frecuencia mal llamada “alejandrita”, es diferente, tiene color azulado a luz diurna y morado a la luz incandescente. También existen verdaderas alejandritas sintéticas.

Cuarzo. Óxido de silicio. Es un mineral muy abundante y se presenta en numerosísimas variedades, aunque aquí vamos a destacar algunas de las más importantes:

Variedades fanerocristalinas (de cristales grandes) más importantes:

- **Amatista.** De color morado-violáceo. Color por Hierro e irradiación natural. La de color más fuerte y aterciopelado es la de calidad más apreciada.
- **Citrino.** De color amarillo-anaranjado. Color debido al hierro. Aunque existe en la naturaleza, muchos de ellos se consiguen por tratamiento.
- **Prasiolita.** De color verde por hierro. El color también se puede obtener por tratamiento térmico de cierto tipo de amatistas.
- **Cuarzo hialino.** Incoloro (cristal de roca). Incluidos en este grupo hay otros cuarzos con abundantes inclusiones de otros minerales que les proporcionan un efecto especial. Variedades criptocristalinas más importantes (se denominan criptocristalinos los agregados formados por cristales diminutos, indistinguibles a simple vista):
- **Calcedonia.** Masas traslúcidas, por lo general de un solo color, que en muchas ocasiones se someten a tratamientos de tinción.
- **Ágatas.** Es una calcedonia bandeada, con variedad de colores y transparencia variable pudiendo llegar a ser casi opacas. Hay variedades gemológicas como el ónix, con bandas blancas y negras, sardonix con bandas blancas y pardas, el ónix negro sin bandas. También existen variedades no bandeadas que comúnmente también se conocen como ágatas, dentro de ellas encontramos el ágata musgosa, ágata de fuego o el ágata dendrítica, que presentan en su interior dibujos debidos a la presencia de óxidos de hierro o manganeso.
- **Jaspes.** En realidad se trata de una roca compuesta en alrededor de 80% por cuarzo microcristalino. Otros minerales en su composición le proporcionan coloraciones muy variadas, manchas, dibujos y mezclas de colores. Son siempre opacos.
- **Ojo de tigre.** Esta variedad pertenece al grupo de cuarzos pseudomórficos (sustituciones). Es de color marrón amarillento con reflejos dorados y presenta un efecto móvil debido a la existencia de fibras de crocidolita. La crocidolita no oxidada es de color azul y el cuarzo se llama "ojo de halcón", si se calienta se pone rojizo y se llama "ojo de buey".

Zoisita. Silicato de aluminio y calcio. La variedad más importante es la **Tanzanita** de color pardo-violeta y azul por vanadio. La mayoría de las tanzanitas se someten al tratamiento térmico para conseguir este color.

Granates. Es un grupo formado por un gran conjunto de especies minerales. Dentro de ellas podemos destacar el almandino, el granate más corriente de color rojo, otros granates rojos como el piropo o espesartina, los granates verdes como la tsavorita o el demantoide y el granate hessonita de color canela. También se encuentran granates de colores amarillo, naranja, morado y otros.

Jade. Con el nombre genérico de jade se conocen dos variedades distintas, la jadeíta y la actinolita (nefrita). Su color es muy variable, blanco, amarillo, rosa, malva, violeta, rojo, azul, pardo, negro y de una gran tonalidad de verdes. La variedad más apreciada se conoce como jade imperial, de color verde intenso. Con gran frecuencia se somete al teñido para darle color.

Lapislázuli. Se trata en realidad de un agregado de varios minerales. De color azul violeta o azulado más o menos intenso, con pequeñas inclusiones de pirita, a veces con vetas blanquecinas de calcita. Se talla en cabujón y objetos artísticos.

Espinela. Conocida desde la antigüedad, ha sido sin embargo confundida hasta el siglo XX con rubí. Es un óxido de aluminio y magnesio. Es transparente y puede presentar una coloración diversa: incolora, roja, púrpura y violeta, azul, azul-verde, siendo la roja o rosa la que se usa con mayor frecuencia en joyería.

Espodumena. Es un silicato de aluminio y litio. Puede presentarse en distintas variedades entre las que destacan la Kuncita de color púrpura a violeta y la Hiddenita de color verde esmeralda. Presentan un marcado pleocroísmo.

Ortosa. Pertenece al grupo de feldespatos potásicos, es un silicato alumínico potásico. Entre las variedades más importantes podemos citar la ortosa noble, transparente de color amarillo que se emplea más como piedra de colección que como gema y la adularia o piedra luna incolora o semitransparente, y con un resplandor blanquecino o azulado, llamado adularescencia.

Peridoto (olivino). Silicato de hierro y magnesio. De color verde oliva debido al hierro ferroso, pudiendo presentar color verde intenso en los mejores ejemplares. Se ha utilizado bastante en joyería a finales del siglo pasado.

Feldespato aventurina o Piedra sol. Variedad gemológica de plagioclasa, en concreto de la oligoclasa de color crema, anaranjado o rojizo, opaca y con efecto aventurinado por las plaquitas de hematites y goethita. La gran cantidad de material comercializado actualmente como aventurita es en realidad vidrio artificial con inclusiones de cobre que causan un efecto parecido.

Rodonita. Silicato de manganeso. Color rojo rosa con zonas negras por oxidación del manganeso. Frecuentemente granular o masivo. Se talla en cabujón.

Materiales orgánicos

Ámbar. Es una resina fósil de origen vegetal, cuya composición varía según su origen y antigüedad. El color depende del árbol productor de la resina; el más habitual es el amarillo, amarillo claro, anaranjado y pardo, y también en ocasiones rojizo, rojo negro, verdoso, azulado (muy raro) y blancuzco lechoso.

Azabache. Es una variedad de lignito de grano muy fino y compacto de origen vegetal. Opaco de color negro aterciopelado, brillante al pulido. Se utiliza sobre todo para collares, objetos de adorno, figuras y en talla en cabujón.

Coral. Esta gema de origen orgánico procede del esqueleto de un celentéreo marino. Su color varía del rosa muy pálido, conocido comercialmente como "piel de ángel", hasta el rojo oscuro intenso, también muy apreciado. Los colores intermedios, rojizos, anaranjados son mucho menos cotizados. Con frecuencia se somete al tratamiento de tinción para proporcionarle color rojo más cotizado.

Marfil. Gema de origen orgánico, procedente de las "defensas" de elefantes, hipopótamos, morsas, cachalotes, narvales y jabalíes verrugosos. El auténtico marfil es el de elefante y en especial del tipo africano, que presenta un color blanco, ligeramente amarillento, cremoso y semitraslúcido en láminas muy finas. En la actualidad el comercio de marfil está rigurosamente controlado a nivel internacional por CITES (The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora - Convenio sobre el Comercio Internacional de

Especies de Fauna y Flora Salvaje Amenazadas) para intentar salvar de la extinción a esta especie animal que en las últimas décadas había descendido espectacularmente.

Capítulo 5

Mineralogía Determinativa y propiedades físicas

Introducción

Puede definirse la mineralogía determinativa como la ciencia (y también arte) de identificar los minerales partiendo de sus propiedades física químicas. El reconocimiento de un mineral puede ser inmediato o elegir una serie de ensayos engañosos durante cierto tiempo, todo lo cual depende de la naturaleza y experiencia de observador.

La identificación de un mineral debería ser más fácil que de una especie animal o vegetal, puesto el número total de aquellos es mucho menor (unos 2000), y la mayoría tan raros que la posibilidad de tropezar con ellos es muy pequeña. Para el principiante, empero, puede ser un problema difícil la identificación de las escasas especies minerales que figuran en un curso elemental. La facilidad con la que un mineralogista experimentado indica el nombre de un ejemplar que aparentemente no encaja con la descripción de la especie, con solo mirarlo, o en ocasiones sopesándolo o rascándolo con una navaja, es para el estudiante una cualidad envidiable y fuera, a primera vista, de su alcance. Debe insistirse de que aquí desempeña un gran papel la costumbre de ver minerales: el mineralogista con experiencia suma instintivamente los caracteres del ejemplar desconocido y los compara con

el recuerdo visual, de los muchísimos que ha identificado antes. El paralelo más perfecto es el reconocimiento de una persona que hemos visto innumerables veces, y que identificamos por la suma total de sus rasgos: vestido, modo de andar, voz y demás características. Resulta, pues, que el mejor modo de hacer un reconocimiento mineralógico consiste en estudiar inteligentemente minerales en las colecciones y en el terreno; el examen cuidadoso de varios ejemplares diferentes de una especie revela aquéllas propiedades comunes que son esenciales en el diagnóstico. Los sistemas lógicos para identificar minerales son sin duda guías de gran utilidad, pero la experiencia y inteligencia permiten a menudo abreviar el proceso. Incluso cuando un examen rápido no permite identificar el ejemplar, al menos limita el campo de un número relativamente reducido de minerales, lo que permite elegir la prueba determinativa más conveniente, ya sea hallar su densidad o su punto de fusión, hacer un ensayo químico sencillo u otro cualquier camino. En las siguientes secciones se desglosan las propiedades de mayor valor determinativo, como algunos métodos de identificación.

Propiedades físicas de los minerales:

Además de la forma, que puede faltar por completo en los fragmentos de minerales, las propiedades físicas constituyen un elemento utilísimo para su reconocimiento. Algunas de estas propiedades pueden apreciarse a simple observación, otras requieren sencillas medidas y finalmente existen parámetros que requieren de una instrumentación más compleja y costosa. Las propiedades físicas de los cuerpos sólidos se dividen en direccionales y no direccionales. Las primeras incluyen las propiedades escalares, expresables en forma numérica, tal como la densidad, y otras propiedades difícilmente definibles mediante números, que dependen de una valoración subjetiva basada en los sentidos humanos, tal como la raya. Las segundas, denominadas vectoriales, no solo requieren un valor numérico para su correcta expresión (módulo) sino que debe especificarse también la dirección en la que se ha realizado la medida, tal como la cohesión, tenacidad, piezoelectricidad y piroelectricidad. En los cuerpos cristalinos están siempre presente por lo menos una propiedad vectorial que cambia de modo discontinuo, i.e., con el módulo bruscamente variable, debido a pequeñas desviaciones de la dirección de medida.

Nombre de los minerales:

Los nombres de los minerales son, por lo general, términos vulgares que hacen referencia a diversos aspectos como el color (albita: blanco; malaquita: malva; cianita: azul;), la región de origen (aragonita: de Molina de Aragón; aglesita: de la isla de Anglesey) o de un nombre propio (covellina: Covelli; Sillimanita; Silliman; halloysita: Halloye). Debido a la ausencia de un criterio fijo para su designación, en 1960 se creó un comité de nomenclatura. A partir de esa fecha solo se admiten nuevos nombres que hagan referencia a la composición química o estructura cristalográfica del mineral. El nombre del mineral descubierto de llevar la terminación “ita” y no admite sinonimias, a fin de sintetizar la nomenclatura y evitar confusiones.

Forma cristalina

Cuando un mineral se muestra cristalizado, su forma cristalina basta a veces para identificarlo sin ninguna prueba más. Los prismas hexagonales terminados por romboedros, generalmente de desigual desarrollo, son característicos del cuarzo y pueden citarse por ejemplo. Aves no es preciso siquiera ver el cristal libre: la sección transversal triangular y redonda de los cristales de turmalina sirve, para identificar este mineral inmediatamente.

Es importante recordar que los cristales aparecen desproporcionados o deformados por el desigual desarrollo de sus distintas caras, hecho que oscurece la verdadera simetría; es muy raro, pongamos como ejemplo, hallar un cristal cubico que sea un cubo perfectamente simétrico. Por otra parte, algunos minerales cristalizan en formas que le dan una apariencia simétrica que, en realidad, es falsa; los cristales de Adularia, variedad de la ortosa, parecen en ocasiones romboedros; al identificar cristales no proporcionados no debe jamás olvidarse que, si bien su aspecto puede no ser el usual, los ángulos que forma las caras han de tener un valor constante y que las caras semejantes lo son también físicamente por sus brillo, estriaciones, etc. El cuarzo, P. ej. Se encuentra con frecuencia en cristales laminares que resultan del desarrollo excesivo de un par de caras prismáticas pero los ángulos diedros que forman caras de este par con la de otro par son de 60° , y todas ellas suelen presentar las caracterices estriaciones horizontales.

La macla es a menudo un ciclo crítico para el reconocimiento. Algunos minerales comunes presentan macla muy típica: la de penetración de la Fluorita, las cruces recta y oblicua de la Estauroлита, los agregados de maclas de Cerusita, que forman como una red, etc. Es importante recordar que las maclas múltiples o repetidas pueden originar la simetría aparente mayor que la que realmente posee el mineral. El aragonito, P. ej., se presenta con frecuencia en cristales con todos el aspecto de prismas hexagonales que son el resultado de una macla triple según (110). Por suerte no hay modo de confundir estos cristales con los de calcita ya que esta, aunque hexagonal, casi nunca cristaliza en prismas hexagonales simples.

Apreciar bien la existencia de maclas polisintéticas por las estriaciones de los planos de exfoliación es de particular importancia en las plagioclasas. Se puede decir que es la única forma sencilla de distinguirlas de la ortosa. La ambligonita, mineral muy raro, muestra análogas macla polisintéticas laminares en las superficies de exfoliación, encontrándose en la algunas pegmatitas junto con las plagioclasas, de las que si distingue fácilmente por su densidad y por medio de ensayos químicos sencillos. También la Calcita y Corindón pueden presentar similares superficies estriadas, pero se distinguen bien de las plagioclasas.

Agregados cristalinos.

Casi todos los ejemplares minerales son agregados de cristales imperfectos. Incluso aquellos que se presentan en masa o en grano muy fino se ven como cristales al microscopio. El tipo de agregación puede ser tan útil para el reconocimiento como la forma cristalina. A continuación indicamos los términos con que se suelen designar los tipos de agregados más frecuentes. Muchos minerales se presentan en grupos cristales alargados en una dirección determinada, generalmente la uno de los ejes cristalográficos; se dice que el alargamiento es paralelo a α , a b o a c, según el caso. Cuando los individuos cristalinos que integran el agregado son suficientemente gruesos y de sección casi equidimensional se dice que su forma es columnar (caso de algunas turmalina); si son aplastados si dice que escamosa o tabular (cianita, estibina); si son pequeños y parecidos a agujas, acicular (pectolita, natolita); si son delgados que pueden considerar como fibras, fibrosa (Asbesto, algunas variedades de Yeso), y si parecen divergir de un centro común, el grupo se denomina radiado (pectolita, wavelita). Algunos minerales se presentan en agregados de hojas muy finas, forma a la que se da el nombre de laminar. Esto es particularmente característico de los minerales que poseen exfoliación perfecta simple, por lo que puede relacionarse con las característica cristalográficas: laminar según (001), según (010), etc. Generalmente las láminas son paralelas, pero pueden curvarse en torno a un centro común dando un agregado de formas concéntricas. Cuando son delgadas y

separables, cual sucede en las micas, se dice que el mineral es foliado. Si se trata de un agregado de laminillas pequeñas, se suele denominar micación (una variedad de hematites).

Cuando los individuos de un agregado cristalino no presentan alargamiento ni aplanamiento, es decir, cuando son equidimensionales, se dice que el agregado es granular, y según el tamaño de tales granos se llama de grano grueso, medio o fino. Si los granos son tan pequeños que ni a simple vista se distinguen, el agregado se llama compacto; en este caso pueden ser visibles al microscopio, micro-cristalino, o no visible por su extremada pequeñez, cripto-cristalino.

Existen algunos agregados muy característicos que no pueden distinguirse con los términos antes empleados. Los hay que son depositados en las cavidades subterráneas por gotas de agua que llevan sustancias disueltas, en cuyo caso su agregación es Estalactita; la Calcita y el Aragonito se encuentra a menudo de esa forma, y a veces también psilomelana y la Limonita, en ocasiones, las estalactitas se curvan y penetran de un modo muy curioso (agregados coraloides o elictíticos). Los detríticos son los que dan la impresión como los de ramas de un árbol así se presenta en el oro, la plata y el cobre cristalizados, así como las ramificaciones negras y tiznantes de la pirolusita y de la psilomelana, que a veces se ven en los planos de estratificación de las rocas sedimentarias.

La hematita se puede encontrar en masas nodulares o redondeadas que se asemejan a un racimo de uvas, agregación que se denomina botroidal ó tuberosa, que también las presentan algunas psilomelanas, malaquita y otros minerales.

La estructura interna de las masas botroidales es con frecuencia fibrosa con las fibras normales a las superficies. Por último, cuando el mineral forma agregados de píldoras redondeadas se dice que este agregado es oolítico si las esferitas son pequeñas, y pisolítico si son grandes. La calcita y el aragonito forman a menudo agregados, oolítico y pisolíticos, y también la bauxita, en cuyo caso se constituyen un carácter importante para la determinación.

Exfoliación y fractura

La exfoliación es la tendencia que tiene un mineral al romperse en direcciones bien definidas y siempre paralelas a caras posibles de cristal. La calidad de una exfoliación se indica con las palabras perfecta, buena e imperfecta. Es perfecta cuando resulta difícil romper el mineral según otra dirección. Y las superficies de exfoliación son extensas y lisas. Es buena cuando el mineral se rompe fácilmente según los planos de exfoliación pero puede hacerlo también en otras direcciones; las superficies de exfoliación son lisas pero están interrumpidas por otras fracturas es imperfecta cuando la facilidad del mineral para romperse según las direcciones de exfoliación es solo ligeramente más pronunciada en las demás direcciones y las superficies de exfoliación son pequeñas y muy accidentadas.

La dirección de exfoliación se indica por la cara a la que es paralela dando los índices o el nombre de dicha cara. La exfoliación según (111) se conoce como octaédrica en el sistema regular, como piramidal en los sistemas tetragonal y ortorrómbico como primática en el monoclinico según (110) es dodecaédrica en los minerales del sistema regular y prismática en los otros sistemas salvo en el triclínico, donde es pinacoidal o pedial. El número de direcciones de exfoliación de una forma cristalina depende del de sus caras; así, la exfoliación (110) en los cristales regulares se produce en 6 direcciones mientras que en los rómbicos y monoclinicos solo presenta 2 y en

los triclinicos 1. Un estudio detenido de la exfoliación nos puede ayudar mucho para determinar el sistema cristalino de un mineral cuyas caras no estén muy bien desarrolladas. Un dato de sumo interés es que todos mineral que solo presenta una dirección de exfoliación no puede ser regular (¿Por qué razón?).

Algunos minerales suelen representar partición, que a primera vista no se distinguen muy bien de la exfoliación puesto que también consiste en una ruptura según ciertos planos cristalográficos. La diferencia reside en que la exfoliación se presenta en todos los ejemplares de una especie mineral, mientras que la partición la muestran solo alguno. Las maclas se rompen con frecuencia según los planos de composición. Los minerales en exfoliación y los que la tienen pero se presenta en masas de grano fino pueden ofrecer una fractura característica. La más común de todos es la conchoide parecida a la que presenta el vidrio; el cuarzo en masa la muestra también frecuentemente, e igual sucede en muchos minerales que forman masas micro o criptocristalinas. Otros términos aplicables a distintos tipos de fractura son astillosos, lisos, rugosos, de significados claros, y dentada, que indican una superficie como la que queda al romperse el hierro fundido. En pocas palabras:

- **EXFOLIACIÓN:** Si un mineral, al aplicar la fuerza necesaria, se rompe de manera que deje dos superficies planas se dice que posee una exfoliación. La exfoliación depende de la estructura cristalina y tiene lugar sólo paralelamente a planos atómicos que poseen una fuerza débil de unión entre ellos.

Al describir una exfoliación deben de mencionarse su calidad y dirección cristalográfica.

Las exfoliaciones se distinguen a grandes rasgos en los siguientes tipos:

- **Exfoliación completa en dos direcciones:**

Mica, clorita, talco

- **Exfoliación buena en dos direcciones:**

Feldespato potásico según dos superficies perpendiculares entre sí, hornablenda con exfoliación prismática.

- **Exfoliación buena en tres direcciones:**

Calcita según el romboedro – Generalmente en todas las formas cristalinas de calcita puede reconocerse planos de crucero en tres diferentes orientaciones. Estos planos de crucero se intersectan formando ángulos de 75° y de 105° de los cuales resulta la forma romboédrica típica de la calcita. Barita BaSO₄ ocurre en cristales tabulares que tienen con frecuencia dos caras perpendiculares a la cara mayor que convergen formando bordes agudos.

- **Exfoliación clara en dos direcciones:**

Piroxeno

- **Exfoliación poco clara:**

Olivino

- **Exfoliación ausente:**

Cuarzo con su fractura concoidea. En el cuarzo los átomos están dispuestos con tal regularidad que los enlaces entre los mismos son muy similares en todas direcciones. En consecuencia, no existe tendencia a que el mineral se rompa según un plano particular, y en los cristales de cuarzo se desarrollan fracturas **concooidales**.

Una medida para determinar la calidad de la exfoliación es, entre otras, el brillo existentes sobre las superficies de exfoliado, que es el responsable de las superficies lisas reflejantes que se observan en los frentes de las aristas.

-Fractura: Por fractura de un mineral se entiende la manera como se rompe cuando no se exfolia o parte. Hay distintos tipos de fractura:

- **Concooidal:** cuando la fractura tiene superficies suaves, lisas, como la cara interior de una concha.
- **Fibrosa o astillosa:** cuando un mineral se rompe se vuelve fibras o astillas.
- **Ganchuda:** cuando un mineral se rompe según una superficie regular, dentada, con filos puntiagudos.
- **Desigual o irregular:** cuando un mineral se rompe según superficies bastas e irregulares.

Partición.

Los cristales maclados pueden separarse fácilmente a lo largo de los planos de composición. Cuando en un mineral se producen superficies planas por rotura a lo largo de dichos planos predeterminados, se dice que tiene partición. El fenómeno se parece a la exfoliación, pero hay que distinguirlo de ella por el hecho de que no lo exhibirán todos los ejemplares de un determinado mineral, sino sólo aquellos que estén maclados o hayan sido sometidos a una presión apropiada.

Tenacidad. Es la resistencia que un mineral ofrece a la ruptura, trituración, curvatura o sesionado. La mayoría de los minerales son frágiles, esto es, se pueden reducir a polvo o triturar. Hay, sin embargo, unos pocos, sobre todo metales nativos que son maleables, es decir, que cambian de forma sin romperse, pues al martillar o presionarlos los granos se convierten en laminas. Los minerales blandos (de dureza inferior a 3) que nos son frágiles suelen ser séctiles, palabra que significa que se puede cortar con un cuchillo. Un mineral flexible es el que se deforma o curva fácilmente (las láminas delgadas del yeso), y es elástico cuando después de deformado vuelve espontánea y rápidamente a su forma inicial, como, P. ej., las láminas delgadas de Mica. En otras palabras.

Es la resistencia que un mineral opone a ser roto, molido, doblado o desgarrado, en resumen su cohesión, se conoce con el nombre de Tenacidad. A continuación se facilitan los términos que se emplean para describir las diversas clases de Tenacidad en los minerales.

- **Frágil:** un mineral que fácilmente se rompe o reduce a polvo.
- **Maleable:** un mineral puede ser conformado en hojas delgadas por percusión.
- **Séctil:** un mineral que puede cortarse en virutas delgadas con un cuchillo.
- **Dúctil:** un mineral al que se le puede estirar en forma de hilo.
- **Flexible:** un mineral que puede ser doblado pero que no recupera su forma original una vez que termina la presión que lo deformaba.

- **Elástico:** un mineral que recobraba su forma primitiva al cesar la fuerza que lo ha deformado.

Peso específico.

El peso específico o densidad relativa de un mineral es un número que expresa la relación entre su peso y el peso de un volumen igual de agua a 4°C. Si un mineral tiene peso específico 2, eso significa que una muestra determinada de dicho mineral pesó dos veces lo que pesaría un volumen igual de agua.

Brillo.

El brillo es debido por la capacidad del mineral de reflejar la luz incidente. Se distinguen minerales del brillo

Brillo		Ejemplos/ Descripción.
Metálico		Pirita, magnetita, hematita, grafito.
Semimetálico		Uralina (pechblenda, UO_2), geothita
No metálico	Vítreo	Cuarzo, olivino, neflina, en las caras cristalinas, siderita.
	Resinoso	Como la resina, por ejemplo. Esfalerita.
	Graso	Grasoso al tacto: cuarzo, nefelina de brillo gris graso.
	Oleoso	Olivino
	Perlado	Como brillo de las perlas: por ejemplo. Talco, biotita, siderita.
	Sedoso	Como el brillo de seda; yeso de estructura fibrosa, sericita, geothita.
	Mate	Como el brillo de la tiza
	Adamantino	Brillante: diamante, rutilo

Color

Cuando la luz blanca incide en la superficie de un mineral parte de ella se refleja y parte se refracta. Si la luz no sufre absorción, el mineral es incoloro, tanto en la luz reflejada como en la transmitida. Los minerales son coloreados porque absorben ciertas longitudes de onda de la luz y el color es el resultado de la combinación de las longitudes de onda que llegan al ojo. Algunos minerales exhiben diferentes Colores cuando la luz es transmitida en direcciones cristalográficas diferentes. Esta absorción selectiva es conocida como pleocroísmo, si sólo hay dos direcciones, la propiedad se llama dicroísmo.

En algunos minerales el color es una propiedad fundamental directamente relacionada con sus elementos constituyentes principales y es, por consiguiente, constante y característico; en estos minerales, llamados idiocromáticos, el color sirve como medio de identificación importante.

Minerales idiocromáticos con colores distintitos son por ejemplo:

mineral	color
Hematita	rojo
Epidota	verde
Clarita	verde
Lapis lazuli	Azul oscuro
Turquesa	Azul característico
Malaquita	Verde brillante
Cobre nativo	Rojo cobrizo

Los minerales que presentan un rango de colores dependiendo de la presencia de impurezas o de inclusiones se llaman alocromáticos.

A los minerales alocromáticos pertenecen por ejemplo: feldespatos potásicos cuyo color varía de incoloro a blanco pasando por color carne hasta rojo intenso o incluso verde.

Organización interna de los minerales.

La materia solida está dividida en dos categorías a saber: Materia amorfa; integrada por partículas que no presentan arreglo geométrico, tal es el caso de la bauxita y el vidrio volcánico, y Materia cristalina; en la cual las partículas que la integran poseen una estructura cristalina; en la cual las partículas que la integran poseen una estructura interna ordenada, con posiciones fijas. Cuando las condiciones son favorables, su aspecto externo es un reflejo de su ordenamiento; por lo tanto, adquiriendo forma geométrica, y se habla de cristal.

Organización interna de los minerales.

