

5.1 DEFINICION

Son los principales constituyentes de las rocas de la corteza terrestre; se trata de sustancias sólidas naturales, y homogéneas de composición química definida, disposición atómica ordenada y fruto de procesos inorgánicos.

Pocos minerales forman rocas a pesar de que se conocen cerca de 2000 especies diferentes, pues los silicatos y los óxidos son los principales constituyentes de la corteza, en razón de que ocho elementos lo hacen casi todo en la naturaleza. Los minerales pueden formarse con base en un sólo elemento, como el diamante con el carbono; con dos elementos, como la pirita (oro de los tontos) con el hierro y el azufre, o con tres o más elementos como los feldspatos o los piroxenos y anfíboles. También se pueden generar varias especies minerales con un mismo elemento, como el diamante y el grafito con el carbono, o con dos elementos como la pirita y la marcasita con el hierro y el azufre.

5. 2 ELEMENTOS CLAVES

Los ocho elementos más importantes de la naturaleza, por su participación, son:

- **Oxígeno.** Elemento no metálico que por ser altamente reactivo forma óxidos con casi todos los demás elementos. Hace parte sustancial del aire y del agua.

- **Silicio.** Elemento metaloide; siempre aparece en los silicatos y en los alumino-silicatos, el más abundante de los cuales es el cuarzo. El silicio se utiliza para aleaciones de ferrosilicio.

Cuadro 5. Elementos más abundantes en la Tierra.

SIMBOLO ELEMENTO	NUMERO ATOMIC O	VALENCIA CARGAS	RADIO IONIC O	PESO ESPECIFIC O	PESO	VOLUMEN
O	8	-2	1.4	---	46.60%	93.77%
Si	14	+4	0.4	2.40	27.72%	0.86%
Al	13	+3	0.5	2.70	8.13%	0.47%
Fe	26	+2	0.7	7.88	5.00%	0.43%
CA	20	+2	1.0	1.54	3.63%	1.03%
Na	11	+1	1.0	0.97	2.83%	1.32%
K	19	+1	1.3	0.86	2.59%	1.83%
Mg	12	+2	0.7	1.74	2.09%	0.29%
Total participación en la corteza						100.00%

Adaptado de Leet y Judson. Fundamentos de geología física, Limusa, 1980.

- **Aluminio.** Elemento metálico; siempre aparece en combinación con otros elementos. Es uno de los principales constituyentes de los silicatos. Resiste a la corrosión, es ligero y buen conductor eléctrico. Es el principal componente de las aleaciones ligeras.

- **Hierro.** Elemento metálico constituyente de óxidos, silicatos, óxidos hidratados, carbonatos y sulfuros. Se encuentra también nativo y en aleaciones con níquel. Es el principal constituyente del acero lo que lo hace el metal industrial más importante.

- **Calcio.** Elemento metálico; aparece en silicatos, carbonatos, sulfatos y fosfatos. Es aditivo en la fundición de metales para separar el oxígeno, el azufre, el fósforo y los halógenos. Es útil como agente reductor o deshidratador, en la química orgánica.
- **Sodio.** Elemento metálico; aparece en los silicatos y en los carbonatos hidratados. Se inflama al contacto con el agua. Es útil como núcleo de los cables eléctricos.
- **Potasio.** Elemento metálico; es el más común en los silicatos y aluminosilicatos. Útil como fertilizante en forma de cloruro, sulfato o en combinación con nitrógeno y fósforo.
- **Magnesio.** Elemento metálico; aparece combinado en silicatos, óxidos, hidróxidos y carbonatos. Se utiliza en aleaciones ligeras de aluminio.

5.3 CRISTALIZACION

Un cristal es un sólido, por regla general homogéneo, que posee un orden interno tridimensional de largo alcance. Los cristales se forman a partir de fundidos, disoluciones y vapores. Estos fluidos, caracterizados por un estado de desorden atómico, se solidifican por variaciones en la temperatura, presión y concentración. El producto final, por regla general, resultará con estructura cristalina, dado que los átomos, iones y moléculas, aparecerán ordenados y ligados por fuerzas electromagnéticas de enlace químico.

La cristalización a partir de un fundido, como el hielo a partir del agua o las rocas ígneas a partir del magma, se genera por el descenso de la temperatura a un punto en el cual las moléculas, iones y elementos disociados, conforme pierden la movilidad, se orientan y aproximan favoreciendo los enlaces de reacción.

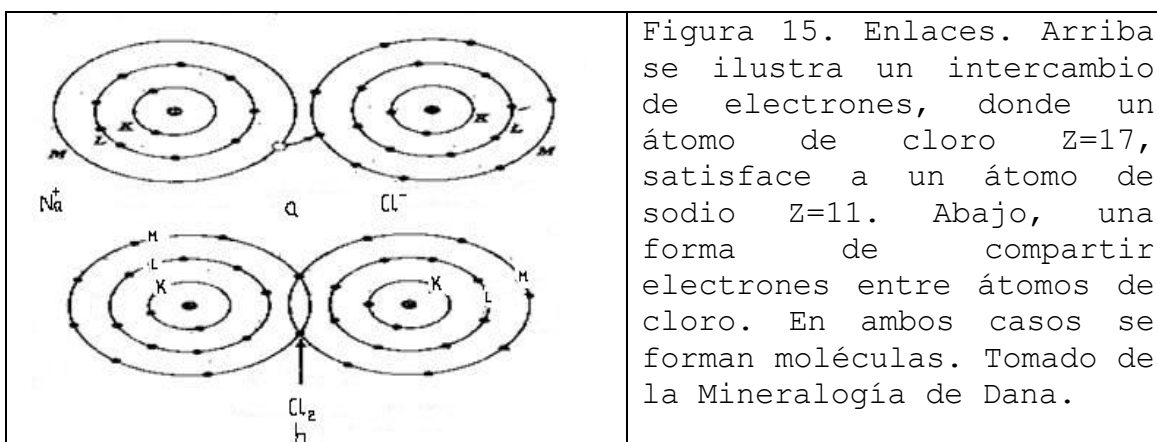
La cristalización a partir de una disolución, como la sal en agua, se produce por sobresaturación del solvente. Si se evapora el agua, si pierde temperatura y presión, los iones de sodio y cloro se van separando de la solución para edificar un cuerpo sólido cristalino.

