

Colaboración estudiantil

Origen y clasificación de los depósitos minerales

Por OCTAVIO BETANCOURT

(Continuación)

III.—LOS DEPOSITOS MINERALES

Clasificación.—Los yacimientos minerales que se han conservado sin sufrir modificación sustancial en su estructura o en su composición, encontrándose tal como ellos fueron originalmente formados, se denominan **primarios** o **hipogénicos**. En contraposición a éstos, aquellos que han sufrido modificaciones por causas dinámicas, se distinguen como deformados, y los que han sido alterados por los agentes superficiales como **secundarios** o **supergénicos**. En este sentido el estudio de los depósitos minerales comporta tres etapas consecutivas, a saber: su formación, su deformación por causas mecánicas y su alteración superficial y consiguiente enriquecimiento o empobrecimiento. No todos los yacimientos se encuentran en una etapa definida, pues más común es encontrarlos en estados de transición, parte de ellos siendo primaria y parte secundaria.

Los yacimientos **singenéticos** son aquellos que se han formado contemporáneamente con la roca encajante, y los **epigenéticos** aquellos que se formaron en una época posterior. Los primeros se refieren a depósitos de diferenciación magmática o a depósitos sedimentarios; los segundos, que componen la mayoría, son aquellos depositados en las grietas de las rocas o formados por fenómenos de metasomasis.

Emprenderé el estudio de los yacimientos siguiendo el orden anteriormente indicado, que me ha parecido el que mejor encaja en la lógica de estos asuntos. Por consiguiente, trataré primero todo lo relacionado con los depósitos primarios, siguiendo la clasificación establecida por el Profesor Emmons, para luego referirme a las trans-

formaciones mecánicas y químicas que éstos son susceptibles de sufrir, completando de esta manera el estudio con los depósitos de formados y secundarios.

Depósitos primarios.—Estos comprenden las siguientes clases:

- 1o.—Depósitos formados por segregación magmática.
 - 2o.—Filones de pegmatitas.
 - 3o.—Depósitos contacto-metamórficos.
 - 4o.—Depósitos de la zona profunda
 - 5o.—Depósitos de la zona media
 - 6o.—Depósitos de la zona superficial
 - 7o.—Depósitos superficiales formados por soluciones meteóricas.
 - 8o.—Depósitos sedimentarios.
- Formados por
soluciones
ascendentes

1o.—Depósitos de segregación magmática.—El magma es una solución (1) de minerales de composición uniforme en estado fundido, y formada por lo general a grandes profundidades. La segregación magmática es el proceso de separación de minerales de composición química diferentes contenidos en un magma.

Este proceso de separación ha sido objeto de diferentes teorías que no entro a comentar por ser una cuestión demasiado complicada. Los hechos primordiales generalmente aceptados por todos los autores se pueden resumir así:

Una masa de materias fundidas en estado de reposo tiende siempre a separarse en dos partes, la una básica y la otra ácida, con una zona intermedia de separación. Debido al enfriamiento la parte externa se contrae causando un sinnúmero de grietas y fracturas a través de las cuales ascienden materias sólidas fundidas de las partes bajas, o gases diversos provenientes de las zonas solidificadas. La mayoría de los magmas dan al enfriarse grandes cantidades de vapores acuosos y gases que decrecen la viscosidad y rebajan el punto de fusión. Cuando son expelidos estos gases llevan consigo muchos metales pesados como hierro, cobre, zinc, plomo o estaño, debido a que entre dichos gases existen compuestos tales como SiH_4 ,

(1) Que el magma es una solución está comprobado por diferentes hechos: la disminución del punto de solidificación mostrada por el orden de cristalización, y la disociación en electrolitos bien definidos,

SiF_4 , SiCl_4 , TiCl_4 , AlCl_3 , WF_6 , BCl_3 , etc. Los metales así llevados son depositados más tarde en la parte externa de las grietas por donde pueden circular los gases o en las paredes de las rocas adyacentes, dándose lugar en muchas ocasiones a la formación de fuentes magmáticas o juveniles por la condensación de los vapores de agua. Estas emanaciones gaseosas no únicamente depositan las sustancias minerales que llevan, en las paredes de las grietas, sino que en la mayor parte de las veces atacan las rocas que encuentran, modificando considerablemente su constitución y disolviendo algunas materias que ellas contienen. El carácter y la clase de minerales depositados por ese proceso dependen, en gran parte, de la temperatura y la presión dominantes.