Puesto que los cristales son cuerpos geométricos, puede estudiarse desde el punto de vista descriptivo, es decir, sin tomar en consideración la orientación de los átomos en su interior. Este tipo de estudio supone, en realidad, el primer estudio de desarrollo de la mineralogía como ciencia (1500 – 1912), después de que fue separada del grupo de las ciencias mineralógicas aplicada los cristales son cuerpos visibles, a diferencia de los átomos que no pueden ser observados directamente, por lo que las primeras descripciones sobre su morfología, fueron realizadas a simple vista, o bien con la ayuda del goniómetro; posteriormente se aplicaron a su estudio las lentes y finalmente el microscopio. Las dimensiones en los cristales no deben considerarse de este modo de importancia capital, pues aquellas permanecen constantes independientemente del tamaño reducido que tenga el cristal. De este modo,

mientras un cristal sea más pequeño, mucho más nítida y brillantes serán las caras y por ende serán más manifiestas las aristas y los vértices de este sólido.

Morfología:

Se distingue la combinación de las caras del mineral/cristal y el hábito del mineral/cristal.

Combinaciones de las caras:

Las combinaciones de las caras del cristal significa el conjunto de todas las caras del cristal o bien la forma cristalina, la cual depende de la simetría del cristal, Por ejem. La galena PbS y la halita NaCl, que pertenecen al sistema cubico pueden cristalizar como cubos, además la galenita puede cristalizar en una combinación de cubo y octaedro, granate cristaliza en la forma romboédrica, en la forma isotetraédrica o en una combinación de dichas dos formas.

Las caras de un cristal (hábito).

El hábito es la apariencia de los cristales, así como la morfología de éstos cuando crecen juntos se denomina agregado; son fundamentales para el reconocimiento de los minerales. Se comentara los fundamentales para que cuando se encuentre un mineral un mineral el estudiante pueda hablar con palabras técnicas.

- **Acicular:** cristales delgados como agujas.
- **Capilar y filiforme:** cristales como cabellos o hebras.
- **Hojoso:** cristales alargados, aplastados como hojas de cuchillo.
- **Dendrítico:** arborescencia en ramas divergentes y delgadas, algo parecidas a las plantas.
- **Reticulado:** agrupación de cristales en redes.
- **Divergente o radial:** grupos de cristales radiales
- **Drusa:** cuando una superficie está cubierta de pequeños cristales.
- **Columnar:** individuos que asemejan a columnas.
- **Hojoso:** agregado de muchas hojas aplastadas.
- **Fibroso:** agregados fibrosos delgados, paralelos o radiados.
- **Estrellado:** individuos radiales que forman grupos concéntricos o como estrellas.
- **Globular:** individuos radiales que forman grupos esféricos o semiesféricos.
- **Botrioidal:** cuando las formas globulares se agrupan como racimos de uvas (del griego botrio, racimo de uvas).
- **Reniforme:** individuos radiales terminados en masas redondas que parecen un riñón.

- **Mamilar:** grandes masas redondas que parecen mamas, formadas por individuos radiales.
- **Coloforma:** resulta con frecuencia difícil distinguir entre los agregados representados en los tres términos, y como resultado de ello el término coloforma ha sido propuesto para incluir todas las formas más o menos esféricas.
- **Exfoliable:** cuando un mineral se separa fácilmente en placas y hojas.
- **Micáceo:** parecido al exfoliable, pero el mineral puede desintegrarse en hojas pequeñísimas, como en el caso de la mica.
- **Laminar o tabular:** cuando un mineral consta de individuos planos como placas superpuestas y adheridas unos a otros.
- **Plumoso:** formado por escamas finas con una estructura divergente o espumosa.
- **Granular:** cuando un mineral está formado por granos grandes o pequeños se llama granular.
- **Estalactítico:** cuando un mineral es en forma de conos o cilindros grandes. Las estalactitas se forman por la deposición procedente del goteo de agua que contiene el mineral desde la bóveda de una cavidad.
- **Concéntricos:** una o más capas superpuestas alrededor de un centro común.
- **Pirolítico:** un mineral formado por masas redondas del tamaño aproximado de un guisante.
- **Oolítico:** un agregado mineral formado por pequeñas esferas semejantes a las huevas del pescado.
- **En bandas:** cuando un mineral aparece en bandas estrechas de diferentes **Colores** o texturas.
- **Macizo:** un agregado mineral formado por mineral compacto con una forma irregular, sin ninguna apariencia peculiar como los arriba descritos.
- **Amigdaloides:** cuando una roca, tal como el basalto, contiene nódulo en forma de almendra.
- **Geoda:** cuando una cavidad ha sido recubierta por la deposición de mineral, pero no ha quedado completamente rellena, la capa mineral, más o menos esférica, se denomina geoda. El mineral se presenta frecuentemente en bandas, como el ágata, debido a la deposición sucesiva del material. La superficie interior aparece frecuentemente recubierta con cristales en relieve.
- **Concreciones:** masas formadas por deposición de mineral sobre un núcleo. Algunas concreciones son casi esféricas, mientras que otras asumen gran variedad de forma.

Ordenación y clasificación mineral.

Antes de que la química alcanzara un cierto desarrollo y de que se produjeran importantes avances tecnológicos, sobre todo en el campo de la óptica y microscopía electrónica, los minerales fueron clasificados con base a criterios

meramente físicos, ya que estos proporcionaban datos con un grado de confiabilidad acerca de su naturaleza, y además, porque era el sentido de la vista el único instrumento del que se disponía.

- **Elementos nativos o sustancias simples.**

Además de los metales nativos, semimetales y no metales, a esta clase pertenecen condicionalmente los nitruros, carburos, fosfuros y siliciuros poco difundidos. Corresponden en número a unas 50 especies minerales.

- **Sulfuros y seleniuros, Telururos, Arseniuros, Antimoniuros y Bismuturos.**

Corresponden un conjunto de unas 300 especies minerales.

- **Halogenuros o Haluros, además de los Cloruros, Fluoruros, Bromuros y Yoduros, así como Oxihaluros e Hidrohaluros.**

Constituyen un grupo de unas 100 especies minerales.

- **Óxidos e Hidróxidos.**

Comprenden unos 250 minerales.

- **Nitritos, Carbonatos y Boratos.**

Constituyen un grupo de 200 minerales.

- **Sulfuros, además de Cromatos, Molibdatos y Volframatos.**

Comprenden unas 200 especies minerales.

- **Fosfatos, Arseniats y Vinadatos.**

Constituye unos 350 minerales.

- **Silicatos, Aluminosilicatos, así como Borosilicatos, Titanosilicatos y Berilosilicatos.**

Comprenden un grupo de unos 500 minerales

Estas clases se dividen en subclases; el indicio de clasificación de las cuales es el tipo estructural de los minerales. En la mayoría de las clases se destacan las subclases de los minerales con estructuras de coordinación, insular, de cadena, estratificada o de armazón. Una división más detallada de las subclases en función de las particularidades de la composición química; su complejidad relativa, presencia de aniones complementarios o el agua.

Siguiendo consideraciones geopolíticas y económicas muchos autores han clasificado a los minerales en tres clases o categorías, tal es el caso de pehrson en Balestini (1959); que expone la siguiente clasificación:

Polimorfos:

Muchos cuerpos pueden tener una composición química idéntica y presentarse bajo formas cristalinas diferentes. De acuerdo con lo dicho anteriormente, su anisotropía será diferente en un caso que en otro, y, por tanto, forman minerales diferentes. Entre los ejemplos más corrientes tenemos:

Composición química	Sistema de cristalización	Mineral
C	regular	Diamante
C	Hexagonal	Grafito
CaCO ₃	Hexagonal	Calcita

CaCO ₃	Rómbico	Aragonito
FeS ₂	Regular	Pirita
FeS ₂	Rómbico	Marcasita

Isomorfismo:

Recíprocamente, muchos cuerpos son de manera lógicamente próximos entre sí porque: cristalizan en el mismo sistema, cristalizan simultáneamente o tienen similares propiedades físicas y químicas.

Estos cuerpos se denominan isomorfos y pueden tener todas las composiciones intermedias entre las de dos constituyentes puros, A y B, presentando propiedades que varían de una manera continua de un compuesto a otro.

Los olivinos y las plagioclasas son ejemplos de lo anterior, según se verá en apartados posteriores.

Criptocristalización:

La estructura interna organizada de los minerales puede, en muchos casos y bajo circunstancias favorables, manifestarse por la adopción de una forma poliédrica apreciable a simple vista. En otros casos, nunca se manifiesta la estructura interna en forma macroscópica. Cuando esto último ocurre se dice que el mineral es criptocristalino o microcristalino. Algunos autores consideran minerales diferentes a aquellos que, dentro del mismo sistema de cristalización y con composición química idéntica, son criptocristalinos o no. Otros, por el contrario, consideran a estos últimos como variedades criptocristalinas de los anteriores.

Seudomorfismo:

Se dan casos en que una sustancia mineral que ocupa la forma cristalográfica que le es propia, es sustituida por otra que adopta aparentemente una forma que no le corresponde. Este fenómeno se denomina pseudomorfismo.

Dureza

Se llama dureza al grado de resistencia que opone un mineral a la deformación mecánica. Un método útil y semicuantitativo para la determinación de la dureza de un mineral fue introducido por el químico alemán Mohs. El creó una escala de dureza de 10 niveles. Para cada nivel existe un mineral respectivo y muy común. El mineral del nivel superior perteneciente a esta escala puede rayar a todos los minerales de los niveles inferiores de esta escala.

La dureza de un mineral desconocido puede averiguarse rascando entre sí una cara fresca del mineral desconocido con los minerales de la escala de MOHS. El mineral más duro es capaz de rayar al mineral más blando. Los minerales de la escala de MOHS que rayan el mineral desconocido son más duros que este, los minerales que son rayados por el mineral desconocido son menos duros. Por tanto la dureza del mineral desconocido se estrecha entre el nivel superior del mineral que puede rayarlo y el nivel inferior que es rayado por este mineral. Con cierta

experiencia y algunos medios auxiliares simples se puede conocer rápidamente la dureza de forma aproximada. Los minerales que pertenecen a la escala de MOHS son los siguientes:

Escala de MOHS		
Dureza	Mineral	Comparación
1	Talco	La uña lo raya con facilidad
2	Yeso	La uña lo raya
3	Calcita	La punta de un cuchillo lo raya con facilidad
4	Fluorita	La punta de un cuchillo lo raya
5	Apatito	La punta de un cuchillo lo raya con dificultad
6	Feldespato potásico	Un trozo de vidrio lo raya con dificultad
7	Cuarzo	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero desprende chispas
8	Topacio	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero desprende chispas
9	Corindón	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero desprende chispas
10	Diamante	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero desprende chispas



La dureza de un mineral depende de su composición química y también de la disposición de sus átomos. Cuanto más grande son las fuerzas de enlace, mayor será la dureza del mineral.

Grafito y diamante por ejemplo son de la misma composición química, solamente se constituyen de átomos de carbono C. grafito tiene dureza según MOHS de 1, mientras que el diamante tiene dureza según MOHS de 10. En la estructura del diamante cada átomo de carbono que tiene 4 electrones en su capa más exterior puede alcanzar la configuración de ocho electrones compartiéndose un par del mismo con 4 átomos de carbono adyacentes, los cuales ocupan las esquinas de una unidad estructural de forma tetraédrica. El enlace covalente entre los átomos de carbono se repite formando una estructura continua, dentro de lo cual la energía de los enlaces covalentes se concentrara en la proximidad de los electrones compartidos, lo que determina la dureza excepcional del diamante.

En la estructura del grafito, los átomos de carbono se presentan en capas compuestas por anillos hexagonales de átomos, de modo que cada átomo tiene 3 que lo rodean. Las capas de átomos del grafito están separadas una distancia relativamente grande, y quedan átomos dispuestos en forma alternada, exactamente por encima de los átomos de la capa adyacente. La causa de la poca dureza del grafito es que los enlaces entre las capas de átomos son muy débiles, mientras que en los átomos en el interior de las capas están dispuestos mucho más próximos que en la estructura del diamante.

Exfoliación (crucero)

Los cuerpos cristalinos pueden exfoliarse en superficies lisas a lo largo de determinadas direcciones, mediante la influencia de fuerzas mecánicas externas, por ejem: mediante de la presión o de golpes de un martillo.

Esta llamativa exfoliación (crucero) depende del orden interno existente en los cristales. Los planos de exfoliación o bien de cibaje son la consecuencia del arreglo interno de los átomos y representan las direcciones en que los enlaces que unen a los átomos son relativamente débiles. La superficie de exfoliación corresponde siempre a caras cristalinas sencillas.

Mientras mayor es el contraste entre la fuerza de los enlaces que unen a los átomos en las direcciones paralelas al plano de exfoliación (crucero) y la debilidad de los enlaces que unen a los átomos en las direcciones perpendiculares a los planos de exfoliación (crucero).

El color de la raya

Es debido por trozos del cristal molidos finamente, colocados sobre una base blanca, como por ejem. Un trozo de porcelana facilita el que separemos si nos encontramos ante un mineral de color propio o ajeno. El color de la raya del feldespato potásico siempre será blanco igualmente si es producido por un feldespato potásico incoloro, de color carne o verde.

El color de la raya tiene importancia en la identificación de las menas. El color de la raya de magnetita es negro, de hematita es rojo cereza, de goethita es de color café.

Fluorescencia y fosforescencia:

Es la propiedad que tienen los minerales que emiten luz al ser expuestos a la acción de rayos ultravioleta, Rx o algún tipo de rayos catódicos. Si la emisión de luz continua después de haber cesado la fuente emisora se dice que el mineral es fosforescente.

PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Piezoelectricidad: es la propiedad que presentan algunos minerales de generar pequeños impulsos eléctricos muy regulares con la presión.

Piroelectricidad: es la propiedad que presentan algunos minerales de generar pequeños impulsos eléctricos muy regulares con los cambios de temperatura.

Normalmente los minerales que cumplen una propiedad suelen cumplir también la otra (Cuarzo).

PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Cuando un mineral es atraído por un imán se le llama magnético. Cuando un mineral se comporta como un imán se dice que presenta magnetismo. El magnetismo puede ser inducido, provocado por otro campo magnético o por una corriente eléctrica. Ahora bien, no todo mineral magnético tiene que presentar magnetismo. (Magnetita [Fe₃O₄ ferroso férrico]).

Cristales maclados:

Algunos cristales están formados por dos o más partes en las cuales la celosía (Kristallgitter) tiene orientaciones diferentes que están relacionadas en forma geométrica. Los cristales compuestos de este tipo se conocen como cristales maclados.

Hay varios tipos de maclas, por ejem: maclas simples, maclas de contacto, maclas de interpretación, maclas paralelas, maclado normal.

Se llaman maclas simples a los cristales compuestos de dos partes individuales, que tienen una relación estructural definida.

Si las dos partes de una macla simple están separados por una superficie definida, esta se describe como maclado de contacto.

Macla de interpretación se refiere a los cristales unidos por un plano de composición – superficie a lo largo de la cual los dos individuos están unidos irregular por ejemplo: Ortoclasa.

Solubilidad:

La solubilidad depende de la composición del mineral.

Sobre todo se usa una dilución fría de ácido clorhídrico HCl para distinguir calcita de puro CaCO₃ o sin CaCO₃.

La relación es la siguiente:

$\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (dióxido de carbonato diluido en agua) + CaCl₂ y H₂CO₃ se descompone en H₂O y dióxido de carbono (CO₂ gas).

Burbujas de CO₂ se producen por esta relación. Se observa la efervescencia de la dilución de ácido clorhídrico cuando se libera el dióxido de carbono.

La concentración de la dilución de HCl tiene que ser 5%. Para la aplicación de la dilución del HCl se necesita un plano fresco de fractura de una roca.

Densidad:

Cada mineral tiene un peso definido por centímetro cúbico; este peso característico se describe generalmente comparándolo con el peso de un volumen igual de agua; el número de masa resultante es lo que se llama “peso específico” o “densidad” del mineral.

El peso específico de un mineral aumenta con el número de masa de los elementos que lo constituyen y con la proximidad o el apretamiento en que estén arreglados en la estructura cristalina.

La mayoría de los minerales que forman rocas tienen un peso específico de alrededor de 2.7 g/cm^3 , aunque el peso específico medio de los minerales metálicos es aproximadamente de 5 g/cm^3 .

Los minerales pesados son los que tienen un peso específico más grande que 2.9 g/cm^3 , por ejemplo: circón, pirita, piroxeno, granate.

Propiedades magnéticas y eléctricas:

Todos los minerales están afectados por un campo magnético. Los minerales que son atraídos ligeramente por un imán se llaman *paramagnéticos*, los minerales que son repelidos ligeramente por un imán se llaman *diamagnéticos*.

Magnetita Fe_3O_4 y Pirrotita Fe_{1-n}S son iónicos minerales magnéticos comunes.

Los minerales tienen diferente capacidad para conducir la corriente eléctrica. Los cristales de metales nativos y muchos sulfuros son buenos conductores, minerales como micas son buenos aislantes dado que no conducen electricidad.

Luminiscencia:

Luminiscencia se denomina la emisión de luz por un mineral, que no es el resultado de incandescencia. Se le observa entre otros en minerales que contienen iones extraños llamados activadores.

Fluorescencia:

Los minerales fluorescentes se hacen luminiscentes cuando están expuestos a la acción de los rayos ultravioleta, X o catódicos. Si la luminiscencia continúa después de haber sido cortado la excitación se llama al fenómeno fosforescencia y al mineral con tal característica mineral fosforescente. Las fluoritas de color intenso son minerales fosforescentes, que muestran luminiscencia al ser expuestos a los rayos ultravioleta.

Divisiones de los minerales

Las divisiones más amplias en la división de los minerales son las siguientes.

1. Elementos Nativos.
2. Sulfuros.
3. Sulfosales.
4. Óxidos u Hidróxidos.
5. Haluros.
6. Carbonatos.
7. Nitratos.
8. Boratos.

9. Fosfatos.
10. Sulfatos.
11. Volframatos.
12. Silicatos.

Estas se dividen en *familias*, basándose en los tipos químicos, y la familia a su vez, se divide en grupos, que presentan una gran similitud cristalográfica y estructural. El grupo formado por *especies*, que pueden formar series entre sí. Las especies tienen la misma estructura pero diferente composición química. Una especie puede dividirse en variedades químicas mediante objetivos modificadores que reflejan la presencia de cantidades no usuales de constituyentes químicos. Ejemplo de estos adjetivos son:

Nombre	Rico en:
Alumínico	Al
Cálcico	Ca
Crómico	Cr
Ferroso	Fe ⁺²
Férrico	Fe ⁺³
Magnesiano	Mg
Manganesico	Mn

En cada una de las clases, se da primero el mineral que posee la relación más alta de metal a no metal, seguido por aquellos minerales que contienen progresivamente menos metal.

Minerales nativos:

Con excepción de los gases libres de la atmosfera, solamente unos veinte elementos se encuentran en estado nativo. Estos elementos pueden dividirse en:

- 1. Metales
- 2. Semimetales.
- 3. No metales.

Los metales nativos más comunes, que se presentan estructuras muy sencillas, forman tres grupos: el grupo del oro (grupo espacial: Fm3m), que comprende oro, plata, cobre y plomo, todos ellos isoestructurales; el grupo del platino (grupo espacial: Fm3m), que comprende al platino, paladio, iridio y osmio, todos ellos isoestructurales y el grupo del hierro (grupo espacial Fm3m), que corresponde hierro y ferroníquel, de los cuales el hierro puro y la kamacita poseen el grupo espacial Im3m y la variedad rica en Ni del ferroníquel (taenita) posee el grupo espacial Fm3m. se han encontrado también mercurio, Tántalo, estaño y zinc. Los semimetales nativos forman dos grupos isoestructurales: Arsénico, antimonio y bismuto (grupo espacial P3, 21). Los no metales importantes: azufre y carbono, en forma de diamante y grafito.

Elementos nativos: Son minerales que se presentan como elementos aislados, sin combinar con otros. Atendiendo a sus caracteres más generales pueden agruparse en tres apartados:

Metales nativos: Oro, plata, platino, cobre, plomo, iridio, osmio, hierro y ferroníquel. Entre sus propiedades hay que citar que presentan simetría cubica, elevada conductividad térmica y eléctrica, brillo típicamente metálico, dureza baja, ductilidad y maleabilidad.

Semimetales nativos: Incluyen el arsénico, antimonio, bismuto, selenio y telurio. Los tres primeros cristalizan en el sistema hexagonal, mientras que los dos últimos lo hacen en el trigonal. Presentan un enlace intermedio entre el metálico y el covalente, una fragilidad mayor que la de los metales y una conductividad más baja.

No metales nativos: Incluyen el azufre y el carbono, este último en sus dos formas de diamante y grafito. El azufre tiene una dureza y un punto de sesión muy bajos, y cristaliza en el sistema rómbico. El diamante cristaliza en el sistema cubico, tiene una dureza muy elevada, gran estabilidad química y baja conductividad eléctrica. El grafito cristaliza en el sistema hexagonal, es muy blando y tiene elevada conductividad.

Sulfuros

Los sulfuros constituyen una importante clase de minerales que incluyen a la mayoría de las menas minerales. En ella se incluyen también a los sulfuroarsénicos, arseniuros, telururos, que son similares a los sulfuros pero más raros.

La mayor parte de los sulfuros son opacos y tienen colores distintos, así como raya de colores muy característicos. La fórmula general de los sulfuros viene dada por X_mZ_n , donde X representa a los elementos metálicos y Z, al elemento no metálico. El orden de enumeración de los distintos minerales es el de la proporción decreciente, X: Z.

Los sulfuros pueden ser divididos en reducidos grupos estructurales}, pero no es posible hacer grandes generalizaciones con respecto a su estructura. En muchos sulfuros simples se encuentra coordinación tetraédrica u octaédrica regular alrededor del azufre. En los sulfuros más complejos, así como en Sulfosales, pueden encontrarse poliedros de coordinación distorsionada. Muchos de los sulfuros tienen enlace iónico y covalentes pero otros, que poseen la mayoría de las propiedades de los metales, tienen enlaces metálicos al menos principalmente.

Algunos de los sulfuros más comunes son los siguientes:

Sulfuros, sulfoarseniuros y arseniuros.							
Nombre	Formula	Nombre	Formula	Nombre	Formula	Nombre	Formula
Acantita (argentita)	Ag ₂ S	Esfalerita (Blenda)	ZnS	Covelina	CuS	Pirita	FeS ₂
Calcosina	Cu ₂ S	Pirrotina	Fe _{1-x} S	Cinabrio	HgS	Cobaltita	(Co,Fe)AsS
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Niquelina	NiAs	Rejalgar	AsS	Marcasita	FeS ₂
Galena	PbS	Millerita	NiS	Oropimente	As ₂ S ₃	Arsenopirita	FeAsS

Calcopirita	CuFeS ₂	Pentlandita	(Fe,Ni) ₉ S ₈	Estibinita	Sb ₂ S ₃	Molibdenita	MoS ₂
-------------	--------------------	-------------	-------------------------------------	------------	--------------------------------	-------------	------------------

A continuación se abordan las características de los sulfuros y, en algunos casos la estructura de algunos minerales que citaron anteriormente. En estas. Se incluirán las propiedades físicas, estructura química, yacimiento y, en algunos casos, la cristalografía del mineral.

Estructura de los sulfuros de hierro.

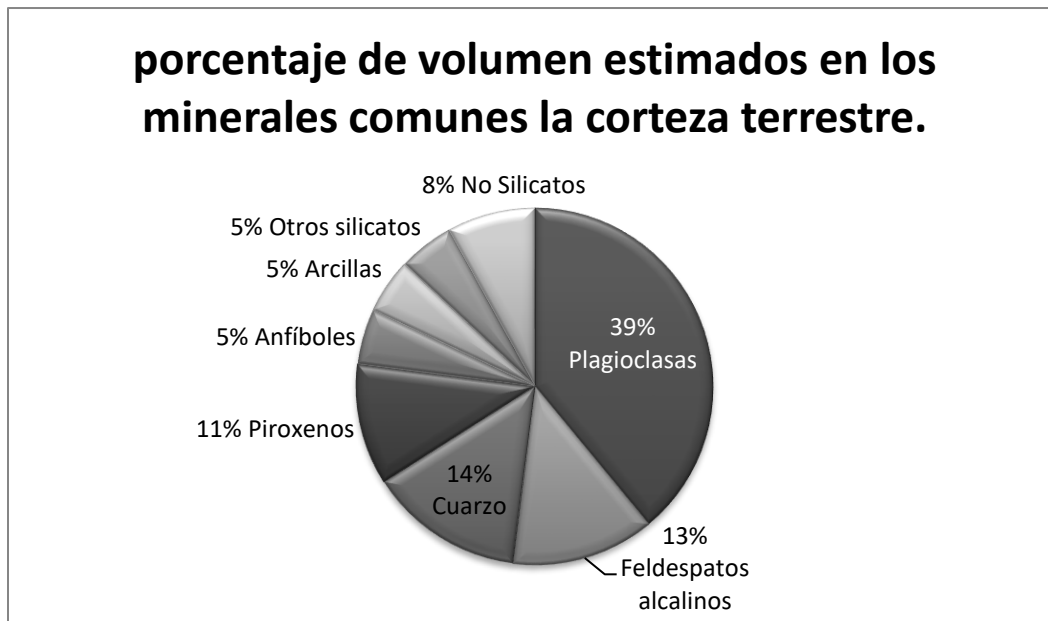
La Pirita, FeS₂, posee una estructura cubica, como se indica en el esquema 2^a, la estructura contiene pares S₂ enlazados covalentemente, que ocuparían la posición del cloro en una estructura de tipo NaCl. La estructura de la pirita puede considerarse derivada de la estructura de la halita NaCl, en donde el Fe, ocupa las posiciones del Na, en la estructura NaCl.

Otra forma polimorfa de FeS₂ es la marcasita (esquema 2b), que tiene una estructura ortorrómbica. Esta estructura, al igual que la pirita, contiene pares S₂ muy próximos. No está todavía muy claro cuáles son los campos de estabilidad de los dos polimorfos, pirita y marcasita. A partir de los yacimientos geológicos se llegara a la conclusión de que la marcasita se presenta en un intervalo de baja y media temperatura en rocas sedimentarias y en las venas metalíferas. Sin embargo, la pirita se presenta como constituyente magnético.

Silicatos

La clase mineral de los silicatos es más importante que cualquier otra, puesto que son casi un 25% de los minerales conocidos y cerca del 40% de los más corrientes. Con pocas excepciones, todos los minerales que forman las rocas ígneas lo son, y estas constituyen más del 90% de la corteza terrestre.

Cuando los porcentajes medios en peso de los ocho elementos más comunes en la corteza terrestre se vuelven a calcular a base al porcentaje atómico, se encuentra que de cada 100 átomos 62.5 son O, 21, 2 Si y 6.5 Al. A los elementos Fe, Mg, Ca, Na y K les corresponde dos o tres átomos más. Con la posición excepcional del Ti, todos los demás elementos entran presentes en cantidades insignificantes en los niveles superiores de la corteza terrestre. Cuando se calculan los porcentajes atómicos de los ocho elementos más abundantes en términos de los porcentajes en volumen, se encuentra que la corteza terrestre puede considerarse como un empaquetamiento de iones oxígeno con iones metálicos intersticiales, tales como Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , etc.



