

**CURSO DE YACIMIENTOS  
MINERALES METÁLICOS  
TIPOS GENÉTICOS**

**LIC. JOSÉ ARIOS IZNAGA**

ESTE LIBRO,  
EN TUS MANOS DE ESTUDIANTE,  
ES INSTRUMENTO DE TRABAJO  
PARA CONSTRUIR TU EDUCACIÓN.  
CUÍDALO,  
PARA QUE SIRVA TAMBIÉN  
A LOS COMPAÑEROS QUE TE SIGAN.

Edición: Dra. Aída Arroyo  
Diseño: Miguel Toledo  
Ilustración: Lic. José Ariosa Iznaga

EDITORIAL PUEBLO Y EDUCACIÓN  
Calle 15 # 604, entre B y C,  
Plaza de la Revolución, Ciudad de La Habana

## PRÓLOGO

Las materias primas minerales —metálicas, no metálicas y combustibles—, constituyen elementos fundamentales en la economía de muchos países.

Aunque la economía nacional de Cuba tiene su fundamento en la producción agropecuaria, el subsuelo de nuestro país atesora riquezas minerales que constituyen, y constituirán cada vez más, una importante fuente de riquezas para nuestro pueblo, bien como material exportable o por su utilización en las distintas ramas y sectores de la economía.

Para poder hacer una utilización eficiente de estos recursos no renovables, es necesario la formación de cuadros técnicos y científicos capaces de llevar adelante esta tarea con criterios racionales lo más económicamente posible y sobre una base científica. Estos cuadros deben formarse, ante todo, en los centros de enseñanza superior del país.

Este libro destinado a los estudiantes de la enseñanza superior, específicamente a los que cursan la carrera de Ingeniería geológica, en la especialización de Geología y exploración de los yacimientos minerales sólidos —metálicos y no metálicos—, también podrá servir a los estudiantes de otras especialidades geológicas, así como a los estudiantes de Geofísica e Ingeniería de minas.

El texto está organizado en relación con el programa de la asignatura Yacimientos minerales —Tipos genéticos de yacimientos industriales— y ha sido confeccionado, de forma tal, que pueda ser utilizado como libro básico para el estudio de la asignatura.

Al redactarlo, hemos consultado, fundamentalmente, los libros que se utilizan en la escuela superior soviética, en esta especialidad y, básicamente, los utilizados por el Instituto de Minas "Plejánov", de Leningrado; también consultamos y utilizamos otras obras, entre las cuales se destacan, con singular relevancia, las de autores cubanos y soviéticos sobre áreas mineralizadas y yacimientos de Cuba. Todas ellas aparecen en la bibliografía general, al final del libro.

La labor del autor ha consistido en unificar y presentar, en un solo texto, el trabajo realizado por distintos especialistas, de acuerdo con el programa de la asignatura y de la forma más adecuada a la didáctica de esta disciplina, sobre la base de la experiencia adquirida durante varios años como profesor de la escuela de Ingeniería geológica, hoy filial minero metalúrgica de la Universidad de Oriente.

Este libro se refiere a los yacimientos de minerales metálicos. Posteriormente se confeccionará el que corresponde a los yacimientos



de minerales no metálicos. Esperamos que sea sometido a la crítica de los geólogos y especialistas de esta ciencia, para que en los próximos años, cuando lo revisemos y ampliemos, tengamos en nuestro poder, un valioso aporte de sugerencias.

José Ariosa Iznaga

## INTRODUCCIÓN

Denominamos yacimientos minerales a las acumulaciones naturales de minerales en la corteza terrestre, en forma de uno o varios cuerpos minerales o meníferos agrupados, los cuales, en este estado, pueden ser objeto de extracción y explotación industriales, en la actualidad o en un futuro inmediato.

De esta definición general podemos inferir que los yacimientos minerales, entre otros aspectos, pueden dividirse en: **industriales** y **no industriales**. Esta división estará en función de las posibilidades tecnológicas para la extracción de esos minerales, así como su posterior utilización en la industria. Esto hace que el concepto de yacimiento mineral industrial sea "variable".

Por situar un solo ejemplo diremos que, hasta hace unos pocos años, sólo se explotaban los yacimientos de uranio cuyas menas fueran muy ricas o tuvieran una elevada ley. Por la importancia estratégica de este metal y el desarrollo de las tecnologías de beneficio y recuperación, muchos yacimientos que antes no se consideraban industriales por tener menas de baja ley, hoy son considerados como explotables.

¿Qué requisitos debe reunir un yacimiento para que pueda ser considerado industrial?

Entre otros, enumeraremos los siguientes:

1. La cantidad de menas, determinada por las dimensiones de los cuerpos y expresada por el tonelaje de las reservas minerales y componentes acompañantes, tiene que garantizar que la explotación del yacimiento sea amortizable durante un plazo mínimo de tiempo, para que justifique la inversión económica.
2. La calidad del mineral, expresada en su ley, así como las impurezas-dañinas y no dañinas, deben satisfacer los requisitos de la industria hacia la cual van a ser destinados. Esto es muy importante, puesto que, en ocasiones, las menas de algunos yacimientos poseen componentes valiosos, que si no son bien controlados, pueden irse con el componente fundamental o principal, y perder así, el país, cuantiosos recursos, al no aprovecharlos como otro metal.

En otros casos, las impurezas pueden ser la causa de que la industria rechace el mineral, puesto que, al no poseer éste los requisitos tecnológicos requeridos, disminuye la eficiencia industrial medida a través del recobrado, que eleva los

costos de producción, en razón a obstrucciones en el flujo tecnológico.

3. La tecnología para el tratamiento de las menas debe fundamentarse en la práctica y haber demostrado la posibilidad técnica, así como la utilidad económica, en la extracción de los componentes útiles.
4. Las condiciones minero-técnicas para la explotación del yacimiento deben cumplimentarse de tal forma, que no permitan que eleven los costos de producción del metal, como consecuencia de lo complicado y costoso de la extracción de las menas y su posterior beneficio.
5. El emplazamiento o ubicación físico-económica del yacimiento, y la economía de dicho mineral (metal) tienen que satisfacer determinadas condiciones mínimas en relación con la posibilidad y utilidad económica de su explotación industrial (demanda del mineral, posición geográfica, vías de comunicación, electrificación de la zona, fuerza de trabajo, etcétera).

En la actualidad, si el yacimiento no reúne uno o varios de los requisitos señalados, no podrá ser considerado como yacimiento industrial. Sin embargo, como expresamos anteriormente, muchos yacimientos considerados no industriales están perdiendo esta categoría a causa de los rápidos y continuos avances de la tecnología y la ciencia modernas, como consecuencia de la revolución, que en este sentido, se produce en el mundo contemporáneo.

Al igual que el concepto de yacimiento industrial es variable, lo es también el concepto de mena, que son aquellos minerales a partir de los cuales se pueden obtener metales y otros componentes, o utilizarse directamente en la industria, con los niveles actuales de desarrollo tecnológico y rentables económicamente.

En consecuencia, por ejemplo, las menas de cobre de muy baja ley pueden explotarse en países de elevado desarrollo industrial y tecnológico por el beneficio y concentración que pueden realizar pero, en cambio, a veces las menas de igual ley, no pueden ser consideradas como tales, en otros países de menor desarrollo o que no posean la tecnología adecuada.

Los metales han desempeñado un papel significativo en el desarrollo de la humanidad. El hombre se valió de ellos, en la antigüedad, para fabricar diversos utensilios con los cuales, entre otras cosas, podía obtener alimento, vestido y también existencia social.

Esto se ha hecho evidente, gracias a los estudios arqueológicos realizados en las áreas de asentamiento de las antiguas culturas en China, Egipto, India, Irán, Irak y otros muchos lugares.

Como resultado del trabajo, el hombre fue ampliando su conocimiento sobre la naturaleza. Comenzó a unir varios metales entre sí (aleaciones), para obtener compuestos con nuevas propiedades necesarias para la producción, en primer lugar, así como para otras actividades humanas.

En la actualidad, el consumo de metales en la economía mundial es elevado; las cantidades de hierro, cobre, níquel, cobalto, plomo, cinc, manganeso, cromo, aluminio, uranio, etc., que se consumen en diversos procesos productivos, son extraordinariamente altas. Los metales están presentes en los instrumentos y objetos de trabajo, con los cuales el hombre crea la base material de su existencia.

Más de sesenta metales y una gran cantidad de aleaciones son utilizados en la industria contemporánea. De acuerdo con su utilización industrial, los metales se pueden clasificar de la siguiente forma:

1. *Grupo de los metales ferrosos y de las aleaciones*  
Fe, Mn, Cr, V, Ti, Co, Ni, Mo y W.
2. *Grupo de los metales no ferrosos*  
Cu, Zn, Pb, Sn, As, Sb, Bi y Hg.
3. *Grupo de los metales ligeros*  
Al y Mg.
4. *Grupo de los metales preciosos*  
Au, Ag, metales del grupo del platino (Pt, Ir, Pa, Rd, Ru y Os).
5. *Grupo de los metales radiactivos*  
Rd, Ra, Th y U.
6. *Grupo de los metales raros y elementos de las tierras raras*  
Zr, Nb, Ta, Ge, Ga, In, Cd, Tl, Li, Rb, Cs, Be; además Hf, Re, Sc, Y, las tierras raras (La, Ce, Tl, etc.) y finalmente, Se y Te.

## **HIERRO**

### **GENERALIDADES**

Los primeros datos sobre el descubrimiento del hierro se encuentran en los papiros egipcios aproximadamente 4 000 a.n.e.

Los siglos VIII y IX a.n.e. indican el comienzo de la edad de hierro, que sustituyó a la edad de bronce. Desde esa época y hasta el presente, el hierro ha sido uno de los metales de mayor utilización en las civilizaciones.

En el siglo XX se comienzan a fundir aceros especiales, y, al mismo tiempo se desarrollan, vertiginosamente, productos artificiales y compuestos naturales especiales, con el propósito de sustituir al hierro y al acero. Sin embargo, estos últimos desempeñan y desempeñarán, en los próximos años, un importantísimo papel en la economía mundial.

De los minerales de hierro se obtienen cuatro productos básicos fundamentales:

- Hierro fundido (2,5 a 4,0% de C)
- Acero (1,5 a 0,2% de C)
- Hierro de bajo carbono (0,2 a 0,04% de C)
- Arrabio acerado (2,5 a 1,5% de C)

A partir, sobre todo, del hierro fundido y del acero, se preparan considerables combinaciones al añadirles determinadas cantidades de otros metales, para obtener productos con determinadas propiedades tecnológicas.

La utilización industrial del hierro queda, entonces, claramente establecida: la industria siderúrgica y, a partir de ella, las de construcción de maquinaria, transporte, y otras más.

La producción mundial de mineral de hierro en el año 1973, fue de 820 millones de toneladas y corresponden las mayores producciones a los siguientes países:

PAÍSES	MILLONES DE TONELADAS
URSS	216
EUA	89
Australia	75
Francia	54,75
Brasil	50

Mining Annual Review, Canadá, 1974.

La producción de acero durante ese mismo año, se elevó a 695,8 millones de toneladas y se destacan las producciones de URSS, EUA, Japón, RFA y Gran Bretaña.

Entre los cinco principales países productores de acero, se encuentran tres —Japón, RFA y Gran Bretaña— cuya producción de hierro es pequeña, lo que indica su dependencia para estas producciones, de las importaciones que realizan, principalmente, de países subdesarrollados.

Los países de América Latina —Brasil, en primer lugar, y Venezuela— y África —Liberia— grandes exportadores de este mineral son las principales áreas de operación de los países capitalistas.

Aunque las leyes de las menas de Fe son variables, y los contenidos mínimos industriales dependen del desarrollo de las tecnologías requeridas para el procesamiento de estos minerales; se considera que el contenido mínimo industrial de Fe debe ser de 25 a 30%. Estos porcentajes permiten un proceso de enriquecimiento posterior, para elevar los contenidos hasta 50 y 60% para pasarlos después a un proceso de **sinterización o pelletización** —ambos procesos de aglomeración del producto terminado—, con el objetivo de hacer más eficiente y económica su posterior fundición en los altos hornos.

En las menas de Fe es necesario controlar, muy de cerca, su contenido de S, As y P, puesto que estos elementos constituyen impurezas dañinas. Para su utilización industrial, las menas de Fe no deben poseer más de 0,25% de S, ni más de 0,1 ó 0,2% de P, ni más de 0,05 a 0,07% de As.

Unido a estas impurezas dañinas aparecen otras consideradas valiosas, como: Mn, Cr, V y Ni.

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El hierro está ubicado en el octavo grupo del cuarto período del sistema periódico de los elementos. Su número atómico es 26 y su peso atómico es 55,85.

En la naturaleza se conocen cuatro isótopos del Fe:

ISÓTOPOS	%
Fe <sup>54</sup> .....	5,84
Fe <sup>56</sup> .....	91,68
Fe <sup>57</sup> .....	2,17
Fe <sup>58</sup> .....	0,31

El Fe es el elemento principal de un grupo que se caracterizan por poseer propiedades geoquímicas muy parecidas, por ejemplo, la valencia variable, relativamente fácil. Esta transformación de una valencia en otra es un fenómeno geoquímico de gran importancia.

La familia del Fe está integrada por: Fe, Ti, V, Cr, Mn, Co y Ni.

Esta semejanza geoquímica se explica por el hecho de que, a partir de un átomo hacia el otro que le sigue en el sistema periódico, se observa el fenómeno de la finalización de la construcción de las órbitas electrónicas en una envoltura atómica más profunda —M—; mientras que la envoltura exterior —N—, determinante de las propiedades químicas de los elementos de un grupo dado, se mantiene igual.

Los elementos de la familia del Fe poseen radios iónicos muy parecidos; el radio del Fe divalente es de 0,80 Å y el del Fe trivalente, equivale a 0,67 Å. El contenido de Fe aumenta en las rocas ultrabásicas:

ROCAS	%
Condritas	25,00
Rocas ultrabásicas	9,85
Rocas básicas	8,56
Rocas medias	5,85
Rocas ácidas	2,70
Rocas sedimentarias	3,33

El contenido de Fe en la corteza terrestre es de 4,65%; por tanto, es uno de los elementos más abundantes. En efecto, sólo el oxígeno, silicio y aluminio se encuentran en mayores cantidades.

La masa fundamental del hierro se desprende de las fusiones magmáticas, pasando a la fase primera y principal de la cristalización; de esta manera, el contenido de Fe disminuye considerablemente en los estadíos posteriores.

No obstante, se pueden formar enormes yacimientos de Fe de tipo postmagmático, principalmente de contacto metasomático y en menor grado, hidrotermales. Se supone que esto sea posible como resultado de una migración del Fe, en forma de combinaciones volátiles o en forma de aniones complejos.

En condiciones endógenas, el Fe está en forma divalente; sin embargo, en la superficie de la Tierra esta valencia cambia. Se produce el fenómeno de oxidación al pasar el Fe divalente a trivalente; en este proceso los factores decisivos son el oxígeno, el gas carbónico, el agua y la materia orgánica —viva y muerta.

Durante el proceso de desintegración de los silicatos formadores de rocas, el Fe divalente pasa a la solución en forma de bicarbonato; por ser una base fuerte, el hierro es retenido en la solución por ácidos débiles disueltos en ella, incluido el ácido carbónico.

El  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , se precipita a partir de soluciones casi neutras; sin embargo el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  es una base inestable, lo que provoca que en soluciones ácidas, a pH 3, se desprenda. De esta manera y en condiciones favorables, pueden formarse enormes yacimientos sedimentarios de hierro en mares, lagos y pantanos.

También, el Fe puede migrar en forma de sulfato, combinaciones húmicas, soluciones coloidales y suspensiones mecánicas. El  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , forma con facilidad soluciones coloidales; de este modo el hierro es transportado al mar, como sol de hidróxido férrico, o como iones de hierro ferroso. En el primer caso en presencia de oxígeno, y en el segundo, en su ausencia, con la presencia simultánea de  $\text{CO}_2$ .