Los magmas siendo soluciones deben comportarse como tales, siguiendo las leyes propias a las soluciones. Así, por el enfriamiento progresivo los minerales se van separando o cristalizando, siguiendo un orden de acuerdo con sus puntos de saturación. Como regla general, los minerales más básicos, tales como sulfuros y óxidos de hierro, magnesio o titanio, cristalizarán primero, y debido a que la separación continúa, la porción no solidificada va siendo cada vez más ácida, hasta que al fin los minerales silíceos cristalizan también. Puede, además, influir el contacto con las paredes frías, en donde los minerales menos solubles cristalizan, mientras los más solubles son llevados por las corrientes de convección hacia las partes aún líquidas, para llegar a cristalizar a su debido tiempo.

Presentación.—Los minerales de segregación magmática se presentan en rocas ígneas, y su ganga es cuarzo, feldespatos, piroxenos, olivina, mica, etc. Los metales encontrados en ellos son: hierro, níquel, titanio, cromo, platino, cobre, plata y oro; también se encuentran piedras preciosas como diamante, corindón, zafiro, topacio, etc.

Los minerales de segregación magmática están, generalmente entrelazados entre sí como los componentes de una roca ígnea. El tamaño de estos depósitos es muy variable; entre los de consideración, algunos yacimientos de magnetita, y los famosos de pirrotita de Sudbury, con níquel y cobre.

2o. Filones de pegmatitas.—Los gases desprendidos de las últimas porciones inconsolidadas de un magma atraviesan las grietas y depositan minerales, dando lugar a los llamados diques o filones de pegmatitas. Estos filones, que pueden ser de carácter ácido o básico, contienen los mismos constituyentes que el magma pero en proporciones diferentes, predominando casi siempre los productos residua-

les. Ciertos compuestos llamados **mineralizadores** facilitan y hacen posible la cristalización a bajas temperaturas (abajo de 500°) en esta clase de formaciones. Entre los mineralizadores, fluor y boro favorecen las pegmatitas ácidas, y cloro, fósforo y azufre, las básicas.

Presentación.—Se presentan en rocas ígneas profundas, y en algunas ocasiones en los márgenes de las rocas intrusivas. También se encuentran en rocas sedimentarias o esquistosas, caso en el cual siguen, por lo general, los planos de unión, aunque no son escasas las veces en que se les encuentra atravesando normalmente dichos planos. Los minerales que se encuentran en pegmatitas son los mismos que los de las rocas ígneas, pero en menor escala; cuarzo, feldespato y mica son los más comunes. Entre los metales se encuentran estaño, tungsteno, bismuto, torio, hierro, etc. También son fuente de la monazita y algunas gemas.

El tamaño de los filones es más variable, y en aquellos lugares en donde han atravesado esquistos se les encuentran tan delgados como una hoja de papel. Los cristales son comúnmente de un tamaño bastante grande y de forma tabular.

3o. Depósitos contactometamórficos.—Es un hecho bien conocido que cuando una masa ígnea atraviesa ciertas rocas, ejerce sobre ellas una acción que cambia considerablemente su composición y su estructura. Se cita, por ejemplo, areniscas que se transforman en cuarcita, caliza en mármol, y arcilla en pizarras compactas.

Las masas intrusivas sueltan soluciones más o menos activas que llevan consigo metales, los cuales pueden ser depositados dentro de la roca, a una distancia variable del contacto. Esta clase de depósitos es, pues, debida principalmente a un fenómeno de reemplazo, y puesto que son formados a altas temperaturas, sus minerales son casi siempre característicos. En una caliza se forman generalmente granate, wolastonita, epidota, diópsido, vesubiana, mientras en una roca aluminosa como arcilla o **shale** los más comunes son andalusita, biotita y silimanita. Los metales están distribuidos a todo lo largo del yacimiento muy irregularmente, encontrándose por lo general en forma de bolsas o capas, y en muchas ocasiones bastante lejos del contacto.

El fenómeno de reemplazo se explica de la siguiente manera: el magma original contiene muchas sustancias volátiles, entre las cuales los mineralizadores desempeñan el papel principal, pues di-

solviendo la mayoría de los metales, se desprenden durante el enfriamiento llevándoselos consigo; si estos gases encuentran en su travesía una roca suficientemente porosa, penetran dentro de ella provocando reacciones químicas, de las cuales resulta la precipitación de los metales y la combinación de la sílice, alúmina y hierro con la cal, u otra roca semejante, para formar silicatos diversos.

Se ha supuesto existir una influencia muy activa de las aguas meteóricas en esta clase de formaciones, pero la pugna existente entre los diversos científicos que se han ocupado en la cuestión, no permite aceptar aún una solución segura al respecto.