Se ha comprobado que los minerales que más abundan en la corteza terrestre son los silicatos, óxidos y otros compuestos de oxígeno, como los carbonatos en cantidades subordinadas. Las diferentes asociaciones de minerales silicatos que caracterizan a las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Así como las venas minerales, las pegmatitas, las rocas meteorizadas y los suelos, tienen la facultad de darnos información sobre las condiciones ambientales en que se formaron.

La unidad fundamental de la estructura de todos los silicatos consta de cuatro iones de oxígenos situados en los vértices de un tetraedro regular que rodea al ion silicio tetravalente y coordinado por este. El

fuerte enlace que une los iones silicio y oxígeno es, literalmente, el cemento que conglomerará la corteza terrestre. Empleando el concepto de electronegatividad de Pauling, este enlace puede ser considerado como iónico en un 50% y covalente en otro 50%. Es decir, aunque el enlace es debido en parte a la atracción de unidades iónicas de cargas contrarias, implica también el reparto de electrones y la interpenetración de las nubes electrónicas de los iones, estando el enlace intensamente localizado en la proximidad de estos electrones compartidos.

Aunque en el enlace silicio – oxígeno hay electrones compartidos, la energía total de enlace del ion silicio, Si^{4+} , sigue estando distribuida por igual entre sus cuatro oxígenos vecinos más próximos. De aquí que la fuerza de cualquier enlace simple silicio-oxígeno sea justamente igual a la mitad de la energía total de enlace disponible del ion oxígeno. Cada ion Oxígeno, O^{2-} , puede unirse a otro ion silicio y entra en otra agrupación tetraédrica, en la que los grupos tetraédricos están unidos por los oxígenos compartidos (puentes de oxígeno). A esta unión de tetraedros mediante la compartición de oxígenos podemos denominarla *polimerización*, tomando este término de la química orgánica. Esta capacidad de polimerización es el origen de la gran variedad de estructuras de silicatos que existen. Sin embargo, en la naturaleza no se da el caso de que dos tetraedros adyacentes compartan tres, ni aun dos oxígenos, pues en este caso quedarían muy próximos dos iones silicio con fuertes cargas positivas y la repulsión entre los mismos haría inestable la estructura.

Un tetraedro puede compartir uno, dos, tres o sus cuatro oxígenos, resultando estructuras con diversas configuraciones. Los silicatos con grupos tetraédricos SiO_4 independientes se llaman *nesosilicatos* (del griego *nesos*, que significa isla) u *ortosilicatos* (del griego *ortos*, que significa normal).

Los silicatos con dos grupos SiO_4 conectados, y que dan lugar a grupos Si_2O_7 , se clasifican como *sorosilicatos* (del griego *soros*, que significa montón) o *disilicatos* (en referencia a los dobles agrupamientos tetraédricos). Si se conectan más de dos tetraedros se forman estructuras cerradas en forma de anillo de composición general Si_xO_{3x} . Los anillos cuádruples poseen la composición Si_4O_{12} .

Este grupo de silicatos anulares reciben el nombre de *ciclosilicatos* (del griego *Kyklos*, que significa círculo).

Los silicatos con 2 grupos SiO_4 conectados, y que dan lugar a grupos Si_2O_7 , se clasifican como sorosilicatos (del griego *soros*, que significa montón) o disilicatos (en referencia a los dobles agrupamientos tetraédricos). Si se conectan más de dos tetraedros se forman estructuras cerradas en forma de anillo de composición general Si_xO_{3x} . Los anillos cuádruples poseen la composición Si_4O_{12} .

Este grupo de silicatos anulares reciben también el nombre de ciclosilicatos (del griego *kyklos*, que significa círculo). Los tetraedros pueden también unirse formando cadenas simples infinitas de composición unitaria Si_2O_6 (o SiO_3). Las cadenas dobles infinitas poseen una relación de Si: O = 4:11.

Ambos tipos de silicatos en cadena se llaman también inosilicatos (del griego inos, que significa hilo). Cuando tres de los oxígenos de un tetraedro se comparten con tetraedros contiguos se forman láminas planas infinitamente extensas de composición unitaria Si_2O_5 .

Tales silicatos laminares suelen llamarse también filosilicatos (del griego phyllon, que significa hoja). Cuando los cuatro oxígenos de un tetraedro SiO_4 son compartidos por tetraedros contiguos se obtiene una red tridimensional de composición unitaria SiO_2 . Estos silicatos estructurales se denominan también tectosilicatos (del griego tecton, que significa constructor).

Los minerales pertenecientes al grupo de los silicatos, se pueden resumir, como se muestra en la tabla número 1, mencionando una más amplia referencia de la estructura de los silicatos.

Tabla 1. Clasificación estructural de los silicatos.

Clasificación	Disposición estructural	Si: O	Ejemplos
Nesosilicatos	Tetraedros independientes	1:4	Olivino
Sorosilicatos	Dos tetraedros compartiendo un oxígeno	2:7	Melilita
Ciclosilicatos	Anillos cerrados de tetraedros compartiendo cada uno dos oxígenos	1:3	Berilo
Inosilicatos	Cadenas sencillas continuas de tetraedros, compartiendo cada uno dos oxígenos.	1:3	Enstatita
	Cadenas dobles continuas de tetraedros, compartiendo alternamente dos y tres oxígenos.	4:11	Antofilita
Filosilicatos	Laminas continuas de tetraedros compartiendo cada uno tres oxígenos	2:5	Talco Flogopita
Tectosilicatos	Esqueletos continuos de tetraedros, que comparten cada uno los cuatro oxígenos	1:2	Cuarzo

Nesosilicatos	
<i>Grupo de la Fenaquita</i>	
Fenaquita	Be_2SiO_4
Willemite	Zn_2SiO_4
<i>Grupo del Olivino</i>	
Forsterite	Mg_2SiO_4
Fayalite	Fe_2SiO_4
<i>Grupo de los Granates</i>	
Piropo	$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Uvarovite	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$
Almadino	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Grosularia	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Espesartina	$\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$

Andradita	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$
<i>Grupo del Círcón</i>	
Circon	ZrSiO_4
<i>Grupo Al_2SiO_5</i>	
Andalucita	Al_2SiO_5
Silimanita	Al_2SiO_5
Cianita	Al_2SiO_5
Topacio	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$
Estaurolita	$\text{FeAl}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{O},\text{OH})_2$
<i>Grupo de la Humita</i>	
Condrodita	$\text{Mg}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{OH},\text{F})_2$
Datolita	$\text{CaB}(\text{SiO}_4)(\text{OH})$
Esfena o Titanita	$\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$

Grupo del olivino.

Sorosilicatos y neso-sorosilicatos

Sorosilicatos y neso-sorosilicatos	
Hemimorfita	$\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$
Lawsonita	$\text{CaAl}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$
Grupo de la epidota	
Clinozoisita	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$
Epidota	$\text{Ca}(\text{Fe}^{3+}\text{Al})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$
Alanita	$\text{X}_2\text{Y}_3\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$
Idocrasa	(Vesubiana)
$\text{Ca}_{10}(\text{MgFe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_4$	

La estructura de la epidota contiene simultáneamente tetraedros SiO_4 independientes y grupos Si_2O_7 . Las cadenas de octaedros AlO_6 y $\text{AlO}_4(\text{OH})_2$ que comparten sus artistas se disponen paralelamente al eje b. (Cadenas octaédricas semejantes están también presentes en los tres polimorfos de Al_2SiO_5 y en la Estaurolita). Una posición octaédrica adicional se presenta fuera de las cadenas; esta posición está ocupada por Al en la clinozoisita y por Fe^{3+} y Al en la epidota.

Las cadenas están enlazadas por grupos independientes SiO_4 y Si_2O_7 . El Ca está en coordinación irregular 8 con el oxígeno. La posición que albergue el Ca^{2+} puede estar cubierta en parte por Na^+ . La posición octaédrica exterior a las cadenas puede albergar Mn^{3+} y más raramente Mn^{2+} , además del Al y Fe^{3+} .

Todos los miembros del grupo de la epidota son isoestructurales y forman cristales monoclinicos que tienen la característica de estar alargados según b. La zoisita ortorrómbica posee una estructura que puede deducirse de su polimorfo monoclinico clinozoisita por un duplicado en forma de macla de la celda a lo largo del eje a, de modo

que a de la zoista = $2a \sin B$ de la clinozoista (o epidota). La estructura de la clinozoista es la misma que la epidota, con todas las posiciones octaédricas ocupadas por Al. La alanita puede deducirse de la estructura de la epidota reemplazando parte del Ca^{2+} por tierras raras y ajustando el balance de cargas electroestáticas.

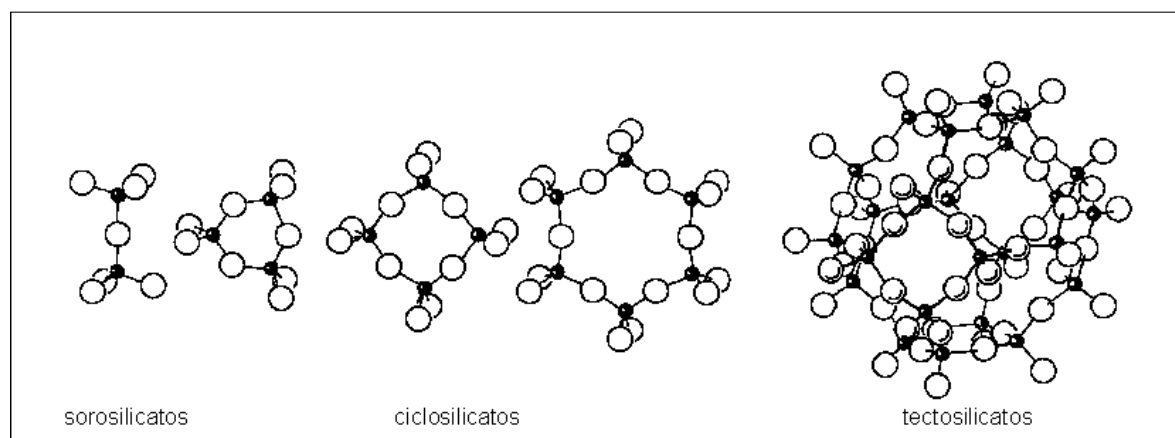
Reemplazando parte del Fe^{+3} por Fe^{+2} . Como resultado de las estructuras muy semejantes de los miembros del grupo de la epidota, las diversas sustituciones iónicas proporcionan las variables principales.

Grupo de la Epidota

Ciclosilicatos

Los ciclosilicatos, están formados por anillos de tetraedros SiO_4 enlazados, con una relación Si: O = 1: 3, existiendo tres posibles configuraciones cíclicas cerradas. La más sencilla es el anillo Si_3O_9 , que en los minerales solo está representada por el raro titanio-silicato, la benitoita, $\text{BaTiSi}_3\text{O}_9$. El anillo Si_4O_{12} se presenta solo en unos pocos silicatos muy raros.

Estructuras de silicatos



Filosilicatos.

Como lo indica su nombre, derivado del griego, *phylon* = hoja, todos los numerosos miembros de este grupo tienen hábito hojoso o escamoso y una dirección de exfoliación dominante,. Son por lo general blandos, de peso específico relativamente bajo y las laminillas de exfoliación pueden ser flexibles e incluso elásticas. Todas estas peculiaridades características derivan del predominio en la estructura de la hoja de tetraedros SiO_4 de extensión indefinida. En esta hoja, tres de los cuatro oxígenos de cada tetraedro SiO_4 están compartidos con tetraedros vecinos, resultando una relación Si: O = 2 : 5. Cada hoja, si no está distorsionada, posee simetría senaria.

La mayor parte de los miembros de los fisiosilicatos son portadores de hidroxilos y tienen los grupos (OH) localizados en el centro de los anillos senarios de tetraedros, a la misma altura que los oxígenos de los vértices o

compartidos en los tetraedros de SiO_4 . Cuando los iones, externos a la hoja de Si_2O_5 están enlazados a las hojas, se encuentran coordinados con dos oxígenos y un OH.

BORATOS

Dentro del grupo de minerales de los boratos, las unidades de BO_3 son capaces de polimerizarse (de modo parecido al de la polimerización de los grupos tetraédrico SiO_4 , en los silicatos) en forma de cadenas, hojas y grupos múltiples aislados.

Aunque es posible preparar solamente un armazón tridimensional del triángulo BO_3 y que tenga la composición B_3O_3 , esta configuración tiene muy poca estabilidad y se desordena rápidamente en un vidrio.

Debido a la tendencia a formar redes desordenadas de triángulos de BO_3 , el boro es considerado en la fabricación de vidrio como “formador de redes” y se emplea en la preparación de vidrios especiales de poco peso y gran transparencia para las radiaciones de gran energía.

SULFATOS

El enlace azufre-oxígeno es muy fuerte, y covalente por sus propiedades, produciendo grupos fuertemente unidos que no pueden compartir oxígenos. Estos grupos $(\text{SO}_4)^{2-}$, son las unidades fundamentales de los sulfatos minerales.

Los sulfatos anhidros más importantes y comunes forman el grupo de la Baritina con grandes cationes divalentes coordinados con el ion sulfato. Cada ion Bario con 12 iones pertenece a 7 grupos diferentes $(\text{SO}_4)^{444}$.

La anhidrita, CaSO_4 , a causa del menor tamaño del Ca en comparación con el Ba, posee una estructura muy diferente a la baritina. Cada Ca está coordinado con los ocho oxígenos más parámetros de los grupos $(\text{SO}_4)^{444}$.

Entre los sulfatos hidratados, el Yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, es el más importante y abundante. Los enlaces entre moléculas de H_2O en capas primas son débiles, lo que explica la exfoliación del Yeso (010). La pérdida de estas moléculas de agua ocasiona el colapso de esta estructura y de la transformación en un polimorfo metaestable que toma la configuración de la anhidrita (CaSO_4), con gran disminución de volumen atómico y la pérdida de la exfoliación perfecta.

A esta clase pertenecen numerosos grupos minerales, pero pocos entre ellos son comunes. La clase puede dividirse en. Sulfatos anhidridos y Sulfatos básicos e Hidratos.

OXIDOS

Los minerales de óxidos comprenden aquellos compuestos naturales en los cuales el oxígeno aparece combinado con uno o más metales.

El más corriente de todos los óxidos es el cuarzo (SiO_2). El tipo de enlace en las estructuras de los óxidos por lo general es fuertemente iónico, en contraste con la estructura de sulfuros con enlaces iónicos, covalentes y metálicos. Una de las primeras determinaciones de estructura registradas, fue la de la Cuprita, CuO_2 , en la cual los átomos de oxígeno están dispuestos en los vértices y en el centro de los grupos. Tetraédricos.

Se agrupan comúnmente en óxidos simples y óxidos múltiples. Los simples, están compuestos por un metal y un oxígeno, son de varios tipos, con diferentes relaciones: O (relación metal-oxígeno), tales como X_2O , XO , X_2O_3 . Los óxidos múltiples XY_2O_4 , tienen dos posiciones (A y B), con átomos metálicos no equivalentes.

Dentro de los óxidos, hay algunos minerales que tienen gran importancia. Económica; entre ellos, los principales minerales (hematite y magnetita), cromo (cromita), manganeso (pirolusita, así como los hidróxidos de manganita y romanequita o psilomelano), estaño (casiterita) y uranio (uraninita).

Hidróxidos.

Todas las estructuras de este grupo están caracterizadas por la presencia del grupo hidroxilo (OH) o moléculas de H_2O . La presencia del grupo hidroxilo ocasiona un debilitamiento en los enlaces de las estructuras en comparación con las de los óxidos.

Algunos de los hidróxidos más comunes son los siguientes.

Hidróxidos	
Brucita	$Mg(OH)_2$
Manganita	$MnO(OH)$
Romanequita o psilomelano	$BaMn^{+2}Mn^{+4}_8O_{16}(OH)_4$
Grupo de la Goethita	
Diásporo	
Goethita	
Bauxita (mezcla de Diásporo, Gibbsita y Bohemita)	

Haluros.

La clase química de los haluros se caracteriza por predominio de los iones halógenos electronegativos, Cl, Br, F, I, que son grandes y tienen carga de -1 y se polarizan fácilmente. Cuando se combinan con cationes relativamente grandes, debidamente polarizados y de valencia baja, tanto los cationes como los iones se comportan como cuerpos casi perfectamente esféricos.

El empaquetamiento de estas unidades esféricas conduce a estructuras de la mayor simetría posible.

Debido a que las débiles cargas electrostáticas están diseminadas por toda la superficie de los iones casi esféricos, los haluros son los ejemplos más esféricos del mecanismo de enlace iónico puro. Todos los haluros tienen dureza relativamente baja, puntos de fusión de moderados a elevados, y en estado sólido son malos conductores de calor y de electricidad.

Cuando los iones halógeno se combinan con cationes de menor tamaño y más polarizados que los de los metales alcalinos, resultan estructuras de simetría menor y el enlace tiene propiedades más covalentes, entrando corrientes en tales estructuras y como constituyentes esenciales, agua e hidróxidos.

Algunos de los Haluros más comunes son.

Haluros			
Halita	NaCl	Criolita	Na_3AlF_6
Silvina	KCl	Fluorina	CaF_2
Querargirita	AgCl	Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$

Mineral:	ARSÉNICO
Formula química:	As
Densidad:	5.72
Paragénesis:	Vetas de mineral en las rocas cristalinas.
Clase:	Elemento nativo.
Dureza:	3.5
Clase de Simetría:	Hexagonal Escalenoédrica.
Sistema Cristalino:	Trigonal.
Grupo Espacial:	R 3 m a = 3.768Å, c = 10.574Å
Fractura:	Irregular/desigual.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Poco frecuente.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Gris pálida.
Exfoliación:	Basal perfecta.
Color:	Gris pálido.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas:	No conductor.
Tenacidad:	Frágil.
Observaciones:	De los elementos más tóxicos que existen.
Aplicaciones:	Se usa comercial e industrialmente como un agente en la fabricación de transistores, láser y semiconductores, así como también en la fabricación de vidrio, textiles, papeles, adhesivos de metal, preservantes de alimentos y madera, municiones (con el plomo permite la fabricación de perdigones), procesos de bronceado, disección de animales y conservación de pieles y en la industria de curtiduría y peletería.

Habito: Granular, masiva en capas, concéntrico. Reticulada, reniforme, columnar, acicular.

Impurezas: Bi, Sb, Fe, Ni, Ag, S, Se.

Asociado a: Cinabrio, oropimente, rejalgar, esfalerita, galena, pirita

Clivaje: Perfecto.

Prins. Yacimientos: México, Chile, Estados Unidos, Madagascar, Australia.

Mineral: CADMIO

Formula química: Cd.

Densidad: 8.65

Paragénesis: Actividad magmática, en areniscas mineralizadas y dolomías.

Clase: Elementos nativos, grupo del platino.

Dureza: 1 – 2.

Clase de Simetría: Dihexagonal bipiramidales.

Sistema Cristalino: Hexagonal.

Grupo Espacial: $P 6_3 / m m c$

Transparencia: Opaco.

Prins. Yacimientos: Rusia, Estados Unidos.

Mineral: AZUFRE

Formula química: S

Densidad: 2.07

Paragénesis: Cráteres volcánicos y fuentes termales.

Clase: Elemento nativo.

Dureza: 1.5-2.5.

Clase de Simetría: Bipiramidales.

Sistema Cristalino: Rómbico.

Grupo Espacial: $F d d d$ $a = 10.468\text{\AA}$, $b = 12.870\text{\AA}$, $c = 24.49\text{\AA}$.

Fractura:	Irregular.
Lustre:	Resinoso.
Frecuencia:	Comun.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Blanca.
Exfoliación:	Basal imperfecta.
Color:	Amarillo brillante a marrón amarillento.
Punto de fusión:	113 °C.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Transparencia:	Transparente, translúcido.
Prop. Eléctricas:	No conductor.
Tenacidad:	Frágil.
Observaciones:	Olor característico.
Aplicaciones:	Principalmente como fertilizante pero también en la fabricación de pólvora, laxantes, fósforos e insecticidas.
Habito:	Masivo, reniforme o estalactítico.
Impurezas:	Se, Te.
Asociado a:	Cobre, plata, oro, cadmio, zinc, arsénico.
Clivaje:	Imperfecto.
Prins. Yacimientos:	Diversas localidades de América, Europa, Asia y Australia

Mineral:	CROMO
Formula química:	Cr
Densidad:	4.5 a 4.8
Paragénesis:	En sitios contiene asociados a magnesio, aluminio, titanio.
Clase:	Elemento nativo.
Dureza:	5.5 – 6.
Clase de Simetría:	Cristales octaédricos.
Sistema Cristalino:	Cubico.
Fractura:	Irregular.
Lustre:	Metálico.
Prop. Magnéticas:	Débilmente magnético.
Raya:	Parda.
Exfoliación:	No presenta.
Color:	Varía entre negro y negro parduzco.
Punto de fusión:	1857 °C.
Punto de ebullición:	2672 °C.
Observaciones:	El cromo compacto es sumamente resistente.
Aplicaciones:	Se emplea en moldes para la fabricación de ladrillos y en general para fabricar materiales refractarios (como los ladrillos para hornos de fundición). Una buena parte de la cromita se emplea para obtener cromo o en aleaciones.
Habito:	Octaédrico.
Origen:	La mena del cromo es exclusiva de rocas máficas y ultramáficas como segregación en las fases iniciales de cristalización ortomagmática. Estable en las metamórficas como la serpentina y concentrada en los placeres.
Caracterización:	El cromo es un metal de transición duro, frágil, gris acerado y brillante. Es muy resistente frente a la corrosión.
Prins. Yacimientos:	Guleman (Turquia).Suerdlousk (Rusia).Bushveld (África del Sur).Gwelo (Rodesia).

Mineral:	DIAMANTE
Formula química:	C.
Densidad:	3.51 – 3.53.
Paragénesis:	En ambientes bajo los efectos de una extrema presión y temperatura.
Clase:	Elemento nativo.
Dureza:	10
Clase de Simetría:	Isométrico-Hexoctaédrico.
Sistema Cristalino:	Cubico.
Fractura:	Concoidal.
Lustre:	Adamantino.
Frecuencia:	Raro.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Blanca.
Exfoliación:	Perfecta, paralela a las caras del octaedro, lo que facilita su tallado.
Color:	Típicamente amarillo, marrón o gris a incoloro. Menos frecuente azul, verde, negro, blanco translúcido, rosado, violeta, anaranjado, púrpura y rojo.
Radioactividad:	No radiactivo.
Transparencia:	Transparente a subtransparente a translúcido.
Prop. Eléctricas:	aislante eléctrico.
Tenacidad:	No es tan buena debido a importantes defectos estructurales.
Observaciones:	Resiste a los ácidos, funde en acero caliente.
Aplicaciones:	Con estos diamantes se fabrican troqueles y muelas para pulir herramientas. También se emplean para perforar pozos petroleros y para cortar todo tipo de piedras.
Habito:	Octaédrico, esférico o masivo.
Origen:	Carbono puro. Se forman en condiciones de presión y temperatura extremas, existentes a profundidades de 140 km a 190 km en el manto terrestre.
Caracterización:	Los diamantes pueden ser identificados por su alta conductividad térmica.

Mineral:	FIERRO
Formula química:	Fe
Densidad:	7.87
Clase:	Elementos nativos.
Dureza:	4
Clase de Simetría:	Isométrico.
Sistema Cristalino:	Cubico.
Raya:	Blanco parduzca.
Frecuencia:	Raro.
Exfoliación:	Perfecta.
Color:	Gris acero.
Prop. Eléctricas:	9,93·10 ⁶ S/m
Observaciones:	Es un metal plateado, maleable, que se oxida fácilmente, a temperatura ambiente, cambiando de color a un gris más opaco, y es resistente a la corrosión.
Aplicaciones:	El hierro es el metal duro más usado, con el 95 % en peso de la producción mundial de metal. El hierro puro (pureza a partir de 99,5 %) no tiene demasiadas aplicaciones salvo excepciones para utilizar su potencial magnético. El hierro tiene su gran aplicación para formar los productos siderúrgicos, utilizando éste como elemento matriz para alojar otros elementos aleantes tanto metálicos como no metálicos, que confieren distintas propiedades al material. Se considera que una aleación de hierro es acero si contiene menos de un 2,1 % de carbono; si el porcentaje es mayor, recibe el nombre de fundición.
Habito:	Agregados micro cristalinos, granulares, masivo.
Origen:	Hierro meteorítico aleación de hierro y níquel. Contiene C, P, S, constituyendo Chalpilita, Schreibersita y Troilita. Hierro terrestre se da en rocas básicas aunque también en sedimentos de carbonato y madera petrificada.
Caracterización:	Agregados micro cristalinos, granulares, masivo. Raramente cristalizado en el sistema cúbico. Infusible, magnético, soluble en ácidos.
Prins. Yacimientos:	Los principales productores de fierro del mundo son China, Malasia, Perú, Indonesia, Brasil y Bolivia (especialmente en el estado de Minas Gerais)

Mineral: GRAFITO

Formula química:	C
Densidad:	2.09 a 2.23
Prop. Eléctricas:	9,17·10 ⁶ S/m
Clase:	Elementos nativos.
Dureza:	1 - 2
Lustre:	Metálica, terroso.
Sistema Cristalino:	Hexagonal
Punto de fusión:	3550 °C bajo una presión de 88 kg/cm ² y a 3726 °C a las 100,000 atmósferas de presión.
Fractura:	Escamosa, de lo contrario en bruto.
Prop. Magnéticas:	Diamagnético.
Raya:	Negra.
Exfoliación:	Perfecto en una dirección.
Color:	Negro acero y gris.
Observaciones:	Es extremadamente refractario, siendo poco afectado por temperaturas superiores a los 3,000 °C; tiene alta resistencia al intemperismo y los ácidos; se mezcla fácilmente con otros materiales tanto líquidos como sólidos.
Aplicaciones:	El grafito mezclado con una pasta se utiliza para fabricar la mina de los lápices.
Habito:	Tabular.
Caracterización:	Es un mineral suave, de color gris a negro, brillo metaloide.
Prins. Yacimientos:	El principal productor mundial de grafito es China, seguido de India y Brasil.

Mineral: COBRE

Formula química:	Cu
Densidad:	8.96
Paragénesis:	Junto con la formación de azurita, malaquita, cuprita, etc.