Es decir que tanto en el ciclo mayor —endógeno— como en el menor —exógeno—, el hierro tiene un fuerte movimiento, lo cual hace que esta característica geoquímica determine la presencia de sus minerales en casi todos los tipos genéticos de yacimientos.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

En consonancia con el elevado contenido de hierro en la corteza terrestre, hay una gran cantidad de minerales, más de ciento setenta, sin incluir a aquellos que contienen Fe en forma de mezcla isomórfica.

El grupo de los minerales mencionados está integrado por sulfuros, óxidos, sulfatos, carbonatos, etc. Sin embargo, en la industria se utilizan sólo una pequeña parte de ellos.

Las principales menas de hierro son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,4
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	70,0
Göethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	48-63
Limonita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	48-63
Shamosita y turingita	hidrosilicatos	27-38
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48,3
Cuarcitas ferruginosas (jaspilitas, taconitas, itabiritas)		

De todas estas menas, las de más perspectivas son las cuarcitas ferruginosas; puesto que existen actualmente, determinadas tecnologías para el enriquecimiento de estas menas, que permiten concentrar hasta un 65% de hierro, con porcentajes relativamente bajos de sílice.

Las reservas mundiales de hierro son enormes, sobre todo, si incluimos en ellas, las de cuarcitas ferruginosas.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Como ya señalamos, las condiciones de concentración del Fe son muy diversas y prácticamente abarcan todos los tipos genéticos de la clasificación de los yacimientos minerales. No obstante esto, el peso específico en la extracción de menas se inclina decisivamente hacia los tipos exógenos sobre los endógenos; aunque si incluimos dentro de éstos a los metamorfogénicos se invierte completamente el cuadro.



Los principales tipos genéticos de yacimientos industriales de hierro son:

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Dentro de los yacimientos magmáticos el tipo principal es el **histeromagmático**, el cual se puede subdividir en:

#### *Formación mineral apatito-magnetita*

Esta formación mineral está asociada con sienitas y sienodioritas. En estos yacimientos es característico el enriquecimiento del apatito y la magnetita, con la hematita, fluorita y la mica. El contenido de Fe se eleva de 55 a 70% y el de P oscila entre 2 y 4%. En general, los cuerpos tienen forma de diques y lentes; estos yacimientos constituyen la fuente principal de las menas de Fe de Suecia, representado en los grandes yacimientos de Kiruna, Kirunavara-Luossavaara y Gellivare. En la URSS estos yacimientos se encuentran en Labiashe, en los Urales.

#### *Formación mineral magnetita-titanio*

Son masas en forma de *stocks*<sup>1</sup> y depósitos de filones de magnetita impregnada en titanio, yacientes en rocas básicas y ultrabásicas.

El contenido de Fe oscila entre 50 y 55%; el de Ti puede llegar hasta 8 y 12% y contiene además V, 0,5 a 1% y, a veces, algún contenido no importante de Cu y Pt.

Estos yacimientos se encuentran en varias regiones que poseen enormes reservas: en los Urales orientales, Kusinks Kachtanar y Pierbouralsk, en la URSS; Taberg, en Suecia; Minnesota, en EUA; Lac-Tio, en Canadá; en Tanzania y África del Sur; también en África y en India.

Para concluir, podemos añadir que los yacimientos histeromagmáticos aportan el 5% de la producción mundial de mineral de Fe.

<sup>1</sup> A través de todo el texto, se utilizará la palabra *stock* para denominar las bolsas de gran dimensión y estructura isométrica definida. (N. del E.)

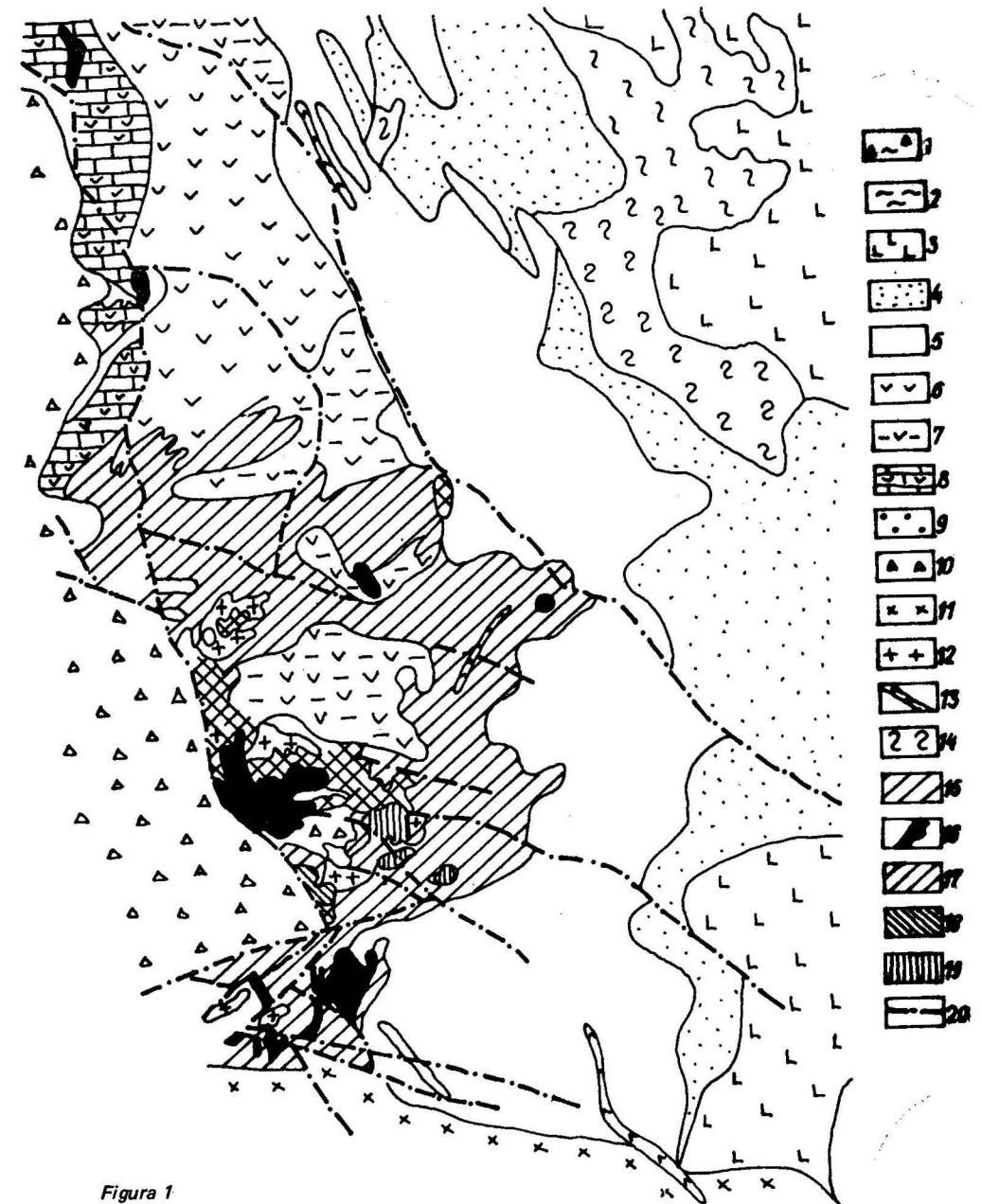


Figura 1

Mapa geológico esquemático del yacimiento Blagodat, URSS

(B. Aleshin, Y. Glasov, E. Klevtsov y A. Purkin)

1. Depósitos cuaternarios 2. Corteza de intemperismo mesozoica 3 y 4. Parte superior de la formación Turinsk 5 al 10. Parte inferior de la formación Turinsk 11. Sienitas biotíticas, piroxénicas, hornbléndicas 12 al 14. Formación filoneana 15. Skarns granático, piroxeno-granático, epidoto-granático y rocas skarnizadas 16 al 19. Menas (16-magnetíticas, 17 granato-magnetíticas, 18 ortoclaso-magnetíticas, 19 Skarn magnetito-granático) 20. Dislocaciones tectónicas.

## 2. YACIMIENTOS METASOMÁTICO DE CONTACTO (SKARN)<sup>1</sup>

Los yacimientos de este tipo están relacionados con granitoides moderadamente ácidos o de composición media, que han intruido series de rocas carbonatadas o efusivo-sedimentarias.

Los cuerpos minerales tienen la forma de bolsas y lentes, los que se localizan, generalmente, cerca del contacto de la roca intrusiva con la masa invadida por la intrusión, con más frecuencia en la zona del exocontacto. La mineralización fundamental es magnetita, martita, oligisto primario pirita y calcopirita; junto a éstos se encuentran los minerales de *skarn*, como piroxenos, calcita, granate, epidota y otros.

El contenido de Fe en las menas oscila entre 20 y 70% (generalmente 40 y 50%), con más de 1 y 2% de S y algo de P.

Yacimientos de este tipo se localizan en la URSS, en Magnitnaya, Blagodatskiy y Vysokaya, en los Urales; Dashkezan en la RSS de Azerbaiján; Banat, en Rumania; Mount Iron y Iron Springs, en EUA; Rif, en Marruecos; así como otros en Italia, Japón y la República Popular China.

En Cuba este tipo genético se encuentra, principalmente, en la provincia de Oriente, yacimiento de Santiago; así como en la provincia de Camagüey, Magarabomba; aunque con menos importancia económica.

## \* 3. YACIMIENTOS HIDROTHERMALES

Aunque este tipo genético no es característico del hierro y no posee importancia industrial, se reconocen algunas formaciones minerales:

### *Formación de yacimientos de magnetita*

Esta formación mineral está asociada con *trapps*, de altas temperaturas, cerca de la superficie. Por ejemplo, los yacimientos de Angará, Siberia en la URSS.

<sup>1</sup> Minerales de ganga silicatos asociados al hierro magnético de Suecia. Se encuentran en rocas arcaicas y han sido formados por sustitución de los carbonatos por la acción de soluciones calientes. El término se ha hecho extensivo a depósitos análogos en todas partes del mundo. (N. del E.)

### *Formación de yacimientos de temperaturas medias*

Son menas sideríticas, dentro de rocas carbonatadas. Esta formación está representada típicamente en Siegerland, en RFA. El contenido de Fe, oscila entre 30 y 40%. La formación de yacimientos de siderita por reemplazamiento metasomático, se incluye dentro de este tipo genético.

Dentro de él, se reconocen:

- Yacimientos fuertemente oxidados de hematitas y limonitas, ricas en la superficie. En la profundidad se localizan la siderita, algo de cobre así como barita y fluorita. Por ejemplo, el yacimiento de Bilbao, en España, con un contenido entre 48 y 52% de Fe; 6 y 9% de Si, un poco de CaO en la superficie; Mn entre 0,5 y 1,3%, y cantidades insignificantes de S y P.
- Yacimientos poco oxidados, con algo de hematita y limonita en la superficie, con psilomelano, siderita y algunos sulfuros (mispiquel, pirita, calcopirita, galena, cinabrio, rejalgar, etcétera).

El contenido de Fe oscila entre 35 y 36%. Ejemplo típico es el yacimiento Eisenerz, en Austria.

## 4. FORMACIÓN DE PLACERES DE MAGNETITA-ILMENITA

Estas formaciones son aluviones marinos modernos, que no tienen gran importancia económica. Se encuentran en Senegal, Japón, Italia y en el mar Negro, en la URSS.

## \* 5. "SOMBREROS DE HIERRO"

Estos yacimientos de Fe se han formado como resultado de la oxidación de las partes superficiales de los cuerpos sulfurados.

Este tipo genético se encuentra en Cuba, principalmente en la zona más occidental de la isla, en Arroyos de Mantua, provincia de Pinar del Río; así como en la parte central, en la provincia de Las Villas, en la zona de Carlota-Guachinango.

Se localizan también en otros muchos países por ejemplo en URSS, Yugoslavia, etc.; aunque poseen poca importancia económica.

## 6. YACIMIENTOS RESIDUALES DE LATERITAS FERRUGINOSAS

Estos yacimientos están relacionados genética y espacialmente con rocas ultrabásicas, a partir de las cuales se han formado, como resultado de los procesos de meteorización química, en condiciones favorables de clima y relieve.

Los yacimientos de este tipo tienen un contenido de Fe que oscila entre 40 y 50%; además, tienen determinado porcentaje de Mn, Cr, Ni y Co, V. De ellos se obtiene entre el 5 y 10% de la producción mundial de hierro y se localizan en la región sur de los Urales (Elizabetinsk y otros); así como en Cuba, Indonesia, Filipinas y la República de Guinea, en África.

En Cuba se localizan enormes yacimientos de este tipo, fundamentalmente en las zonas de Nicaro, Pinares de Mayarí, Moa y Punta Gorda, todos en la costa norte de la provincia de Oriente. Por su contenido de Ni son menas industriales de este metal y constituyen la materia prima para el desarrollo industrial de la región minera del norte de Oriente. En un futuro serán la base fundamental de la siderurgia cubana.

## 7. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

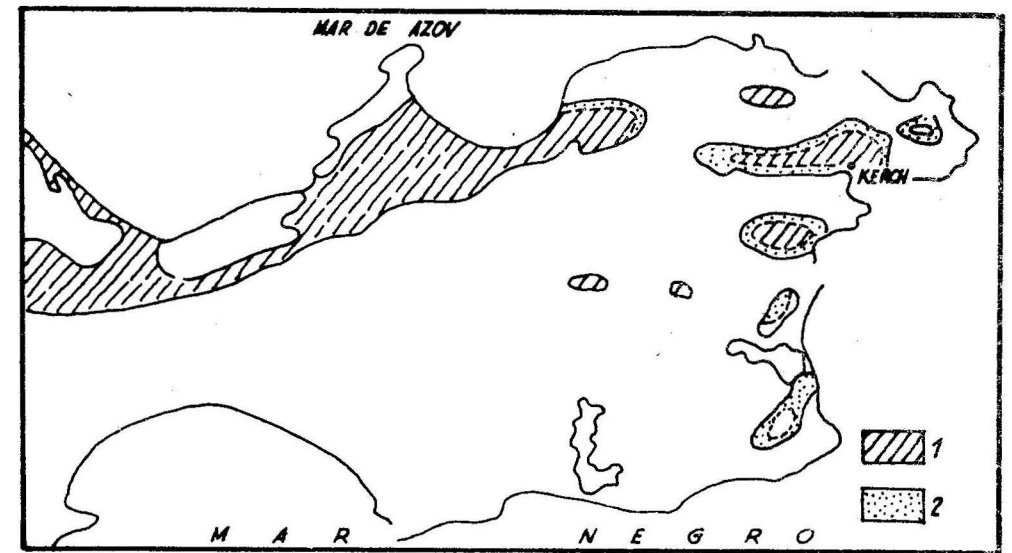
Los yacimientos de este tipo son cuencas y capas de menas oolíticas de hematita-goethita-shamosita, confinadas a facies sedimentarias de tipo marino, cerca de la costa y también a facies efusivo-sedimentarias.

Se reconocen tres subtipos:

### Subtipo hematítico

Está representado típicamente por el yacimiento Clinton, en EUA. La mineralización es de oligisto, siderita, calcita y clorita. Se desarrollan en series arcillosas con conglomerados en los cuales está presente la estratificación cruzada; a veces las menas están asociadas con calizas. Las menas poseen entre 35 y 50% de Fe, y sílice entre 8 y 18%.

Estos yacimientos pueden tener enormes dimensiones como el yacimiento Clinton, que se extiende desde Alabama hasta Nueva York y produce la décima parte del hierro de EUA.