La cristalización por un vapor de enfriamiento se presenta por la interacción de sus átomos o moléculas que se aproximan entre sí hasta solidificarse (desublimación o previa condensación del vapor). Es el caso de la nieve formada a partir del vapor de agua.

Si la velocidad de los procesos de solidificación es alta, el ordenamiento interno, y con mayor razón el crecimiento cristalino, será deficiente. Algunas sustancias solidificarán como agregados y por lo tanto sin estructura cristalina (vidrio); semejantes sólidos son amorfos por lo que su estado debe ser considerado más bien como de líquido de elevada viscosidad. Minerales sin estructura cristalina reciben el nombre de mineraloides.

Los cuerpos amorfos tienden a cristalizarse; en algunos de ellos la velocidad de transformación es muy baja, en tanto que en otros es tan rápida que se convierte en explosiva.

5.4 ENLACES, ESTRUCTURAS Y ALEACIONES



La estructura cristalina se mantiene por fuerzas de naturaleza electromagnética, así como los protones sostienen eléctricamente la nube electrónica, intra-atómica. La unión entre átomos es posible por el estado eléctrico de cada átomo constituyente, expresado en su último orbital. El tipo de enlace químico puede ser predominantemente de una de las siguientes formas, las que permiten estados de transición.

5.4.1 Enlace iónico. La falta de electrones en un átomo y el excedente en otro, pueden generar una configuración estable. El catión de sodio, monovalente, y el anión de cloro, monovalente, dan como resultado una configuración estable cuando se comparte el electrón mediante un enlace electrostático.

5.4.2 Enlace covalente. La inestabilidad del anión de cloro, monovalente, hace que el elemento sea altamente reactivo en su estado monoatómico; por lo tanto dos iones de cloro pueden prestarse el servicio uno a uno compartiendo una pareja de electrones para hacerse inertes gracias a un enlace covalente. Este enlace, en el que se comparten electrones, supera en fuerza al iónico, de carácter electrostático.

5.4.3 Enlace metálico. Los metales, átomos cuyos núcleos tienen bajo control sobre los electrones más externos, son conductores de la electricidad debido a su movilidad. Del mismo modo los átomos de los metales pueden sostener enlaces metálicos de intensidad moderada gracias a una nube de electrones que circunda el conjunto.

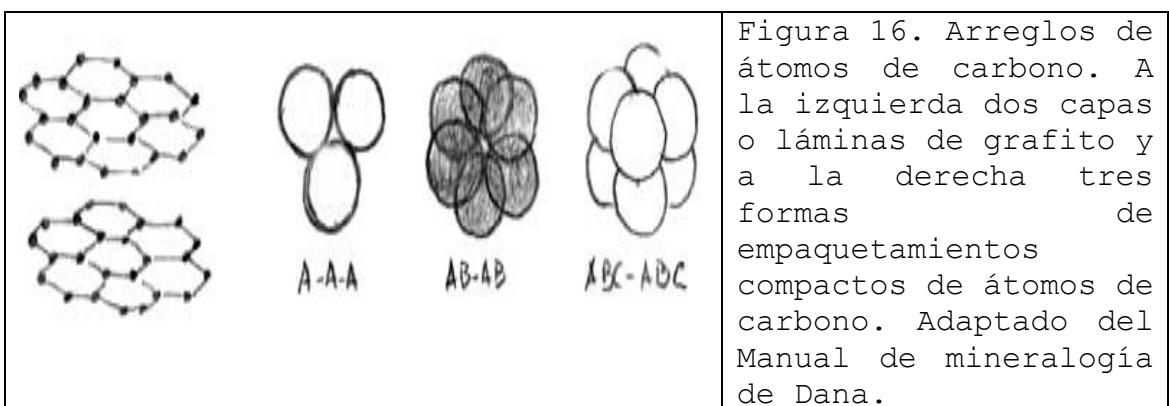
5.4.4 Estructuras de carbono. En su última órbita, que se satura electrostáticamente con 8 electrones, sólo se encuentran presentes cuatro. En esa segunda nube electrónica es difícil conseguir que el átomo pierda o gane electrones, por lo cual el carbono no se ioniza; prefiere la combinación con un máximo de cuatro átomos compartiendo

electrones. No obstante tal limitación, el carbono forma más de un millón de compuestos, si se rodea en forma de tetraedro como el metano. Pero cada átomo, de hidrógeno por ejemplo, puede ser sustituido por otro al cual le falte un electrón, para estabilizarse. Podrá entonces el carbono sustituir 1, 2, 3, ó 4 hidrógenos por flúor, cloro, bromo y yodo con 39 combinaciones distintas.

Pero el Carbono puede ligarse consigo mismo para formar el diamante, el grafito o el carbón vegetal. En el diamante los átomos de carbono se ordenan tridimensionalmente en tetraedros: cada átomo está rodeado por cuatro compartiendo con cada uno un par de electrones (el suyo y el de él).

En el grafito los átomos se disponen en capas bidimensionales formando anillos de seis átomos, cada uno de ellos con 3 vecinos cercanos (2 de su anillo y uno del otro), por lo que el número de electrones compartidos por átomo es 6, mientras los dos restantes quedan sin compartir (uno de cada átomo); eso sí, su papel es contribuir a la firmeza de los anillos.

En el carbón vegetal la sustitución tiende a ser la del grafito y no la del diamante; también existen allí capas de anillos hexagonales pero la extensión de cada arreglo es reducida y por lo tanto el espacio de movilidad de los electrones no apareados también lo es.



Los casos anteriores explican la mayor densidad del diamante, su dureza (más átomos y a menor distancia por unidad de volumen), y la propiedad lubricante del grafito, material conductor de la electricidad, de brillo metálico y exfoliación perfecta, gracias a la movilidad de electrones no compartidos sobre un arreglo espacial ineficiente.

5.4.5 Estructuras de silicio. El silicio, con idéntica estructura electrónica a la del carbono y extendida variedad de compuestos, prefiere la unión con átomos no idénticos, como en el carbono, sino con otros que lo hacen más estable, por ejemplo, rodeándose tetraédricamente con oxígeno. En este caso se forma un anión de silicato estable con cuatro valencias negativas.