Clase:	Elementos Nativos.
Dureza:	3
Clase de Simetría:	Cubica centrada en las caras.
Sistema Cristalino:	Cubico.
Grupo Espacial:	Fm3m
Fractura:	Astillosa.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Común.
Prop. Magnéticas:	Diamagnético
Raya:	Rojo Metálico.
Exfoliación:	Sin exfoliación.
Color:	Rojizo Metálico.
Punto de ebullición:	2562 °C.
Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas:	$58,108 \times 106 \text{ S/m}$.
Tenacidad:	Dúctil y Maleable.
Aplicaciones:	Industria eléctrica, calderería, aleaciones, fabricación de sulfato de cobre, medicina y tratamientos insecticidas.
Habito:	Masivo, dendrítico, filamentoso o en cristales cúbicos deformados.
Origen:	Los yacimientos de cobre más importantes están ligados a lavas basálticas por procesos de hidrotermalismo y a rocas ultra básicas. En la región aparecen algunos ejemplares asociados a sulfuros (calcopirita) alterados en la zona de oxidación, cuando se dan condiciones reductoras, especialmente en minas inundadas periódicamente (Águilas), donde pueden encontrarse incrustaciones sobre maderas y objetos metálicos. Normalmente, aparece asociado a cuprita, malaquita o azurita.
Caracterización:	Su color característico, brillo metálico, densidad y baja dureza lo hacen inconfundible con cualquier otro mineral. Cuando presenta pátina de alteración, la existencia de manchas verdosas nos sugiere su presencia. Si existe alguna duda, lo mejor es rayar la pátina para poder observar la superficie fresca.

Mineral:	MERCURIO
Formula química:	Hg
Densidad:	13.6 – 14.4
Paragénesis:	Hidrotermal, en zonas de oxidación del cinabrio.
Clase:	Elementos Nativos.
Dureza:	Líquido.
Clase de Simetría:	Trapezoédrica Trigonal.
Sistema Cristalino:	Trigonal/Hexagonal.
Transparencia:	Opaco.
Fractura:	Ninguna.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Muy raro.
Exfoliación:	Ninguna.
Color:	Blanco.
Punto de fusión:	-39°C.
Punto de ebullición:	350°C.
Radioactividad:	Por encima de los 40 °C-, produce vapores tóxicos y corrosivos, más pesados que el aire por lo que se evapora creando miles de partículas en vapor ya que estas se enfrían y caen al suelo.
Observaciones:	Es líquido a temperaturas normales formando pequeños glóbulos. Se asigna al sistema trigonal/hexagonal pero muestra un hábito con cristales romboédricos solo por debajo de los -39°C. El mercurio es opaco y tiene un brillo metálico brillante. Se disuelve en ácido nítrico.
Aplicaciones:	El mercurio se emplea para la fabricación de termómetros y para contactos termoelectrónicos. También se emplea en metalurgia para diversos procesos. Sus compuestos presentan múltiples aplicaciones en agricultura, armamento, medicina.
Habito:	Romboédrico.
Origen:	En las chimeneas volcánicas, a menudo de Cinabrio.

Asociado:	Cinabrio.
Prins. Yacimientos:	San José de California, Terlingua, Texas.
Mineral:	NIQUEL
Formula:	Ni
Densidad:	8.9
Fractura:	Concoidea.
Clase:	Elemento nativo.
Dureza:	5.5
Lustre:	Graso a Mate.
Asociado a:	Cobalto, plata.
Prop. Magnéticas:	Ferromagnético.
Raya:	Negra.
Exfoliación:	Carente.
Punto de fusión:	1.455 °C.
Punto de ebullición:	2.730 °C.
Color:	Blanco Plateado.
Prop. Eléctricas.	14,3 × 106 S/m.
Tenacidad:	Frágil.
Observaciones:	Es soluble en ácido nítrico diluido, y se convierte en pasivo (no reactivo) en ácido nítrico concentrado. No reacciona con los álcalis.
Aplicaciones:	El níquel se une al hierro en una aleación para fabricar acero inoxidable. El acero inoxidable tiene numerosas aplicaciones. Se emplea en utensilios de cocina, cubiertos, herramientas, instrumentos quirúrgicos, tanques de almacenamiento de armas de fuego, faros de coches, joyas y relojes.
Habito:	Agregados lamelares o afieltrados.
Origen:	Se forma en filones hidrotermales, y en noritas y está asociado con menas de plata, y cobalto.

Caracterización:	El níquel se encuentra en la naturaleza formando silicatos, óxidos, sulfuros, sulfatos, etc. La Garnierita $(\text{Ni, Mg})_6[(\text{OH})_8/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$, es uno de los minerales más empleados en la extracción de este metal.
Impurezas:	Cobre, Cromo, Aluminio.
Prins. Yacimientos:	Venezuela.
Mineral:	Plata.
Formula:	Ag
Densidad:	10,5
Raya:	Blanco Plata.
Clase:	Elemento Nativo.
Dureza:	2.5 – 3.
Clase de Simetría:	Hexaquisoctaédrica. (m3m).
Sistema Cristalino:	Isométrico.
Grupo Espacial:	Fm3m.
Fractura:	Ganchuda.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Rarísima.
Exfoliación:	Ninguna.
Color:	Blanco Plata.
Punto de fusión:	962 °C.
Punto de ebullición:	2162 °C.
Textura:	Masiva.
Transparencia:	Opaco
Prop. Eléctricas:	$63 \times 10^6 \text{ S/m}$
Tenacidad:	Muy dúctil.
Paragénesis:	Entorno a la formación de ciertos minerales como cobre, calcita, baritina, fluorita, cuarzo, uraninita, sulfuros de Co y otros minerales de Ag.

Observaciones:	Su hábito es filiforme, escamoso, detrítico y masivo. Se oxida al contacto con la atmosfera. La plata es opaca y su brillo es metálico. Soluble en ácido nítrico y fusible. Es el mejor conductor de electricidad y calor.
Aplicaciones:	Fotografía. Por su sensibilidad a la luz (especialmente el bromuro y el yoduro, así como el fosfato). El yoduro de plata se ha utilizado también para producir lluvia artificial. Medicina. Por su elevado índice de toxicidad, sólo como uso externo. Electricidad. La plata se ha empleado para fabricar monedas desde 700 AC, inicialmente con electrum, aleación natural de oro y plata, y más tarde de plata pura. En joyería y platería para fabricar gran variedad de artículos ornamentales y de uso doméstico cotidiano, y con menor grado de pureza, en artículos de bisutería.
Habito:	Filiforme.
Origen:	Se forma en filones hidrotermales y en las zonas oxidadas de menas que contienen oro y otros minerales de plata y sulfuros metálicos. La plata forma de un 20 o un 25 por ciento de la aleación de oro y plata, llamada electrum.
Caracterización:	La plata es un metal muy dúctil y maleable, algo más duro que el oro, y presenta un brillo blanco metálico susceptible al pulimento.
Impurezas:	Chilenita.
Asociado a:	Plomo, Cobre, Zinc.
Prins. Yacimientos:	Mexico, Chile, Perú, Canadá.
Mineral:	Paladio
Formula química:	Pd
Densidad:	12.02
Paragénesis:	En torno al ambientes de formación del platino.
Clase:	Sulfuro, elementos nativos.
Dureza:	4,75
Clase de Simetría:	Tetragonal.
Sistema Cristalino:	Cubico.
Grupo Espacial:	P42/m
Frecuencia:	Rara.
Color:	Blanco plateado.

Punto de fusión:	1.555 °C.
Punto de ebullición:	1.555 °C.
Prop. Eléctricas:	9,5•10 ⁶ S/m.
Tenacidad:	Dúctil.
Observaciones:	No se oxida con el aire, y es el elemento del grupo del platino de menor densidad y menor punto de fusión. Es blando y dúctil al templarlo, aumentando considerablemente su dureza, aumenta considerablemente su resistencia y resistencia al trabajarlo en frío cuando su temperatura es baja. Puede disolverse en ácido sulfúrico, H ₂ SO ₄ , y en ácido nítrico, HNO ₃ . También se puede disolver, aunque lentamente, en ácido clorhídrico (HCl) en presencia de cloro u oxígeno.
Aplicaciones:	El paladio se encuentra en muchos productos electrónicos como computadoras, teléfonos móviles, condensadores de múltiples capas de cerámica, revestimiento de componentes de baja tensión, contactos eléctricos y televisores SED/OLED/LCD. El paladio se usa también en odontología, medicina, purificación de hidrógeno, aplicaciones químicas, y en el tratamiento de aguas subterráneas. El paladio desempeña un papel clave en la tecnología utilizada para las pilas de combustible, que combina hidrógeno y oxígeno para producir electricidad, calor y agua.
Caracterización:	El paladio es blando y dúctil y puede fabricarse como alambres finos y placas delgadas. Calentado a temperaturas superiores a 1472°F, se forma un óxido opaco, PdO, ligero y adherente, que no tiende a descarapelarse ni a desprenderse.
Mineral:	ORO
Formula:	Au
Densidad:	19.3
Color:	Amarillo Brillante.
Clase:	Elementos Nativos.
Dureza:	2,5-3
Clase de Simetría:	Hexaquisoctaédrica. (m3m).
Sistema Cristalino:	Cúbico.
Grupo Espacial:	Fm3m.
Fractura:	Ganchuda, astillosa.
Lustre:	Amarillo Brillante.

Frecuencia:	Rarísimo.
Prop. Magnéticas:	Depende del estado de los electrónicos del material.
Raya:	Amarillo oro.
Punto de fusión:	1.064 °C.
Punto de ebullición:	2.970 °C.
Prop. Eléctricas:	45,5 × 106 S/m.
Tenacidad:	Muy dúctil y maleable.
Paragénesis:	El oro de mina (yacimientos primarios) tiene generalmente gangas predominantes de cuarzo, calcita albita, apatito, turmalina, hornblenda y en ocasiones zeolitas.
Observaciones:	Insoluble en cualquier ácido puro; soluble en agua regia.
Aplicaciones:	El oro ejerce funciones insustituibles en comunicaciones, naves Espaciales, navegación, motores de aviones de reacción y otros productos de precisión. Como la plata, el oro puede formar fuertes amalgamas con el mercurio que a veces se emplea en empastes dentales.
Habito:	Masivo, en alambres, placas, etc.
Origen:	Se forma en filones hidrotermales, a menudo asociado con cuarzo y sulfuros. También en forma de placer en arenas no consolidadas, y en areniscas y conglomerados. Se puede encontrar oro aluvial en granos o pepitas en los lechos fluviales. Al inicio se puede confundir el oro con la pirita y calcopirita.
Caracterización:	El oro de mina (yacimientos primarios) tiene generalmente como ganga predominante el cuarzo; también puede ser calcita, ankerita, albita, apatito, turmalina, hornblenda y en ocasiones zeolitas.
Asociado a:	Electrum con un 25 a 28% de plata. Porpezita Au aleado con paladio (Goya, Brasil). Rhodita con un 34 a 43% de roído (México). Maldonita con bismuto, encontrada en Maldon, Victoria, de Color: blanco rosado fácilmente alterable en rojizo o negro.
Prins. Yacimientos:	El oro es al parecer el primer mineral que conoció el hombre, que ya lo utilizaba 5000 a.C., en Egipto o en las minas Etbai y Benisque en China. Esta antigüedad del uso se debe a que resultaba fácilmente moldeable debido a su maleabilidad. El oro fue el impulsor de los más importantes descubrimientos geográficos y ha tenido siempre gran importancia en el curso de la historia. Su atractivo provocó las llamadas “fiebres del oro”, la primera en 1849 en los aluviones de California; la segunda, en 1851, en Victoria, Australia; la tercera, en Klondike, junto al río Yukón y Fairbanks, Alaska. En 1884, se descubrió el importantísimo yacimiento de Witwatersrand en el distrito de Rand, cerca de Johannesburgo, Sudáfrica.

Mineral:	PLATINO
Formula química:	Pt
Densidad:	21.45 puro, 14 a 19 natural.
Paragénesis:	Generalmente se encuentran en yacimientos de carácter aluvial, combinado con otros metales preciosos (oro, osmiridio, etc.).
Clase:	Elementos Nativos.
Dureza:	4 - 4.5
Clase de Simetría:	4/m , 2/m.
Sistema Cristalino:	Cubico Hexaquisoctaédrica.
Grupo Espacial:	Fm3m
Fractura:	Irregular, ganchuda.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Muy Raro.
Prop. Magnéticas:	Es magnético cuando es rico en hierro.
Raya:	Gris acero, gris oscuro.
Exfoliación:	Nula.
Color:	Gris de acero con brillo reluciente.
Punto de fusión:	1755 °K.
Punto de ebullición:	4098 °K.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Textura:	Rugosa .
Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas:	$9,66 \times 10^6 / m \Omega$ buen conductor de la electricidad.
Tenacidad:	Dúctil.

Observaciones:	El Platino aparece casi exclusivamente en su estado nativo solamente se conoce un compuesto natural muy raro. La Esperrillita, PtAs ₂ . La mayor parte del platino puede relacionarse genéticamente con rocas ultrabásicas, especialmente dunitas. Cuando esta in situ, aparece asociado con olivino, cromita y magnetita.
Aplicaciones:	El empleo del platino depende principalmente de su naturaleza refractaria y gran dureza, se emplea para aparatos químicos, equipo eléctrico y joyería y como agente catalítico en la fabricación de ácido sulfúrico. Es empleado también por odontólogos así como para material médico y pirometría.
Origen:	Las primeras noticias de este metal llegaron a Europa en 1748 a través del español Antonio de Ulloa aunque la evidencia sugiere se conocía por los nativos sudamericanos desde miles de años antes. El platino es el más importante del grupo de elementos llamado metales de platino cuyos restantes miembros son rutenio, rodio, paladio, osmio e iridio. Su comportamiento químico fue estudiado por el sueco Scheefer en 1752, aunque no pudo aislarse del resto de los metales mencionados hasta principios del siglo XIX. Su nombre está relacionado con la denominación española de la plata.
Caracterización:	Los cristales son poco frecuentes y normalmente están deformados, se encuentran por lo general en pequeños granos y escamas, en masas irregulares y pepitas de gran tamaño.
Impurezas:	Normalmente contiene en aleación diversos porcentajes de hierro y pequeñas cantidades en iridio, osmio, rodio y paladio. También cobre oro y níquel.
Asociado a:	Olivino, cromita, magnetita, calcopirita, pirita y pirrotina
Clivaje:	Ausente
Prins. Yacimientos:	En placeres en el río Tura superior, en la vertiente oriental de los montes Urales, U.R.S.S.
Mineral:	PLOMO
Formula química:	Pb
Densidad:	11,4
Paragénesis:	Hidrotermal de temperaturas medias y bajas, se encuentra en vetas, cuerpos metasomáticos, así como en skarns. Sedimentario, es decir formando impregnaciones, principalmente en las rocas carbonáticas bituminosas.
Clase:	Elementos Sub-metálicos, elementos nativos.
Dureza:	1.5
Clase: de Simetría:	(4/m 3 2/m).
Sistema Cristalino:	Cubico.

Grupo Espacial:	Fm3m.
Fractura:	Irregular.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Raro.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Gris plomizo.
Exfoliación:	Perfecta.
Color:	Gris.
Punto de fusión:	330 °C.
Punto de ebullición:	1750 °C.
Textura:	Lisa.
Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas:	Mal conductor de la electricidad.
Tenacidad:	Dúctil y maleable.
Observaciones:	Muy raro nativo y siempre en pequeñas cantidades, por lo que el plomo suele obtenerse de la galena. Reacciona con el ácido nítrico; a temperatura ambiente, apenas le afectan los ácidos sulfúrico y clorhídrico. El plomo es el metal común más denso y maleable, con una gran resistencia a la corrosión, pero no es muy sólido.
Aplicaciones:	El plomo se emplea en la fabricación de baterías y en el revestimiento de cables eléctricos. Se utiliza industrialmente en las redes de tuberías, tanques y aparatos de rayos x. Debido a su elevada densidad y propiedades nucleares, se usa como blindaje protector de materiales radioactivos; entre las numerosas soldaduras, el metal tipográfico y diversos cojinetes metálicos.
Habito	A menudo en agregados amorfos otras veces implantado, generalmente en cubos, octaedros o combinaciones de ambos.
Caracterización:	Masas globulares, láminas, hilos. Cristales muy raros.
Asociado a:	La galena PbS en todas partes es la mena del plomo más importante y frecuente, casi siempre se halla unida a la Blenda ZnS y en íntima concrescencia con ella. Otras asociaciones corresponden a Pirita (FeS, Pirrotita, Baritina BaSO ₄ , Cuarzo SiO ₂ , Calcita CaCO ₃ y Calcopirita CuFeS ₂).

Impurezas:	Sb, Ag o Au.
Prins. Yacimientos:	Canadá (Manitoba), Suecia (Langban, Vermland, Pagsberg y Jacobsberg), EEUU (Fraklin), Rusia (Urales), México, Venezuela (Gran Sabana) y Corea. En España en Badajoz (Herrera del Duque), Ciudad Real (Río Ojalera) y Murcia (Cartagena).
Mineral:	Selenio
Formula química:	Se.
Densidad:	4.79
Impurezas:	Azufre.
Clase:	Elementos Sub-metálicos, elementos nativos.
Dureza:	2
Color:	Gris, gris púrpura, rojizo.
Sistema Cristalino:	Triclínico.
Grupo Espacial:	Fm3m.
Transparencia:	Opaco.
Lustre:	Sub-Metálico.
Frecuencia:	Raro
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Roja.
Punto de fusión:	221 °C.
Punto de ebullición:	685 °C.
Radioactividad:	No radioactivo.
Fluorescencia:	No fluorescente.
Prop. Eléctricas:	Buen conductor.
Tenacidad:	Flexible
Aplicaciones:	Científico, coleccionismo.
Origen:	El selenio (del griego σελήνιον, resplandor de la Luna) fue descubierto en 1817 por Jöns Jacob Berzelius. Al visitar la fábrica de ácido sulfúrico de Gripsholm observó un líquido

pardo rojizo que calentado al soplete desprendía un olor fétido que se consideraba entonces característico y exclusivo del telurio —de hecho su nombre deriva de su relación con este elemento ya que telurio proviene del latín Tellus, la Tierra— resultando de sus investigaciones el descubrimiento del selenio.

Caracterización:	Cristales, granos isométricos, agregados fibrosos, costras pulverulentas, micro cristalina, agregados terrosos, masivos.
Asociado a:	Pirita, Uranios, Seleniuros, Calcita, Molibdenita.
Clivaje:	Bueno {0112}.
Paragénesis:	Fumarolas por sublimación de vapores. Por reducción de soluciones ricas en selenio de yacimientos de uranio-vanadio.

Mineral: TELURIO

Formula química:	Te
Densidad:	6.1 – 6.3
Clase:	Elementos Sub-metálicos, elementos nativos.
Clase de Simetría:	(3 2)
Paragénesis:	Hidrotermal, secundaria por sublimación en fumarolas volcánicas.
Dureza:	2-2,5
Sistema cristalino:	Hexagonal
Fluorescencia:	No fluorescente
Frecuencia:	Raro
Color:	Gris
Raya:	Gris Plateado
Grupo Espacial:	Fm3m
Lustre:	Metálico
Frecuencia:	Raro.
Prop. Eléctricas:	Buen conductor de la electricidad.
Transparencia:	Opaco.

Punto de fusión	450 °C.
Punto de ebullición:	988 °C
Observaciones:	Soluble en ácidos sulfhídrico y nítrico calientes dando una disolución de color rojo, la llama colorea de verde.
Aplicaciones:	El telurio se utiliza industrialmente para aparatos termoelectrónicos y en el proceso de creación de caucho. También se utiliza médicamente, y como colorante para vidrio. Otro uso es como aditivo de la gasolina para reducir la detonación del motor.
Habito:	Pequeños granos, pulverulento, laminar, masivo, raramente cristales.
Origen:	Rumania Fata Baii (Facebanya) en el condado de Alba en Transilvania.
Caracterización:	Formación por lo general, masiva, sino también en las venas delgadas, y más raramente en delgadas, cristales prismáticos hexagonales
Impurezas:	Oro, Plata, Selenio, Hierro, Bismuto, Azufre.
Asociado a:	Oro, Silvanita, Empressita, Altaita, Pirita, Galena, Barita, Cuarzo.
Clivaje:	perfecto en {1010}, imperfecto en {0001}.
Prins. Yacimientos:	La mina de emperador en Vatukoula, Viti Levu, Fiji ha sido quizás la localidad más famosa de este mineral, junto con Moctezuma, Sonora, México. También en Sonora, México es la localidad de Cananea.

Mineral: RUTENIO

Formula química:	Ru
Densidad:	12.2
Paragénesis:	En aluviones derivados de rocas ultra básicas.
Clase:	Elementos Nativos.
Dureza:	6.5
Clase de Simetría:	(6/m 2/m 2/m)
Sistema Cristalino:	Hexagonal.
Grupo Espacial:	P 63/mmc.
Transparencia:	Opaco.
Lustre:	Metálico.

Frecuencia:	Muy Raro.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Gris.
Exfoliación:	No observada.
Color:	Blanco plata, gris estaño.
Punto de fusión:	2334 °C.
Punto de ebullición:	4150 °C.
Radioactividad:	No radioactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Prop. Eléctricas:	13,7·10 ⁶ S/m.
Tenacidad:	Maleable.
Observaciones:	Resistente a la corrosión, no soluble en ácidos, reacciona con las sales y las bases, quebradizo.
Aplicaciones:	Se emplea como catalizador en algunas aleaciones de platino.
Habito:	Tabular.
Origen:	Fue descubierto por Karl Ernst Claus en 1844. Observó que el óxido de platino contenía un nuevo metal y obtuvo seis gramos de rutenio de la parte de platino que es insoluble en agua regia.
Mineral:	RENIUM
Formula química:	Re
Densidad:	21.02
Paragénesis:	Ocurre con otros metales del grupo del platino (Pt, Re, Os, Ir). Nunca encontrado como elemento puro, siempre se alea con porcentajes varing de MGP.
Clase:	Elementos Nativos
Clase de Simetría:	(6/m 2/m 2/m).
Sistema Cristalino:	Hexagonal.
Grupo Espacial:	P 63/mmc.

Color:	Negro.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Muy Raro.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Gris.
Punto de fusión	3459 °K.
Punto de ebullición:	5869 °K.
Radioactividad:	No radioactivo.
Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas	$5,42 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$
Tenacidad:	Dúctil.
Observaciones:	El renio es uno de los metales más densos que existen, Se sabe muy poco acerca de la toxicidad que pueden tener el renio y sus compuestos, ya que estos se utilizan en cantidades muy pequeñas. . Es también estable frente a los ácidos, excepto sulfúrico concentrado.
Aplicaciones:	Muy utilizado en joyería y como catalizador.
Origen:	Mediante una investigación sistemática con rayos X se descubrió el elemento en minerales de platino y en columbita.
Caracterización:	Es un metal blanco plateado con brillo metálico, pesado.
Asociado a:	molibdenita.
Prins. Yacimientos:	Chile y Kazajistán.
Mineral:	ZINC
Formula química:	Zn
Densidad:	6.9 a 7.2
Clase:	Elementos nativos.
Dureza:	2
Clase de Simetría:	Di hexagonal-Di piramidal.

Sistema Cristalino:	Hexagonal.
Grupo Espacial:	P63/mmc.
Fractura:	Sub-concoidea.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Común.
Prop. Magnéticas:	Diamagnético.
Exfoliación:	Perfecta [0001].
Color:	Blanco metálico azul pálido y grisáceo.
Punto de fusión:	692.68 °K.
Punto de ebullición:	1180 °K.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Prop. Eléctricas:	Semiconductor.
Transparencia:	Opaco.
Observaciones:	Insoluble en ácidos.
Aplicaciones:	Se utiliza en baterías, en metalurgia, aleaciones.
Habito:	Usualmente forma cobertura, también forma ramificaciones, los cristales son raros.
Impurezas:	Selenio.
Asociado a:	Magnesio, cadmio, titanio, plata.
Clivaje:	Ausente.
Prins. Yacimientos:	Stirling Hill, New Jersey.
Mineral:	OSMIO
Formula química:	(Os,Ru,Ir)
Densidad:	22.4
Paragénesis:	Presente en rocas ultramáficas.

Clase:	Elementos nativos.
Dureza:	6 a 7.
Clase de Simetría:	Dihexagonal-Dipiramidal.
Sistema Cristalino:	Hexagonal.
Grupo Espacial:	P63/mmc.
Transparencia:	Opaco.
Lustre:	metálico.
Frecuencia:	Muy raro.
Prop. Magnéticas:	Diamagnético.
Raya:	Gris.
Exfoliación:	Perfecta.
Color:	Blanco.
Punto de fusión:	3306 °k.
Punto de ebullición:	5285 °k.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Prop. Eléctricas:	Conductor.
Tenacidad:	Quebradizo.
Observaciones:	Si se presenta en polvo es muy toxico para los ojos, volátil.
Aplicaciones:	Se utiliza como un buen oxidante.
Habito:	Usualmente forma cobertura, también forma ramificaciones, los cristales son raros.
Origen:	Se encuentra presente en rocas ultramáficas.
Caracterización:	Se caracteriza por su alta densidad.
Impurezas:	Selenio.
Asociado a:	Iridio, platino, hierro, níquel.

Clivaje:	Ausente.
Mineral:	ROSICKYITA
Formula química:	S
Densidad:	2.
Paragénesis:	Volcánico, en nódulos de limonita.
Clase:	Sulfuros.
Dureza:	2 a 3
Clase de Simetría:	Monoclínico.
Sistema Cristalino:	Monoclínico.
Grupo Espacial:	P2/b
Fractura:	Sub-concoidea.
Lustre:	Adamantino.
Frecuencia:	Muy raro.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Blanca.
Exfoliación:	Poco definida.
Color:	Amarillo pálido.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Prop. Eléctricas:	Aislante.
Observaciones:	Muy frágil, se desmenuza fácilmente, es soluble en ácido nítrico.
Aplicaciones:	Uso científico.
Habito:	Usualmente forma cobertura, también forma ramificaciones, los cristales son raros.
Origen:	Abundantes ejemplares procedentes de Hiendelaencina (Guadalajara).
Caracterización:	Se caracteriza por su brillo adamantino, presenta prismas.

Asociado a:	Azufre, yeso, pirita, limonita.
Mineral:	SILICIO
Formula química:	Si
Densidad:	2.88.
Paragénesis:	Volcánico. Mineral accesorio en rocas ígneas.
Clase:	Elementos nativos.
Dureza:	6.5 a 7.
Clase de Simetría:	Hexoctaédrico.
Sistema Cristalino:	Isométrico.
Grupo Espacial:	D3/m.
Fractura:	Concoidea.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Común.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Negro.
Exfoliación:	Poco definida.
Color:	Negro, marrón rojizo.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Prop. Eléctricas:	Semiconductor.
Observaciones:	Se encuentra presente en muchos minerales.
Aplicaciones:	Se utiliza para producir vidrio, siliconas, como abrasivo.
Habito:	Granular.
Origen:	Vetas epitermales, mineral accesorio en rocas ígneas.
Asociado a:	Cuarzo, silicatos.

Clivaje:	Ausente
Mineral:	TITANIO
Formula química:	Ti
Densidad:	4.3 a 4.5
Paragénesis:	Rocas eruptivas básicas, pegmatitas.
Clase:	Elementos nativos.
Dureza:	6.5 a 7.
Clase de Simetría:	Dihexagonal- Dipiramidal.
Sistema Cristalino:	Hexagonal.
Grupo Espacial:	P63/mmc.
Transparencia:	Opaco.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Común.
Prop. Magnéticas:	paramagnético.
Raya:	Negro.
Exfoliación:	No tiene.
Color:	Gris plata.
Punto de fusión:	1941 °k.
Punto de ebullición:	3560 °k.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas:	Conductor.
Tenacidad:	Gran tenacidad.
Observaciones:	Insoluble en ácidos, se caracteriza por baja oxidación, maleabilidad.