(a)

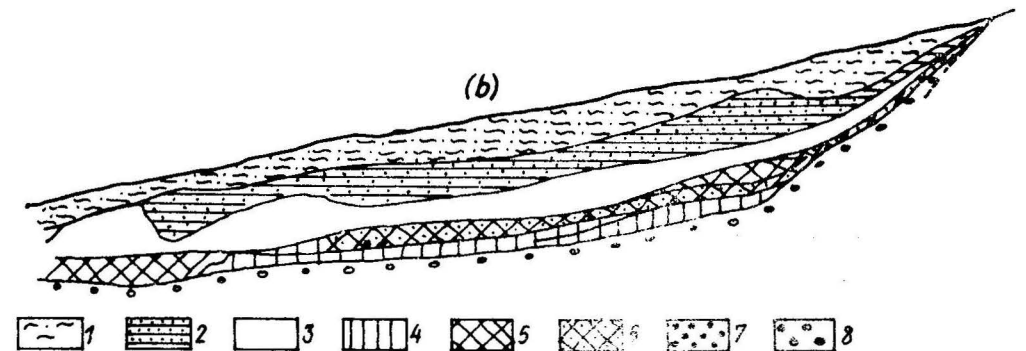


Figura 2

A. Esquema de la distribución de la menajeración en la península de Kerch

(Y. Yur, Y. Lebedev, O. Kirichenko)

1. Áreas de distribución de las menas "color tabaco" 2. Áreas de distribución de las menas "marrones".

B. Perfil geológico transversal de Kamish-Burusk región de Kerch.

(Y. Yur, Y. Lebedev, O. Kirichenko)

1. Areniscas arcillosas calcáreas 2. Arcillas arenosas 3. Arcillas 4. Menas de "color tabaco" 5. Menas de color "marrón" 6. Menas tipo "huevo de caviar" 7. Arcillas arenosas, arenas arcillosas, arenas arcillosas con abundancia de valvas de moluscos 8. Conchas de moluscos, sideritizadas en el techo.



#### Subtipo limonítico

Este subtipo está representado en la región de Lorena en Francia; así como en el área que corresponde a Luxemburgo y Bélgica. La mineralización es de goethita, oligisto, magnetita, siderita y calcita. El contenido de Fe es variable, pero casi siempre inferior al 40%. En Lorena, por ejemplo, oscila entre 28 y 41%.

#### Subtipo vulcano-sedimentario

Los yacimientos de este subtipo están representados por LanhDill en RDA. El mineral es oligisto, su estructura es colomórfica y no oolítica, como en los casos anteriores.

El vulcanismo asociado a este subtipo es de carácter geosinclinal: queratófidos y leptitas —rocas volcánicas ácidas o tufas recrystalizadas, como en Suecia— y espilitas en almohadas. El magma inicial era muy rico en agua y sodio.

El tipo genético sedimentario aporta entre 25 y 30% de la producción mundial de hierro. Yacimientos importantes de este tipo genético sedimentario se localizan por ejemplo en Kerch, en la URSS.

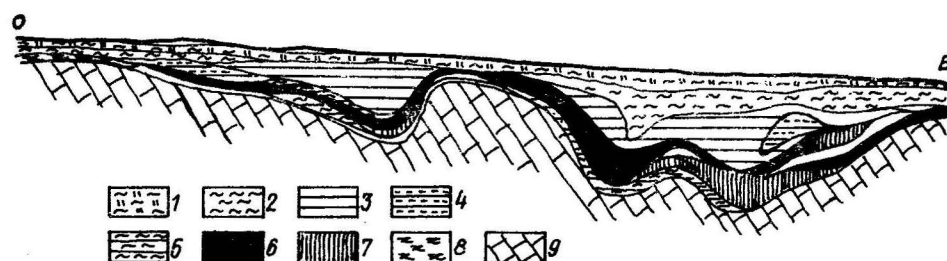
### 8. YACIMIENTOS DE INFILTRACIÓN

Son menas oolíticas de siderita (esferosiderita) y limonita; yacimientos de este tipo son: Alapaevsk, en los Urales septentrionales, y Egrimont en Gran Bretaña. Su importancia industrial no es significativa.

Figura 3

Perfil geológico del yacimiento Alapaevsk, URSS  
(B. Gruzdev)

1. Suelo arcilloso 2. Depósitos color turquesa 3. Depósitos color blanco 4. Depósitos blanco-ferruginosos-pardos 5. Depósitos blanco-verdosos 6. Menas ricas 7. Menas pobres 8. Corteza de intemperismo de rocas paleozoicas, arcillas del bloque yacente. 9. Calizas



### 9. YACIMIENTOS METAMORFOGÉNICOS

Los yacimientos de este tipo genético, tienen una enorme importancia puesto que aportan el 60% del total del mineral de Fe que se produce en el mundo. Todos los grandes yacimientos de este tipo son Precámbricos (Proterozoico) y están formados por las llamadas **cuarcitas ferruginosas** y asociadas a ellas, menas ricas en magnetita, hematita y magnetita.

Las reservas de cuarcitas ferruginosas son enormes, y su contenido promedio de Fe oscila entre 25 y 40%; los yacimientos de este tipo contienen además entre 0,02 y 0,25% de P y entre 7 y 12% de sílice.

Las cuarcitas ferruginosas son equivalentes a las taconitas, itabiritas, jaspilitas ferríferas, yacimientos de hierro estratificados (*banded iron ores*), etc. La interpretación genética de estos yacimientos está definida como el resultado de cuatro etapas:

- Concentración sedimentaria por precipitación química **sin-genética**, como resultado del aporte de Fe y Si desde un continente lateritizado con relieve favorable.
- Metamorfismo, recrystalización en cuarcitas y formación de ciertos silicatos.
- Deformaciones tectónicas; a veces fallas y zonas de brechas.
- Rejuvenecimiento morfológico.

Los yacimientos más representativos de este tipo lo son: Krivoi-Rog y la anomalía magnética de Kursk (AMK) en URSS; Knob Lake, en Canadá; Cerro Bolívar, en Venezuela; Lago Superior en EUA; Fort Gouraud, en Mauritania; Mekambo, en Gabón; Kribi, en Camerún; así como yacimientos en Liberia, República Popular China, sur de Australia y en los estados de Bihar y Orissa en la India.

### PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Las principales provincias metalogénicas del hierro son las siguientes:

**Europa:** la provincia rusomeriodional: Krivoi Rog y AMK; Lotaringia, en Francia; Kerch-Tamán, en URSS; Normandía-Turingia-Bohemia y Suecia septentrional, en Europa occidental.

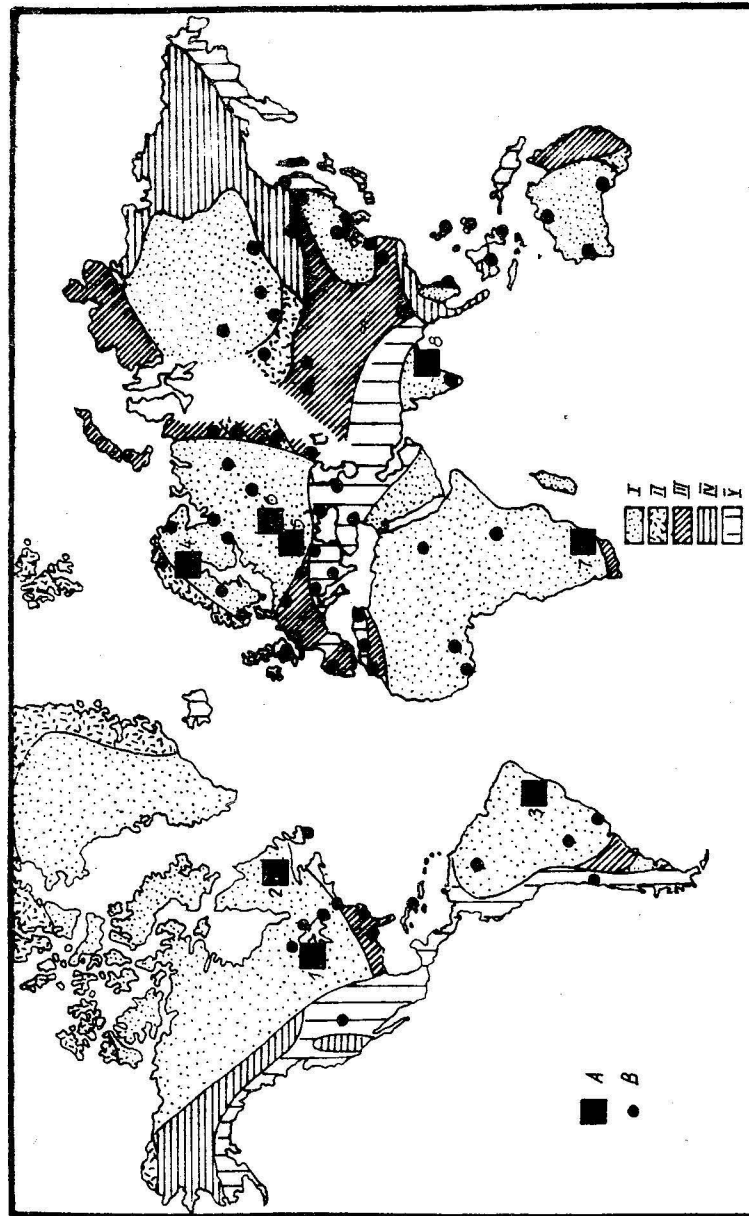


Figura 4

Principales yacimientos de hierro del mundo: I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimeridgienses V. Zonas plegadas alpinas.  
A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial: 1. Lago Superior (EUA) 2. Labrador (Canadá) 3. Itabira (Brasil) 4. Kiruna (Suecia) 5. Krivoi-Rog (URSS) 6. AMK (URSS) 7. Transvaal (República de África del Sur) 8. Bihar-Orissa (India).  
B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

**Asia:** la mayor es la provincia uraliana de yacimientos de *skarn* de edad Paleozoica; la provincia hindú, la Manchuro-coreana, la Filipina, y la cuenca Angará-Pit, en Siberia.

**África:** la provincia de África del Sur y la de África septentrional, aunque esta última en menor grado.

**América del Norte:** la provincia del Lago Superior y Labrador, y al norte, la provincia de los estados orientales de EUA.

**América Central insular:** la zona del norte de la provincia de Oriente, en Cuba.

**América del Sur:** las más importantes son, la provincia brasileña y la región venezolana.

La época mas favorable desde el punto de vista metalogénico, fue el Precámbrico. Además, las épocas Caledoniana y Herciniana, tienen significado en Europa, EUA y URSS.

La época Kimeridgiense es muy significativa porque los yacimientos de esta edad aportan el 30% de la producción mundial; la época Alpina tiene para Cuba gran importancia, puesto que en ella se formaron sus yacimientos de lateritas ferruginosas.

En resumen, entre las épocas Precámbrica y Kimeridgiense, se aporta el 90% de la producción total de Fe en el mundo.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos de forma general, las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes de Fe, en el mundo.

### YACIMIENTO KIRUNAVARA, SUECIA

Al norte de Suecia, en la región de Norbotten, se localizan varias decenas de yacimientos, entre los cuales los más importantes son: Kiruna, Kirunavara, Luosavara y Gellivara.

La zona está representada por una serie de rocas Precámbricas que se inicia con conglomerados Arqueanos, sobre los cuales descansa una masa potente de rocas verdes. Inmediatamente después se sitúan los pórfidos de sienita, que se sustituyen hacia arriba por pórfidos cuaríferos. Encima y con discordancia angular por la transgresión, se sitúan series Proterozoicas de filitas, areniscas y cuarcitas.

El cuerpo mineral tiene la forma de dique, con rumbo hacia el este bajo un ángulo de 55°; según la dirección, el cuerpo mineral ha

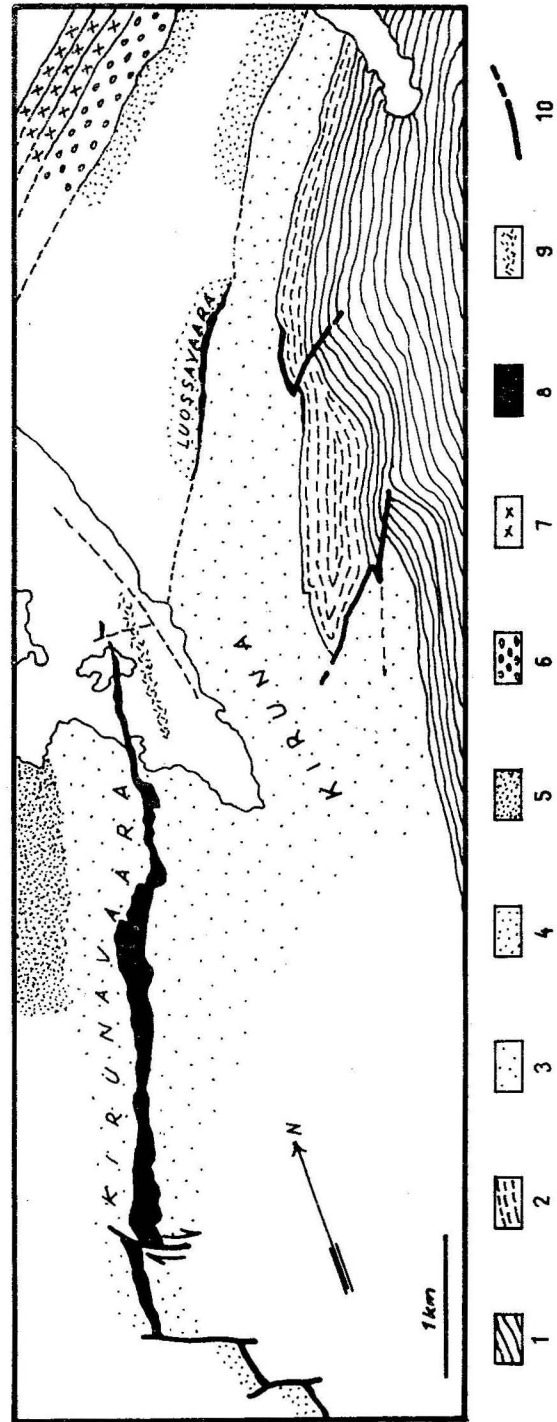


Figura 5

Mapa geológico de la región de Kiruna, Suecia

(Geijer, Congreso Geológico Internacional, 1960)

1. Formación sedimentaria Vakkö 2. Complejo Lower Hauki (lavas alteradas, esquistas, sericiticas) 3. Pórfido riolítico (con cuarzo) 4. Pórfido sienítico 5. Sienita de grano grueso 6. Conglomerado de Kirunavara 7. Rocas verdes de Kiruna 8. Mineral de hierro 9. Zonas con venas de minerales "brecha mineralizada" 10. Fallas

sido explorado a lo largo de 4 400 m, y oscila su potencia entre 34 y 152 m, con promedio de 90 m, hasta la profundidad de 1 km.

El cuerpo mineral está cortado en muchos lugares, por vetas de aplitas, sienitas, granitos y pegmatitas; la composición mineralógica del yacimiento es de magnetita, fluorapatito, hematita. Además hay dióxido, anfíboles, turmalina, zircón, biotita, calcita y cuarzo.

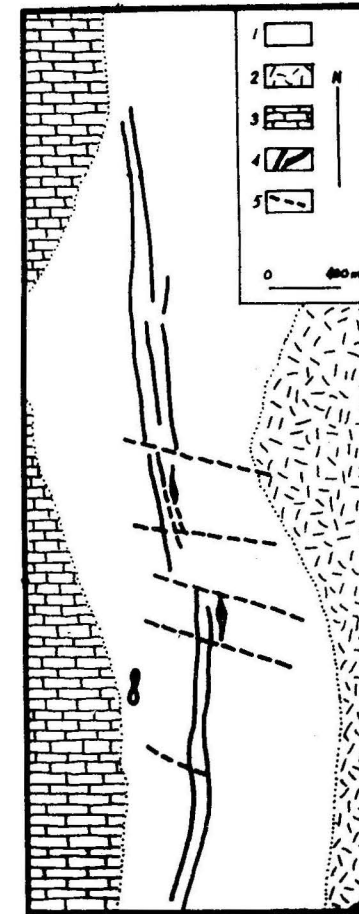
El contenido promedio de la mena de Kiruna oscila entre 58 y 70% de Fe, 0,01 y 2,5% de P, no más de 0,05% de S y hasta 0,18% de V.