Los cuatro electrones no apareados sirven para que el ion del silicato ligue cationes metálicos. Esta estructura de tetraedros individuales es el grupo de silicatos denominado nesosilicatos. Pero esas cargas (de los 4 electrones) sobre el silicio, pueden considerarse sobre los oxígenos. Si se hace que uno de los oxígenos comparta su electrón con el oxígeno de un tetraedro adyacente, el nuevo ion silicatado tendrá seis electrones disponibles para ligarse con iones metálicos que compensen su carga.

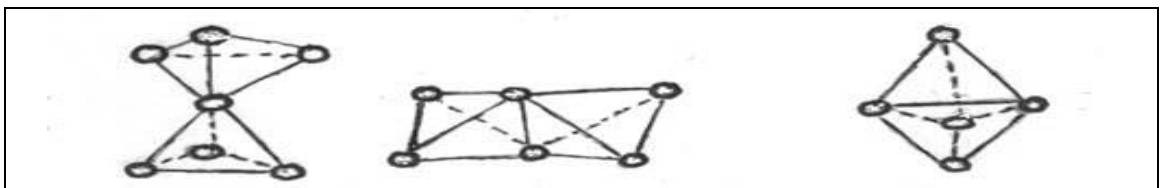


Figura 17. Tetraedros de silicio. Compartiendo vértice (iz), compartiendo arista (ce) y compartiendo cara (de). Adaptado del Manual de Mineralogía de Dana.

Ese desarrollo general en el cual los tetraedros de silicio-oxígeno se ligan compartiendo átomos de oxígeno en una versión ampliada, puede hacerse por los vértices, para degenerar en anillos (ciclosilicatos) o en cadenas (inosilicatos); por las aristas, degenerando en láminas

(filosilicatos), y por las caras, degenerando en volúmenes (tectosilicatos).

5.4.6 Aleaciones. Una masa metálica está constituida por iones metálicos, en los cuales los electrones que sostienen el conjunto transitan sin sujeción a un núcleo específico (enlace metálico). La variedad del metal se da principalmente por la diversidad del elemento ionizado que participa de la masa. El Mercurio, elemento líquido, por lo general forma amalgamas ya que la sustancia resultado de la unión del Mercurio con otros metales es amorfa o es líquida.

Las aleaciones, sólidos con estructura cristalina, son factibles entre metales dependiendo del tamaño de sus iones, de la fuerza con que atraigan a los electrones y del número de electrones cedidos por cada metal a la nube comunitaria.

Si en sus espacios intra-iónicos participan iones de gran tamaño, éstos permitirán que se deslicen y acomoden iones de pequeño radio, aprovechando los agujeros para aumentar la densidad, resistencia y dureza de la masa. Es el proceso de fabricación del acero: se introduce carbono al hierro y a veces otros metales (vanadio, cromo, wolframio), caso en el cual se tiene la aleación con mejor resistencia mecánica.

Otra forma de aleación se obtiene entre dos iones metálicos, el primero con mejor control sobre los últimos electrones que el ejercido por el segundo. El enlace que predominará entre los iones de ambos elementos emulará el enlace iónico entre cloro y sodio. Esos electrones de baja movilidad harán de la aleación una sustancia mala conductora de la electricidad. Como ejemplo se tiene la aleación entre estaño y magnesio.

Los metales, por lo general con tres electrones lejanos en su último nivel, tienen un enlace químico que los tipifica.

Si se analiza el zinc que cede dos electrones y el cobre que fácilmente cede uno, uno y otro con estructura diferente, se formará el latón (a veces enriquecido con Fe, Si, Sn, o Al) en una proporción de una parte de zinc por dos de cobre, en la cual se presentarán dos estructuras cristalinas mezcladas que en conjunto le darán características diferentes a la masa final.

5.5 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES

Las propiedades físicas pueden ser generales o específicas.

Las **generales**, propias de los minerales con estructura cristalina, son:

- Los minerales forman cristales, esas unidades macroscópicas que representan la cristalización de su estructura atómica.
- La forma externa, es función de la estructura cristalina; no obstante, una especie puede mostrar hábitos debidos a variaciones en el número, tamaño y forma de las caras.

Las **específicas**, útiles para la identificación del tipo de mineral, son:

- Crucero o Clivaje.
- Fractura.
- Dureza.
- Tenacidad.
- Peso específico.
- Propiedades ópticas.
- Propiedades electromagnéticas.

5.5.1 Crucero o Clivaje. Un mineral no amorfo tiende al crucero o clivaje, cuando por presión, se separe en planos de posición con una geometría definida. Se hablará de exfoliación cuando se generen láminas (la mica), o de

partición cuando se originen cubos o prismas (la magnetita). El crucero se califica según su grado, de perfecto, bueno o imperfecto.

La mica y el cinabrio tienen exfoliación perfecta, pero el berilo y el apatito la tienen menos definida, y la anhidrita no la presenta. Los cristales maclados, fácilmente se separan a lo largo de los planos de composición, produciendo superficies de rotura en forma de partición.

La magnetita muestra partición octaédrica, el piroxeno partición básica y el corindón partición romboédrica y la calcopirita, que generalmente se presenta en masas, puede presentarse en cristales que parecen tetraedros.

5.5.2 Fractura. Es el carácter de la superficie de rompimiento que muestra un mineral que no presenta exfoliación o partición, sea el mineral amorfo o cristalino (en el segundo caso la ruptura podrá estar controlada por el crucero del mineral).

Según el tipo de superficie (no plana), se hablará de fractura concoidea (en concha) como el vidrio, la pirita y el cuarzo; fibrosa (en astilla) como la plata, el hierro y el cobre nativos; ganchuda (dentada); irregular (desigual) como el oro nativo, etc.

5.5.3 Dureza. Se define como la capacidad que tiene el mineral para rayar o dejarse rayar por otros minerales u objetos; depende de la estructura cristalina, y por lo tanto de la fuerza de enlace químico.

La escala de MOHS (1824), de uno a diez, califica la dureza con prototipos, del más blando al más duro así:

Tabla 7. Escala de Mohs.