Presentación.—En rocas sedimentarias o metamorfoseadas cerca a los contactos con rocas intrusivas. Los depósitos son de forma irregular, generalmente distribuidos en masas o racimos a lo largo de la zona de metamorfismo. En ocasiones se hallan alteraciones en la roca ígnea intruída.

El mineral se compone de una mezcla de silicatos entrecruzados con óxidos y sulfuros de metales; entre éstos se encuentran hierro, cobre, zinc, tungsteno, y en algunos casos oro, plata y plomo; entre los no metálicos, grafito y corindón.

Los yacimientos contacto-metamórficos suelen clasificarse en los siguientes grupos:

- a). Depósitos de magnetita (E. U., México) (1).
- b). Depósitos de chalcopirita. Contienen: Chalcopirita, pirita, pirrotita, molibdenita y especularita. (E. U.)
- c) Depósitos de blenda y galena (E. U.)
- d) Depósitos de arsenopirita aurífera con pirrotita.
- e). Depósitos auríferos (E. U.)
- f). Depósitos de casiterita (Alasca, Finlandia).

4o. Depósitos de la zona profunda. Son productos magmáticos formados a grandes temperaturas y presiones dentro de grietas o fisuras profundas. Se pueden considerar como término medio entre pegmatitas y depósitos contacto-metamórficos, de los cuales se diferencian por encontrarse en fisuras bien definidas y a grande distancia de contactos con rocas intrusivas. Una característica de estos depósitos es la intensa alteración metasomática en los respaldos del filón, que da como resultado la transformación de la roca en un agregado mineral de granos gruesos.

(1) Estos ejemplos se refieren a los países en donde mejor se han estudiado los depósitos aludidos.

La profundidad a la cual se han formado los depósitos no ha sido posible calcularla con exactitud. Se cree generalmente que son posibles esta clase de formaciones de 1500 a 5000 metros bajo la superficie.

Presentación.—Se encuentran en rocas ígneas profundas que por lo general han sido fuertemente erodadas. Son más comunes en las formaciones antiguas que en las modernas. Los minerales son los mismos que en los depósitos contacto-metamórficos, pero el cuarzo se presenta en mayor abundancia. Los sulfuros alternan con los óxidos. Entre los metales se cuentan oro, estaño, hierro, zinc y cobre, y con menos frecuencia tungsteno y molibdeno. Los minerales no metálicos más comúnmente encontrados, son: piroxenos, anfíboles, granates, apatita, turmalina, feldespatos y micas.

Se distinguen estos depósitos de algunos otros en que la formación es, por lo general, bandeada, y los minerales presentan inclusiones líquidas y gaseosas.

Los filones que más parecen pertenecer a esta clase son los siguientes:

- a). Filones de casiterita, wolframita y molibdeno.
- b) Filones auríferos en esquistos cristalinos (E. U., Brasil, Alaska, Colombia).
- c) Depósitos de turmalina auro-cuprífera (E. U.)
- e) Filones de turmalina cobaltífera (Chile).

5o. **Depósitos de la zona media.**—Se han formado en profundidades intermedias por soluciones calientes que ascienden hacia la superficie, de tal manera que genéticamente son considerados como una transición entre los filones profundos y las formaciones superficiales. La profundidad a la cual se han formado es apreciada por Lindgren entre 1200 y 3600 metros. Su característica principal es la ausencia de minerales de alta temperatura.

Existen minerales de reemplazo pero en menor escala que en los filones de la zona profunda.

Las rocas a las cuales están relacionados estos filones son del tipo ácido o básico, aunque generalmente predomina un tipo intermedio como diorita o diorita porfirítica, o un tipo que se acerca más a los ácidos como granito, granodioritas, monzonitas, cuarzo pórfiro, etc.

Presentación.—En o cerca a rocas ígneas, y más comúnmente cerca a rocas intrusivas. Contienen por lo general una gran variedad de minerales, entre los cuales son de importancia cuarzo y carbona-

tos de diferentes composiciones. Los metales se encuentran en forma de sulfuros, arseniuros, sulfoarseniuros y sulfoantimoniuros, y están representados por oro, plata, cobre, plomo, zinc, arsénico, antimonio, y como secundarios, níquel, cobalto, bismuto, manganeso y tungsteno.

Esta clase de filones son casi siempre de forma tabular, aunque se encuentran también otras formas caprichosas. Son en ocasiones bandeados y la roca presenta en la mayoría de los casos alteraciones intensas; los compuestos feldespáticos y ferromagnesianos se transforman en sericita, y los carbonatos y piritas muestran silicificación acompañada de dolomitización.