La génesis del yacimiento se interpreta como el resultado de la diferenciación profunda de un magma sienítico, a partir del cual se formaron las elevadas concentraciones de hierro.

Figura 6

Mapa geológico del yacimiento Kusinsk, URSS

1. Gabro y anfíbolitas 2. Granito-neis 3. Calizas 4. Depósitos minerales 5. Dislocaciones tectónicas.



## YACIMIENTO KUSINSK, URSS

Este yacimiento pertenece a la formación magnetita-titanita, y se encuentra en los Urales a 18 km al norte de la ciudad Slatoust; se localiza en la pendiente oriental de estas montañas y está formado por cuerpos minerales en forma de bolsas, fajas minerales diseminadas o cuerpos en forma de vetas que forman tres fajas con dirección meridional y buzan hacia el SE bajo ángulo de 45°. Están localizadas dentro de un macizo de gabbro anfibolizado el que se acuña en dirección meridional. Su contacto oriental lo constituyen granitos-neis y el occidental, calizas del Paleozoico.

Los cuerpos minerales tienen una potencia entre 1 y 10 m y la mineralización se conoce hasta los 250 m, aunque los datos geofísicos la señalan hasta los 800 m. La mena contiene entre 60 y 70% de magnetita, 20 y 30% de ilmenita y algo de bornita, calcopirita, clorita, piroxenos, pirita, hematita, cromita y apatito. El contenido de hierro es de 50 a 57%; 10 a 20% de óxido de titanio; 1 a 2% de óxido de cromo y 0,12% de azufre.

La génesis de este yacimiento es histeromagmática; y se formó como resultado de las particularidades de la cristalización en el estadio magmático tardío de un magma gábrico menífero, que permitió la concentración de Fe, Ti y V.

## YACIMIENTO MAGNITNAYA, URSS

La montaña Magnitnaya, es la fuente de materia prima del combinado metalúrgico de Magnitogorsk, y junto a ella ha surgido una gran ciudad de este nombre.

El yacimiento se encuentra en la zona oriental de los Urales del sur, en la región de Cheliavinsk, en la ribera izquierda del río Ural.

La región del yacimiento está formada por rocas efusivo-sedimentarias del Devónico y el Carbonífero inferior, las cuales están plegadas en dos sinclinales. Esta masa rocosa, es cortada por masas intrusivas (granitos, sienitas, dioritas, etc.) de edad Variscico, las cuales forman las cimas y pendientes de la montaña Magnitnaya.

De esta forma surgieron valiosos yacimientos de *skarn* los cuales agrupan cuerpos en forma de bolsas, lentes y minerales parcialmente diseminados. El cuerpo principal tiene una potencia de 60 a 70 m y aflora en la cima de la montaña; este cuerpo se extiende por más de 3 000 m.

La mena se compone de magnetita, silicatos de los *skarn*, pequeñas cantidades de hematita, pirita y a veces calcopirita, esfalerita, galena

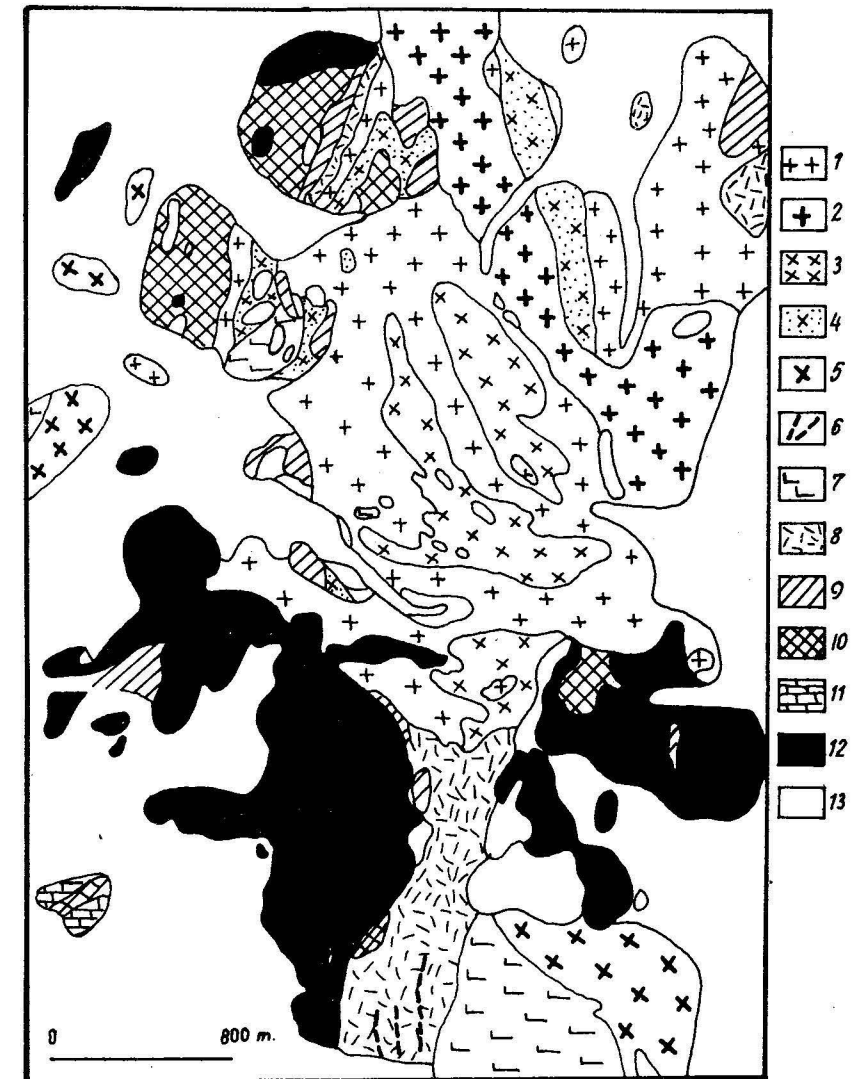


Figura 7

Mapa geológico de la montaña Magnitnaya (magnética), URSS

(A. N. Zavaritsky)

1. Granito hornbléndico y piroxénico 2. Granitos y sienitas rojos, pobres en cuarzo 3. Granodioritas y cuarzodioritas 4. Dioritas augíticas y uralíticas 5. Microgranitos, felsitas y sus brechas 6. Filones de pórfido cuarcífero 7. Dioritas augíticas y uralíticas filoneanas o formando pequeñas intrusiones 8. Porfiritas oligoclásicas y uralitas labradoríticas 9. Dioritas y porfiritas, alteradas en parte 10. Rocas granatíferas y otros skarn 11. Mármoles y calizas del Carbonífero inferior 12. Menas 13. Eluvio, deluvio y aluvio.

y arsenopirita. En la zona de oxidación, entre 40 y 50 m, hay martita, y los sulfuros han sido lixiviados.

El contenido de Fe en las menas industriales oscila entre 20 y 25% hasta 67%, el S en las menas magnetíticas oscila entre 2 y 3% y en las menas martíticas hasta 0,1%. El P oscila entre 0,01 y 0,07%. Este es el yacimiento mayor del mundo, dentro de este tipo genético.

#### YACIMIENTO SIEGERLAND, RFA

Este yacimiento se encuentra en Westfalia del sur, y es uno de los más viejos del mundo, por la prospección y explotación que en él se ha realizado.

La región está formada por rocas arenosas y esquistos del Devónico inferior, queratófidos y diabasas del Devónico inferior y medio, los cuales son cortados por diques de diabasas del Devónico superior.

La mineralización —siderita, hematita y sulfuros— está asociada a un foco magmático profundo, el cual no ha sido descubierto por la erosión. A veces la mineralización siderítica se encuentra cubierta por otra más joven, representada por arseniuros de cobalto, níquel, galena, esfalerita y marcasita.

La mena del yacimiento Siegerland, contiene de 30 a 37% de Fe, 5,7 a 7,5% de Mn; 0,01 a 0,03% de P y, generalmente, décimas de S. Este yacimiento es de génesis hidrotermal, tipo filoneano, de temperatura media, relacionado con cuerpos magmáticos profundos, no descubiertos por la erosión.

#### YACIMIENTOS DE LA CUENCA DE LORENA FRANCIA

Los yacimientos de esta cuenca están situados en parte de Francia, RFA, Bélgica y Luxemburgo, y se extiende por un área aproximada de 1 100 km<sup>2</sup>.

Las rocas estériles son psamitas del Aaleano inferior y margas del Aaleano superior, entre las cuales se interestratifican capas de minerales de 1 a 6 m; y la potencia total de la masa rocosa metalífera oscila entre los 25 y 60 m.

Los minerales oolíticos se forman de göethita y stilpnomelano, con impurezas de cloritas ferruginosas y siderita; a veces contiene hematita y magnetita. El contenido de Fe es de 30 a 50% con 0,5 a 1,8% de P, entre 0,5% y menos de Mn 0,4% de S y hasta 0,1% de V.

Este yacimiento es muy parecido al de Kerch, en la URSS (Ver figura 2) y pertenecen ambos al mismo tipo genético de los yacimientos sedimentarios.

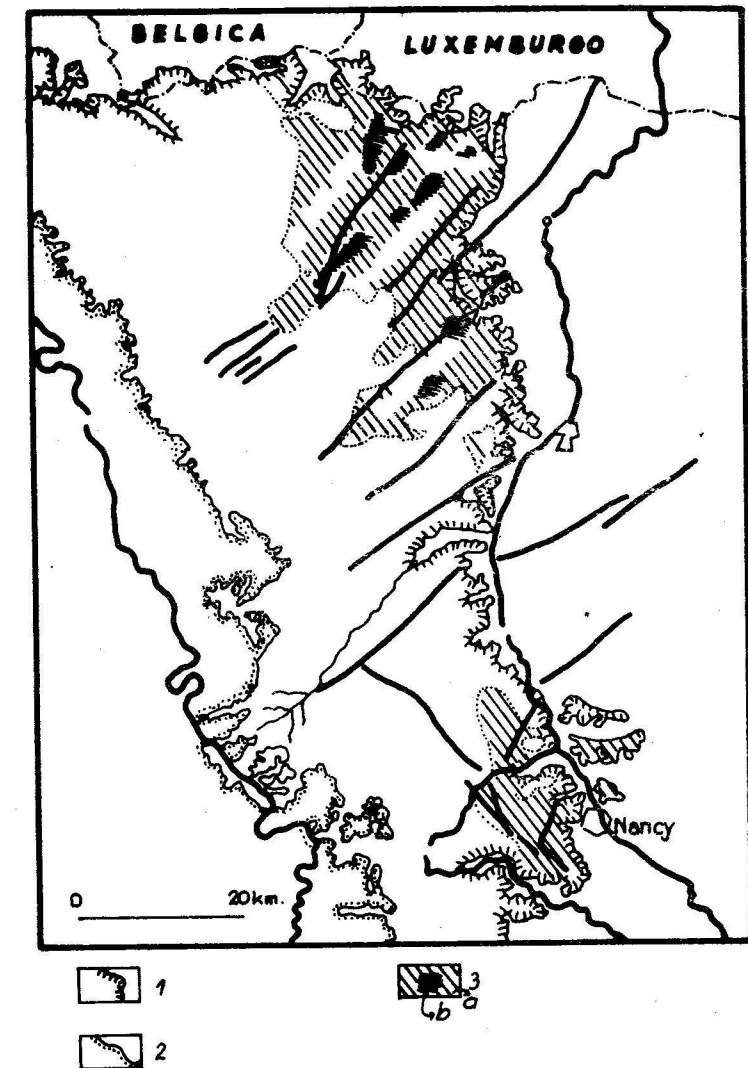


Figura 8

Cuenca ferrífera de Lorena, porción francesa  
(F. Cusset, F. de Torcy y P. Maubeuge)

1. Afloramiento del Aaleano 2. Afloramiento del Oxfordiano superior 3. Minerales de hierro: a) extensión general b) zonas ricas, con más de 7 toneladas de metal por metro cuadrado.



## YACIMIENTOS DEL LAGO SUPERIOR, EUA

Las áreas ferríferas de los estados de Minnesota, Michigan y Wisconsin, tienen un gran significado económico para EUA, y constituyen una de las regiones más grandes e importantes de todo el mundo.

En esta área se localizan algunos miles de yacimientos pequeños de cuarcitas ferruginosas (taconitas) Precámbricas; y se destacan entre éstas, por su rendimiento, las zonas de Cuyuna, Mesabi, Vermillion, Marquette, Menominee, Gogebic, etc. El perfil geológico de la región (de arriba a abajo) es el siguiente:

- Cámbrico: areniscas.
- Serie Algonquino:
  - Huroniano:
    - Superior: cuarcitas, formaciones ferruginosas y esquistos.
    - Medio: formaciones ferruginosas, esquistos, cuarcitas.
    - Inferior: cuarcitas, conglomerados, dolomitas, esquistos, intrusivos.
  - Keweenawan:
    - rocas arenosas, capas de lavas básicas e intrusivos de esta misma composición.
- Serie Arqueozoica:
  - Kewatin:
    - Superior: Formaciones ferruginosas, rocas sedimentarias y metamórficas.
    - Inferior: lavas de composición básica frecuentemente metamorfizadas.
  - Granitos y neis del Laurentino.

Las formaciones ferruginosas están representadas por variedades de calcedonia (*cherts*) y jaspilitas, menos metamorfizadas que en Krivoi-Rog; se encuentran en tres series de diferentes edades, con su masa básica, en el Huroniano, como se aprecia en el perfil descrito.

La potencia de los cuerpos minerales oscila entre decenas de metros hasta 100 m y los cuerpos tienen la forma de lentes y columnas que han sido estudiadas hasta 800 y 1 200 m.

Las menas son cuarzo-hematíticas y muy raramente cuarzo-magnetíticas, martíticas y göethíticas; el contenido de Fe en los minerales oscila entre 50 y 62%, con un porcentaje de S y P que alcanza hasta 0,1%. La génesis inicial de este yacimiento es muy controvertida;

algunos lo consideran del tipo sedimentario y otros lo consideran del tipo hidrotermal.

## YACIMIENTOS DE LA ANOMALÍA MAGNÉTICA DE KURSK (AMK), URSS

La anomalía magnética de Kursk es conocida desde 1784, pero no fue hasta 1919 que comenzaron los trabajos de investigación detallada para determinar su origen y características. En 1921 se perforó el primer pozo, y se localizaron cuarcitas ferruginosas con magnetita, lo que sirvió de explicación acertada a este fenómeno.

La AMK es la mayor cuenca del mundo de minerales de Fe y tiene una dirección meridional de 600 km, con un ancho entre 40 y 250 km, está situada en la región de Jarkov en la RSS de Ucrania, en URSS.

En 1952 comenzó la extracción y el beneficio de los minerales de AMK; sus concentrados contienen entre 60 y 65% de Fe y junto con la cuenca de Krivoi-Rog, constituyen los dos pilares básicos de la industria metalúrgica pesada soviética.

En la AMK se reconocen dos complejos de rocas completamente diferentes:

- rocas intrusivas y metamórficas muy dislocadas, del Precámbrico
- rocas sedimentarias del Devónico, Carbonífero, Jurásico, Cretácico, Terciario y Cuaternario.

El horizonte de rocas intrusivas y metamórficas está cubierto por las formaciones más jóvenes, yace a profundidades que varían entre 100 y 200 m hasta 700 m y no aflora. Este complejo forma una gran elevación, la antecliza de Vorónezh, en la cual se distinguen tres zonas: el sinclinal nor-oriental, el anticlinal central y el sinclinal sur-oriental.