Mineral	Dureza	Composición	Sistema	Observación
Talco	1	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Mon	Tacto graso, séctil
Yeso	2	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Mon	Brillo vítreo o sedoso
Calcita	3	$CaCO_3$	Rom	Fosforescente
Fluorita	4	CaF_2	Iso	Exfoliación octaédrica
Apatito	5	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	Hex	Exfoliación mala
Ortoclasa	6	$KAlSi_3O_8$	Mon	Feldespatos potásicos
Cuarzo	7	SiO_2	Rom-Hex	El más abundante
Topacio	8	$Al_2SiO_4(F, OH)_2$	Ort	Exfoliación perfecta
Corindón	9	Al_2O_3	Rom	Alterado pasa a mica
Diamante	10		Iso	Brillo adamantino

Adaptado de R. Brauns. Mineralogía, Labor, 1927 y Cornelius & Cornelis. Manual de mineralogía de DANA, Reverté S. A. 1985.

Pero la escala de Mohs es más cualitativa que cuantitativa; de lo contrario el diamante debería estar en 40. Utilizando la escala con éste nuevo concepto, el geólogo se vale de las siguientes herramientas de trabajo para el chequeo de la dureza: la uña tiene 2.5 y raya el talco y el yeso pero no la calcita; la moneda de cobre tiene 3.5, la navaja 5.5 y la lima 6.5; ninguna de las anteriores puede rayar al cuarzo, siendo éste un mineral que raya al vidrio y al acero.

Para las perforaciones se usan las siguientes brocas:

- En rocas blandas y rocas meteorizadas, son de común uso las brocas de carbono artificial, como son la de silicio de dureza 14.0, la de boro con dureza 19.7 y la de tungsteno con dureza 17.6.
- En rocas duras o cristalinas se emplean las brocas de mayor dureza, que son la de diamante Bort de 36.4 y la de diamante carbonado de 42.4.

5.5.4 Tenacidad. Concepto que califica la resistencia cohesiva del mineral a diferentes tipos de esfuerzos; alude a como el mineral se deja romper, desgarrar, moler o doblar. Las clases de tenacidad son: frágil (sí rompe), como la calaverita, la margarita y la piritita; maleable (sí da láminas), como el cobre, la plata y el platino; séctil (sí se deja rebanar), como la acantita y el bismuto; dúctil (sí da hilos), como el oro y el cobre; flexible (sí se deja doblar), como el grafito y la molibdenita; y elástica (sí recupera su forma después de un esfuerzo), como la moscovita, la flogopita y la biotita.

5.5.5 Peso específico. Este concepto es diferente al de peso unitario (peso sobre volumen) o a la densidad absoluta (masa sobre volumen). El peso específico se conoce también como gravedad específica.

Se entiende por peso específico el peso de la muestra sobre el peso del agua a 4°C, cuando de ambas sustancias se contrastan volúmenes iguales. Dicho valor depende de dos parámetros: la clase de átomos y la estructura cristalina.

Algunos ejemplos de minerales con su composición, sistema cristalino, peso específico (G) y dureza (D):

Tabla 8. Peso específico y dureza de algunos minerales.

Nombre	Composición	Sistema Cristalino	G	D
Calaverita	AuTe ₂	Monoclínico	9.35	2
Berilo	Be ₃ Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)	Hexagonal	2.65 - 2.80	7 ½ - 8
Cerusita	PbCO ₃	Ortorrómico	6.55	3 - 3 ½
Cobre	Cu	Isoclínico	8.90	2 ½ - 3
Grafito	C	Hexagonal	2.23	1 - 2
Halita	NaCl	Isoclínico	2.16	2 ½
Magnesita	MgCO ₃	Romboédrico	3-3.2	3 ½ - 5

Datos tomados de Cornelius & Cornelis. Manual de Mineralogía de DANA, Reverté, 1985.

En caso de materiales porosos (con cualquier cantidad de espacios vacíos) se toman los pesos de la muestra, seca (D), saturada (S) y en suspensión sumergiéndola en agua (F).

El peso específico aparente será:

$$P_a = D / (S - F)$$

El peso específico verdadero será:

$$P_v = D / (S - F - A)$$

Siendo $A = (S - D)$, el agua que satura los poros de la muestra.

5.5.6 Propiedades ópticas. Son las que dependen de la luz, como la diafanidad, el brillo, el color, el espectro y la raya.

- **La diafanidad.** Depende de la capacidad refractante del mineral: si la refracción es coherente la muestra será

transparente (a las frecuencias que ordenadamente la atraviesan); ejemplo el diamante y el espato de Islandia.

Si la onda luminosa que cruza el cuerpo es incoherente, el mineral será translúcido; como ejemplo la baritina. Finalmente, si la luz se refleja o queda absorbida, sin poder cruzar el material, la muestra será opaca; ejemplo la galena.

- **Brillo.** Es el grado de reflexión que experimenta la luz en los cuerpos opacos. Si la reflexión es coherente (la superficie de rebote es pulida), el brillo será máximo (metálico). Si la reflexión es incoherente (la superficie de rebote es rugosa), el brillo será nulo (mate).

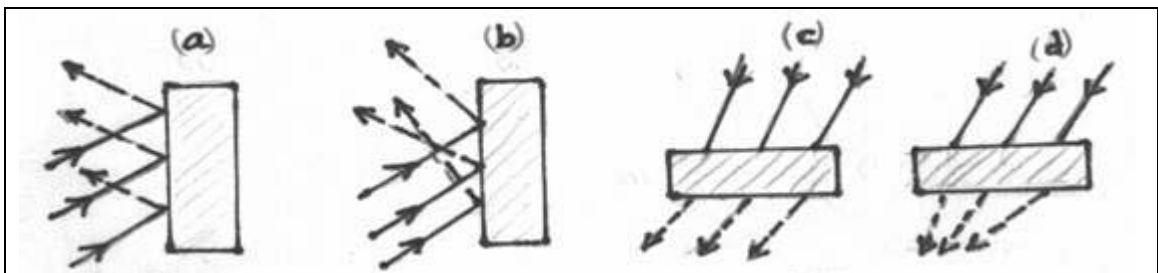


Figura 18 Reflexión y refracción de una haz luz. A. Reflexión coherente y brillo metálico, B. reflexión incoherente y color mate, C. refracción coherente y diafanidad transparente, D. refracción incoherente y diafanidad translúcida.