Aplicaciones:	Se utiliza en tratamientos quirúrgicos, en aleaciones con metales	
Habito:	Usualmente forma cobertura, también forma ramificaciones, los cristales son raros.	
Origen:	Pegmatitas asociadas a gabros.	
Clivaje:	No tiene.	
Prins. Yacimientos:	Australia y Sudáfrica.	
Mineral:	ANTIMONIO	
Formula química:	Sb	
Densidad:	6.62	
Paragénesis:	Venas hidrotermales.	
Clase:	Elemento nativo.	
Dureza:	3 – 3.5	
Clase de Simetría:	Hexagonal escalenoédrica	
Sistema Cristalino:	Trigonal	
Grupo Espacial:	$R\ 3\ m$ $a = 4.307\ \text{\AA}$, $c = 11.273\ \text{\AA}$	
Fractura:	Irregular/desigual.	
Lustre:	Metálico.	
Frecuencia:	Poco frecuente.	
Prop. Magnéticas:	No magnético .	
Raya:	Gris.	
Color:	Gris plata pálido.	
Radioactividad:	No radiactivo.	
Fluorescencia:	No presenta.	
Prop. Eléctricas:	No eléctrico.	
Transparencia:	Opaco.	
Punto de fusión:	631 °C.	

Punto de ebullición: 1587 °C.

Observaciones: Raras veces se encuentra en forma natural.

Aplicaciones: Muchas aleaciones de grado comercial.

Habito: Masivo.

Asociado a: Galena, pirita, cuarzo, plata, esfalerita.

Clivaje: Perfecto.

Prins. Yacimientos: Canadá, Estados Unidos, Australia, Rusia

Mineral: ARSÉNICO

Formula química: As

Densidad: 5.72

Paragénesis: Vetas de mineral en las rocas cristalinas.

Clase: Elemento nativo.

Dureza: 3.5

Clase de Simetría: Hexagonal escalenoédrica.

Sistema Cristalino: Trigonal.

Grupo Espacial: $R\ 3\ m\ a = 3.768\text{\AA}, c = 10.574\text{\AA}$

Fractura: Irregular/desigual.

Lustre: Metálico.

Frecuencia: Poco frecuente.

Prop. Magnéticas: No magnético.

Raya: Gris pálida.

Exfoliación: Basal perfecta.

Color: Gris pálido.

Radioactividad: No radiactivo.

Fluorescencia: No presenta.

Transparencia:	Opaco.
Prop. Eléctricas:	No eléctrico.
Tenacidad:	Frágil.
Observaciones:	De los elementos más tóxicos que existen.
Aplicaciones:	Se usa comercial e industrialmente como un agente en la fabricación de transistores, láser y semiconductores, así como también en la fabricación de vidrio, textiles, papeles, adhesivos de metal, preservantes de alimentos y madera, municiones (con el plomo permite la fabricación de perdigones), procesos de bronceado, disección de animales y conservación de pieles y en la industria de curtiduría y peletería.
Habito:	Nodular.
Caracterización:	Granular, masiva en capas, concéntrico. Reticulada, reniforme, columnar, acicular. Pequeña romboedros.
Impurezas:	Bi, Sb, Fe, Ni, Ag, S, Se.
Asociado A:	Cinabrio, oropimente, rejalgar, esfalerita, galena, pirita.
Clivaje:	Perfecto
Principales yacimientos:	México, Chile, Estados Unidos, Madagascar, Australia.

Mineral:	CUPROESTIBITA
Formula química:	$\text{Cu}_2(\text{Sb,Tl})$
Densidad:	8.42
Paragénesis:	Como acompañante de antimonio, plata, calcopirita, calcosina, bismuto, esfalerita, galena, etc.
Clase:	sulfuros y sulfosales.
Dureza:	4
Clase de simetría:	4/mmm (4/m 2/m 2/m) - Ditetragonal Dipiramidal
Sistema Cristalino:	Tetragonal.
Grupo Espacial:	$P4/nmm$ $a = 3.990\text{\AA}$, $c = 6.09\text{\AA}$
Fractura:	Irregular.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Muy raro.
Prop. Magnéticas:	Diamagnético.
Raya:	Gris acero.
Exfoliación:	Distinto / Buena, en una dirección.
Color:	gris acero a violeta/rosa.
Radioactividad:	No radiactiva.
Fluorescencia:	No presenta.
Transparencia:	Opaca.
Prop. Eléctricas:	dieléctrico
Tenacidad:	frágil
Observaciones:	Ussingita en corte de sienita sodalita.
Aplicaciones:	Mineral de interés científico y coleccionista.
Habito:	Masivo, granudo, agregados, costras.
Paragenesis:	Como agregados de grano fino en una vena de corte usinita, sodalita, sienita, en las venas de sulfuros en dolomía metamórfica silícea.

Caracterización: Como agregados de grano fino, a 1,5 mm de diámetro.

Impurezas: Hierro, vanadio, azufre y agua.

Asociado: Plata, lollinguita, calcopirita.

Clivaje: Distinto / Buena, en una dirección.

Prins. Yacimientos: Mina franklin (EE.UU.), Uranium Mine No. 16 (Shaft No. 16), Háje, Příbram, Central Bohemia Region, Bohemia (Böhmen; Boehmen), Czech Republic., Långban, Filipstad, Värmland, Sweden.

Mineral: JAMESITA

Formula química: $\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$

Densidad: 5.6 - 5.7. (Pura 5.67)

Paragénesis: Hidrotermal en sus últimas etapas.

Clase: Sulfuros, Arseniuros y Sulfonales

Dureza: 2.0 - 2.5.

Clase de Simetría: Prismática.

Sistema Cristalino: Monoclínico.

Grupo Espacial: P21/a.

Fractura: Concoidea.

Lustre: Metálico.

Frecuencia: Rara.

Prop. Magnéticas: Presenta magnetismo

Raya: Gris oscura.

Exfoliación: Buena.

Color: Gris acerado, a veces con irisaciones.

Radioactividad: No presenta

Fluorescencia: No presenta

Tenacidad: Frágil.

Transparencia: Opaca.

Observaciones: Es un sulfoantimoniuro de metales de plomo y de hierro. Fácilmente confundible con la boulangerita ($\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$), de composición química parecida pero sin hierro.

Aplicaciones: Mena de plomo y antimonio.

Habito: Cristales aciculares o filiformes con frecuencia asociados en penachos (variedad plumosita). Agregados fibrosos o columnares, incluso a veces radiales o plumosas.

Origen: Hidrotermal de media y baja temperatura.

Caracterización: La solución nítrica precipita $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ al añadir amoníaco. Filtrando y añadiendo IK se forma Pb_2 (amarillo). En tubo cerrado se forma un sublimado de Sb_2S_3 (rojo oscuro, casi negro en caliente) y azufre.

Impurezas: Cobre, cinc, plata y bismuto.

Asociado: Antimonita, bournonita, bindehimita, esfalerita, cuarzo, oro, rodocrosita, tetraedrita, galena, piritita, etc.

Prins. Yacimientos. Bellmunt del Priorato, Cilleros, Panticosa, Riotinto, Santa Cruz de Mudela, Valencia de Alcantara, Valle de Gistain, Villamayor de Calatrava, Villamiel.

Los cristales del bloque de color más apagado, son de estannita, un mineral de estaño. Los cristales más brillantes con forma de agujas son de jamesonita.

Mineral: MOLIBDENITA

Formula química: MoS_2

Densidad: 4.73

Paragénesis: Magmatica, pegmatitas, hidrotermal, metasomatica de contacto.

Clase: Sulfuros.

Dureza: 1 – 1.

Clase de Simetría: 6/m 2/m 2/m

Sistema Cristalino:	Hexagonal
Grupo Espacial:	2.EA.30 (Strunz)
Lustre:	Metálico.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Azul – gris.
Exfoliación:	[0001] Perfecta.
Color:	Negro, gris plomizo-plateado-violeta.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Tenacidad:	Muy séctil.
Observaciones:	División en finas hojas, los cristales son flexibles, pero no elásticos. Tiene un tacto de sensación grasienta y deja restos en los dedos.
Aplicaciones:	Es la más importante mena de molibdeno usado en acerías, electrónica e industria.
Habito:	Cristales hexagonales delgados y laminados terminados por caras pinacoidales, también como pirámides de seis caras, que pueden estar truncados por los pinacoides.
Caracterización:	División en finas hojas, los cristales son flexibles, pero no elásticos. Tiene un tacto de sensación grasienta y deja restos en los dedos.
Mineral:	OROPIMENTE
Formula química:	As_2S_3
Densidad:	4.05
Grupo Espacial:	2.FA.30 (Strunz)
Clase:	Sulfuro.
Dureza:	1,5 - 2
Clase de Simetría:	2/m
Sistema Cristalino:	Monoclínico.
Lustre:	Nacarado.
Prop. Eléctricas:	No presenta.
Prop. Magnéticas:	No magnético.

Raya:	Amarillo pálido.
Exfoliación:	Perfecta (010).
Color:	Amarillo parduzco, amarillo limón, amarillo naranja.
Radioactividad:	No radioactivo.
Transparencia:	Transparente a translúcido.
Paragénesis:	Se le encuentra frecuentemente en micaesquistos resultantes del metamorfismo regional de sedimentos arcillosos, donde es un mineral índice del grado de metamorfismo.
Observaciones:	Muy venenoso, se oxida con el aire, se altera con la luz, durante la fusión desprende vapores de olor aliáceo.
Aplicaciones:	Se utiliza en la fabricación de cristal permeable a la radiación infrarroja, telas especiales, y linóleo. Como pigmento tiene aplicaciones en semiconductores y fotoconductores y en la fabricación de fuegos de artificio.
Habito:	Columnar, hojoso, reniforme, estriado.
Origen:	Por sublimación en las fumarolas volcánicas, en fuentes hidrotermales templadas, por cambios bruscos de temperatura y como subproducto de la descomposición de otros minerales arsenicales como el rejalgar (As_2S_2) por acción de la luz solar.
Caracterización:	Cristales, agregados hojosos, películas, agregados terrosos, masivos, reniformes y pulverulentos.
Prins. Yacimientos:	El oropimente es abundante en regiones del Kurdistán y en las cercanías de Tajova, en Hungría. Otros yacimientos importantes se ubican en el Cáucaso, Allchar(Yugoslavia), Utah(EEUU), Huancavelica(Perú), Siberia(Rusia), Harz(Alemania), etc.
Mineral:	REJALGAR
Formula química:	As_4S_4
Densidad:	3,56
Paragénesis:	Ambientes sulfurosos en compañía de Oropimente, antimonita, pirita, esfalerita, arsénico y cinabrio.
Clase:	Sulfuro.
Dureza:	1,5 - 2
Clase de Simetría:	2 / m – prismático.
Sistema Cristalino:	Monoclínico.

Grupo Espacial:	P 2 1 / n
Fractura:	Concoidea.
Lustre:	Resinoso a graso.
Frecuencia:	Muy abundante.
Prop. Magnéticas:	No presenta.
Raya:	Rojo anaranjado a rojo.
Exfoliación:	Buena.
Color:	Rojo a amarillo anaranjado.
Radioactividad:	No radiactivo.
Fluorescencia:	No fluorescente.
Textura:	Rugosa.
Transparencia:	Opaca a translúcida.
Tenacidad:	Muy frágil.
Observaciones:	Es tóxico y se usó en la medicina medieval y fabricación de vidrio; hoy se usa en fuegos artificiales y pesticidas. Es soluble en soluciones de hidróxido de potasio.
Aplicaciones:	Mena del arsénico, pirotécnica, veneno contra animales.
Habito:	Masivo, granular, estriado.
Origen:	En la mina de Gethell, Nevada (E.E.U.U.), se han encontrado cristales de más de 70 mm. De hasta 80 mm en Lengenbach, Bintal (Suiza). Se conocen en Baia Sprie (Rumania). En Allchar (Macedonia), son comunes los agregados masivos
Caracterización:	Masas granulares o compactas o cristales estriados prismáticos. Muy fácilmente alterable por la luz, transformándose en oropimente por lo que hay que mantenerlo en la oscuridad.
Asociado a:	Cinabrio, Oropimente, Estibina, Calcita, minerales de Arsénico, Plata y Oro.
Prins. Yacimientos:	Los más bellos en Hunan (China). También en la mina de Getchell (EEUU, Nevada) y en la ya agotada mina de Green River George (Franklin, Washington, EEUU). Otros lugares típicos son Binntal (Suiza), Baia Sprie (Rumanía).
Mineral:	PIRITA
Formula química:	FeS_2
Clase:	Sulfuro.

Dureza:	6 - 6,5
Clase: de Simetría:	4/m 3 2/m
Sistema Cristalino:	Cubico.
Grupo Espacial:	2.EB.05a (Strunz)
Densidad:	4,95 – 5,10
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	No presenta.
Prop. Magnéticas:	Magnética después de calentar.
Raya:	negra-verduzca a negra-marrón.
Exfoliación:	Imperfecta.
Color:	Amarillo latón pálido.
Radioactividad:	No presenta.
Transparencia:	Transparente a translúcido.
Prop. Eléctricas:	No presenta.
Observaciones:	También conocida como "el oro de los tontos" o "el oro de los pobres", u "oropel" por su gran parecido con el oro.

Aplicaciones: No se utiliza para la extracción de Fe por su excesivo contenido de S, pero su uso industrial es muy importante como en el fabricación de ácido sulfúrico, sulfatos de hierro y de cobre, alumbre, anticriptográficos, fabricación de tintas, tintorería, etc. De algunas piritas se extrae oro como en las de Riotinto, Tharsisi Aznalcollar.

Habito: Cúbico. También puede presentarse en octaedros y piritoedros.

Origen: Por ser un mineral “peragranante” o “cursor” que puede producirse en todas las formaciones, está muy difundido y es el más abundante de los sulfuros por lo que no es posible detallar las innumerables localidades que lo producen.

Caracterización: En masas compactas, granudas estriadas, globulares, estalactíticas, concrecionadas en muchas ocasiones, sujetas a limonitización. Medianamente conductora de la electricidad.

Mineral: MOLIBDENITA

Formula química: MoS_2

Clase: Sulfuro.

Dureza:	2
Clase de Simetría:	2/m
Sistema Cristalino:	Monoclínico, prismático.
Grupo Espacial:	2.EC.10 (Strunz)
Densidad:	4,73
Lustre:	Metálico.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Negra.
Exfoliación:	Buena.
Color:	Gris plomo, negro verdoso, negro.
Radioactividad:	No radioactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Prop. Eléctricas:	No presenta.
Transparencia:	Opaco.
Observaciones:	Es extraído en las minas como la principal mena del vanadio.
Habito:	Masivo de cristales indistinguibles o bien en agregados en racimos de cristales.
Origen:	Aparece como el principal mineral mena de vanadio.
Caracterización:	Es un sulfuro simple de vanadio, anhidro.
Asociado:	Suele encontrarse asociado a otros minerales como azufre nativo, bravoíta, pirita, minasragrita, stanleyita, dwornikita, cuarzo, lignito vanádico o coque natural.
Mineral:	POLIBASITA
Formula química:	$\text{Cu}(\text{Ag,Cu})_6\text{Ag}_9\text{Sb}_2\text{S}_{11}$
Clase:	Sulfuro.
Dureza:	2,5 - 3
Clase de Simetría:	2/m
Sistema Cristalino:	Monoclínico, prismático.
Grupo Espacial:	Sulfuros.

Fractura:	Concoidea irregular.
Lustre:	Opaco.
Frecuencia:	Poco Frecuente.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Negra - rojiza.
Exfoliación:	{001} Pobre.
Color:	Blanco-plata grisáceo con pátina negruzca de alteración.
Radioactividad:	No radioactivo.
Densidad:	6,1 - 6,36.
Transparencia:	Transparente a translúcido.
Prop. Eléctricas:	No conductor.
Tenacidad:	Muy quebradizo.
Observaciones:	El nombre hace referencia a su múltiple contenido metálico.
Aplicaciones:	Se extrae en las minas y es usada como mena de antimonio, plata y arsénico.
Habito:	Cristales tabulares hexagonales, a veces masiva.
Origen:	En menas de plata de baja a temperatura moderada de la formación.
Caracterización:	En cristales tabulares hexagonales a veces maclados o en forma masiva y compacta.
Asociado a:	Suele encontrarse asociado a otros minerales como pirargirita, tetraedrita, estefanita, otras sulfosales de plata, acantita, oro, cuarzo, calcita, dolomita o barita.
Mineral:	VAESITA
Formula química:	NiS ₂
Densidad:	4.45
Paragénesis:	Aparece diseminada en masas de dolomita.
Clase:	Sulfuros.
Dureza:	4.5 – 5.5
Clase de Simetría:	Triclínico – pinacoidal.
Grupo Espacial:	P 1

Sistema Cristalino:	Isométrico diploidal.
Grupo Espacial:	P a3
Lustre:	Metálico a submetálico.
Transparencia:	Opaco.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Negra.
Exfoliación:	Perfecta.
Color:	Negro, gris-plateado, gris-violeta con luz reflejada.
Radioactividad:	No radioactivo.
Fluorescencia:	Violeta con luz reflejada.
Observaciones:	Es un sulfuro simple de níquel. Estructura cristalina semejante a la de otros minerales sulfuros del grupo de la pirita al que pertenece.
Aplicaciones:	Puede ser usado como mena del metal de níquel.
Habito:	Formas de hoja (por ejemplo micas).
Origen:	Fue descubierta en 1945 en la mina Kasompi en Katanga (República Democrática del Congo, siendo nombrada así en honor de Johannes F. Vaes, mineralogista belga.
Caracterización:	Forma una serie de solución sólida con la cattierita (CoS ₂), en la que la sustitución gradual del níquel por cobalto va dando los distintos minerales de la serie.
Impurezas:	Cobalto y hierro.
Asociado a:	Níquel, skutterudita, pirita, polidimita o uraninita.
Prins. Yacimientos.	Kasompi Mine (Menda Mine; Kasompi Hill), Swambo, Katanga Copper Crescent, Katanga (Shaba), Democratic Republic of Congo (Zaire).
Mineral:	ULLMANNITA
Formula química:	NiSbS
Densidad:	6,65 - 6,85
Paragénesis:	Aparece junto a otros minerales del níquel en vetas hidrotermales.
Clase:	Sulfuro.
Dureza:	5 – 5.5

Clase de Simetría:	Cúbico, P213
Sistema Cristalino:	Isométrico, tetartoidal.
Grupo Espacial:	P 2 1 3
Fractura:	Irregular.
Lustre:	Metálico.
Tenacidad:	Quebradizo.
Prop. Magnéticas:	No magnético.
Raya:	Negra grisácea.
Exfoliación:	Perfecta.
Color:	Blanco-estaño, gris-acero, blanco-plata.
Radioactividad:	No Radioactivo.
Fluorescencia:	No presenta.
Textura:	Granular.
Transparencia:	Opaca
Observaciones:	Muestras individuales pueden ser anisotrópico débil y una del revelará estructura laminar fina.
Aplicaciones:	Industriales.
Habito:	Cristales cubos de caras estriadas, o granular masivo de cristales indistinguibles.
Origen:	Fue descubierta en 1843 en una mina en Gosenbach, en el estado de Renania del Norte-Westfalia (Alemania) , siendo nombrada así en honor de Johann C. Ullmann, mineralogista y químico alemán. Un sinónimo poco usado es hartmannita
Caracterización:	Es un sulfuro de níquel y antimonio. Forma una serie de solución sólida con la willyamita (CoSbS), en la que la sustitución gradual del níquel por cobalto va dando los distintos minerales de la serie.
Impurezas:	Fe, Co, As, Bi.
Asociado a:	Nickelin, Gersdorffit, Pentlandit, Chalcopyrit, Pyrrhotit, Galenit, Tetrahedrit, Dyskrasit.
Clivaje:	Por completo

Prins. Yacimientos: Deutschland / Nordrhein-Westfalen / Arnsberg, Bezirk / Siegen-Wittgenstein, Kreis / Siegen / Gosenbach / Grube Storch und Schöneberg.

Mineral: RENÍTA

Formula química: ReS_2

Densidad: 6,48

Paragénesis: Entornos volcánicos

Clase: Sulfuros

Dureza: 1.25

Clase de Simetría: Triclínico – pinacoidal.

Sistema Cristalino: Triclínico.

Grupo Espacial: P 1

Transparencia: Translúcido.

Lustre: Metálico.

Prop. Magnéticas: No magnético.

Raya: Negra.

Exfoliación: Ninguna.

Fractura: Concoidea.

Color: Negro-gris plateado, rojo translúcido

Radioactividad: Es radiactivo tal como se define en 49 CFR 173.403. Mayor que 70 Bq / gramo

Fluorescencia: No presenta

Observaciones: No hay datos sobre riesgos para la salud de este material ha sido introducido en la base de datos. Usted siempre debe tratar a los especímenes minerales con cuidado.

Aplicaciones: Puede ser usado como mena del renio.

Habito: Formas de hoja (por ejemplo micas).

Origen: Fue descubierta en 1994 en el volcán Kudriavyyi en la isla Iturup de las Islas Kuriles, en el óblast de Sajalín (Rusia); siendo nombrada así por su composición química y aprobado como mineral en el año 2004. Sinónimos poco usados son IMA1999-004a y kurilita.

Caracterización: Se forma en ambiente volcánico, a partir de los gases de fumarolas ácidas calientes.

Asociado a:	Re, S
Clivaje:	Por completo (001)
Prins. Yacimientos:	Volcán Kudryaviy, Iturup Island, Kurilian Cadena, Rusia
Mineral:	ACANTITA
Formula química:	Ag ₂ S
Densidad:	7.24
Paragénesis:	Hidrotermal, secundaria.
Clase:	Sulfuros
Dureza:	2 – 2.5
Clase de Simetría:	2/m (173°C) o isométrico (>173°C)
Sistema Cristalino:	Monoclínico
Grupo Espacial:	P2 ₁ /n(<173°C) o Im3m(>173°C)=99°35'; Z=4 a= 7.87 ,b=6.91Å, c=4.23 Å
Fractura:	Sub-concoidea
Lustre:	Metálico
Frecuencia:	Yacimientos frecuentes, Mineral escaso.
Prop. Magnéticas:	No magnético
Raya:	Negro brillante
Exfoliación:	Poco definida
Color:	Gris plomo, negro
Observaciones:	Soluble en ácido nítrico y clorhídrico, soluble en amoníaco, maleable, flexible, sétil.
Aplicaciones:	Es importe mena de plata.
Origen:	Abundante ejemplares procedentes de Hiendelaencina (Guadalajara)
Caracterización:	Generalmente en masas o formas arborescentes. Cristales Octaedros, hexaedros, rombododecaedros (argentita), tabulares, isométricos, columnares, caras a menudo curvadas y desiguales, maclas, pseudomorfos de argentita (acantita).
Impurezas:	Selenio.
Asociado:	Polibasita, Plata, Proustita, Pirargirita, Estefanita, Galena, Calcita, etc.

Mineral:	AGUILARITA
Formula química:	Ag_4SeS
Densidad:	7.65
Paragénesis:	Hidrotermal, en yacimientos de plata de baja temperatura ricos en selenio y pobres en azufre.
Clase:	Sulfuros
Dureza:	2.5
Lustre:	Metálico
Sistema Cristalino:	Ortorrómbico
Fractura:	Áspera
Prop. Eléctricas:	Gran conductor
Frecuencia:	Yacimientos y Mineral: raro.
Prop. Magnéticas:	No magnético
Raya:	Gris – negro
Exfoliación:	No observada Color: Gris plomizo brillante
Aplicaciones:	Se extrae como mena de plata, aunque de importancia secundaria.
Origen:	Yacimientos y Mineral: raro.
Caracterización:	Agregados masivos, esféricos, esqueléticos, dendritas.
Mineral:	ARGENTITA
Formula química:	Ag_2S
Densidad:	7.2 – 7.4
Paragénesis:	Hidrotermal
Fractura:	Subconcoidea
Clase:	Sulfuros
Dureza:	2 – 2.5
Lustre:	Metálico en fracturas recientes; opaco en superficies antiguas
Sistema Cristalino:	Cúbico

Grupo Espacial:	P2/n (<173°C) o Im3m(>173°C) a= 7.87Å, b=6.91Å, c= 4.23Å, b=99°35'; Z=4
Clase de Simetría:	2/m (<173°C) o (>173°C)
Solubilidad:	Ácido nítrico.
Prop. Magnéticas:	Muy débil
Raya:	Negro brillante
Exfoliación:	Imperfecta
Color:	Negro a gris
Observaciones:	Brillante en superficie reciente que, al ser expuesta al aire, se torna negra mate, debido a la formación de un sulfuro terroso. Al enfriarse por encima de 173 °C se forman maclas penetrantes que presentan es aspecto aparente de cristales cúbicos.
Aplicaciones:	Empleo importante mena de plata.
Origen:	Guadalajara, Barcelona, Murcia.
Asociado a:	Plata nativa, proustita, pirargirita, estefanita, etc. Y en vetas argentíferas. Generalmente en masas o formas arborescentes.
Identificación:	La argentita es uno de los Minerales más comunes de la plata y como tal, se encuentra muy difundida en vetas de plata. Es normal que se encuentre asociada a la plata nativa y a varios sulfuros de plata (proustita, Pirargirita, estefanita y sobre todo polibasita, con la cual frecuentemente forma crecimientos paralelos). Son de destacar las concomitancias de la argentita con la galena (sulfuro de plomo, también con simetría cubica y una exfoliación, (según las caras de un cubo) hasta el punto de que es difícil distinguir estas dos especies ante un simple examen visual, por mucho que se afirme que la argentita sea claramente mucho más maleable y además ennegrezca con mayor facilidad que la galena, expuestas ambas a los efectos de la luz y el aire.

Mineral:	ANGLESITA
Formula química:	PbSO ₄
Sistema Cristalino:	Ortorrómbico
Clase de Simetría:	2/m2/m2/m
Densidad:	6.3
Clase:	Sulfatos

Dureza:	2.5 - 3
Fractura:	Concoidal, frágil.
Color:	Blanco, puede ser oscuro por Impurezas
Brillo:	Adamantino brillante.
Raya:	Blanca
Exfoliación:	Exfoliable
Prop. Magnéticas:	No magnético
Paragénesis:	Como mineral supergénico de plomo.
Observaciones:	Se forma de por alteración de la galena y otros minerales de plomo. La anglesita es un mineral de formación secundaria como producto de la oxidación de una mena primaria de plomo, el sulfuro de plomo llamado galena, cuando la parte superior del depósito de galena presenta una superficie de alteración.
Aplicaciones:	Mena secundaria de plomo.
Origen:	Ejemplares cristalinos se han recogido en Teijeira (Orense). En la mayoría de las localidades se encuentra en pequeña cantidad en forma de costra sobre otros materiales. A veces, en cavidades de galena se han encontrado resplandecientes recubrimientos en forma de geoda de cristales de anglesita.
Caracterización:	En cristales con hábitos semejantes a la baritina y celestina.
Asociado:	Cerusita, esfalerita, smithsonita o hemimorfita.
Mineral:	ARGENTOJAROSITA
Formula química:	$\text{AgFe}_3^{+3}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Sistema Cristalino:	Hexaédrico
Clase de Simetría:	R3m a=7, b=0, c=17, z=3
Formula química:	$\text{Ag Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH}_6)$
Densidad:	3.66
Dureza:	3.5 – 4.5
Clase:	Sulfuros
Fractura:	Semiconcoidea
Raya:	Amarillo.