Las rocas del Precámbrico se dividen en tres formaciones:

**Superior:** esquistos sericíticos con aspecto de filitas, esquistos actinolíticos, estaurolítico-granático-biotítico y calizas cristalinas. La potencia es de 280 m, y yacen en su base conglomerados ferrosos.

**Media:** tiene hasta cinco horizontes de cuarcitas ferruginosas separadas por esquistos. La potencia llega hasta 470 m. Las cuarcitas ferruginosas son rocas finamente bandeadas con granos pequeños y alternancia de cuarzo, magnetita, hematita y silicatos.

**Inferior:** de abajo hacia arriba se reconocen esquistos filíticos con talco, cuarcitas, esquistos biotíticos y anfibólicos,

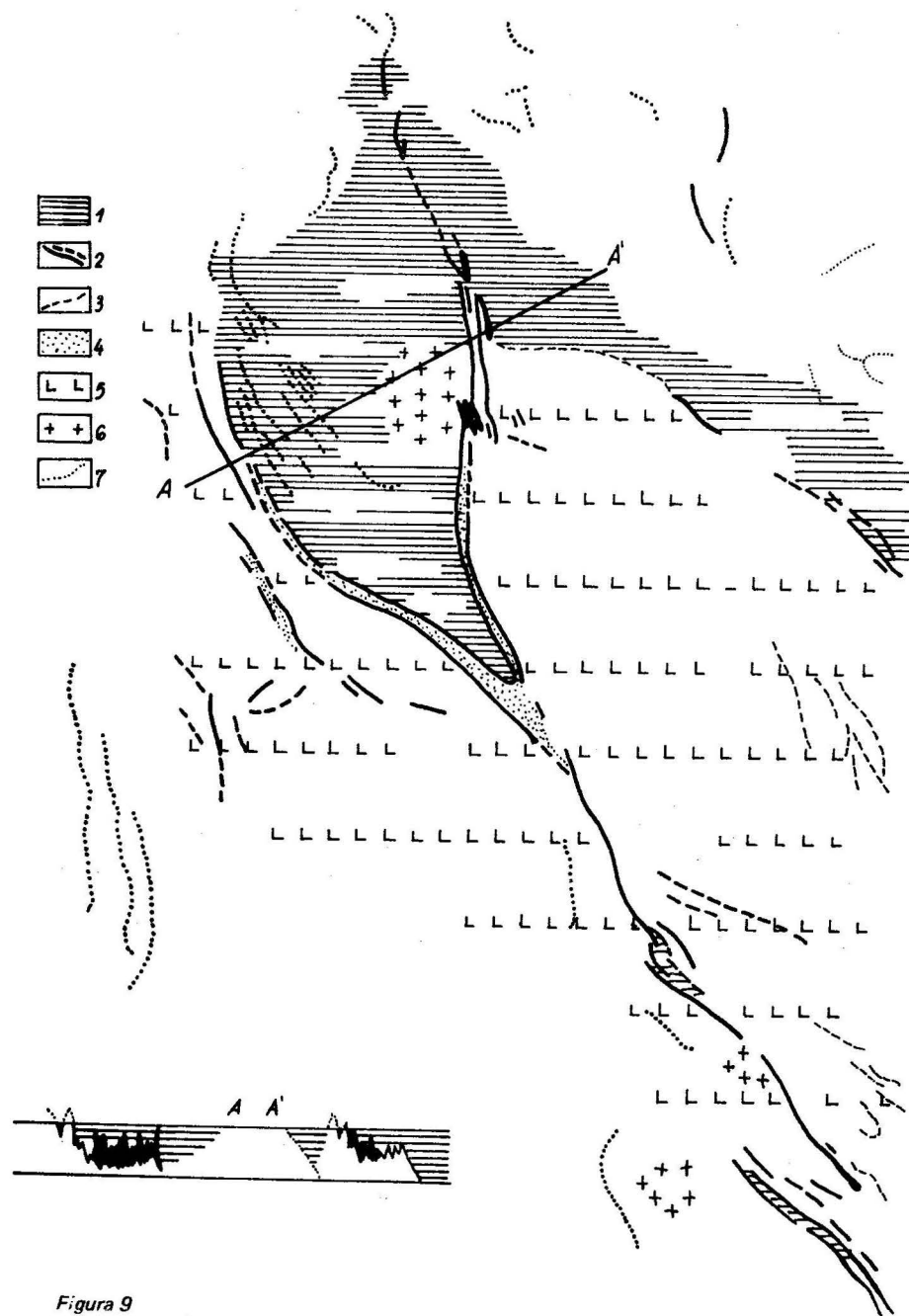


Figura 9

Mapa geológico esquemático del Precámbrico en la Anomalía Magnética de Kursk-AMK, URSS.

(I. A. Rusinovich)

1. Rocas de recubrimiento (formación ferruginosa) 2. Cuarcitas ferruginosas establecidas por el levantamiento geofísico 3. Cuarcitas ferruginosas (supuestas) 4. Esquistos 5. Rocas del arqueozoico 6. Granitos y otras rocas ígneas 7. Eje de las anomalías magnéticas.

neis bimicáceos y micáceos los que yacen sobre plagiogranitos antiguos. Desde los neis hacia abajo las rocas son Arqueozoicas.

Las rocas del Precámbrico se extienden en dirección NW y buzan hacia los flancos bajo ángulos entre 70° y 90°. Estas rocas han sufrido, en algunas regiones como Belgorod, un potente proceso de alteración hipergénica. La potencia de la corteza oscila entre 30 y 50 m, y en la zona señalada alcanza 100 y 150 m.

Puede verse en la tabla, la composición química de las menas y rocas de la AMK.

ROCAS	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ferruginosas	31,50	13,88	30,46	51,30	1,30
Menas martíticas	64,11	0,85	94,92	3,07	0,90

(Estos valores significan porcentos)

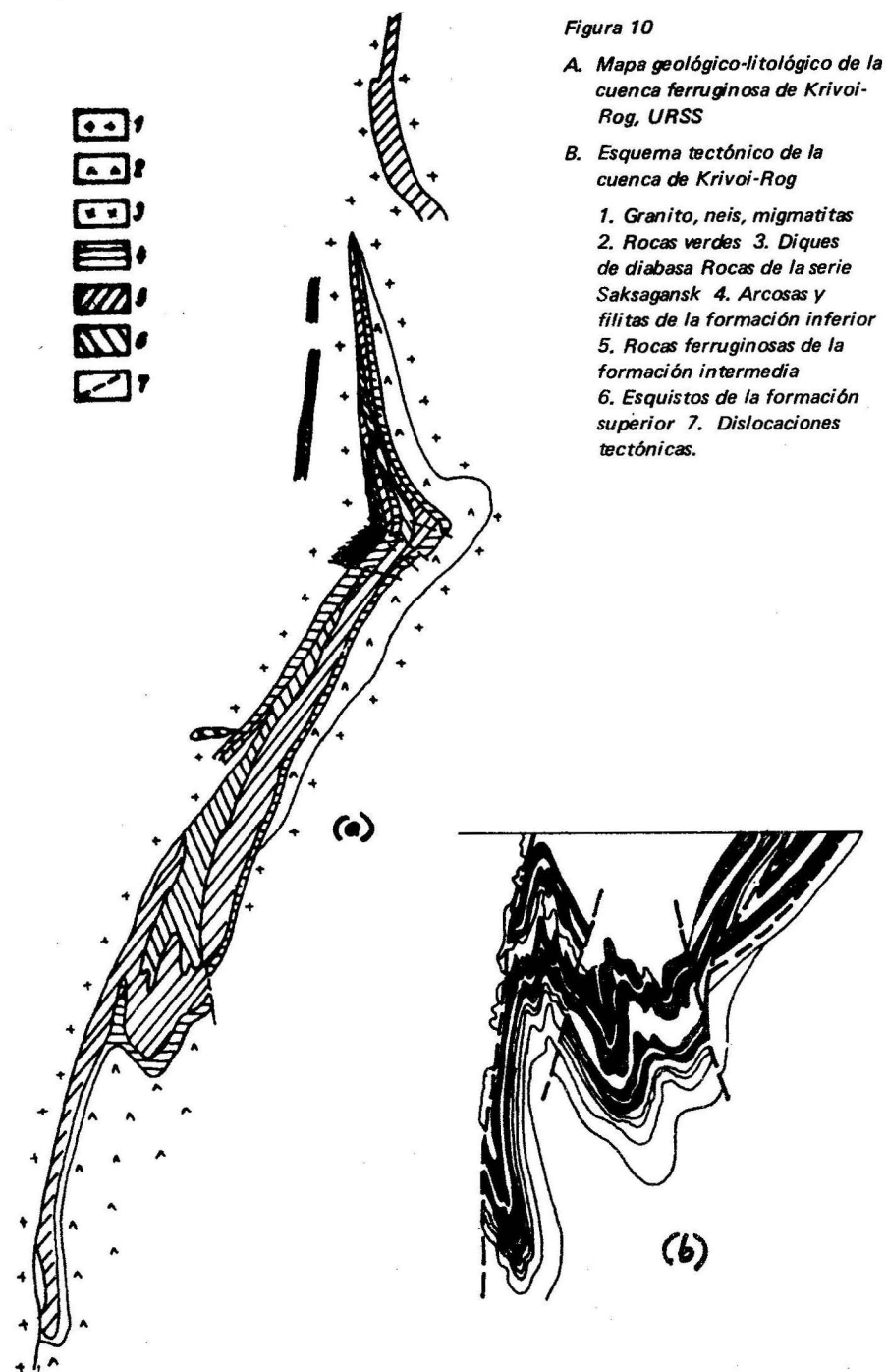
Ejemplos de yacimientos son Yakolevsk, Gostischevsk y otros que se encuentran, precisamente, en la región del Belgorod.

#### YACIMIENTOS DE LA CUENCA DE KRIVOI-ROG, URSS

Los yacimientos de Krivoi-Rog, son conocidos y explotados desde hace mucho tiempo; su explotación industrial comenzó en 1870. Antes de la guerra, Krivoi-Rog aportaba el 65% del volumen total de la producción de menas de Fe de URSS; hoy su participación es de primordial importancia en la industria pesada soviética, aunque en una proporción ligeramente menor.

La cuenca de Krivoi-Rog, forma parte del macizo cristalino de Ucrania, y se extiende casi meridionalmente, en dirección NE, aproximadamente a 150 km de la ciudad de Nikolo-Kozelsk por el sur y hasta el río Dniéper por el norte.

Las rocas de la formación Krivoi-Rog afloran desde 0,5 km por el norte, hasta 6 y 7 km en la ciudad del mismo nombre. Hacia el norte y el oeste estas rocas están limitadas por granitos y migmatitas; sobre yaciéndolas se encuentran depósitos del Terciario y Cuaternario. El complejo rocoso más antiguo pertenece al Arqueozoico inferior y está compuesto por neis biotítico y biotítico granítico.



Sobre ellos descansa la formación Krivoi-Rog, con amplios procesos de metasomatosis. Se distinguen tres complejos magmáticos, y Semenenko distingue, además, tres ciclos orogénicos intrusivos. La capa de Krivoi-Rog se divide en tres formaciones:

**Inferior:** arcoso-filítica con potencia entre 100 y 250 m, y yace transgresivamente sobre diferentes granitos y anfibolitas.

**Media:** son hornblendas ferruginosas y jaspilitas interestratificadas con esquistos. Se distinguen siete horizontes ferruginosos y esquistosos; la potencia varía entre 1 200 y 1 300 m.

**Superior:** dolomitas, areniscas, conglomerados, esquistos carbonoso-sericíticos, anfibólicos, etc. Esta formación yace en discordancia sobre la formación infrayacente, y tiene una potencia de 2 500 m.

Las menas están relacionadas con las formaciones medias fundamentalmente, y en algunos lugares con la porción inferior de la superior. Las menas de Fe de Krivoi-Rog contienen desde 15 a 20% hasta 40 a 43% de metal, y las más ricas se encuentran entre las jaspilitas y las hornblendas ferruginosas en forma de depósitos estratificados, columnas minerales, *stocks*, depósitos de charnela muy potentes y otros cuerpos de forma muy compleja.

Por su composición se distinguen las menas magnetíticas, martíticas y hematíticas. La zona, en general, ha sido sometida a fuertes plegamientos y está atravesada por numerosas fallas transversales y longitudinales a la dirección general del yacimiento.

Tanto Krivoi-Rog como la AMK, son ejemplos típicos de yacimientos metamorfogénicos del tipo metamorfizados, y por sus reservas caen dentro de la categoría de yacimientos mundiales.

## EL HIERRO EN CUBA

Nuestro país, posee importantes recursos de Fe, los cuales en la actualidad no son explotados para la extracción del mineral, aunque en los planes prospectivos, constituyen la base sobre la cual se desarrollará la industria siderúrgica.

En el territorio nacional las reservas más importantes se localizan en la provincia de Oriente; también, aunque en mucho menor proporción, se localizan reservas de Fe en Pinar del Río y Camagüey. De todos los yacimientos, los más importantes son los del tipo genético residual de lateritas ferruginosas.



El norte de la isla de Cuba está surcado por un cinturón de rocas hiperbasálticas, serpentinizadas en mayor o menor grado; esta faja de rocas marca la zona de transición entre la zona eugeosinclinal de Zaza (hacia el sur) y la depresión de avance (hacia el norte). Las peridotitas, principalmente hazburgitas, tienen su mayor extensión en la provincia de Oriente; éstas han sido sometidas a procesos de intemperismo y el resultado ha sido la formación de una corteza laterítica ferruginosa rica en Ni y Co.

Estas menas lateríticas se conocen desde hace mucho tiempo, y durante varios años se han realizado considerables estudios acerca de ellas. Después del triunfo de la Revolución, en 1959, se ha intensificado este estudio mucho más y se ha hecho sistemático.

El perfil general de la corteza de intemperismo en la costa norte de Oriente, puede describirse, en forma muy esquemática, de la siguiente forma, según Adamovich y Chejovic:

(De abajo hacia arriba)

- Peridotitas serpentinizadas no alteradas.
- Serpentinitas alteradas, a veces nontronitizadas. Esta capa contiene 20 a 25%.
- Lateritas arcillosas compactas, de color anaranjado-pardo; contiene entre 40 y 48% de Fe.
- Lateritas menos compactas, de color rojo, con concreciones psamíticas y psefticas de hidróxidos de hierro; contiene un promedio de 45% de Fe.

La transición entre un horizonte y otro es lenta. En algunos casos los horizontes desaparecen por completo.

Las regiones más importantes pueden dividirse en tres: la región de Nicaro (100 km<sup>2</sup>), la región de Pinares de Mayarí (120 km<sup>2</sup>) y la región de Moa-Punta Gorda (230 km<sup>2</sup>).

Las reservas de Fe son enormes, como ya se señaló; las menas contienen Ni y Co, así como Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn, P, S, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La geomorfología de la región, ha desempeñado un importante papel, en la formación de los yacimientos de lateritas de la costa norte de Oriente. Se observan determinadas relaciones entre la potencia y las especificidades de la corteza de intemperismo, y las cotas de las distintas superficies de erosión. La edad de los yacimientos se calcula del Terciario.

Importantes estudios científicos sobre este particular han sido realizados por especialistas soviéticos y cubanos (Korin, Finko, Formel, etcétera), del Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de Cuba.

También, hacia la parte sur de la provincia de Oriente, al este de la ciudad de Santiago de Cuba, se localizan cuerpos minerales magnéticos de génesis metasomática de contacto y de *skarn*.