La luz es un frente de ondas multiespectral. Algunas frecuencias se refractan y otras se reflejan, en uno y otro caso, con diferente nivel de coherencia. Así, el brillo podrá ser: metálico, como en la galena y la piritita; adamantino, en la cerusita y la anglesita; vítreo, en el cuarzo y la turmalina; sedoso, en el yeso fibroso y la serpentina; nacarado, en la superficie de exfoliación del talco; graso, en algunas especies de blenda; resinoso en la blenda y el azufre, y mate, en la acantita, que siendo gris acerada cuando la superficie es fresca, se vuelve gris mate al aire.

- **Color.** Sea el material opaco o transparente, el color depende de la longitud de onda de la luz que llegue al ojo. En los opacos, la luz se absorbe o rebota; pero en otros se da una combinación de refracción-reflexión-dispersión, por frecuencias. Así, los colores pueden variar de claros a oscuros y los tonos, del azul al rojo.

Además el color puede ser el propio de la sustancia o el que adquiere aquella en virtud de materias extrañas. Suelen estar entre los primeros los minerales opacos, metálicos y transparentes, por ejemplo, blanco la plata, gris la galena, amarillo el oro, rojo el cobre, amarillo el azufre, rojo el cinabrio, verde la malaquita y azul la azurita. En los segundos, la coloración no es propiedad característica del mineral, porque esta varía extraordinariamente en una misma especie y aún en las distintas partes de un mismo ejemplar.

- **Espectro.** Es la forma de la descomposición de la luz que se refracta oblicuamente. Cada onda penetra el material con diferente dirección; por la anisotropía algunas pueden reflejarse sobre caras internas del cristal, otras pueden quedar absorbidas y otras pueden atravesarlo. De lo anterior se desprende que el mineral presente irisación, como en ciertos piroxenos y feldespatos y birrefringencia (doble imagen por doble refracción), como en el espato de Islandia.

- **La raya o huella.** Es el color del polvo resultante de frotar o triturar una muestra sobre la superficie de un objeto de porcelana áspera blanca (dureza alrededor de 7), sin hacer mucha presión. Ordinariamente el color de la raya es más claro que el del mineral, y muchas veces de distinto color; así, el oligisto, que es negro, da raya roja, la pirita de hierro amarilla, la produce negra.

5.5.7 Propiedades electromagnéticas. Son las que tienen que ver con la respuesta del mineral a las fuerzas eléctricas y magnéticas.

Conductividad eléctrica. Los minerales con enlaces puramente metálicos, como los metales nativos, son excelentes conductores eléctricos; aquellos en los que el enlace es parcialmente metálico y hay pocos electrones móviles, como en algunos sulfuros, son semiconductores. Las cerámicas, los silicatos y los diamantes, por su estructura interna (minerales iónicos o de enlace covalente), son no conductores. La sal no conduce la electricidad porque está compuesta de iones y los iones son fijos, sólo vibran pero no se desplazan.

- **La piroelectricidad** se produce cuando se desarrollan cargas positivas y negativas en los extremos de un eje cristalino por variación de la temperatura en el mineral, por ejemplo la turmalina.

- **La piezoelectricidad** se presenta cuando se produce electricidad al presionar un cristal sobre un eje, por ejemplo el cuarzo.

- **El magnetismo:** si con imanes o electroimanes potentes pueden ser o no atraídos ciertos minerales. La magnetita, La pirrotita, la ilmenita y la hematites, son imanes naturales.

5.6 FORMA Y SISTEMAS CRISTALINOS

Cuando la sustancia no es amorfa, cristalizará; es decir, tomará forma característica. Las formas de los minerales presentan siete sistemas cristalinos que generan 14 redes espaciales (7 con la geometría de las esquinas y 7 de repetición), tomando lugares interiores del cristal.

También algunos minerales tienen la posibilidad de presentar estrías (bandas) o maclas (formas de empotramiento de uno con otro), propias de cada especie.

5.6.1 Los sistemas cristalinos. Los siguientes son las células elementales posibles de los cristales, es decir, los sistemas que dan origen a las 32 clases cristalinas, y

estas a su vez, a 230 grupos espaciales según su disposición. Con A, B, C y D se definirán los ángulos y con a, b, c y d los ejes de los cristales.

- **Cúbico o isométrico.** (Forma de dado) sí $A = B = C = 90^\circ$ y $a = b = c$. En la simetría, 4 ejes ternarios. Ejemplo la halita, la pirita, la fluorita, el oro nativo, etc.

- **Ortorrómico.** De base rectangular y altura perpendicular a la base; sí $A = B = C = 90^\circ$ y $a \neq b \neq c$. Con 3 ejes de simetría binarios. Ejemplos el olivino, la aragonita, el vitriolo de níquel, la marcasita, etc.

- **Tetragonal.** La base es un cuadrado y la altura es perpendicular a la base; sí $A = B = C = 90^\circ$ y $a = b \neq c$. Con 1 eje tetragonal en la simetría. Ejemplo circón, la calcopirita, el rutilo y la pirolusita.

- **Romboédrico.** Llamado también trigonal (formaba parte del hexagonal); sí $A = B = C \neq 90^\circ$ y $a = b = c$. Con 1 eje de simetría ternario. Ejemplo la dolomita, la magnesita, la calcita, etc.

- **Hexagonal.** De base hexagonal, con 4 ejes, siendo las 3 de la base iguales; sí $A = B = C = 90^\circ$, $D = 120^\circ$ y $a = b = c \neq d$. Con 1 eje hexagonal de simetría. Ejemplo la pirrotina, el berilo, la nefelina, el grafito, etc.

- **Monoclínico.** Con base rectangular y altura perpendicular a un sólo eje; sí $A = B = 90^\circ \neq C$ y $a \neq b \neq c$. Con 1 eje de simetría binario. Ejemplo la moscovita, la biotita, el yeso, la ortoclasa, etc.