Brillo: Vítreo.

Mineral: **ARGENTOPENTLANDITA**

Sistema Cristalino: Cubico

Formula química: $\text{Ag}(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_8$

Densidad: 3 – 3.5

Clase: Sulfuros y sulfosales

Color: Pardo bronce

Dureza: 3.5

Lustre: Metálico

Clase de simetría: $4/m \bar{3} 2/m$, $Fm\bar{3}m$, $a = 10,50 \text{ \AA}$, $Z=4$.

Impurezas: Cobre

Transparencia: Opaco

Raya: Pardo rojizo

Exfoliación: Buena (1 1 1)

Aplicaciones: Es una importante mena de plata.

Origen: Hidrotermal, en skarns con sulfuros diseminados, raramente en carbonatitas.

Asociaciones: Pirita, Pirrotina, Mackinawita, Cubanita, Calcopirita, Estannita, Galena, Esfalerita, Cuarzo, etc...

Mineral: **ARGENTOPIRITA**

Formula química: AgFe_2S_3

Sistema Cristalino: Ortorrómbico

Clase de Simetría: $2/m 2/m 2/m$, $Pmmn$, $a=6.64$, $b=11.7$, $c=6.45 \text{ \AA}$, $Z=4$.

Clase: Sulfuros y sulfosales.

Densidad: 4.25

Dureza: 3.5 – 4

Lustre: Metálico

Raya: Gris

Color: Bronce

Paragénesis: Minerales de Ag, de Co-Ni, de Sn.

Caracterización: Las secciones basales muestran un maclado complejo.

Mineral: ARGENTOTENANTITA

Formula química: $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Densidad: 4.71

Paragénesis: Hidrotermal

Clase: Sulfosales

Dureza: 3.5

Lustre: Metálico

Sistema Cristalino: Cubico

Grupo Espacial: Grupo de la tenantita

Clivaje: No presenta

Clase: de simetria I4-3m

Raya: Pardo rojo, negro

Exfoliación: No presenta

Color: Negro, gris.

Mineral: ARSÉNOPIRITA

Formula química: FeAsS

Sistema Cristalino: Monoclínico

Densidad: 5.07

Clase: Sulfuros

Color: Amarillo a pardo

Dureza: 5.5 – 6

Lustre: Vítreo débil

Solubilidad: En ácidos

Fractura: Irregular

Prop. Eléctricas:	Nulas
Impurezas:	Anglesita, barita, cuarzo.
Prop. Magnéticas:	No magnético
Raya:	Amarilla
Exfoliación:	Fácil
Paragénesis:	Pirrotina, pirita, calcopirita, Au, galena, entre otros.
Aplicaciones:	Para la extracción de arsénico. Puede ser explotable por su contenido en oro, plata, cobalto y níquel. Contiene el 43% de arsénico, 34,3% de hierro y un 19,7% de azufre.
Habito:	Masas formadas por granos finos y costras constituidas por cristales aplanados con contorno hexagonal
Observaciones:	Cristales prismáticos y maclados polisintéticamente, pueden formar maclas en forma de punta de lanza o de estrella. Precipitado blanco con HCL, soluble en amoniaco (Ag). Ensayos característicos del hierro (sulfocianuro, ferrocianuro) y de los sulfatos (cloruro de bario).
Morfología:	Cristales tabulares gruesos a estriados prismáticos, masas granulares y masas compactas.
Mineral:	BARITA
Formula química:	BaSO ₄
Sistema Cristalino:	Ortorrómbico
Clase de Simetría:	Dipiramidal (2/m 2/m 2/m)
Color:	Sin color, amarillo, blanco, marrón, azulado, etc.
Densidad:	4.47
Clase:	Sulfatos
Dureza:	3 -3.5
Lustre:	No metálico; blanco mate
Fractura:	Irregular
Punto de fusión:	1580 °C
Frecuencia:	Si presenta

Tenacidad:	Quebradiza
Raya:	Blanca
Exfoliación:	Perfecta según {001} -base- y {210}
Aplicaciones:	Es la mena principal de bario.
Origen:	Es un mineral muy común. Aparece frecuentemente como envolviendo las vetas de minerales metálicos. Es así una de las gangas filonianas junto con la calcita y el cuarzo, que aparecen junto a ella.
Caracterización:	El principal uso de la barita es en la industria petrolera. También tiene importantes Aplicaciones: en la industria de la pintura como un pigmento con resistencia a los ácidos. Se usa en la obtención del elemento bario. En la industria automotriz al remplazar el asbesto como producto friccionante en la fabricación de balatas para frenos. En la industria del vidrio como fundente. Como protección en los cuartos de rayos X debido a que con su alta Densidad: es capaz de absorber la radiación. Substituye en ciertos casos al plomo. En la industria médica al ingerirse y ser un medio de contraste en las radiografías del aparato digestivo.

Mineral:	BORNITA
Formula química:	Cu_5FeS_4
Sistema Cristalino:	Tetragonal
Densidad:	4.9 – 5.3
Clase:	Sulfuros, Arseniuros y Sulfosales
Dureza:	3 – 3.25
Lustre:	Metálico. A veces presenta patina.
Fractura:	Concoidea o desigual
Prop. Eléctricas:	Buen conductor
Frecuencia:	Rara
Impurezas:	Plata y plomo
Raya:	Negro grisáceo

Exfoliación:	Imperfecta o difícil
Color:	Rojo de cobre, marrón de bronce, púrpura
Paragénesis:	Pirita, magnetita, galena, esfalerita, cuarzo, enargita, calcosina, calcopirita, covellina, crisocola, malaquita, azurita, cuprita y calcita.
Hábito:	Cristales cúbicos, dodecaédricos y más raramente octaédricos. Las caras suelen aparecer desgastadas o curvadas. Las masas pueden ser compactas o granulares (cobre abigarrado). La alteración provoca reflejos de color azul o violeta (cuello de pichón).
Origen:	Formándose como mineral primario de cobre en los filones pegmatíticos e hidrotermales asociados a cámaras magmáticas. También puede aparecer de forma secundaria, en las zonas de oxidación de los yacimientos asociada a la malaquita.
Caracterización:	Es extraída por su importancia industrial como mena del cobre y se encuentra en depósitos porfídicos junto con otra mena de cobre más abundante y común, la calcopirita. La bornita se altera rápidamente a calcosina y covelita. También se la llama erubescita.
Aplicaciones:	Es una de las principales menas de cobre
Mineral:	BOULANGERITA
Formula química:	$\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$
Densidad:	5.8 – 6.2
Paragénesis:	Galena, esfalerita, antimonita, arsenopirita y sulfosales
Dureza:	2.5 – 3
Sistema Cristalino:	Monoclínico
Clase Cristalina	P21/m
Fractura:	Ganchuda
Raya:	Gris negra, gris – azul
Fractura:	Imperfecta a buena
Color:	Gris plomo algo azulado, marrón rojizo
Caracterización:	Si se encuentra en grandes cantidades se emplea como mena de plomo y como mena secundaria de antimonio.

Habito: Cristales similares a agujas, rara vez en masas fibrosas y anillos, micáceo en forma de pluma.

Los cristales son prismáticos, a veces llegan a ser aciculares. Las caras aparecen generalmente estriadas y no suelen estar bien desarrolladas. Las masas son fibrosas, plumosas y a veces compactas.

Compacta granuda en agregados radiales fasciculares o fibroso.

Mineral: Calaverita

Formula química: AuTe_2

Densidad: 9.31

Clase: Sulfuros, Arseniuros y Sulfosales

Dureza: 2.5 - 3

Lustre: Metálico

Sistema Cristalino: Monoclínico

Clase de Simetría: $C2/m a=9 \text{ } b=4 \text{ } c=10 \text{ } \alpha=0^\circ \text{ } \beta=125^\circ \text{ } \gamma=0^\circ \text{ } Z=4$

Fractura: Concoidal

Solubilidad: Es soluble en agua

Prop. Magnéticas: No magnética

Raya: Gris amarillento a gris verde

Exfoliación: Sin exfoliación

Color: Amarillo latón

Observaciones: También se le conoce como telururo de oro, acompañado generalmente de un 3 % de plata en forma de silvanita. Se encontró por primera vez en el condado de Calaveras (California). Otros yacimientos son los de Cripple Creek, Colorado, y Kalgoorlie, Australia occidental (v. Teluro). Tiene un punto de fusión de 464 °C.

Origen: Calaveras (California)

Caracterización: Agregados masivos o granudos muy raramente cristales

Mineral: CALCANTITA

Formula química:	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Densidad:	2.12 – 2.30
Clase:	Sulfatos
Dureza:	2
Lustre :	Vítreo
Sistema Cristalino:	Triclínico
Clase de simetría:	Pinacoidal
Fractura:	Irregular
Habito:	Habitualmente estalactítico, incrustado, reniforme o masivo
Prop. Magnéticas:	No magnetica
Raya:	Blanca azulosa
Exfoliación:	Imperfecta, irregular
Color:	Verde, azul
Aplicaciones:	Se emplea en la industria del cobreado, tintorería, tintas, pilas eléctricas, papeleras, medicina, etc. En grandes masas se puede utilizar como mena de cobre.

Origen: Producto de la oxidación de minerales de cobre (calcopirita y otros sulfuros). Al ser soluble en agua no aparecen grandes masas, si no en costras o estalactitas. Ya era conocida en la Antigüedad como lo revelan algunos escritos griegos y romanos, los cuales ya obtenían cobre a partir de las soluciones añadiendo hierro. También conocida como Piedra Lipis, Vitriolo Azul, Caparrosa Azul, Cianosa.

Caracterización: Pierde color al calentar, el cual se recupera al humedecer. A alta temperatura se descompone en óxido cúprico y SO_3 . Al sumergir una punta de hierro en la disolución, se recubre lentamente de cobre metálico.

Mineral: CALCOCITA

Formula química:	Cu_2S
Densidad:	5.5 – 5.8
Paragénesis:	Calcopirita, bornita
Clase:	Sulfuros
Dureza:	2.5 - 3

Lustre:	Metálico
Sistema Cristalino:	Monoclínico
Tenacidad:	Frágil
Fractura:	Concoidea o desigual
Transparencia:	Opaca
Frecuencia:	No presenta
Prop. Magnéticas:	No magnético
Raya:	Gris brillante
Exfoliación:	Poco clara
Color:	Gris plomo algo azulado
Caracterización:	Masas compactas y granudas, nódulos películas a veces recubiertas de polvillo verde de malaquita.

Mineral: CALCOPIRITA

Formula química:	CuFeS_2
Sistema Cristalino:	Tetragonal
Grupo Espacial:	I42d.
Clase:	Sulfuros
Densidad:	4.1 – 4.3
Dureza:	3.5 – 4
Lustre:	Metálico
Fractura:	Concoidea a desigual
Transparencia:	Opaca
Frecuencia:	Muy común
Prop. Magnéticas:	No magnética
Raya:	Negra verdosa
Exfoliación:	Imperfecta
Color:	Amarillo latón con matriz verdosa

Paragénesis:	Pirita, esfalerita, galena, tetraedrita, pirrotina, covelita, malaquita, azurita, crisocola, cuarzo, calcita, baritina.
Aplicaciones:	Una de las principales menas de cobre. Debido al alto contenido en metales nobles, estos se recuperan en los barros anódicos de los procesos electrolíticos del cobre.
Hábito:	Son raros los cristales tetraédricos u octaédricos, siendo a menudo estriados. Generalmente aparecen masas compactas, botroidales y reniformes.
Origen:	Aparece en filones hidrotermales de alta y de media temperatura. En placeres como consecuencia de procesos de metamorfismo. Es menos frecuente encontrarla asociada a rocas básicas de origen ígneo y en formaciones de origen orgánico. Se altera fácilmente a malaquita y a otros minerales secundarios de cobre. También llamada bronce candelero. Es muy fácil de confundir con las piritas cupríferas.
Caracterización:	Cristales pequeños generalmente masas compactas. En tubo cerrado se ennegrece formando sublimado amarillo de azufre. Añadiendo amoníaco a la disolución nítrica, se forma un precipitado pardo de hidróxido de hierro y un complejo azul, observable cuando se filtra.

Mineral: CALCOSIDERITA

Formula química:	$\text{CuFe}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})_3$
Color:	Verde manzana, verde oscuro.
Densidad:	3.1
Clase:	PI
Lustre:	Vítreo o terroso
Grupo Espacial:	$a=8 \ b=10 \ c=8 \ \alpha=112^\circ \ \beta=115^\circ \ \gamma=69^\circ \ Z=1$
Pro. Eléctricas:	No conductor
Prop. Magnéticas:	No presenta
Exfoliación:	Perfecta
Hábito:	Prismas cortos, usualmente masivo, de grano fino
Origen:	Desarrollados en yacimientos de cobre. Cristales implantados.
Caracterización:	Sulfuros
Dureza:	4.5

Sistema Cristalino:	Triclínico
Fractura:	Concoidal
Frecuencia:	No muy común
Raya:	blanca y verde claro
Paragénesis:	Turquesa

Mineral: ESTIBINITA

Clase:	Sulfuros
Fórmula química:	Sb_2S_3
Color:	Gris plomo
Raya:	Gris
Lustre:	Metálico
Sistema cristalino:	Ortorrómbico
Hábito cristalino:	Acicular, masivo, granular, columnar
Dureza:	2
Densidad:	4,63

Mineral: GALENA

Fórmula química:	PbS
Clase:	Sulfuros.
Sistema cristalino:	Cúbico.
Hábito:	Cúbico, cubo-octaédrico, octaédrico o masivo.
Color:	Gris plomo.
Raya:	Gris oscura
Brillo:	Metálico.
Dureza:	2.5,

Densidad:	7.5
Exfoliación:	Cúbica perfecta, muy notoria.
Habito:	Cubico.
Caracterización:	Su hábito cúbico, su color gris plomo, brillo metálico, elevada densidad y exfoliación cúbica perfecta, le hacen inconfundible con otros sulfuros u óxidos de aspecto parecido. Algunos ejemplares procedentes de La Unión-Cartagena suelen presentar pátinas superficiales con irisaciones azuladas. Se debe evitar confundirla: con las variedades de blenda ricas en hierro, las cuales poseen hábito tetraédrico maclado que origina cristales redondeados, de color más oscuro (negro), menor densidad, mayor dureza y exfoliación rombododecaédrica perfecta; con la antimonita, de hábito prismático y más oscura; y con algunas variedades de oligisto, más duro, oscuro, con raya pardo-rojo y carente de exfoliación cúbica.
Ambiente de formación:	La galena puede aparecer en diferentes ambientes; asociada a depósitos metamórficos, pegmatitas, rocas sedimentarias, etc., pero cabe destacar su presencia en filones hidrotermales donde aparece asociada a blenda, pirita, cuarzo, barita y siderita, entre otros.
Localidades:	En España cabe destacar las mineralizaciones de Linares y La Carolina en Jaén, las de la Sierra de Almagrera en Almería y las de los distritos mineros de La Unión y Cartagena, pero aparecen yacimientos importantes en otras numerosas provincias. En la Región de Murcia destacan los yacimientos de las localidades citadas anteriormente, donde aparece asociada a blenda y pirita, pero también existen mineralizaciones en las poblaciones de Mazarrón (Cabezos de San Cristóbal, Los Perules, Las Pedreras Viejas y Coto Fortuna, con altos contenidos en plata), Águilas (Tebar, Cueta de Gos y Sierra de la Pinilla), Lorca (Minas de Zarzadilla de Ramos y Rincón), así como otras pequeñas mineralizaciones dispersas por Zarzadilla de Totana y en el valle de Ricote, esta última asociada a materiales triásicos.
Usos:	La galena es la principal mena de plomo y una de las más importantes menas de plata (galena argentífera). El plomo se empleó hasta hace pocas décadas para la fabricación de tuberías, aunque en la actualidad ha sido sustituido por el cobre y diversos plásticos, así como antidetonante en la gasolina, donde ha sido sustituido por otros aditivos. Actualmente sigue utilizándose en la fabricación de baterías, pinturas, materiales de soldadura, perdigones y balas, y como aislante de radiaciones, etc.

¿Sabías qué? La palabra galena proviene del latín, utilizada por Plinio para todas las menas de plomo.

Los egipcios ya la utilizaban como un cosmético de color negro para los ojos, el Mesdemet. Haciendo esto protegían sus ojos del polvo y de la excesiva luz solar. Este maquillaje actuaba a la vez de repelente de insectos y desinfectante en dolencias oculares. La palabra alcohol, procede de este mineral, pues proviene de la árabe khol, que era como denominaban a ese polvo fino que las damas orientales usaban como cosmético formado por galena. Actualmente esta palabra árabe da nombre a un famoso tipo de cosmético de ojos.

Las mineralizaciones de galena argentífera de los cotos mineros de La Unión y Cartagena, comenzaron a explotarse intensivamente en el siglo IV a.C. por los cartagineses, para financiar la guerra contra Roma, con la plata asociada a este mineral.

Mineral:	HIPERCINABRIO
Formula química:	HgS
Clase:	Sulfuros.
Localidad Tipo:	Llamado así por su relación trimórfica con Cinabrio y Metacinabrio.
Dureza:	7,43
Densidad:	3
Sistema cristalino:	Hexagonal.
Exfoliación:	Poco clara (010).
Fractura:	Desigual.
Raya:	Negra rojiza.
Color:	Negro purpura, rojo.
Transparencia:	Translúcido.
Brillo:	Adamantino.
Morfología:	Raramente en cristales, agregados granulares, masivos o pulverulentos, pseudomorfos.
Génesis:	Hidrotermal, transformación desde Metacinabrio.
Cristales:	Tabulares, romboédricos, trapezoédricos, maclas.
Propiedades:	Se evapora al soplete insoluble en HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , levemente séctil.

Yacimientos: Muy raros.

Usos: Coleccionismo.

Composición: 86,21% de Mercurio y 13,79% de Sulfuro

Asociaciones: Estibina, Pirita, Marcasita, Calcedonia, Cuarzo, Etc.

Similares: Rejalgar, Proustita, Cuprita, Rutilo, Hematites.

Mineral: JAMESONITA

Fórmula química: $\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$

Sistema cristalino y clase: Monoclínico; 2/m

Grupo espacial: $P2_1/a$ $a = 15.65 \text{ \AA}$, $b = 19.03 \text{ \AA}$, $c = 4.03 \text{ \AA}$, $\beta = 91^\circ 48'$; $Z = 2$

Clase cristalina: Sulfosales

Etimología: En honor del mineralogista inglés Robert Jameson (1774-1854).

Color: Gris de acero.

Raya: Gris de acero.

Brillo: Metálico.

Dureza: 2 a 3.

Densidad: 5.63

Óptica: Opaco con color blanco como la galena. Anisótropo.

Química: Contiene 40.08% de Pb, 34.70% de Sb, 2.79% de Fe y 21.37% de S. Es atacable con ácido nítrico.

Forma de presentarse: En cristales aciculares o en forma de capilares. Fibroso o macizo y compacto.

Génesis: Mineral hidrotermal primario, principalmente de alta a mediana temperatura.

Yacimientos en España: Ha sido localizado en Santa Cruz de Mudela (Ciudad Real).

También en Valencia de Alcántara y como fragmentos exfoliados fibrosos en Cilleros y Villamiel (Cáceres). Ejemplares procedentes de Tharsis y Ríotinto (Huelva).

Empleo: Mena de plomo y antimonio.

Mineral: JAROSITA

Fórmula química:	$\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Clase:	Sulfatos
Color:	Amarillo pardo; rojo óxido (al cristalizar)
Raya:	Amarilla
Lustre:	Terroso o limoso, pulverulento; brillante en forma cristalina
Sistema cristalino:	Trigonal
Hábito cristalino:	Tubular
Macla:	No presenta
Exfoliación:	Imperfecta (romboédrico); perfecta y clara (trigonal)
Fractura:	Irregular (romboédrico); concoidea a desigual (trigonal)
Dureza:	3 a 4 (romboédrico); 2,5 a 3,5 (trigonal)
Tenacidad:	Frágil
Densidad:	3,1 a 3,3
Propiedades ópticas:	Anisotropía y Reflejos Internos: Moderada: azul, gris, amarillo, café, gris verdoso
Solubilidad:	Insoluble en agua
Fluorescencia:	No presenta

Mineral:	Alunita
Formula química:	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Densidad:	2.8
Sistema Cristalino:	Trigonal.
Clase:	Sulfato
Dureza:	3.5 - 4
Clase de Simetría:	$R\bar{3}m$, $R\bar{3}m$; $a=7$ $b=0$ $c=17$; $\alpha=0^\circ$ $\beta=0^\circ$ $\gamma=0^\circ$; $Z=4$
Fractura:	Irregular, concoidea
Lustre:	Vítreo aperlado
Frecuencia:	Poco común
Prop. Magnéticas:	No magnético

Raya:	blanca
Exfoliación:	Perfecta – Concoidea
Color:	Blanco, amarillento, gris
Punto de fusión:	2.000 °C
Radioactividad:	No radioactivo
Fluorescencia:	No presenta
Textura:	Fibrosa, granular, masiva
Transparencia:	Transparente a opaco
Prop. Eléctricas	Fuertemente piro eléctrico
Tenacidad:	Quebradizo
Observaciones:	Común en brechas hidrotermales junto con silicificación o cuarzo.
Aplicaciones:	Este mineral ha sido utilizado para datación de sedimentos por el método del potasio-argón en depósitos metálicos, a partir de la datación de la alunita que se presenta rellenando el interior de oquedades
Habito:	Raramente en cristales, normalmente como drusas en agregados masivos
Origen:	Mineral generado por la acción del sulfato, que puede ser formado a partir de la pirita o bien por la acción de una solfatara, sobre rocas ricas en aluminio del tipo de los feldespatos ortoclasas, normalmente acompañado de una caolinización y salificación.
Caracterización:	Silicificación se infiere de una apariencia a veces blanquecina y una gran dureza en la roca. Es común en muchos sistemas hidrotermales donde la precipitación de sílice es típicamente un resultado del descenso de la temperatura del fluido

Mineral:	MOLIBDENITA
Formula química:	MoO ₃
Densidad:	4,73

Paragénesis: Pegmatítico pneumatolítico. Neumatolítico de contacto. Hidrotermal de alta temperatura. Ortomagmático y accesorio en ciertos granitos.

Clase: Sulfuros

Dureza: 1 – 1.5

Clase de Simetría: 2.EA.30

Sistema Cristalino: Hexagonal

Grupo Espacial: P63/mmc $a = 3.16 \text{ \AA}$, $c = 12.32 \text{ \AA}$, $\alpha = 120^\circ$; $Z = 0.33$

Fractura: Desmenuzado

Lustre: Metálico

Prop. Magnéticas: No magnético

Raya: Azul-gris

Exfoliación: Perfecta

Color: Negro, gris plomizo-plateado-violeta

Fluorescencia: Si

Transparencia: Opaco

Prop. Radiactivas: No radiactivo

Tenacidad: Sectil y flexibles

Observaciones: Soluble en ácido clorhídrico. División en finas hojas, los cristales son flexibles, pero no elásticos. Tiene un tacto de sensación grasienta y deja restos en los dedos.

Aplicaciones: Actualmente, es ampliamente utilizada como aditivo EP (Extrema Presión) para lubricantes, pero también tendría Aplicaciones: dentro de la rama electrónica.

La presencia de capas alternadas de Azufre y Molibdeno genera en el material una banda prohibida de 1,8 eV que sirve como control del flujo de electrones. Con este material podrían construirse procesadores mucho más pequeños y que consuman unas 100.000 veces menos energía que uno de Silicio en estado de reposo.

Y aquí no se terminan sus beneficios, la Molibdenita, además de ser abundante en la naturaleza, es muy fácil de separarse en capas, mediante un proceso de Exfoliación: La atracción entre capas de Azufre es muy baja,

con lo que el material se puede hacer deslizar para ir obteniendo sandwiches de capas Azufre – Molibdeno – Azufre.

La molibdenita podrá usarse junto al Grafeno para producir procesadores muchísimo más potentes y con menor consumo de energía, así como también, celdas fotoeléctricas más eficientes y en aplicaciones: optoelectricas que requieran de materiales semi-conductores transparentes. Probablemente en algunos años más empecemos a ver prosperar estas nuevas tecnologías.

Habito:	Cristales hexagonales delgados y laminados terminados por caras pinacoidales.
Origen:	Depósitos minerales hidrotermales de alta temperatura.
Asociado:	Pirita, la calcopirita, el cuarzo, la anhidrita, la fluorita y la scheelita.

Mineral:	MILLERITA
Formula química:	NiS
Densidad:	5,37
Paragénesis:	Hidrotermal de baja temperatura.Producto de alteración de otros minerales de níquel.
Clase:	Sulfuros
Dureza:	3 - 3,5

Clase de Simetría: 2.CC.20

Sistema Cristalino: Trigonal, ditrigonal dipiramidal

Grupo Espacial: R3m $a = 9.591 \text{ \AA}$, $c = 3.145 \text{ \AA}$, $g = 120^\circ$; $Z = 9$

Fractura: Irregular

Lustre: Metálico

Frecuencia: Poca

Prop. Magnéticas: Magnético tras calentar

Raya: Negra verdosa

Exfoliación: Perfecta

Color: Amarillo-latón pálido, con barniz iridiscente, gris-verdoso.

Punto de ebullición 43°C

Transparencia: Opaco

Tenacidad: Quebradiza

Observaciones: Anisotropismo fuerte

Aplicaciones: Muy buscado por coleccionistas.

Habito: Cristales aciculares metalizados

Caracterización: Cristales capilares o aciculares. Raramente compacta.

Asociado a: Galena, fluorita, calcopirita, pirita, siderita, cuarzo, calcita, barita, ankerita, pirrotita.

Mineral: PAVONITA

Formula química: AgBi_3S_5

Densidad: 6,8

Paragénesis: Aparece en yacimientos de minerales sulfuros metálicos, formándose en vetas hidrotermales.