Los tipos pertenecientes a estos filones se pueden clasificar en el siguiente orden:

- a) Filones de cuarzo aurífero tipo California (E. U., Australia, Nueva Escocia).
- b) Diversos yacimientos de reemplazo en cuarcitas, calizas y pórfiros, principalmente auríferos. (E. U.).
- c) Filones plombo-argentíferos que comprenden: filones de cuarzo, tetraedrita y galena: fil. de galena y siderita.
- d) Filones plombo-argentíferos con calcita, siderita y barita (Alemania, Bohemia).
- e). Filones de galena, pirita y cuarzo (E. U., Sajonia).
- f). Filones de Tungsteno (E. U.).
- g). Filones de plata nativa (E. U., Sajonia, Suecia).
- h). Depósitos de sulfuros debidos a reemplazo, que dan principalmente cobre. (Alemania, Tasmania, España, Chile, Islandia, E. U.)

6o. Depósitos de la zona superficial.—Son muy semejantes en su formación a los anteriores, pero su génesis ha tenido lugar en profundidades bastante superficiales, como se puede deducir por su relación con formaciones volcánicas. La presión y la temperatura son naturalmente pequeñas. Estos yacimientos constituyen una de las clases más interesantes por su riqueza, sobre todo en la explotación de oro y plata. También son notables los depósitos de cobre, mercurio, plomo y zinc.

Presentación.—En rocas ígneas y sedimentarias; algunos se presentan cerca a rocas intrusivas consolidadas a profundidades pequeñas. Son muy comunes en regiones de actividad ígnea reciente, principalmente en las formaciones terciarias de los Andes. La erosión en las rocas es casi insignificante.

Los minerales encontrados en estos depósitos son: sulfuros, tales como pirita, galena, chalcopirita, estibina y cinabrio, junto con teleruros, saleniuros y sulfosales complejas de antimonio y arsénico; también se encuentran arsenopirita, argentita y pirargirita. La ganga es principalmente cuarzo y calcita, pero en ocasiones dolomita, siderita, barita y fluorina son halladas. Los metales comprenden oro, plata, mercurio, antimonio, arsénico, plomo, tungsteno y zinc; cobre es de importancia en las formaciones zeolíticas de algunos países.

La forma más común que presentan estos depósitos es la tubular, aunque a menudo se hallan también en formas irregulares y caprichosas. Las bonanzas o enriquecimientos son comunes en algunas formaciones. También se hallan minerales de reemplazo y alteraciones, tales como sericitización y propilitización; un cambio en el carácter de la mineralización se muestra a veces cuando calcita es reemplazada por cuarzo o adulario.

Los filones que pertenecen a esta clase son los siguientes:

- a). Depósito de mercurio (E. U., España, Italia, Perú).
- b) Depósitos de estibina.
- c) Filones de cuarzo aurífero (E. U., Tasmania, Colombia).
- d). Filones de cuarzo, argentita y oro (E. U.)
- f) Filones de telururos de oro (E. U., Colombia).
- g) Filones de seleniuros de oro (E. U., Colombia).

7o. Depósitos superficiales formados por soluciones meteóricas.

—Los yacimientos pertenecientes a este grupo han sido depositados de soluciones frías o por lo menos no calentadas por intrusiones ígneas. Por lo tanto, el metamorfismo sufrido por las rocas atravesadas por dichas soluciones no tiene un carácter hidrotermal, y los cambios que han tenido lugar en ellas son característicos de la acción atmosférica. Las precipitaciones de minerales, por la misma razón, no son debidas a cambios bruscos de temperatura, sino casi exclusivamente a fenómenos químicos, en algunas ocasiones favorecidos por la presencia de materias orgánicas.

La precipitación de metales llevados en solución se puede realizar por diferentes procesos, muchos de los cuales son en extremo complicados. Pequeñas cantidades de sulfuros de plomo y zinc pueden ser disueltas por el ácido carbónico, dando lugar a la formación de los respectivos carbonatos y de ácido sulfhídrico; cuando las soluciones han subido cerca a la superficie y el anhídrido carbónico se puede desprender, los metales son precipitados en forma de sulfuros. El hierro disuelto en forma de sulfato o carbonato de las rocas que

lo contienen, puede ser precipitado en forma de sulfuros. El hierro disuelto en forma de sulfato o carbonato de las rocas que lo contienen, puede ser precipitado como óxido por aguas descendentes, dando lugar a la formación de pequeños filones de hematita. De un modo semejante se pueden formar depósitos de manganeso.