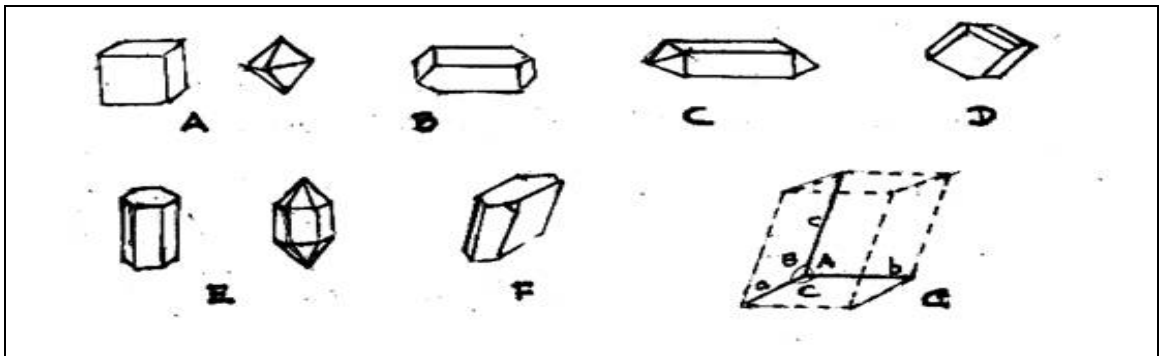


Figura 19. Ejemplos de cristales sistema por sistema. A. Halita y fluorita (cúbico), B. aragonita (Ortorrómbico), C. circón (tetragonal), D. calcita (romboédrico), E. Nefelina y cuarzo (hexagonal), F. calcantita (triclínico), G. elementos del cristal. Por la forma, prismático (A izquierda), piramidal (A derecha), tabular (F), columnar (E). Tomados de Diccionario Rioduero de Geología y Mineralogía.

- **Triclínico.** Sí $A \neq B \neq C \neq 90^\circ$ y $a \neq b \neq c$. Sistema cristalino sin ejes de simetría. Sólo existe un centro de simetría. Ejemplo: las plagioclasas, la caolinita, la calcantita, la cianita, etc.

5. 7 MINERALOGIA QUIMICA

De acuerdo con la composición química, los minerales pueden ser agrupados en silicatos, óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos, elementos nativos y otros grupos menores.

5.7.1 Los silicatos. Se subdividen en ferromagnesianos y no ferromagnesianos; se trata de la unión de un catión más el anión SiO^{-4} .

Los ferromagnesianos son silicatos de Fe y Mg oscuros y pesados; sobresalen entre ellos la Biotita, una mica negra con raya blanca y laminado débil; la hornblenda, de brillo vítreo, es un tipo de anfíbol verde oscuro y negro y en el clivaje muestra ángulos agudos; la augita, tipo de piroxeno con fractura concóidea, de iguales colores al anterior, pero mostrando clivaje en ángulos casi rectos; los

olivinos, tetraedros simples de estructura granular, color verde olivo y con porcentajes variables de Fe y Mg.

Los no ferromagnesianos, por la ausencia de Fe y Mg, son claros y menos densos; entre ellos se incluyen el cuarzo, la moscovita y los feldespatos.

Dentro de los feldespatos, se encuentran las plagioclasas, una serie isomorfa que va desde la anortita, feldespato Cálxico, hasta la albita, feldespato Sódico.

Otro feldespato es la ortoclasa, un feldespato potásico, monoclinico y de color rosado, blanco o gris.

Plagioclasa significa que el mineral rompe oblicuamente y ortoclasa que rompe en ángulo recto.

El cuarzo es un tetraedro de silicio-oxígeno (SiO^{-4}) pero químicamente es SiO_2 . Es duro e incoloro o blanco grisáceo. Entre sus variedades cristalinas, se encuentran el cristal de roca, la amatista, el jaspe, el ágata y el ónice.

La moscovita que es la mica blanca bien cementada con exfoliación perfecta y que cristaliza en el sistema monocíclico. Algunos silicatos son:

Tabla 9. Ejemplos de silicatos.

Mineral	Composición	Características
Cuarzo	SiO_2	Romboédrico o hexagonal, dureza 7
Anortita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Miembro extremo Ca de las plagioclasas
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Miembro extremo Na de las plagioclasas
Ortoclasa	KAlSi_3O_8	Feldespato potásico de temperatura media
Biotita	$\text{K}_2(\text{MgFe})_6(\text{Si}_3\text{Al})_2\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Mica negra, monoclinica
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Monoclinica, exfoliación

Mineral	Composición	Características
Olivino	$(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$	perfecta Mineral de roca, verde, Ortorrómico
Piroxeno	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Grupo mineral de la forma $\text{X Y Z}_2 \text{O}_6$
Hornblenda	$\text{NaCa}_2(\text{MgFeAl})_5(\text{SiAl})_8\text{O}_{22}$ $(\text{OH})_2$	Anfíbol verde a negro

Datos tomados de Cornelius & Cornelis. Manual de Mineralogía de DANA, Reverté, 1985.

5.7.2 Los óxidos. Son la unión de un elemento con el oxígeno; se caracterizan por ser menos duros que los silicatos, pero menos pesados que los sulfuros; en este grupo se encuentran las principales menas (vetas de un metal económicamente explotable) de hierro, magnesio, estaño, cromo y aluminio, entre otros. Los prototipos son: casiterita, corindón, cromita, hematita, magnetita, pirolusita y cromita (tipo de espinela). Algunas de sus características son:

Tabla 10. Ejemplos de óxidos.

Mineral	Composición	Características
Casiterita	SnO_2	Dureza 6,0-7,0; color pardo a negro
Corindón	Al_2O_3	Dureza 9,0; fractura concóidea
Cromita	FeCr_2O_4	Dureza 5,5; brillo submetálico
Hematita	Fe_2O_3	Llamada oligisto; más dura que la limolita
Magnetita	Fe_3O_4	Dureza 5,5; exfoliación imperfecta
Pirolusita	MnO_2	Dureza 2,2-5,0; gris plomo o negro

Datos tomados de Cornelius & Cornelis. Manual de Mineralogía de DANA, Reverté, 1985.

5.7.3 Los sulfuros. Unión de un elemento con azufre; se encuentran allí las menas comercialmente más importantes de hierro, plata, cobre, mercurio, zinc y plomo. Sus prototipos son: pirita, galena, esfalerita, calcosita, marcasita y cinabrio. Algunas características son:

Tabla 11. Ejemplos de sulfuros.