Clase: Sulfuros

Dureza: 2

Clase de Simetría:	4.FC.20
Sistema Cristalino:	Monoclínico, prismático
Transparencia:	Opaco
Fractura:	Desigual
Lustre:	Metálico
Color:	Gris-acero a Blanco-lata
Prop. Magnéticas:	Fuertemente magnético
Raya:	Gris-plomo
Aplicaciones:	Se extrae en las minas como mena de la plata y el bismuto.
Habito:	Masivo con diminutos cristales aplanados
Asociado a:	Uropavonita, bismutinita, calcopirita, aikinita o hodrushita.
Mineral:	PIRARGIRITA
Formula química:	Ag_3SbS_3
Densidad:	5,85
Paragénesis:	La pirargirita, se forma a bajas temperaturas en los filones de plata, como mineral que cristaliza luego en la secuencia de la deposición primaria
Clase:	Sulfuros
Dureza:	2.5
Clase de Simetría:	2.GA.05
Sistema Cristalino:	Trigonal
Grupo Espacial:	$R3c$ $a = 11.03 \text{ \AA}$, $c = 8.72 \text{ \AA}$, $\alpha = 120^\circ$; $Z = 6$
Fractura:	Irregular concoidea
Lustre:	Adamantino
Raya:	Roja púrpura
Exfoliación:	Manifiesta en romboedros.
Color:	Rojo oscuro o gris rojizo
Tenacidad:	Quebradizo

Transparencia:	Translúcido
Observaciones:	Funde bajo influencia del soplete y es soluble en HNO ₃ , HCl y KOH.
Aplicaciones:	Mena de plata.
Hábito:	Prismático, hemimórfico.
Origen:	La pirargirita es un mineral originado en la etapa final de formación de los filones hidrotermales de baja temperatura, asociada a otros sulfuros y Mineralesde plata.
Asociado:	Asociada a proustita galena, polibasita.
Mineral:	QUERMESITA
Formula química:	Sb ₂ OS ₂
Densidad:	4,69
Paragénesis:	Aparece como Mineral: secundario a partir de la alteración de la estibina, en yacimientos de Mineralesde antimonio.
Clase:	Sulfuros
Dureza:	1 - 1,5
Clase de Simetría:	2.FD.05
Sistema Cristalino:	Triclínico, pinacoidal
Lustre:	Adamantino Frecuencia: Escasa
Prop. Magnéticas:	no magnético Raya: Roja-marrón
Exfoliación:	Perfecta
Color:	Rojo, rojo-violeta, rojo cereza
Radioactividad:	No radiactivo Fluorescencia No fluorescente
Tenacidad:	Sectil, flexibles los cristales delgados
Transparencia:	Translúcido a opaco
Observaciones:	Muy frágil, soluble en HNO ₃ .
Aplicaciones:	Como un cosmético, para pintar con una línea roja el contorno de los ojos. Raras veces como mena de antimonio, coleccionismo.
Habito:	Prismático, muy alargados o en grupos radiados
Origen:	Hidrotermal, Secundaria a partir de la alteración de la Estibina

Asociado A: Estibina, antimonio nativo, senarmontita, valentinita, cervantita o estibiconita.

Mineral: ROUTHIERITA

Formula química: $\text{Tl}(\text{Cu},\text{Ag})(\text{Hg},\text{Zn})_2(\text{As},\text{Sb})_2\text{S}_6$

Densidad: 5.83

Paragénesis: yacimientos hidrotermales

Clase: Sulfuros

Dureza: 3.5

Clase de Simetría: Ditetragonal dipiramidal

Sistema Cristalino: Tetragonal

Grupo Espacial: $I4\ 2m$ $a = 9.9821\text{\AA}$, $c = 11.3122(12)\text{\AA}$ $c/a = 1.133$

Lustre: Metálico

Frecuencia: Rara

Prop. Magnéticas: No magnético

Raya: No presenta

Exfoliación: Dos perpendiculares

Color: Violeta-rojo

Radioactividad: No radioactivo

Transparencia: Opaco

Prop. Eléctricas: No presenta

Tenacidad: Débil

Observaciones: Pleocroísmo débil, blanco azulado con fuertes reflejos internos

Habito: En granos anhédricos sin caras.

Origen: Yacimientos hidrotermales ricos en talio alojados en sedimentos dolomía de un complejo epitérmico. Isoestructural con el Mineral: stalderita ($\text{TlCu}(\text{Zn},\text{Fe},\text{Hg})_2\text{As}_2\text{S}_6$) rica en cinc, es su equivalente rico en mercurio.

Caracterización: Insoluble en ácido,

Asociado A:	Rejalgar, estibina, pierrotita, esfalerita, pirita, smithita, cinabrio, parapierrrotita, molibdenita o tetraedrita-tennantita.
Prins. Yacimientos:	Pelvoux, Hautes-Alpes, Francia
Mineral:	SARTORITA
Formula química:	PbAs_2S_4
Densidad:	5,08 - 5,13
Sistema Cristalino:	Monoclínico,
Grupo Espacial:	2/m, P21/n, $a=19.62 \text{ \AA}$, $b=7.89 \text{ \AA}$, $c=4.19 \text{ \AA}$, $\beta=90^\circ$, $Z=4$.
Clase de Simetría:	Prismática
Clase:	Sulfuros
Dureza:	3
Fractura:	Concoidea
Lustre:	Metálico
Color:	Gris, negro grisáceo
Prop. Magnéticas:	No presenta
Raya:	Marrón chocolate
Radioactividad:	No presenta
Fluorescencia:	No presenta
Transparencia:	Opaco
Observaciones:	Pleocroísmo débil, visible sólo en aceite, rojo
Paragénesis:	Yacimientos Hidrotermales
Aplicaciones:	Puede ser extraído en las minas como mena del metal de plomo.
Habito:	Cristales prismáticos muy estriados de hasta 10 cm, con terminación redondeada; común la agrupación paralela
Origen:	Aparece en yacimientos hidrotermales de roca dolomita, siendo la sulfosal más común en el yacimiento donde se descubrió.
Caracterización:	Compacto y en cristales prismáticos. Color: gris acero, Raya: castaña, brillo metálico. Clivaje {100} bueno, Fractura: concoidal. Muy frágil. $D=3$. $Pe=5,05$.

Asociado A:	Tennantita, pirita, dufrénoysita, rathita o rejalgar.
Clivaje:	{100}
Prins. Yacimientos:	Canadá, Bolivia, Italia, Azerbaiyán, Suiza,
Mineral:	SULVANITA
Formula química:	Cu_3VS_4
Densidad:	3,86 – 4
Clase:	Sulfuros
Dureza:	3.5
Clase de Simetría:	hextetraédrico
Sistema Cristalino:	Isométrico
Grupo Espacial:	$A = 90^\circ B = 90^\circ \gamma = 90^\circ P43m$ $a = 5.39\text{\AA}$ $V 156.59 \text{\AA}^3$
Color:	Gris acero, bronce, en sección fina es amarillo dorado
Lustre:	Metálico
Frecuencia:	Rara
Prop. Magnéticas:	No presenta
Raya:	Negra
Radioactividad:	No presenta
Fluorescencia:	Ausente
Prop. Eléctricas:	No presenta
Transparencia:	Opaco
Observaciones:	Soluble en HNO_3
Habito:	Cristales cúbicos en costras, normalmente indistinguibles
Paragénesis:	Yacimientos Hidrotermales
Origen:	Aparece en yacimientos hidrotermales de Minerales del cobre conteniendo vanadio, formado como un sulfuro primario.
Caracterización:	Es uno de los pocos sulfuros de vanadio que existen en la naturaleza, donde aparece en forma de cristales de Color: amarillo bronce, brillo metálico y Simetría: cúbica, que constituyen agregados masivos o granulares.

Impurezas:	Arsénico, cinc y mayor cantidad de cobre.
Asociado A:	Calcopirita, calcocita, digenita, covellina, crisocola, malaquita, azurita, atacamita, vesignieíta, mottramita, yeso, yushkinita, esfalerita cádmica o fluorita.
Prins. Yacimientos:	Australia, Norteamérica, Europa, China
Mineral:	VILLAMANINITA
Formula química:	$(\text{Cu}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Fe})\text{S}_2$
Densidad:	4,52
Clase:	Sulfuros.
Sistema Cristalino:	Cúbico.
Clase de Simetría:	Cubica.
Dureza:	4.5.
Raya:	Negro.
Fractura:	Irregular.
Lustre:	Metálico.
Frecuencia:	Raros.
Exfoliación:	Perfecta (001).
Color:	Negro Hierro.
Radioactividad:	No presenta.
Fluorescencia:	Ausente.
Tenacidad:	Frágil.
Transparencia:	Opaco.
Paragénesis:	Yacimientos de Cobre.
Observaciones:	La villamaninita aparece en este yacimiento en dos hábitos típicos o bien como cristales, toscos en general, cúbicos, cuboctaédricos u octaédricos, normalmente de menos de 1 mm, o bien como nódulo fibrosorradiados de hasta 1 cm.
Aplicaciones:	Coleccionismo.
Habito:	Cristales cúbicos o nódulos.
Origen:	Hidrotermal.

Caracterización:	Cristales, toscos en general, cúbicos, cuboctaédricos u octaédricos, normalmente de menos de 1 mm, o bien como nódulos fibrosorradiados de hasta 1 cm.
Impurezas:	Selenio.
Asociado:	Bravoita, linneita, bornita, tetraedrita y pirita.
Prins. Yacimientos:	Mina Providencia, distrito minero de Cármenes-Villamanín (León).
Mineral:	Melanterita
Formula química:	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Densidad:	1,9
Paragénesis:	Resultado de la oxidación de sulfuros de hierro, precipitación meteórica.
Clase:	Sulfuro
Dureza:	2
Clase de Simetría:	Piramidal
Sistema Cristalino:	Monoclínico
Grupo Espacial:	$P2_1/b$; $a = 14.077\text{\AA}$, $b = 6.509\text{\AA}$, $c = 11.054\text{\AA}$; $\beta = 105.6^\circ$; $abc = 2.163 \times 10^{-24}\text{\AA}^3$
Fractura:	Concoidea
Lustre:	Vítreo Frecuencia:
Prop. Magnéticas:	No magnético
Raya:	Blanca
Exfoliación:	Perfecta
Color:	Blanca, verde pálido y amarillo
Tenacidad:	Frágil
Transparencia:	Transparente a traslúcido y opaca
Observaciones:	Soluble En agua, es conveniente protegerlo de la humedad
Aplicaciones:	Antiguamente para tinteros. Mineral: de interés coleccionista.
Habito:	Cristales > 3mm, prismas cortos, tabular gruesa, octaédrica, estalactítica, costras
Origen:	Es un mineral secundario resultado de la oxidación de sulfuros de hierro, formándose en yacimientos por precipitación meteórica en disoluciones que

empapan rocas ricas en sulfuros de hierro, especialmente en presencia de pizarras aluminicas y carbón. Es inestable en condiciones atmosféricas normales.

Caracterización: Es un mineral que presenta distintas variedades en su coloración, como consecuencia de la sustitución parcial del hierro (Fe) por cobre (Cu), de forma que sus tonalidades varían entre el blanco verdoso (para las variedades más ricas en Fe) y el azul (para las variedades más ricas en Cu).

Asociado: Pirrotina, pirita, farmacolita.

Mineral: **NIQUELITA**

Fórmula química: NiAs

Densidad: 7.8

Paragénesis: Hidrotermal, zonas de metamorfismo.

Clase: Sulfuros.

Dureza: 5 – 5.5.

Clase: de Simetría: Hexagonal ($6 / m 2 / m 2 / m$).

Sistema Cristalino: Hexagonal.

Grupo Espacial: C6/mmc; $a = 3.61 \text{ \AA}$, $c = 5.02 \text{ \AA}$, $\alpha = 120^\circ$; $Z = 2$

Fractura: Irregular, desigual.

Lustre: Metálico.

Tenacidad: Quebradiza.

Prop. Magnéticas: No presenta propiedades magnéticas.

Raya: Parda negruzca.

Exfoliación: {1010} Imperfecta, {0001} Imperfecta.

Color: Rojos, pardos o negros.

Radioactividad: No radiactivo.

Fluorescencia: No fluorescente.

Transparencia: Raramente.

Observaciones: Este mineral cristaliza en el sistema hexagonal.

Aplicaciones: Mena secundaria de níquel.

Hábito:	Columnar masivo a reniforme, rara vez en forma de cristales terminados {1011} con aspecto distorsionado, horizontal estriado.
Origen:	Modificación hidrotermal de rocas ultramáficas y depósitos de
Caracterización:	Este mineral suele tener colores rojos, pardos o negruzcos, columnar masivo a reniforme, tiene un alto valor de densidad y una característica muy peculiar es que al ser calentado este mineral desprende un olor a ajo.
Impurezas:	Suelen tener pequeñas cantidades de azufre, hierro y cobalto.
Asociado:	Los minerales asociados incluyen arsenopirita, barita, plata, cobaltita, pirrotita, pentlandita, calcopirita, breithauptita y maucherita.
Clivaje:	{1010} Imperfecta, {0001} Imperfecta.
Prins. yacimientos:	Se pueden encontrar en los alrededores de Sudbury y Cobalt, Ontario. Otras localizaciones incluyen el flanco oriental del domo Widgiemooltha, Australia Occidental

TAREAS

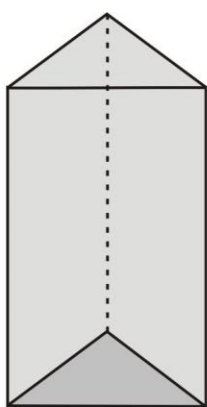
1: en el siguiente cuadro clasifique aquellas sustancias, que de acuerdo a la definición propuesta en este práctico, pueden ser llamadas mineral y cristal respectivamente.

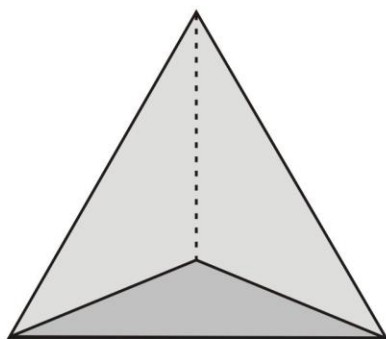
Sustancia	Mineral	Cristal
hielo oro mercurio ópalo diamante cuarzo diamante sintético ámbar		

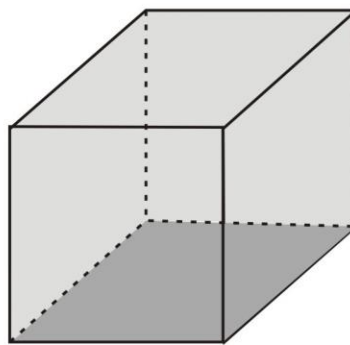
2: indicar brevemente cuales son los campos de aplicación de cada una de las subdivisiones de la mineralogía.

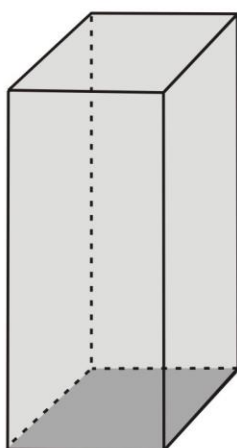
Subdivisiones	Aplicación
Cristalografía morfológica	
Cristaloquímica	
Óptica mineral	
Mineralogía determinativa	
Cristalografía estructural	
Física mineral	
Mineralogía sistemática	
Paragénesis mineral	
Mineralogía industrial	

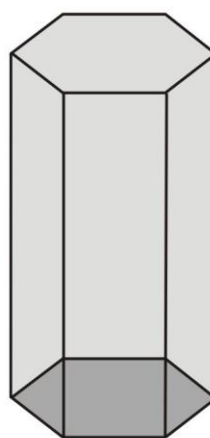
Ejercicio 1: sobre cada figura, reconocer elementos geométricos (caras, aristas y vértices) y aplicar la regla de Euler-Descartes.











Ejercicio 2: sobre cada letra, indique, utilizando regla y colores, donde hay planos de simetría, ejes de simetría o centros de simetría. Se debe tener en cuenta que sobre cada figura puede existir más de un elemento de simetría o ninguno, sobre la línea debajo de cada figura debe colocar la combinación de elementos de simetría (ej. 1 $\bullet$ + 2m + i). más correcta de acuerdo a las reglas de simetría estudiadas

A B C D E

F G H I J

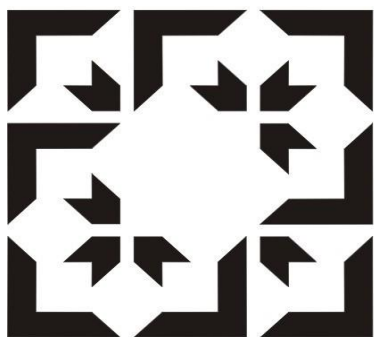
K L M N O

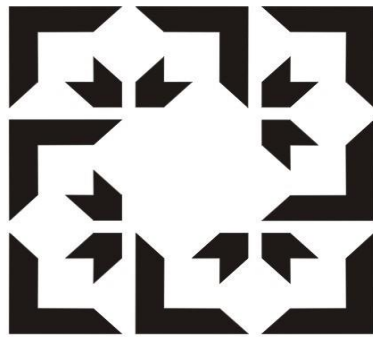
P Q R S T

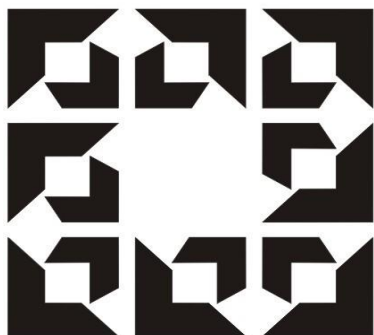
U V W X Y

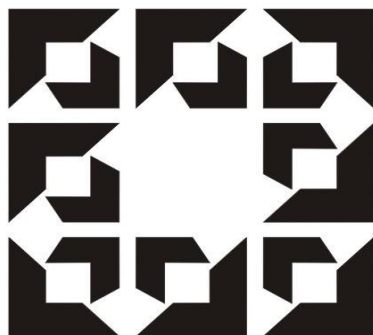
Ejercicio 3: localizar todos los elementos de simetría presentes, utilizando colores diferentes para cada uno y la nomenclatura correspondiente. Sobre la línea debajo de cada figura, escribir la combinación más correcta de acuerdo a las reglas de

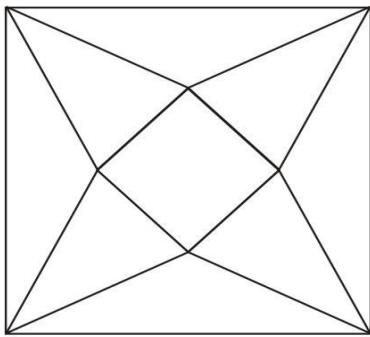
Simetría (ej. 1 $+2m + i$).

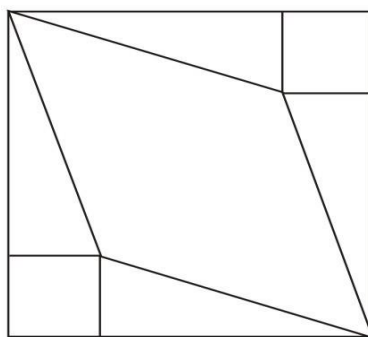












1: teniendo en cuenta la característica de la cruz axial de cada sistema cristalino, expresar las relaciones axiales para los siguientes minerales.

Mineral	Sistema cristalino	Cruz axial		Relación axial
		Condición de los ejes	Condición de los ángulos	
Microclino				
Albita				
Cianita				
Oro				
Espodumeno				
Yeso				
Talco				
Muscovita				
Galena				
Topacio				
Pirita				
calcopirita				
Corindón				
Calcita				
Halita				
Cuarzo				
Berilo				
Diamante				
Fluorita				

2: sobre un cristal se ha determinado que: $[a_1] = [a_2] = [a_3] = 8,01 \text{ \AA}$ y $[c] = 8,97 \text{ \AA}$ y que posee una trigira + i, indicar cuál de las opciones es correcta, ☐ justificando su elección:

☐ el cristal es hexagonal.

☐ el cristal es trigonal y tiene una trigiroides de giro inversión.

☐ el cristal tiene además, un **m** perpendicular a la trigira.

☐ necesariamente el cristal tiene además tres digiras sobre el plano perpendicular a la trigira.

☐ el cristal es hexagonal y tiene una hexagiroides de giro inversión. ☐ ninguna de las anteriores opciones es correcta.

3: indicar con una cruz cuál/es afirmaciones son correctas, realice una breve justificación a su elección:

☐ es posible la existencia de 5 digiras coplanares.

6: mencione cuantas son las clases de simetría que presentan centro de simetría, escriba el nombre de cada una y su notación (H-M).

Nombre	Notación

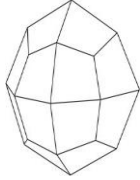
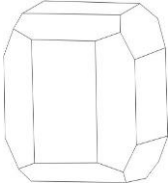
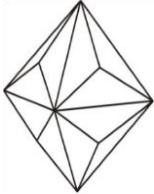
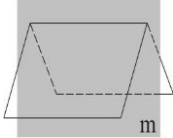
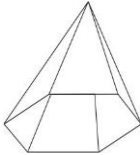
Coeficientes de Weiss e índices de Miller. Formas cristalográficas.

1: pasar los siguientes coeficientes de Weiss a índices de Miller - Bravais, según corresponda.

Coeficiente de Weiss	Cálculo de recíprocos	Índice de Miller - Bravais
$(\infty, \infty, 1)$		
$(2, \infty, 1)$		
$(\infty, 3, 2)$		
$(4, 1, 3)$		
$(-2, 2, -3)$		
$(4, \infty, 2)$		
$(3, 2, 1)$		
$(\infty, \infty, -2)$		
$(1, \infty, -1, \infty)$		
$(1, -2, 1)$		

(2,1,3)		
(5, ∞ , 2)		
(2,2,-1,1)		
(2, ∞ , 2)		
(3,1,2)		

2: identificar las formas presentes.

Modelo	Nombre de la/s forma/s	Forma abierta o cerrada	Sistema cristalino y grupo puntual
			
			
			
			
			
			
			

3: en un cristal de topacio, $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$, se han identificado las siguientes formas: $\{hkl\}$, $\{hk0\}$, $\{100\}$ y $\{010\}$. Proyectar estereográficamente el cristal, teniendo en cuenta los siguientes valores angulares: $(100)^\wedge(hkl) = 54^\circ$, $(010)^\wedge(hkl) = 48^\circ$ y $(100)^\wedge(hk0) = 36^\circ$. Se pide consignar además:

- el nombre completo de las formas presentes,
- los valores angulares $(hk0)^\wedge(010)$, $(hkl)^\wedge(hkl)$ y $(hkl)^\wedge(hkl)$.
- la notación de todas las caras que estén en zona con el eje $[c]$,
- la notación de todas las caras que sean equivalentes con $(hk0)$.

4: indicar el nombre completo de la forma a la que pertenece una cara cristalina de notación si el mineral es:

- a. una especie del grupo de las turmalinas _____ ,
b. calcita _____ ,
c. berilo _____ ,
d. benitoíta _____ ,
e. fluorapatita _____ .

Reconocimiento de formas cristalográficas en modelos.

1: de cada modelo cristalográfico asignado durante la clase, se deben determinar las formas cristalográficas presentes y asignarles la notación correspondiente. Para tal fin se puede usar el siguiente cuadro como modelo.

[illegible]

Proyecciones cristalográficas de cristales simples.

PROYECCION DE CRISTALES -procedimiento práctico-

En el proceso de proyección de cristales -o modelos cristalográficos- a partir de la medida de sus ángulos interfaciales con goniómetro de contacto, resulta útil seguir la siguiente metodología:

- 1.** Determinar todos sus elementos geométricos.
- 2.** Determinar todos los elementos de simetría.
- 3.** Reconocer la clase de simetría y el sistema cristalográfico en función de la simetría existente.
- 4.** Orientar el cristal en la red de Wulff.
- 5.** Efectuar la proyección de los elementos de simetría.
- 6.** Determinar la cantidad de formas presentes
- 7.** Delimitar sobre la red de Wulff los dominios correspondientes al sistema que pertenece el cristal, sobre la base lograda marcar los polos de las caras que caigan sobre el dominio fundamental teniendo en cuenta que:
 - a.** Primero se deben marcar -si los hubiera-, en forma directa, los polos de las caras que no tienen grados de libertad sobre los vértices del triángulo esférico -polos 5, 6 y/o 7-.
 - b.** Luego se marcan los polos con grados de libertad -si los hubiera- en función de las medidas de los ángulos interfaciales respecto a las caras proyectadas anteriormente.
- 8.** Multiplicar los polos marcados en el punto anterior por medio de las operaciones vinculadas a los elementos de simetría presentes.
- 9.** Señalar el nombre y notación de todas las formas presentes en el cristal. Debe controlarse que estén todas las señaladas en el punto 7, además debe revisarse que todas las caras del cristal hayan sido proyectadas.

En la siguiente página se plantea la resolución de un ejercicio siguiendo los pasos precedentes.

Proyección estereográfica de cristales

Ej. MODELO Nº 66

1. Elementos geométricos

$C = 12$, $A = 20$, $V = 10$; $C+V = A+2$, $22 = 22$

2. Elementos de simetría

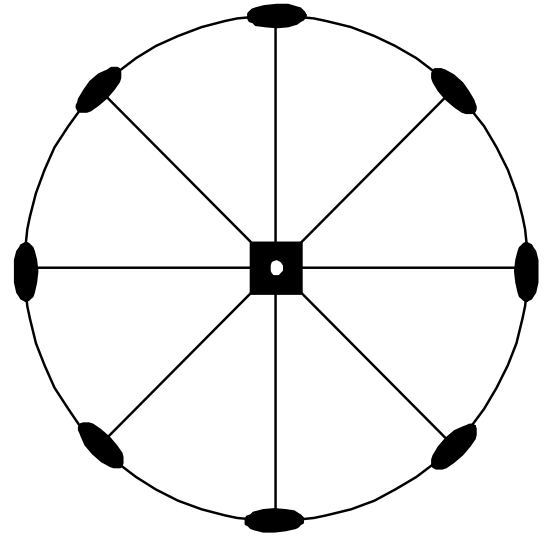
1 $\square + 4C + 5m + i$

3. Sistema cristalográfico y clase de simetría

Sistema TETRAGONAL

Clase DITETRAGONAL BIPIRAMIDAL

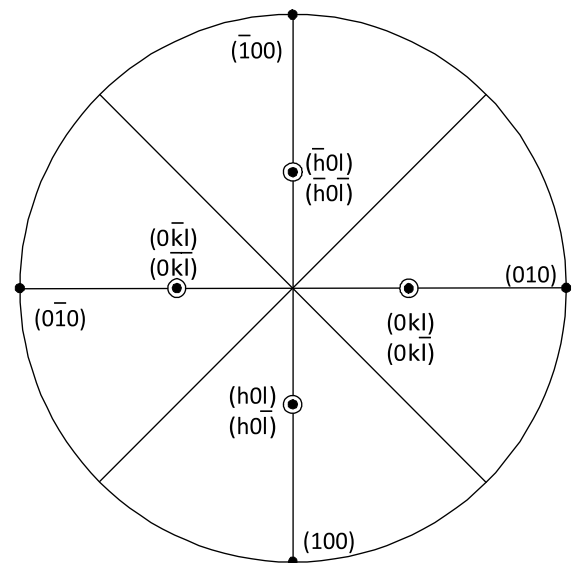
$4/m \ 2/m \ 2/m$ ó $4/mmm$ -Ho-



4. Formas cristalográficas presentes $P_3 = \{h0l\}$

Bipirámide tetragonal de 2º p.