Estos yacimientos se encuentran enclavados en la Sierra de la Gran Piedra; la zona está formada por rocas efusivo-sedimentarias del Cretácico inferior (formación Vinent), las cuales han sido atravesadas por cuerpos intrusivos de composición diorítica, cuarzo diorítica y granodiorítica. Las rocas del Mioceno (formación La Cruz) y del Cuaternario, recubren la zona del yacimiento y la región en su conjunto.

En el contacto entre los efusivo-sedimentarios (de composición andesítica-dacítica y andesítica con intercalaciones de calizas) y los cuerpos intrusivos, se desarrollaron procesos de *skarnización* con el surgimiento de mineralización magnética, además de los propios minerales del *skarn*. En la zona del exocontacto se desarrollan además, cuerpos de mármoles y rocas córneas (tactitas).

El área mineralizada del contacto entre las rocas ígneas intrusivas y las efusivo-sedimentarias, se extiende con rumbo NE a lo largo de 15 km. De acuerdo con los trabajos de búsqueda y exploración, las zonas con más perspectivas, como: Antoñica, Yuca y la Grande, Arroyo de la Poza, Chiquitica y Chicharrones, Folfa y Concordia, El Norte, etc., son depósitos lenticulares cortos de 50 a 450 m de largo y de 30 a 250 m de extensión, a lo largo de su buzamiento con una potencia de 6 a 30 m (Bondarets y Gorbachov).

El contenido medio de Fe de estas menas, es de 36,95%, con 0,49% de S y 0,03% de P, así como centésimas de Zn, Pb y Cu. Los yacimientos de Fe de la provincia de Oriente constituyen, por tanto, las reservas más importantes de nuestro país.

Los yacimientos de Fe de la provincia de Pinar del Río, son limonitas asociadas principalmente con las zonas de oxidación de los yacimientos sulfurosos (piritas y piritas cupríferas). En general los yacimientos son pequeños o simplemente constituyen manifestaciones minerales.

Su característica esencial es su contenido de Fe, que oscila entre 40 a 60%, con porcentajes muy bajos de impurezas nocivas y la facilidad de su posible extracción a cielo abierto.

El mayor grupo de "sombreros de hierro" se localiza en NW de la provincia de Pinar del Río, en la zona de Mantua, Los Arroyos, etc. Esta región está formada por los depósitos de la formación San Cayetano, de edad Jurásico-inferior-medio, constituida por areniscas, filitas y esquistos arcilloso-carbonatosos.

Los depósitos primarios tienen generalmente control tectónico por dislocaciones (fallas) con rumbos NE y NW. Entre los yacimientos más importantes se encuentran Mina Brooklyn, Cayo Alto, Unión II, Olga, etcétera.

## MANGANESO

### GENERALIDADES

Los minerales de manganeso fueron conocidos en la antigüedad; a finales del siglo XVIII comenzó la utilización industrial de éstos, en las industrias químicas y de colorantes. Hoy en día, la mayor utilización del Mn está en la industria metalúrgica; alrededor del 95% de la producción mundial de este metal es usada en la industria del acero, principalmente en forma de ferromanganeso.

La principal función del Mn en la producción de aceros es remover el oxígeno a partir del metal fundido y proporcionarles dureza y tenacidad. Antiguamente alrededor de catorce libras de Mn se necesitaban para producir 1 tonelada de acero, pero las modernas plantas con convertidores de oxígeno sólo necesitan nueve libras del metal por tonelada de acero.

Otro importante renglón de utilización del Mn es en la producción de baterías eléctricas secas y en productos químicos.

El uso del Mn se amplía en el campo de las aleaciones, principalmente con el Al, para endurecer los productos finales destinados a diversas líneas de producción.

En 1973 la producción mundial de Mn se elevó a 23,5 millones de toneladas; URSS con sus enormes reservas de yacimientos, ocupa el primer lugar en ambos aspectos. Otros países productores de importancia son: República de África del Sur, Brasil, Gabón e India.

Es necesario señalar, que países industrializados como EUA, Gran Bretaña, RFA, Francia y Japón no poseen recursos manganíferos, por lo que deben importar los volúmenes necesarios para sus producciones de acero y otras ramas de la industria metalúrgica.

Cuba posee determinadas reservas de minerales de Mn en la provincia de Oriente.

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Mn está situado en el séptimo grupo y el cuarto período de la tabla periódica. Su número atómico es 25, su peso atómico es 54,938 y se le conoce un solo isótopo: Mn 55. Su Clarke es de 0,1.

Después del Ti es el oligoelemento más abundante de la corteza terrestre. Como miembro de la familia del Fe tiene propiedades relacionadas con este metal. Durante el ciclo endógeno, el Mn se incorpora en forma divalente y por su radio iónico (0,80 Å) puede sustituir diatómicamente al Fe divalente (0,74 Å), Mg divalente (0,66 Å), Zn divalente (0,74 Å) y Ca (0,99 Å). Sin embargo, la sustitución más frecuente y la de mayor importancia geoquímica es la del manganeso divalente por el hierro divalente.

Este fenómeno hace que el contenido de Mn en las rocas ígneas básicas sea mayor que en las rocas ácidas, lo cual se observa en los siguientes datos:

Rocas	%
Condritas	0,20
Rocas ultrabásicas	0,15
Rocas básicas	0,20
Rocas medias	0,12
Rocas ácidas	0,06
Rocas sedimentarias	0,067

En condiciones endógenas, el potencial iónico del Mn divalente y del Fe divalente es similar, lo que tiene gran importancia geoquímica.

En general, durante la formación de las rocas ígneas, el Mn no se concentra lo suficiente como para formar minerales independientes, por lo cual queda oculto en las estructuras de los minerales petrográficos.

Los filones hidrotermales llevan con frecuencia la rodocrosita o siderita,  $\text{CO}_3\text{Mn}$ , rica en Mn (manganosiderita). Cuando las soluciones hidrotermales ricas en Mn se ponen en contacto con las aguas subterráneas, pueden depositar manganeso en forma de dióxido.

En el ciclo exógeno, el Fe y el Mn poseen diferencias sustanciales; mientras que el estado de valencia del Fe es 3, para el Mn es 4. Además, los hidrosoles de Fe tienen carga positiva en tanto que los de Mn

tienen carga negativa. El transporte del Mn divalente durante la meteorización, se produce en forma de bicarbonato y se disuelve en aguas que contienen  $\text{CO}_2$  y sulfato, con más facilidad que el Fe.

Durante la meteorización es importante el pH de la solución, puesto que, en sentido general, las soluciones ácidas son más favorables para la transportación del Mn. Los hidróxidos de Mn son precipitados a pH 7, mientras que los óxidos lo hacen a pH entre 2 y 4.

Señalábamos que el Mn en forma de hidrosol, está cargado negativamente; esto hace que existan depósitos de Mn carentes o pobres en Fe, puesto que los hidrosoles de éste, tienen una carga opuesta. En consecuencia, los sedimentos oxidados ricos en Mn contienen frecuentemente cantidades notables de Li, K, Ca, Ba, Ti, Co, Ni, Cu, Zn, Tl, Pb, W, y otros metales.

Un papel importante en la precipitación del Mn, lo desempeña el desprendimiento del  $\text{CO}_2$  del bicarbonato, por la acción de las bacterias o por la oxidación. Las bacterias pueden consumir también las sustancias orgánicas que actúan como coloides protectores; en estos casos el Mn se precipita como carbonato o hidróxido.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La cantidad de minerales de manganeso, que se encuentran en la corteza terrestre, se elevan casi a ciento cincuenta. Sin embargo, entre ellos, los más significativos desde el punto de vista industrial son los siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Pirolusita	$\text{MnO}_2$	55-63
Braunita	$\text{Mn}_2\text{O}_3$	60-69
Gausmanita	$\text{MnMn}_2\text{O}_4$ ó $\text{Mn}_3\text{O}_4$	65-72
Manganita	$\text{MnO}_2 \cdot \text{Mn}(\text{OH})_2$	50-62
Psilomelano	$m\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	35-60
Rodocrosita	$\text{CO}_3\text{Mn}$	40-45
Manganocalcita	$(\text{Mn}, \text{Ca})\text{CO}_3$	20-30
Oligonita	$(\text{Mn}, \text{Fe})\text{CO}_3$	23-32
Rodonita	$(\text{Mn}, \text{Ca})\text{SiO}_3$	33-40

La pirolusita es el mineral industrial más importante, característico de los yacimientos sedimentarios y pocas veces de los hidrotermales.

Tanto la braunita como la gausmanita, son característicos de los yacimientos de skarn y de los sedimentarios metamorfizados.

La manganita es característica de los yacimientos sedimentarios.

En el psilomelano, una parte de  $\text{MnO}$  puede mezclarse con  $\text{BaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{NiO}$  y otros óxidos. Esta es la mena más importante, característica de los yacimientos sedimentarios, llamados "sombreros de manganeso", y también de yacimientos hidrotermales.

La rodocrosita, la manganocalcita y la oligonita, se localizan, generalmente, en yacimientos sedimentarios, pero también se pueden encontrar en yacimientos hidrotermales.

La rodonita es el mineral principal en los sedimentos silicatados, así como en los yacimientos skarn, y en los metamorfizados.

Otros minerales como la bustamita  $\text{SiO}_3(\text{Mn}, \text{Ca})$ , tefroita  $\text{SiO}_4\text{Mn}_2$ , alabandina  $\text{SMn}$ , franklinita  $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ , tienen menor importancia.

Desde el punto de vista industrial, las menas y concentrados de Mn se clasifican, en los siguientes grupos:

Menas de manganeso para la industria química				
Grado	Contenido de Mn	Mn/Fe	Sílice	P (no más de ...)
I-A	Mayor de 50	6-7	Mayor de 9	0,20
I-B	40-50	7-10	9-15	0,17
II	35-40	3-4	15-25	0,18
III	30-35	4-5	25-35	0,15

Para la industria química el contenido de  $\text{MnO}_2$  es fundamental y no debe ser inferior al 85 ó 88% con no más de 1% de óxido férrico, 2 ó 3% de  $\text{CaO}$  y 4% de  $\text{SiO}_2$ .

Menas de manganeso para la industria metalúrgica				
Grado	Contenido de Fe más Mn %	Mn/Fe	Sílice	P (no más de ...)
I	50-60	1,5-0,6	Más de 15	0,09-0,18
II	40-50	2,0-0,8	15-25	0,08-0,50
III	30-40	2,5-1,0	25-35	0,07-0,12

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

De acuerdo con las características geoquímicas del Mn sus tipos genéticos más importantes son los exógenos; puesto que en los endógenos los sobresalientes son los hidrotermales y los metasomáticos tipo *skarn*, pero sin gran importancia desde el punto de vista industrial.

Estudiaremos cada uno de los tipos genéticos de yacimientos industriales:

### 1. YACIMIENTOS DE SKARN

Estos yacimientos están representados por la formación mineral braunita-gausmanita. Los minerales característicos de estos yacimientos son granate mangánífero, piroxeno, epidota, magnetita, gausmanita, braunita, rodonita junto con franklinita.

Este es un tipo genético escaso y de poca importancia. Ejemplos de estos yacimientos son: Longban, en Suecia; Franklin, en EUA y montaña Lipovaya, en los Urales septentrionales, URSS.

### 2. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Dentro de este tipo genético, se encuentran yacimientos en rangos de temperaturas medias y bajas. Los de temperaturas medias están relacionados con granitoides, por ejemplo los yacimientos de Ilfeld e Ilmenau en el territorio alemán; Romanesch, en Francia; Butte, en EUA y otros en Marruecos, y México.

Los yacimientos descritos no tienen gran significación industrial.

Los de bajas temperaturas están asociados a la actividad vulcanógena, sobre todo del tipo submarina; ejemplos de estos yacimientos se encuentran en Bulgaria, Turquía, Japón, Finlandia, México y EUA. Estos yacimientos tampoco tienen gran importancia económico-industrial.

### 3. "SOMBREROS DE MANGANESO"

Estos yacimientos residuales están compuestos de pirolusita y psilomelano, los que se han formado, fundamentalmente,

como resultado de los procesos de oxidación de yacimientos sedimentarios y metamorfogénicos, desarrollando los llamados "sombreros de manganeso", formados por la propia corteza de intemperismo.

Los yacimientos tienen contenidos muy variables de Mn, pero sus concentrados pueden llegar hasta 40 y 50% de metal. Ejemplos son los yacimientos de Madhya Pradesh, Orissa y Madrás, en la India y los de la República de África del Sur, Ghana, Mali, Brasil y Australia. En la URSS, pertenecen a este tipo los yacimientos de Mazulks, en Siberia occidental, así como Marsiatsk y Polunoch.

### 4. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

Este es el tipo genético más importante para el Mn; se subdivide en dos grupos: **marinos** y **lacustres**. Están representados por las formaciones minerales pirolusita-psilomelano-manganita y rodocrosita-manganocalcita.

#### *Yacimientos sedimentarios marinos*

Este es el grupo más importante, porque pertenecen los yacimientos mayores de todo el mundo. Por ejemplo, Tchiaturi en la RSS de Georgia y la región de Nikopol en la RSS de Ucrania.

La composición de estos yacimientos varía de acuerdo con las condiciones bajo las cuales los sedimentos mangáníferos se acumularon. Sobre la base de las investigaciones realizadas, los depósitos están asociados a las costas de las cuencas marinas, con rocas ópalo-calcedónicas, y sedimentos coloidales ópalo-arcillosos.

A medida que se alejan de la línea costera, los óxidos, pirolusita y psilomelano, son sustituidos por manganita y después, a mayor distancia, por los carbonatos.

#### *Yacimientos sedimentarios lacustres*

Estos son yacimientos modernos, representados por minerales concrecionales de hidróxidos de manganeso. Se encuentran en Karelia, URSS; Finlandia, Suecia, Canadá y otros países.