Mineral	Composición	Características
Pirita	FeS ₂	Color amarillo de latón, dureza 6,0 a 6,5
Galena	PbS	Peso específico 7,4-7,6 y muy buena exfoliación
Esfarelita	ZnS	Es el mineral de zinc más importante (blenda)
Calcosita	CuS	Peso específico 5,7-5,8; dureza 2,5-3.0
Marcasita	FeS ₂	Pirita blanca de color amarillo verdoso
Cinabrio	HgS	Color rojo escarlata de brillo diamantino

Datos tomados de Cornelius & Cornelis. Manual de Mineralogía de DANA, Reverté, 1985.

5.7.4 Los carbonatos. Son la combinación de un elemento más el anión (CO₃)⁻² prototipos son: la calcita, que es el mineral constituyente de las calizas y los mármoles, y en consecuencia del cemento; su dureza es 3 -mineral blando-; se pone en evidencia porque presenta efervescencia con el HCl oficial (diluido al 10%). La dolomita, mineral constituyente de la roca dolomía, porque da efervescencia con el HCl fuerte. Finalmente, la malaquita, la cerusita y la magnesita. Algunas características son:

Tabla 12. Ejemplos de carbonatos.

Mineral	Composición	Características
Calcita	CaCO ₃	Dureza 3 y peso específico 2,6-2,8
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	Un carbonato de calcio y magnesio
Malaquita	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	Color verdoso y fractura concóidea
Magnesita	MgCO ₃	Carbonato de Mg, peso específico 3,0
Cerusita	PbCO ₃	Mineral de Pb asociado a la galena

Datos tomados de Cornelius & Cornelis. Manual de Mineralogía de DANA, Reverté, 1985.

5.7.5 Los sulfatos. Son la combinación de un catión más el anión $(SO_4)^{-2}$, prototipos: la anhidrita, el yeso, la calcantina, la barita y la celestina. Algunas características son:

Tabla 13. Ejemplos de sulfatos.

Mineral	Composición	Características
Anhidrita	$Ca(SO_4)$	Incoloro, blanco, gris, rojo o azulado
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Fractura concóidea y dureza 1,5-2,0
Barita	$BaSO_4$	Bario predominantemente hidrotermal
Calcantina	$Cu(SO_4) \cdot 5H_2O$	Llamado vitriolo de cobre (azul)
Celestina	$SrSO_4$	Estroncio originado en fisuras calcáreas

Datos tomados de Cornelius & Cornelis. Manual de Mineralogía de DANA, Reverté, 1985.

5.7.6 Grupo de los elementos. Alrededor de una veintena de elementos se encuentran en la naturaleza sin combinar químicamente con otros, aunque en ocasiones se presentan como mezclas homogéneas de dos o más. En general son muy escasos. Entre los metales se destacan el oro, la plata y el cobre y entre los no metales se pueden citar el azufre, el grafito y el diamante.

5.7.7 Grupos menores. Comprende los subgrupos sulfosales, nitratos, boratos, tungstatos, fosfatos, boratos y haluros. Entre ellos se tienen:

Los haluros, combinaciones de metales con elementos halógenos como flúor y cloro. Entre ellos están la halita, la silvita y la fluorita.

Los nitratos y boratos, menos extendidos que los carbonatos, se encuentran en concentraciones locales de depósitos salinos, por ejemplo el bórax y el nitro (salitre).

Los fosfatos, cuya mayor parte se halla en forma de apatito (fosfato cálcico con flúor y cloro); los demás son muy raros.

5.8 PARTICIPACION E IMPORTANCIA DE LOS MINERALES

Los silicatos más los óxidos constituyen el 75% de la corteza. Los feldespatos de Na, Ca y K, por su parte, conforman el 60% de la corteza, principalmente las plagioclasas (45%), pues son ellas las constituyentes primarias de las rocas ígneas.

5.8.1. Minerales fundamentales. En las rocas ígneas, cuarzo, feldespatos, micas, augita, hornblenda, olivino y óxidos de hierro.

En las rocas de metamorfismo regional, actinolita, andalucita, asbesto, clorita, epidota, granate, cianita, hornblenda, serpentina y talco.

En las sedimentarias, cuarzo, feldespatos (plagioclasas), caolinita (arcilla), calcita, corindón, dolomita, hematita, yeso, anhidrita y halita.

La actinolita es un clinocanfíbol que se presenta en cristales alargados o fibrosos. La andalucita es un silicato frecuente en contactos de granitos con pizarras arcillosas. El asbesto, de fibras duras y rígidas, es una serpentina de múltiples usos. La clorita es un filosilicato que se diferencia de las micas por inelástico. El granate es un nesosilicato cúbico y duro. La cianita es un silicato triclínico que con la andalucita y la sillimanita constituyen un sistema polimorfo. La serpentina es un filosilicato como la clorita que puede ser fibrosa u hojosa. El talco, por su parte, es un filosilicato monoclínico de origen secundario gracias a la alteración de los ferromagnesianos.

5.8.2 Principales menas de minerales. Se entiende por mena un depósito, de un mineral o de varios minerales, en una concentración superior a la media, y en condiciones económicamente explotables.

En consecuencia, la mena es la parte mineral aprovechable de una explotación minera. Asociados con los minerales económicamente útiles (minerales de mena) están los minerales de ningún valor comercial (ganga). Los estudios cuidadosos de la paragénesis de ambas mineralizaciones (mena y ganga), junto con el estudio de inclusiones muy pequeñas de fluido hidrotérmico residual (inclusiones fluidas) en granos minerales, permiten dividir los depósitos hidrotermales en función de la temperatura de origen (baja, entre 50 y 150°C; intermedia, entre 150 y 400°C, y alta, entre 400 y 600°C).

- **Piedras preciosas.** Sobresalen el diamante, el rubí, el zafiro y la esmeralda, entre otras. Colombia es famosa por las esmeraldas de Muzo y Chivor. La esmeralda es un berilo coloreado de verde por su contenido en cromo.

- **Piedras ornamentales.** Sobresalen el mármol, las calizas y los granitos. Las dos primeras de suma importancia por su nobleza y baja dureza. La segunda, aunque dura, por su aspecto y resistencia.