$P_5 = \{100\}$ Prisma tetragonal de 2º p.



5. Ejemplos minerales

Reconocimiento de las propiedades físicas de los minerales.

Ficha propuesta para la elaboración de cada práctico:

- a.** Nombre:
- b.** Composición química:
- c.** Sistema de cristalización:
- d.** Grupo puntual:
- e.** Clasificación sistemática:
- f.** Forma:
- g.** Hábito:
- h.** Dureza (H):
- i.** Peso específico (G):
- j.** Brillo:
- k.** Color:
- l.** Raya:
- m.** Diafanidad:
- n.** Clivaje:
- o.** Partición:
- p.** Fractura:
- q.** Propiedades diagnósticas:
- r.** Yacimientos -tipos de yacimientos y ejemplos mexicanos y de Sonora:
- s.** Usos:
- t.** Otros -cualquier otra característica que considere de interés, tales como etimología, especies con las cuales se puede confundir, reconocimiento químico, luminiscencia, propiedades radiactivas, eléctricas y magnéticas etc.-:

Reconocimiento de las propiedades físicas de los minerales.

Ejercicio 1: ubicar a los siguientes minerales según su simetría: forsterita, almandino, circón, sillimanita, cianita, andalusita, topacio, estaurolita, titanita, dumortierita, epidoto, allanita, cordierita, schorl, berilo, enstatita, espodumeno, rubelita, esmeralda, tremolita, wollastonita, dravita, diopsido, glaucofano, riebeckita y rodonita:

triclínico	monoclínico	rómbico	tetragonal	trigonal	hexagonal	cúbico	amorfo

2: indicar con una cruz cuál/les de las siguientes afirmaciones son íntegramente correctas.

- ☐ cianita, topacio, estaurolita y epidoto son especies minerales idiocromáticas.
- ☐ las especies minerales que pertenecen al grupo del granate, presentan clivaje MB o P en 4 direcciones.
- ☐ los polimorfos de aluminio son: cianita, sillimanita y andalusita.
- ☐ sillimanita y andalucita pertenecen al mismo grupo puntual y espacial.
- ☐ los granates cálcicos pertenecen a la serie de la piralspita.
- ☐ en la fórmula general de los minerales del grupo del granate, la posición B es ocupada por Al, Cr³⁺, Fe³⁺, Mn³⁺, Si, Ti, V³⁺ y Zr.
- ☐ uvarovita, se clasifica como granate crómico.
- ☐ forsterita-fayalita, son especies minerales que pertenecen al grupo del olivino.
- ☐ berilo, espodumeno y rodonita son especies minerales alocromáticas.
- ☐ aguamarina, esmeralda y heliodoro son variedades de berilo.
- ☐ espodumeno y berilo son especies minerales que se caracterizan por su clivaje perfecto.

___ los piroxenoides wollastonita y rodonita, son monoclinicos. ___
cordierita es un inosilicato de Mg y Al.

3: para cada uno de los siguientes nesosilicatos, sorosilicatos, ciclosilicatos e inosilicatos,
especifique su nombre y simetría:

$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$ _____, _____
 CaTiSiO_5 _____, _____
 $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Al})\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$ _____, _____
 Mg_2SiO_4 _____, _____
 ZrSiO_4 _____, _____
 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ _____, _____
 $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ _____, _____
 $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$ _____, _____
 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ _____, _____
 CaSiO_3 _____, _____
 $(\text{Mn},\text{Fe},\text{Mg},\text{Ca})\text{SiO}_3$ _____, _____

4: indique cuál/es constituyen propiedades diagnósticas para el reconocimiento mesoscópico
de los siguientes minerales:

sillimanita

estauroлита

circón

epidoto

topacio

allanita

berilo

schorl

espodumeno

cordierita

rodonita

Reconocimiento de las propiedades físicas de los minerales.

1: ubicar a los siguientes minerales según su simetría: forsterita, almandino, circón, sillimanita, cianita, andalusita, topacio, estauroлита, titanita, dumortierita, epidoto, allanita, cordierita, schorl, berilo, enstatita, espodumeno, rubelita, esmeralda, tremolita, wollastonita, dravita, diopsido, glaucofano, riebeckita, rodonita, muscovita, biotita, microclino, ortoclasa, leucita, sanidina, albita, nefelina, labradorita, caolinita y talco:

triclínico	monoclínico	rómbico	tetragonal	trigonal	hexagonal	cúbico	amorfo

2: Clasificación sistemática de Strunz, silicatos (completar).

Disposición de los tetraedros $[\text{SiO}_4]_4$ - estructural unidad ____ relación Si:O

NESOSILICATOS		
SOROSILICATOS		
CICLOSILICATOS		
INOSILICATOS		
FILOSILICATOS		
TECTOSILICATOS		

3: indicar con una cruz cuál/les de las siguientes afirmaciones son íntegramente correctas.

___cianita, topacio, estaurolita y epidoto son especies minerales idiocromáticas.

___las especies minerales que pertenecen al grupo del granate, presentan clivaje MB o P en 4 direcciones.

___los polimorfos de aluminio son: cianita, sillimanita y andalusita.

___sillimanita y andalucita pertenecen al mismo grupo puntual y espacial.

___los granates cálcicos pertenecen a la serie de la piralspita.

___en la fórmula general de los minerales del grupo del granate, la posición B es ocupada por Al, Cr³⁺, Fe³⁺, Mn³⁺, Si, Ti, V³⁺ y Zr.

___uvarovita, se clasifica como granate crómico.

___forsterita-fayalita, son especies minerales que pertenecen al grupo del olivino.

___berilo, espodumeno y rodonita son especies minerales alocromáticas.

___aguamarina, esmeralda y heliodoro son variedades de berilo.

___espodumeno y berilo son especies minerales que se caracterizan por su clivaje perfecto.

___los piroxenoides wollastonita y rodonita, son monoclinicos.

___cordierita es un inosilicato de Mg y Al.

___microclino y ortoclasa son especies minerales que cristalizan en el sistema monoclinico.

___muscovita, clorita, lepidolita y biotita forman parte del grupo de las micas.

___clevelandita es una especie de la serie de las plagioclasa.

___lepidolita es un filosilicato de Li.

___ las plagioclasas se clasifican según el % mol de Ab.

4: para cada uno de los siguientes nesosilicatos, sorosilicatos, ciclosilicatos, inosilicatos, filosilicatos y tectosilicatos, especifique su nombre y simetría:

$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$ _____, _____

CaTiSiO_5 _____, _____

$\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Al})\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$ _____, _____

Mg_2SiO_4 _____, _____

ZrSiO_4 _____, _____

$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ _____, _____

$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ _____, _____

$(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$ _____, _____

$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ _____, _____

CaSiO_3 _____, _____

$(\text{Mn},\text{Fe},\text{Mg},\text{Ca})\text{SiO}_3$ _____, _____

KAlSi_2O_6 _____, _____

$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ _____, _____

$(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$ _____, _____

$(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ _____, _____

$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ _____, _____

5: indique cuales de los minerales del ejercicio anterior forma una serie, mencione la especie con la que forma serie y de su respectiva composición.

6: indique cuál/es constituyen propiedades diagnósticas para el reconocimiento mesoscópico de las siguientes especies minerales:

sillimanita

estauroлита

циркон

эпидот

топаз

алланит

берил

шорл

эсподумено

кордьерит

родонит

клевеландит

muscovita

microclino

Lepidolita

Talco

labradorita

Z: indique el uso principal que presenta cada una de las especies minerales que se presenta en el siguiente listado:

- a. microclino _____
- b. almandino _____
- c. Gr. epidoto _____
- d. Gr. anfíboles _____
- e. muscovita _____
- f. sillimanita _____
- g. berilo _____
- h. cordierita _____
- i. Gr. de las turmalinas _____
- j. rodonita _____
- k. talco _____
- l. forsterita _____
- m. circón _____
- n. topacio _____
- o. espodumeno _____
- p. caolinita _____

8: indique la fórmula general completa para los siguientes grupos minerales:

Gr. de los anfíboles _____

Gr. de los piroxenos _____

Gr. del epidoto _____

Gr. de los feldespatos _____

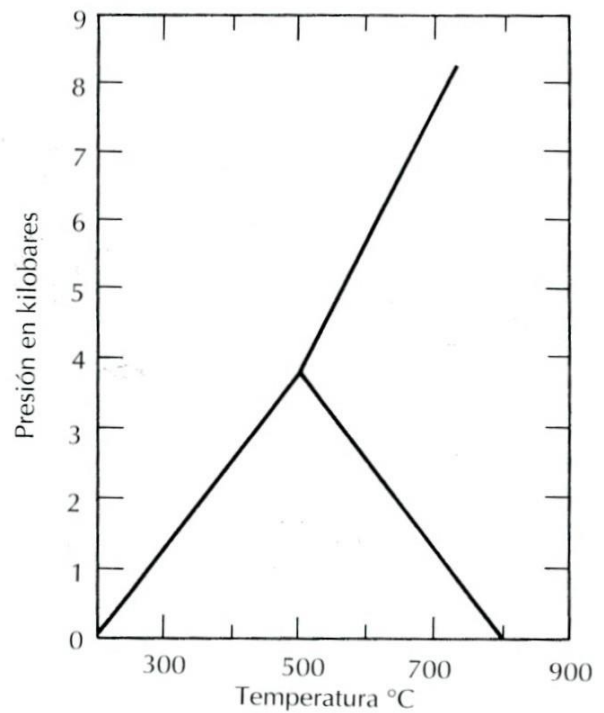
Gr. del granate _____

Gr. de las micas _____

Gr. del olivino _____

Gr. de las turmalinas _____

9: ubique en el siguiente cuadro de presión y temperatura a los polimorfos de aluminio, para cada uno agregar composición y sistema de cristalización.



10: para cada uno de los siguientes nesosilicatos, sorosilicatos, ciclosilicatos, inosilicatos, filosilicatos y tectosilicatos, especifique su yacencia, y de un ejemplo de depósitos en Argentina y San Luis (si tuviese ambos).

- a. almandino_____
- b. circón_____
- c. cianita_____
- d. epidoto_____
- e. berilo_____
- f. rubelita_____
- g. espodumeno_____
- h. horblenda_____
- i. talco_____
- j. wallastonita_____
- k. lepidolita_____
- l. microclino_____
- m. sanidina_____
- n. biotita_____

Reconocimiento de las propiedades físicas de los minerales (parte 3).

1: ubicar a los siguientes minerales según su simetría: cobre, bismuto, covelita, pirrotita, pirita, antimonio, plata, pirargirita, bornita, rejalgar, azufre, bismutinita, arsenopirita, oro, diamante, marcasita, cuprita, magnetita, hematina, rutilo, goethita, anatasa, carnotita, columbita, casiterita, crisoberilo, tyuyamunita, cromita y brookita :

triclínico	monoclínico	rómbico	tetragonal	trigonal	hexagonal	cúbico	amorfo

2: indicar con una cruz cuál/les de las siguientes afirmaciones son íntegramente correctas.

___ platino queda definido por su alto peso específico, su maleabilidad y su color acero.

___ azufre se reconoce por su clivaje perfecto y el hábito de sus cristales que lo diferencian del oropimente.

___ grafito presenta hábito hojoso, tacto graso y puede ser realizado de manera artificial a partir de antracita.

___ diamante y grafito son especies minerales polimorfas de C.

___ galena muestra un clivaje perfecto {110} que le permite diferenciarse de la esfalerita.

___ los principales minerales que se generan por oxidación de la galena son cerusita y anglesita.

___ molibdenita es un sulfuro que se distingue de grafito por su clivaje perfecto {0001}. Ab.

___ pirita presenta clivaje P {100} cúbico.

___ rutilo, anatasa y broquita son especies minerales polimorfas de TiO_2 .
___ hematita se reconoce por su raya verde oscura característica.

3: para cada uno de los siguientes elementos, sulfuros y óxidos, especifique su nombre y simetría:

Sb _____, _____

Pt _____, _____

S _____, _____

Cu_5FeS_4 _____, _____

CuS _____, _____

ZnS _____, _____

CuFeS_2 _____, _____

$\text{Fe}_{10}\text{S}_{11}$ _____, _____

PbS _____, _____

HgS _____, _____

MoS_2 _____, _____

FeAsS _____, _____

$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ _____, _____

Al_2O_3 _____, _____

UO_2 _____, _____

$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4) \cdot 5-8\text{H}_2\text{O}$ _____, _____

4: indique cuál/es constituyen propiedades diagnósticas para el reconocimiento mesoscópico de las siguientes especies minerales:

Oro

Plata

Grafito

Azufre

Diamante

Bornita

Esfalerita

Galena

Pirita

Calcopirita

Covellita

Molibdenita

Pirrotita

Cinabrio

Rejalgar

Magnetita

Corindón

Hematita

Cuarzo

Rutilo

Pirolusita

5: indique que propiedades utiliza para distinguir entre las siguientes especies minerales, especificando de forma completa (ej: color amarillo para azufre y rojo para cinabrio).

Oro de pirita:

Galena de esferita:

Platino de antimonio:

Pirita de calcopirita:

Bornita de covellita:

Diamante de cuarzo:

Hematita de limonita:

6: indique el uso principal que presenta cada una de las especies minerales que se presenta en el siguiente listado:

- q.** oro _____
- r.** plata _____
- s.** diamante _____
- t.** grafito _____
- u.** azufre _____
- v.** covellita _____
- w.** galena _____
- x.** esfalerita _____
- y.** calaverita _____
- z.** magnetita _____

7: indique la fórmula general completa para los siguientes grupos minerales:

Gr. de la calcopirita _____

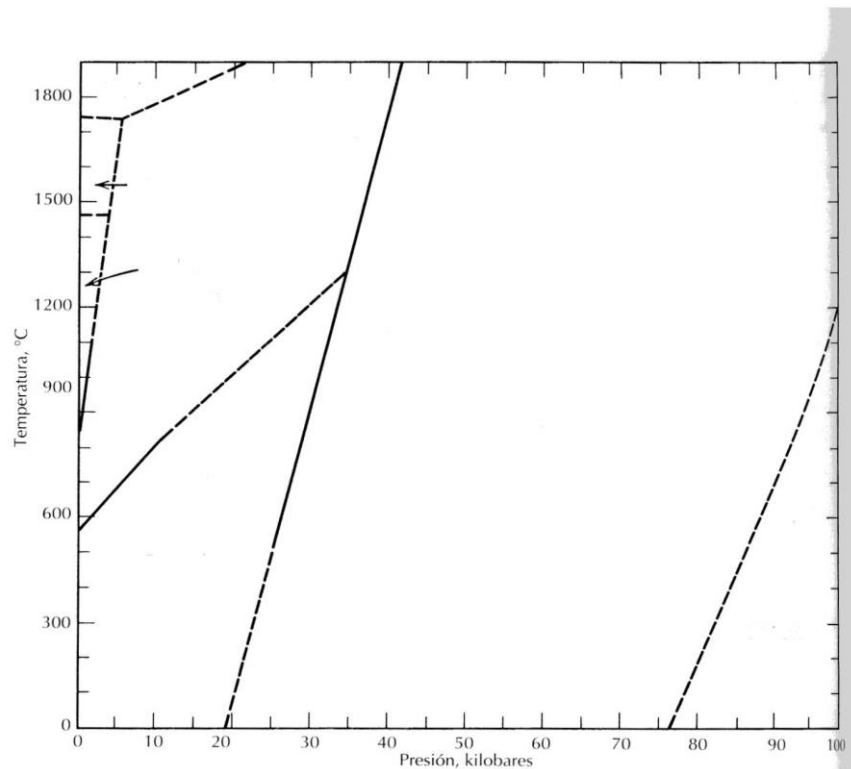
Gr. de la esfalerita _____

Gr. de la espinela _____

Gr. de la hematita _____

Gr. De la pirita _____

8: ubique en el siguiente cuadro de presión y temperatura a los polimorfos de SiO_2 , para cada uno agregar composición y sistema de cristalización.



9: para cada uno de los siguientes elementos, sulfuros y óxidos, especifique su yacimiento, y de un ejemplo de depósitos en México y Sonora (si tuviese ambos).

O. oro _____

p. cobre _____

q. plata _____

r. esfalerita _____

S. galena _____
t. bornita _____
U. cinabrio _____
V. rejalgar _____
W. oropimente _____
X. magnetita _____
y. cuarzo _____
Z. rutilo _____

Glosario

1. **Agregado:** Asociación de minerales de pequeñas dimensiones. Las rocas son agregados de cristales minerales

2. **Alocromático:** Mineral totalmente incoloro cuando es puro, pero puede adquirir diversas coloraciones, Más o menos intensas, a causa de la presencia en su interior de elementos químicos ajenos.
3. **Asterismo:** Fenómeno óptico que se manifiesta en la superficie de los minerales con la formación reflejos luminosos en forma de estrellas.
4. **Birrefringente:** Se dice de los cristales en el interior de los cuales un rayo de luz incidente es desdoblado en dos rayos refractados. Un buen ejemplo son los cristales transparentes e incoloros de calcita de la variedad espato de Islandia.
5. **Brillo:** Fenómeno óptico perceptible por el ojo humano debido a la reflexión y la refracción de la luz en la superficie de un mineral. El brillo se describe por su similitud con el brillo que producen ciertas sustancias, como el diamante (brillo adamantino), el vidrio (brillo vítreo), los metales (brillo metálico), etc. El brillo es sin duda, una de las características más empleadas en la descripción de los minerales.
6. **Clase cristalográfica:** Cada uno de los 32 grupos en que se pueden clasificar los cristales en base a la simetría morfológica que presentan.
7. **Clase mineralógica:** Cada uno de los grupos en que se puede clasificar los minerales de acuerdo con su composición química y su estructura cristalina. Se distinguen nueve clases principales, como la de los silicatos, sulfuros, etcétera.
8. **Cristal:** Cuerpo sólido, homogéneo, con forma geométrica delimitada por caras planas y por aristas. La formas consecuencia de la ordenación interna de la materia mineral.
9. **Densidad:** relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Se expresa en gramos por centímetro cubico. El valor numérico de la densidad es igual al del peso específico. El zafiro, por ejemplo, tiene densidad 4.
10. **Ductilidad:** Propiedad de un material de dejarse estirar en hilos finos. Entre las sustancias más dúctiles se encuentran los metales, especialmente el platino, el oro y la plata.
11. **Dureza:** Mayor o menor resistencia que presenta la superficie sin alterar de un mineral a ser rayada se mide con la escala ideada hace 150 años por el alemán F. Mohs (1773-1839) que comprende diez grados de dureza, desde el 1 o mineral más blando, como el talco, al 10, o el mineral más duro, como el diamante.
12. **Especie mineralógica:** Unidad fundamental de la clasificación de los minerales. Constituye especies un mineral de composición química y de estructura cristalina definida y diferente de la de las restantes especies.
13. **Estructura cristalina:** Disposición regular de los átomos, de los iones o de las moléculas en el interior del retículo cristalino.
14. **Familia:** Sinónimo de grupo. Pertenecen a una familia los minerales de la misma clase mineralógica que presentan características físicas y estructurales muy similares.

15. **Exfoliación:** Rotura de un mineral según superficies cristalográficas concretas debido a un golpe o a una presión. Ciertos minerales se exfolian en una sola dirección, mientras que otros presentan dos o más direcciones de exfoliación.
16. **Fluorescencia:** Fenómeno de luminiscencia, de emisión de luz visible por una sustancia sobre la que inciden radiaciones de longitud de onda inferior (ejemplos: rayos Ultravioleta)
17. **Forma cristalográfica:** Figura geométrica a la cual se puede referir un cristal. Se trata de un sólido cuyas caras equivalentes están relacionadas por determinados elementos de simetría. Son formas cristalográficas el cubo, el octaedro, el romboedro y otros.
18. **Fosforescencia:** Fenómeno similar a la fluorescencia caracterizado por la persistencia de la emisión de la luz cuando cesa la radiación estimulante.
19. **Fractura:** Aspecto que presenta la superficie resultante tras romperse un mineral. La fractura puede ser concoidal (superficies curvas), astillosa, fibrosa, etcétera.
20. **Fuego:** Emisión de juegos de luz de diversos colores por la superficie de una gema. Es una consecuencia de la dispersión de la luz.
21. **Geoda:** Cavidad que se produce en el interior de una roca tapizada por cristales bien conformados que se desarrollan hacia adentro.
22. **Habito:** Aspecto externo de un cristal, determinado por el predominio de cierta forma cristalográfica sobre otras. Por ejemplo, un cubo con los vértices truncados por pequeñas caras de octaedro determina un habito cubico.
23. **Idiocromático:** Es aquel mineral que en casi todos los casos presenta la misma coloración independientemente de las impurezas que este pueda llegar a contener
24. **Inclusión:** Sustancia que ha quedado englobada en el interior de un mineral durante el crecimiento de sus cristales las inclusiones más frecuentes suelen ser sólidas, pero también pueden ser líquidas y gaseosas.
25. **Isomorfismo:** Proceso debido al cual en la naturaleza se encuentran cristales mixtos con composición química intermedia entre dos extremos puros. El olivino de hierro es isomorfo con el olivino de magnesio.
26. **Macla:** Agrupación de dos o más cristales de una misma especie mineralógica que han crecido juntos según unas leyes cristalográficas. En las maclas de contacto los cristales que las forman están en contacto mediante superficies planas, mientras que en las maclas de compenetración unos cristales penetran en el interior de los otros siguiendo una determinada dirección.
27. **Mineral:** Compuesto Natural inorgánico y homogéneo con propiedades físicas y químicas definidas y constantes, y con estructura interna cristalina.
28. **Monocristal:** Se trata de un cristal de unas dimensiones específicas y que pertenece a una especie mineral que puede presentarse también en forma de agregado microcristales. El cristal

de roca y la amatista, por citar un ejemplo, son cuarzos del tipo monocristalino, mientras que la calcedonia es un cuarzo microcristalino.

29. **Monorrefringente:** Se dice de los cristales en los que un rayo de luz incidente origina un solo rayo refractado.
30. **Nativo:** Se dice del elemento químico que en su estado natural se encuentra puro, es decir, sin combinarse con otros con otros elementos.
31. **Ojo de gato:** Fenómeno óptico que presentan algunas gemas sobre la superficie de las cuales se observa una banda de luz reflejada y difusa que recuerda el corte vertical de la pupila de un gato.
32. **Pegmatita:** Roca magmática intrusiva filoniana, que se presenta en filones de dimensiones diversas, formada por grandes cristales de cuarzo y de feldespato.
33. **Peso específico relativo:** Peso de una sustancia en relación al peso de un volumen idéntico de agua coincide con la densidad.
34. **Piezoelectricidad:** Fenómeno físico de generación de cargas eléctricas sobre la superficie de un mineral comprimido
35. **Pleocroísmo:** Variación del color de un cristal al cambiar la dirección de observación.
36. **Polimorfismo:** Fenómeno por el cual minerales de igual composición química cristalizan en formas diferentes. Por ejemplo el rutilo, la anatasa y la brookita son, los tres, óxidos de titanio, pero cristalizan en formas distintas.
37. **Pseudomorfosis:** Fenómeno de sustitución de un mineral por otro que hereda la forma del primero.
38. **Quilate:** Unidad de medida de peso que se utiliza para las piedras preciosas o gemas equivalente a 200 miligramos (0,2 gramos = 1 cts.). También se utilizaba este término para medir la ley o pureza del oro de las aleaciones. Actualmente la ley del oro se expresa en milésimas. La pureza mínima que se requiere para el oro utilizado en joyería es de 750/1000 equivale a 18 quilates.
39. **Raya (o color del polvo):** Color propio de un mineral obtenido al frotar el mismo sobre una lámina de porcelana sin vidriar. La raya es una de las características más útiles en la determinación macroscópica de los minerales.
40. **Retículo cristalino:** Estructura de los sólidos caracterizada por la disposición ordenada y regular de sus átomos a lo largo de las tres direcciones del espacio.
41. **Roca:** Agregado de minerales iguales o diferentes (el mármol o el granito) que constituyen masa geológicas de notable extensión.
42. **Roca sedimentaria:** Roca exógena (se origina en la superficie terrestre) que se presenta en estratos y que con frecuencia contiene fósiles. La mayor parte de las rocas sedimentarias se originan a partir de los productos resultantes de la meteorización de otras rocas. Ejemplos de rocas sedimentarias son las calizas, las areniscas y los conglomerados.

43. **Roca ígnea o magmática:** Rocas que se origina por enfriamiento y solidificación de un magma. Se distinguen las rocas intrusivas, originadas a partir de magmas que se enfrían de forma lenta en el interior de la corteza terrestre (incluye las rocas plutónicas, como los granitos y las filonianas, como las pegmatitas) y las rocas efusivas o volcánicas que se originan por la rápida solidificación de los magmas en la superficie terrestre (por ejemplo, los basaltos)
44. **Roca metamórfica:** Roca que se origina a partir de otras pre-existentes cuando estén sometidas a elevadas presiones y temperaturas, pero sin llegar a la fusión. Durante los procesos metamórficos se producen cambios fisicoquímicos en los minerales y la formación de nuevas especies mineralógicas. Entre las rocas metamórficas merecen ser citadas los mármoles y los esquistos.
45. **Seda:** Reflejo sedoso que presenta algunas gemas debido a la presencia de inclusiones desordenadas en forma de aguja.
46. **Serie:** Pertenece a una serie de los minerales con la misma estructura cristalina y que son isomorfos entre ellos (serie del olivino, de los granates de aluminio, etcétera).
47. **Simetría:** Conjunto de relaciones geométricas observables entre las orientaciones en el espacio de las caras, las aristas y los vértices de un cristal en base a la simetría se distinguen 32 clases, que se agrupan en 7 sistemas cristalinos.
48. **Sistema cristalino:** Cada uno de los 7 grupos que se pueden obtener asociando las 32 clases cristalinas. Las clases que pertenecen a cada sistema tienen en común un eje de simetría del mismo orden, que será la característica de simetría del sistema. Existen 7 sistemas cristalinos: Cúbico, tetragonal, hexagonal, trigonal, rómbico, monoclinico y triclínico.
49. **Termoluminiscencia:** Fenómeno óptico que consiste en la emisión de luz coloreada por una sustancia sometida a altas temperatura. Son termoluminiscente por ejemplo, la fluorita y la scheelita.
50. **Yacimiento:** Conjunto de rocas de la corteza terrestre donde se han concentrado ciertos minerales cuya extracción es rentable económicamente. Se distinguen los yacimientos primarios, si los minerales se han formado al mismo tiempo que la roca que los contiene, y secundarios, si se han formado posteriormente