Presentación.—En rocas sedimentarias, dentro de cavidades, grietas o dislocaciones; algunos formados por metasomasis.

Los principales minerales encontrados son sulfuros de zinc, plomo, hierro y cobre, con sus productos de alteración, y óxidos de hierro y manganeso. La ganga puede ser calcita, dolomita, barita, etc.; también se encuentran talco, magnesita, cuarzo, fosfatos y nitratos.

Estos depósitos son principalmente importantes para plomo y zinc, algunos para hierro y manganeso, y muy pocos para cobre, uranio y vanadio.

Los de mayor importancia se encuentran en forma sedimentaria con planos de separación bien determinados, aunque existen también verdaderos filones a través de antiguos canales subterráneos. En la mayoría de los casos es difícil distinguir si el depósito es primario o secundario.

80. Depósitos sedimentarios.—Todas las rocas de la corteza terrestre contienen, aunque en porcentajes muy reducidos que no permitirían una explotación económica, minerales de gran utilidad. Debido a la acción atmosférica, la erosión y el acarreo de las aguas y demás agentes meteóricos, aquellos minerales pueden llegar a formar depósitos de consideración. Una diorita de composición normal contiene feldespatos, cuarzo, moscovita, biotita, magnetita, augita y algunos otros minerales secundarios, como titanita, apatita y pirita; la acción atmosférica tiende a descomponer la roca, formando caolín, cuarzo y limonita y en ocasiones especiales wad y bauxita. El agua subterránea o de lluvia, que contiene bastante anhídrido carbónico, disuelve con facilidad los alcalinos y alcalinotérreos en forma de carbonatos o bicarbonatos; los sulfuros quedan también disueltos en forma de sulfatos, mientras el hierro, el aluminio, la sílice y los compuestos de fósforo son escasamente disueltos. Los elementos disueltos son acarreados por las aguas a los lechos de los lagos o mares para ser depositados allí, merced a causas diversas. Es el proceso de formación de tantos depósitos que se explotan hoy día con provecho y utilidad, como calcáreos, dolomías, depósitos de hierro sedimentario, yeso, fosfatos, etc.

Los minerales pesados que no pueden ser disueltos, sobre todo aquellos que resisten la descomposición superficial, tales como platino, oro, magnetita y casiterita, son llevados por la corriente en suspensión o por acarreo, pero se precipitan poco después por gravedad en el lecho de los ríos, formando placeres.

Los depósitos sedimentarios pueden dividirse en dos grupos: concentrados mecánicamente y concentrados químicamente. Los primeros comprenden los conglomerados de minerales de hierro y los placeres de oro, platino, estaño, hierro, etc.; pueden ser de formación marina, lacustre o fluvial, según el lugar en donde se han depositado. Los segundos son el resultado de una precipitación por evaporación, reducción, oxidación o influencias orgánicas, y como ejemplos más característicos se pueden mencionar: depósitos de sales, carbón, yeso, fosfatos, algunos minerales de hierro y de manganeso.

Algunos depósitos de esta clase tienen la estructura característica de las rocas sedimentarias; en otros las partículas constituyentes son redondeadas debido al desgaste, y no son escasos aquellos que presentan una forma oolítica o cristalina.

La hulla es el resultado de un proceso de carbonización lenta llevado a cabo en sitios pantanosos y merced al cual las sustancias vegetales han perdido el agua, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, con la consiguiente concentración en carbono. Los yacimientos de hulla se presentan en forma de mantos o grandes capas que por lo general han sido fuertemente plegadas.

Por último mencionaré los yacimiento de petróleo que pueden ser considerados como sedimentarios, ya que ellos se han formado dentro de estratos porosos, al mismo tiempo que éstos y en condiciones especiales de precipitación. La teoría más aceptada hoy día supone que el petróleo se ha formado de sustancias orgánicas en dos etapas diferentes; en la primera predomina un proceso bioquímico, y en la segunda un proceso dinamo-químico. La materia orgánica de la cual resultó más tarde el petróleo fué depositada en los estuarios o cerca a la costa de los lagos o mares, y debido a la acción de algunas bacterias aneróbicas se transformó su constitución química, pasando la celulosa a otras sustancias diferentes, y quedando un residuo de grasas y ceras. Por encontrarse las acumulaciones de petróleo íntimamente ligadas a estratos marinos se ha creído que el agua salada es indispensable para su formación, pero, a pesar de ello, en muchos lugares se han encontrado restos de animales de agua dulce en estratos petrolíferos.