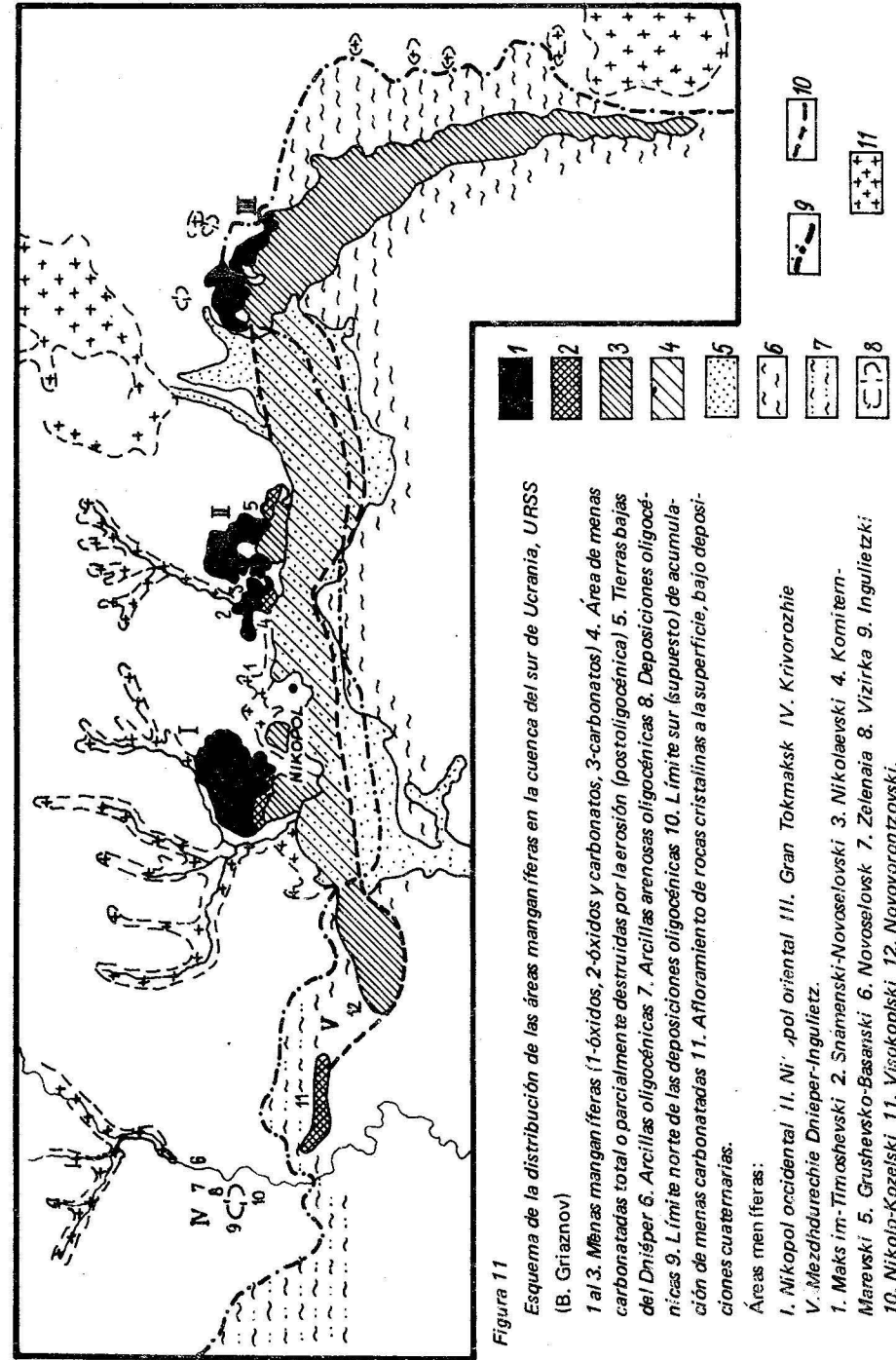


Figura 11

Esquema de la distribución de las áreas manganíferas en la cuenca del sur de Ucrania, URSS (B. Griaznov)

1 al 3. Menas manganíferas (1-óxidos, 2-óxidos y carbonatos, 3-carbonatos) 4. Áreas de menas carbonatadas total o parcialmente destruidas por la erosión (postoligocénica) 5. Tierras bajas del Dniéper 6. Arcillas arenosas oligocénicas 7. Depósitos oligocénicos 8. Límite norte de las depósitos oligocénicos 9. Límite sur (supuesto) de acumulación de menas carbonatadas 10. Afloramiento de rocas cristalinas a la superficie, bajo depósitos cuaternarios.

Áreas manganíferas:

I. Nikopol occidental II. Nikopol oriental III. Gran Tokmansk IV. Krivorozhie V. Mezhdudurechie Dnieper-Ingulietz.  
1. Maksim-Timoshevski 2. Snamenski-Novoselovski 3. Nikolaevski 4. Komintern-Marevski 5. Grushevsko-Basanski 6. Novoselovsk 7. Zelenai 8. Vizirka 9. Ingulietzki 10. Nikola-Kozelski 11. Visukopski 12. Novovorontzovski.

## 5. YACIMIENTOS METAMORFOGÉNICOS

Estos yacimientos se forman como resultado del metamorfismo de yacimientos sedimentarios, o rocas sedimentarias ricas en manganeso.

El metamorfismo de la mena oxidada (pirolusita y psilomelano), se produce con la deshidratación del yacimiento y la formación, en su lugar, de menas braunito-gausmanfíticas. Estas menas tienen significado industrial. Ejemplos de estos yacimientos se localizan en Usinsk, en la URSS; India, Brasil y Ghana.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Las provincias metalogénicas más importantes del Mn son:

**Europa:** la provincia de Nikopol, de menas sedimentarias de edad oligocénica.

**Asia:** las provincias Tchiaturi-Adzhameti-Chjarsk y nor-uraliana, de menas sedimentarias de edad oligocénica; la provincia de Siberia occidental de menas sedimentarias del Cámbrico frecuentemente metamorfizadas, como el yacimiento de Usinsk, y del Proterozoico, por ejemplo el yacimiento Mazulsk; la provincia india de yacimientos

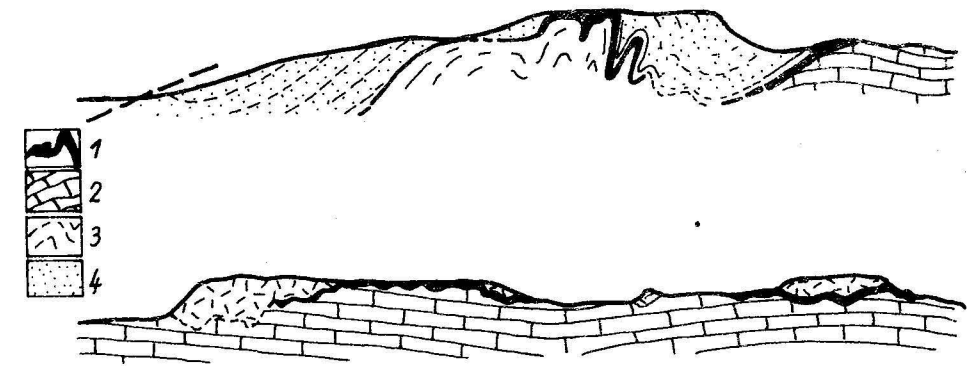


Figura 12

Cortes verticales de los depósitos de manganeso de Postmasburgo, República de África del Sur

(Du Toit)

1. Mineral 2. Dolomitas 3. Pizarras 4. Cuarcitas.

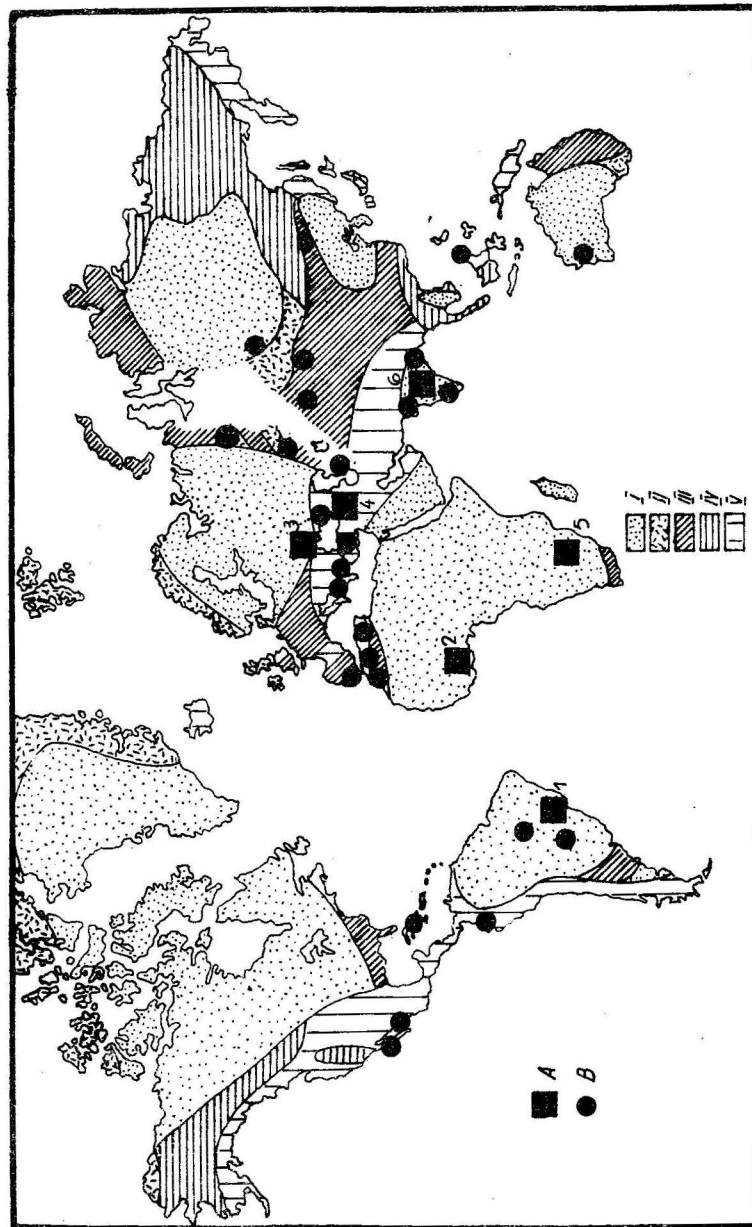


Figura 13

Principales yacimientos de manganeso del mundo  
I. Plataformas de edad Caledoniana II. Zonas plegadas de edad Herciniana III. Zonas plegadas de edad Kimeridgiense IV. Zonas plegadas de edad Alpina V. Zonas plegadas de edad Alpina A. Regiones montañosas y yacimientos de significado mundial 1. Morro di Mina (Brasil) 2. Nsima (África centro-occidental) 3. Nikopol (URSS) 4. Tchiaturi (URSS) 5. Postmasburg (República de África del Sur) 6. Balagat-Hagpur (India) B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

metamorfogénicos del Precámbrico; la provincia del océano Pacífico, de yacimientos hidrotermales de edad Terciaria, en Japón, etcétera.

**África:** la provincia de Postmasburg y Ghana, con yacimientos metamorfogénicos del Precámbrico y la provincia norafricana marroquí, de yacimientos sedimentarios.

**América del Sur:** la provincia brasileña de yacimientos metamorfogénicos del Precámbrico.

Las épocas más características para la formación de estos yacimientos fueron las siguientes:

**Precámbrico:** en esta época se formaron grandes yacimientos metamorfogénicos en India, Brasil, África occidental y septentrional y también yacimientos en la URSS. El Precámbrico aporta la tercera parte de la producción mundial de menas de manganeso.

**Cámbrico:** en esta época, se formó el enorme yacimiento Usinsk, en Siberia, de menas carbonatadas y silicato-carbonatadas metamorfi-zadas.

**Devónico:** se localizan yacimientos en la región aledaña a Magnitogorsk, y los yacimientos del Kazajstán central, en la URSS.

**Carbonífero inferior:** en esta época se formaron los yacimientos del sur de los Urales y también del Kazajstán central, como los del grupo Atasuik.

**Pérmico superior:** en esta época se formó el gran yacimiento Uluteliaks, en una zona cercana a los Urales occidentales.

**Cretácico superior y Paleógeno (Oligoceno):** esta es la época de formación más importante, puesto que produce las dos terceras partes de toda la extracción mundial de menas de manganeso.

En el Oligoceno se localizan los gigantescos yacimientos soviéticos de Tchiaturi, Nikopol, Polunoch, etc.; también en la parte superior de esta edad se localizan grandes yacimientos en Marruecos, así como una serie de yacimientos en los Balcanes y en Turquía.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos las características geológicas de los yacimientos de manganeso más importantes del mundo.

### YACIMIENTOS DE NIKOPOL, UCRANIA, URSS

Esta región se localiza al norte de la ciudad del mismo nombre, y se explota desde el año 1886. Específicamente el yacimiento Nikopol

está representado por depósitos en forma de capas, las cuales yacen casi horizontalmente, a veces con un buzamiento hacia el sur entre 5° y 7°.

En ocasiones las capas descansan sobre una superficie ondulada y erosionada, de granitos y neis, del Precámbrico; frecuentemente las capas están cubiertas por arenas y arcillas del Oligoceno.

El cuerpo mineral está formado por estratos intercalados de menas negras y areniscas-arcillas que tienen una potencia variable desde algunos centímetros hasta 0,3 m. La mena está compuesta por pirolusita y manganita, así como de menas carbonatadas- manganocalcita y calcito-rodocrosíticas. Entre las menas primarias (óxidos) se pueden reconocer cuatro tipos, siendo las concrecionadas, las más importantes.

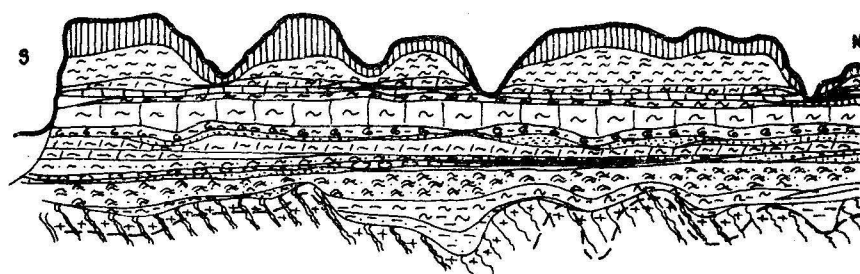


Figura 14  
Perfil geológico esquemático del yacimiento Nikopol, URSS

El contenido de Mn oscila entre 25 y 40%, y por eso las menas requieren un enriquecimiento industrial. Se obtienen concentrados de tres tipos:

% de Mn	% de P	tipo
48-52	0,16-0,22	1
42-46	0,17-0,25	2
30-35	0,18-0,35	3

Este yacimiento desempeña un papel fundamental en la economía soviética, fundamentalmente en la industria metalúrgica.

## YACIMIENTO TCHIATURI, URSS

Este gigantesco yacimiento de menas sedimentarias de manganeso se encuentra en la región de la ciudad de Tchiaturi, en el occidente de la RSS de Georgia.

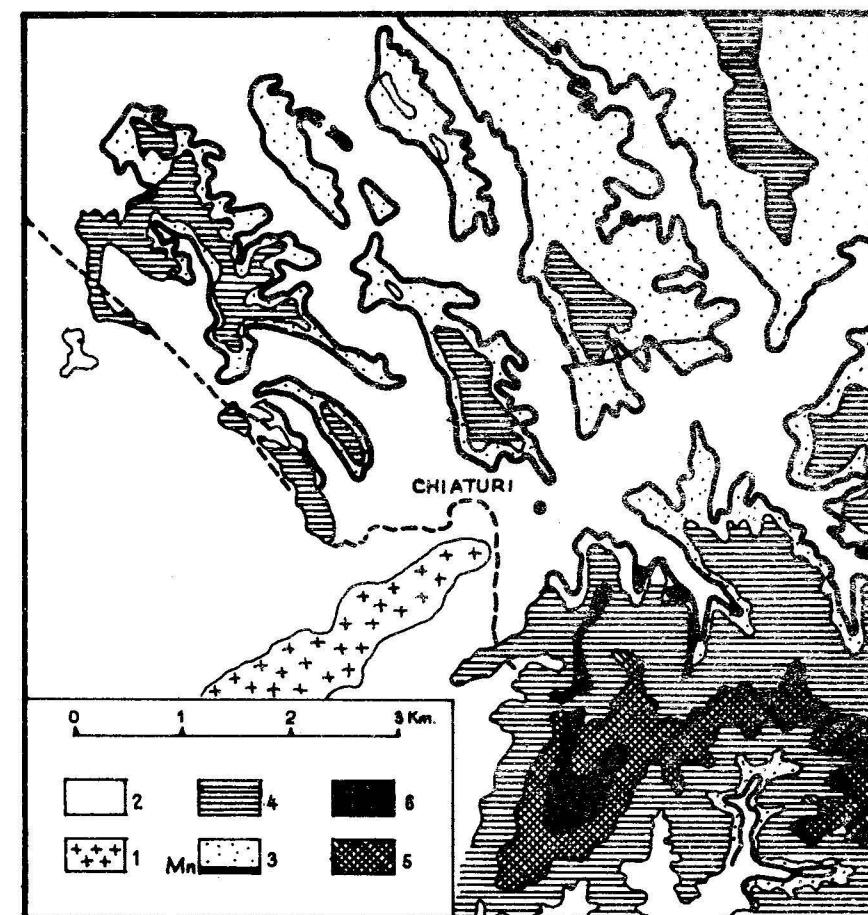
La región se caracteriza por la presencia de capas interestratificadas de areniscas arcillosas y areniscas, que forman una serie transgresiva oligocénica sobre las calizas cretácicas.