- **Otros usos de los minerales.** Como abrasivos, el cuarzo y el diamante. En la cerámica y vidriería, la caolinita y el cuarzo. Como refractarios el grafito y las micas. Como fundentes y en óptica, la calcita y el cuarzo. También el cuarzo en electrónica y las fosforitas como abonos.

Tabla 14. Las menas más importantes.

Metal	Mineral	Metal	Mineral
Aluminio	bauxita	Manganeso	manganita y pirolusita
Cromo	cromita	Oro	oro nativo y marmatita

Metal	Mineral	Metal	Mineral
Cobre	el cobre nativo, calcosina, bornita calcopirita	Plata y	Argentita
Mercurio	cinabrio	Uranio	uraninita carnotita Esperrilita
Estaño	casiterita estannina	y Platino	
Hierro	hematites magnetita	y Plomo	galena, cerusita anglesita
Molibdeno	Molibdenita	Magnesio	Magnesita
Zinc	blenda esfalerita	o Níquel	Niquelina
Aluminio	bauxita	Titanio Manganeso	Ilmenita manganita pirolusita
Cromo	cromita	Oro	oro nativo marmatita
Cobre	el cobre nativo, calcosina, bornita calcopirita	Plata y	Argentita
Mercurio	cinabrio	Uranio	uraninita carnotita

Lexis de Mineralogía y Geología, volumen 22, 1983.

5.9 GEOLOGIA ECONOMICA DEL EJE CAFETERO

Según el inventario minero de Ingeominas (1972), la región cuenta con 220 explotaciones y depósitos metalíferos y no metalíferos: 124 en Caldas, 60 en el Quindío y 36 en Risaralda.

La minería es una actividad que se remonta a la época precolombina, fue importante como motor en la colonización antioqueña, y aún hoy, aunque con excepciones, se desarrolla con características artesanales.

En la región las principales ocurrencias son oro, plata, zinc y mercurio, además de otros minerales metálicos y no metálicos que son vitales para el desarrollo de las fuerzas productivas, como calizas, mármol, arcillas y carbón.

- **Oro y plata.** Asociados a cuerpos intrusivos y depósitos aluviales. Como yacimientos de filones, en Caldas, se destacan Marmato y Riosucio, el distrito Manizales-Villamaría y otros yacimientos en Samaná, Florencia y Manzanares. En Risaralda la región de Santa Cecilia-Pueblo Rico; en Quindío no hay áreas de interés.

Como aluviones auríferos, están las terrazas del Cauca, los ríos Samaná y Guarinó, en Caldas; Risaralda y San Juan, en Risaralda, y La Vieja y Boquerón, en Quindío. Esta minería se practica básicamente sin control estatal.

- **Hierro.** Se destacan yacimientos del complejo volcánico Ruiz-Tolima, utilizados en la industria del cemento.

- **Antimonio.** Son escasas las ocurrencias en la región. Se conocen manifestaciones en Villamaría (Caldas) y en los alrededores de Salento (Quindío), unas y otras asociadas a rocas metamórficas y metasedimentarias.

- **Plomo-zinc.** Son numerosas las mineralizaciones; se conoce la mina Las Nieblas, y en Caldas, ocurrencias en Samaná y Marquetalia.

- **Cobre.** Manifestaciones numerosas en Caldas y Risaralda, algunas de ellas explotadas antiguamente.

- **Manganeso.** El ambiente de la fosa del Cauca parece favorable, siendo reportadas manifestaciones en San Félix, Viterbo y Apía, sobre rocas sedimentarias del Cretáceo.
- **Mercurio.** Se detecta un cinturón que se extiende de Aranzazu a Salamina; existen manifestaciones en Aguadas (El Pico), sobre la formación Quebradagrande y en las Vegas del río Supía y Guaca, en la desembocadura del río Cambía.

- **Carbón.** El Terciario Carbonífero de Antioquia se extiende a Riosucio, Quinchía y posiblemente Aranzazu. Los mantos anuncian una cuenca intra-montañosa con reservas bituminosas apreciables y con buen poder calorífico.

- **Asbestos.** Se reportan en Neira (Caldas) y Córdoba y Pijao (Quindío), asbestos con fibras de mala calidad asociados a rocas básicas de la falla Romeral.

- **Caliza-mármol.** Sobresalen los yacimientos de Samaná, La Victoria y La Dorada (Caldas); existen numerosas explotaciones como la de Neira (Caldas), Manizales y Pijao (Quindío). Las últimas en forma de lentejones.

- **Grafito.** Asociados a esquistos negros y shales, podrían darse yacimientos; la única ocurrencia conocida está en el norte de Caldas.

- **Arcillas.** Abundantes en el Quindío; en Caldas y Risaralda se explotan niveles que incluyen caolinitas. Los yacimientos más interesantes están en Génova, Calarcá, Quimbaya y Pijao, formados como suelos residuales. La naturaleza detrítica supone largos transportes pero subyacen suelos altamente productivos.

- **Caolín.** Se presentan numerosas ocurrencias en Aguadas, San Félix y Marquetalia (formación Abejorral y Valle Alto).

- **Talco.** En la Felisa (Salamina) asociado a serpentinas de la Falla Romeral.

- **Azufre.** Se han explotado yacimientos asociados a morrenas en el costado norte del nevado del Ruiz. Existe otra ocurrencia interesante en la Laguna del Otún.

- **Agregados de ríos.** Las principales fuentes son los ríos Vieja, Otún, Risaralda, Cauca, Chinchiná y Barragán.

Algunas fuentes resultan hoy sobre explotadas, por lo cual se intensifican explotaciones en Cerro Bravo y en macizos rocosos vecinos a los grandes cascos urbanos.

- **Uranio.** Se encuentran anomalías en Irra (Risaralda) y Berlín (Caldas), asociadas las primeras a sedimentos del Cretáceo y las segundas a un intrusivo del Terciario.

- **Recursos geotérmicos.** Los estudios de prefactibilidad de la CHEC permitieron identificar tres zonas anómalas: la Laguna del Otún (Cerro España), la región de Nereidas (Playa Larga) y la región de Cajamarca (El Machín). Hoy se prospecta el potencial del campo de Nereidas, en territorio de Villa María.