Figura 15

Mapa geológico esquemático del yacimiento Tchiaturi, URSS

(A. E. Betejtin)

1. Pórfido cuarcífero 2. Calizas del Cretácico superior 3. Arenisca oligocénica (en la base se localiza la mineralización) 4. Mioceno 5. Argilitas 6. Basaltos



El mineral está formado por pirolusita y manganita, de textura oolítica muy frecuente. Además se encuentra marcasita, barita y ópalo, y a veces se presenta hierro oolítico interestratificado. Se localizan de tres a quince estratos manganíferos de 2 a 5 m de potencia; en el yacimiento se desarrollan algunos metros de minerales friables como resultado de la alteración superficial de los minerales hipogénicos. Entre los minerales de este tipo, se señalan la vernardita, pirolusita y rancierita.

El contenido de Mn varía entre 10 y 35%, aunque en algunas partes puede ser mayor; el contenido de Fe es de 1 a 1,5%; se encuentra sílice en valores de 8,5%; el P, 0,16% y se reporta además la presencia de  $TiO_2$ .

Hay que señalar que en las direcciones E y NE, la mineralización de Mn se carbonata, y se desarrolla la rodocrosita con un contenido de calcio no muy grande y la manganocalcita, con 10 y 30% de CaO. El contenido de Mn varía entre 10 y 22% en estas zonas del yacimiento.

## EL MANGANESO EN CUBA

En el territorio de la isla de Cuba, se encuentran localizadas más de doscientas manifestaciones de mineralización manganífera, aunque la mayor parte de ellas son sólo yacimientos pequeños o de escala media; algunos con un mineral de elevada calidad y buenas condiciones para su explotación. La mayor parte de estas manifestaciones y yacimientos se localizan en la provincia de Oriente.

Katsitadze, Holmgren y Porro (1968), señalan que, en general, todos los yacimientos de Mn de Oriente, están asociados a las zonas de articulación sur y norte, del sinclinorio de Cuba oriental con el anticlinorio Sierra Maestra y el de Mayarí-Baracoa. De este modo se localiza una cuenca manganífera aproximadamente de 170 km, con un ancho promedio de 15 km.

Simmons y Straczek (1958) destacan, que varios yacimientos de Mn ubicados en la costa sur de la provincia de Oriente, yacen en la parte media de la formación El Cobre. Los autores mencionados subdividen la mineralización manganífera de Cuba en tres tipos genéticos:

- Vulcanógeno-sedimentario, que es el más importante de todos.
- Hidrotermal.
- Exógenos:
  - deluviales-aluviales contemporáneos (granzón)
  - deluviales-proluviales antiguos (bolsones)
  - de infiltración

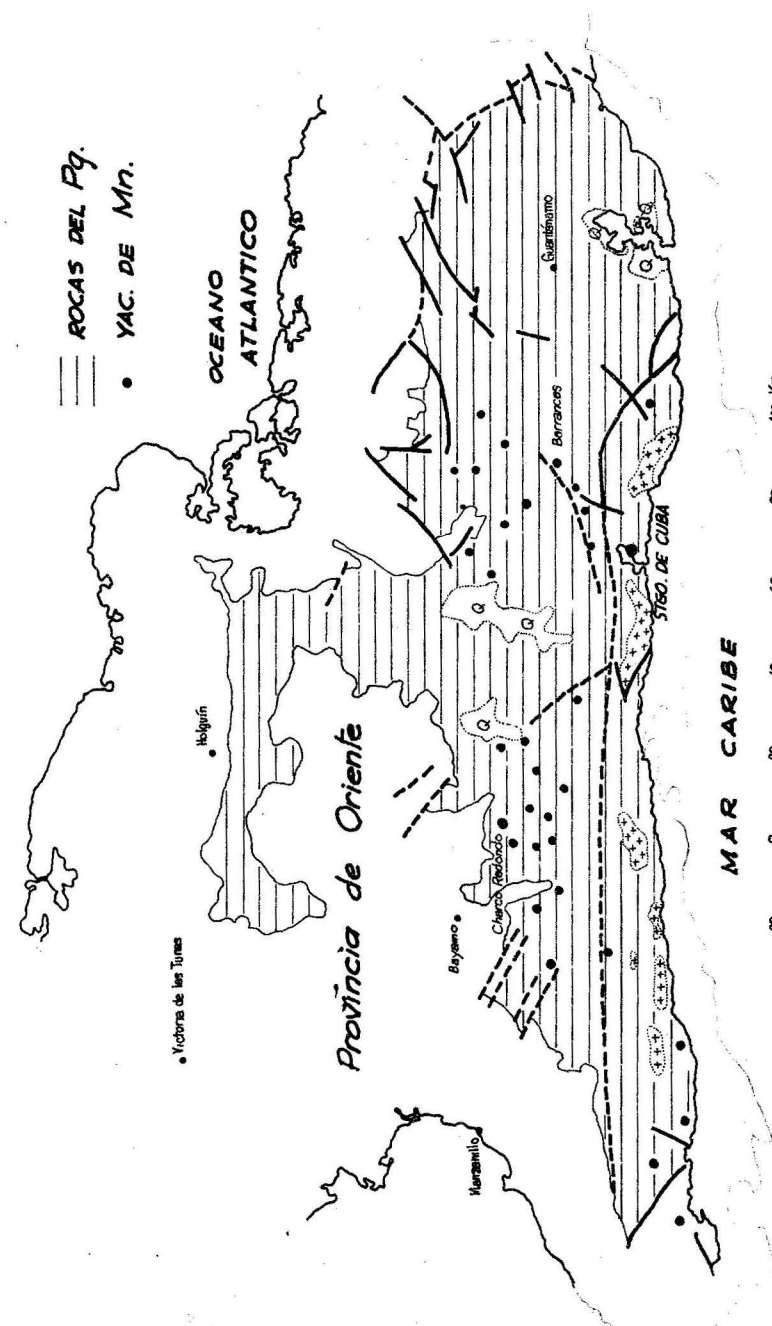


Figura 16  
Principal zona de mineralización manganífera de Cuba  
Cada punto indica un yacimiento o manifestación.



Se señala que los minerales de Mn se localizan generalmente en las partes periféricas de los focos volcánicos, con los que están relacionados genéticamente, y se encuentran en estrecha asociación con rocas silicificadas semejantes a jaspes, que reciben el nombre local de **bayate**.

En sentido general, la mineralización de Mn en la provincia de Oriente, está emplazada en un área donde se desarrollan las formaciones El Cobre (Cretácico-Eoceno inferior), Calizas Charco Redondo (Eoceno medio) y San Luis (Eoceno superior).

Sokolova, Brito y Coutín (1973) han realizado un estudio interesante sobre la formación manganífera El Cobre, en el cual describen su área de desarrollo, las características petrográficas y estructurales, así como las distintas zonas, manifestaciones y yacimientos de Mn relacionados con su origen.

Se pueden diferenciar varias áreas de desarrollo de los yacimientos de Mn en la provincia de Oriente; sin embargo dos de ellas son las más significativas:

- región Guisa-Los Negros
- región El Cristo-Ponupo.

La región Guisa-Los Negros, se encuentra aproximadamente a 100 km hacia el NW de la ciudad de Santiago de Cuba, capital de la provincia de Oriente. De todos los yacimientos de esta región el más importante ha sido Charco Redondo, que se encuentra localizado en el flanco SE de una estructura megasinclinal, situada al norte de la Sierra Maestra.

Este coto minero comprende una agrupación de yacimientos: Charco Redondo, Casualidad, Harlem, Charco Azul, Manuel, Caridad y otras manifestaciones. Las menas sólo se explotaron en el área de Charco Redondo.

En este yacimiento, se localizaron tres horizontes denominados A, B y C respectivamente; los mantos A y B estaban encajados en las calizas de Charco Redondo y el C en el contacto con las tobas de la formación El Cobre. La distancia entre los horizontes meníferos varía entre 1 y 6 m; los espesores y contenidos de cada manto son los siguientes:

Manto	Espesor	Ley mineral %
A	0,84 m	44,8
B	0,99 m	38,6
C	1,22 m	39,6

En general la composición mineral es psilomelano con pirolusita; las dimensiones del yacimiento son: 1 500 m de largo por 300 m de ancho.

La región El Cristo-Ponupo se desarrolla hacia el N y NE de la ciudad de Santiago de Cuba, y resulta ser el área más perspectiva de manganeso en la provincia. En la zona, la formación El Cobre tiene un amplio desarrollo, así como la formación San Luis, donde se localizan los bayates.

Con respecto a su génesis, en términos generales, existen diversas hipótesis, pero siempre todas tienen relación con el vulcanismo terciario andesítico-dacítico del sur de Oriente. Una de las opiniones supone que la formación de estos yacimientos ha sido por vía hidrotermal y que se originaron como resultado de la sustitución metasomática de las tobas depositadas en agua o calizas intercaladas, de edad Eoceno.

De acuerdo con Shirokova y Skraelin, la precipitación del Mn en el agua marina, proviene de la coagulación de los coloides protectores; lo mismo sucedió con el Fe y la sílice presentes en el yacimiento.

Opina Shirokova que al acumularse el Mn en las zonas de los depósitos, ocurrió una amplia sustitución metasomática de las rocas que se encontraban en el fondo marino: tufitas, tobas, calizas y areniscas. Durante la precipitación más intensa, la sustitución del Mn alcanzó a los materiales fragmentarios y fósiles presentes en las tobas y las calizas.

La sustitución de este tipo, sólo pudo lograrse por soluciones verdaderas de elevado contenido de Mn, en una supuesta relación con la actividad volcánica. De acuerdo con la calidad, la menas de Mn pertenecen, principalmente, al tipo metalúrgico, siendo la proporción entre el MnO<sub>2</sub> y el Mn igual a 1/2.

## CAPÍTULO 3

### CROMO

#### GENERALIDADES

✕ La utilización industrial de la cromita, comenzó en Noruega, en el año 1820, como material refractario; su uso generalizado en la industria metalúrgica y en la industria química, se inició a finales del siglo XIX.

Actualmente, la mayor cantidad de cromo se consume en la industria metalúrgica, para la producción de los aceros inoxidables. La adición de Cr le confiere al acero resistencia, tenacidad, dureza así como resistencia a la oxidación, corrosión, abrasión, ataque químico, paso de la corriente y descomposición por temperaturas elevadas.

El ferrocromo (65 a 70% de Cr) y la estellita (aleación de Cr con Co y Mo o V) son dos productos de gran demanda industrial.

Además de la industria metalúrgica, que consume más del 50% de la producción mundial del Cr, se utiliza aproximadamente el 40% en la industria de los refractarios y el 10% restante es utilizado por la industria química.

En la industria de los refractarios, se utiliza para el revestimiento de hornos y en la industria química en la producción de tintes, curtientes, lixiviadores, colores y agentes oxidantes.

La mayor producción de Cr en el mundo se logra en la URSS. La producción mundial en 1973 se elevó a 6,9 millones de toneladas. Además de URSS, son grandes productores la República de África del Sur, Turquía, Rhodesia y Filipinas. En Cuba se localizan determinadas reservas, fundamentalmente en las provincias de Camagüey y Oriente.

#### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Cr está situado en el sexto grupo y cuarto período de la tabla periódica. Su número atómico es 24 y su peso atómico es 51,996; se le conocen cuatro isótopos.

Isótopos	%
Cr <sup>50</sup>	4,5
Cr <sup>52</sup>	83,8
Cr <sup>53</sup>	2,4
Cr <sup>54</sup>	2,3

A pesar de tener el número atómico par, el cromo es el componente menos abundante de la litosfera superior. En la naturaleza el Cr puede presentarse en dos estados de valencia estables: en forma de cromo trivalente y hexavalente; sus radios iónicos miden 0,63 Å y 0,52 Å respectivamente. El radio del Cr trivalente es muy parecido al del Fe trivalente; el Cr se presenta en los silicatos en forma de catión, fuera de las redes complejas de silicio-oxígeno, donde sustituye con facilidad al Fe y al Al (el radio iónico del Al trivalente, es de 0,51 Å); esta es la forma más importante de presentarse el Cr litosférico.

Durante la diferenciación magmática, el Cr, a semejanza del Ti y el P, está muy concentrado en los primeros cristalizados. El carácter oxífilo del Cr en la litosfera superior es evidente; hasta ahora no se ha encontrado sulfuro de cromo en las rocas de nuestro planeta.

La evidencia de la asociación del cromo con los primeros diferenciados magmáticos, se obtiene del contenido de éste en las rocas:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	0,2
Rocas básicas	0,02
Rocas medias	0,005
Rocas ácidas	0,0025
Rocas sedimentarias	0,01

El contenido medio de Cr en la corteza terrestre es de 0,035%.

Los únicos minerales independientes de Cr en las rocas ígneas lo forman las llamadas **espinelas cromíferas**; es evidente que la mayor parte del cromo de la litosfera superior se encuentra en esta forma.

En los procesos postmagmáticos, el Cr no tiene un gran papel. En los procesos exógenos, en razón a las semejanzas de las propiedades químicas, tamaño iónico y carga iónica, el Cr sigue al Fe y al Al.

Sin embargo, los minerales de Cr tienden a concentrarse en los residuos inertes, fundamentalmente por su peso específico elevado, dureza alta y solubilidad relativamente baja. De ahí que su contenido en las rocas sedimentarias supere, incluso, al de las rocas básicas.

Quando el potencial *redox* es muy elevado, el Cr se moviliza en forma de cromo hexavalente; eso explica la presencia de cantidades estables de cromatos en los yacimientos de nitratos de Chile.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La única mena industrial de Cr es la cromita, que forma parte de las llamadas espinelas y cuya fórmula general es la siguiente:

(RO.R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) donde R(divalente) es Mg o Fe  
R(trivalente) es Cr, Fe o Al.

De esta forma, se reconocen los siguientes tipos de cromita:

Minerales	Composición química	Contenido % (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Cromita (Cromita ferruginosa)	Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Fe	47-60
Magnocromita	(Mg,Fe) Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	50-65
Cromopicotita	(Mg,Fe) (Cr,Al) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	35-55
Alumocromita	(Fe,Mg) (Cr,Al) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	35-60

Sobre la base de su utilización industrial, las cromitas se dividen en: metalúrgicas y refractarias, y se establecen dentro de cada subtipo, determinados grados de acuerdo con su calidad. Las cromitas metalúrgicas deben reunir los siguientes requisitos, entre otros:

Contenido de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no menos de 37 a 40%  
Relación Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no menos de 2,5%

Para las refractarias, el contenido de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> debe ser mayor que 30 ó 32% y la relación Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> puede ser 2,5 y a veces puede llegar a 2.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

De acuerdo con las características geoquímicas del Cr, se supone que sus tipos genéticos estén prácticamente relacionados con las rocas ultrabásicas. En efecto, todos los yacimientos industriales de cromo son del tipo genético magmático y fundamentalmente de génesis histeromagmática y de segregación. Una parte, con menor importancia, se localiza en forma de plaçeres.

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Estos yacimientos constituyen el tipo genético principal para el cromo.

#### *Yacimientos de segregación*

Los yacimientos de segregación o propiomagmáticos se forman como resultado del desprendimiento temprano, desde el magma menífero, de cristales de cromita los cuales forman lentes y vetillas entre las rocas ultrabásicas.

Como resultado de esta diferenciación gravitacional, los cristales de cromita se localizan en el interior de los macizos hiperbásicos. Ejemplos de estos yacimientos se localizan en Kliuchesk, en los Urales, URSS; así como en Great Dike, en Rhodesia; en Bushveld, República de África del Sur.

#### *Yacimientos histeromagmáticos*

Estos yacimientos, llamados también magmáticos tardíos, se formaron como resultado de la cristalización tardía de soluciones magmatogénicas ricas en cromo, que se han separado como resultado de la acción catalítica de los volátiles en la precipitación y cristalización de los minerales formadores de las rocas.

Si los cuerpos de los yacimientos de segregación eran lentes y capas, así como *schlieren*, los de los yacimientos histeromagmáticos son cuerpos en forma de vetas y filones, entre peridotitas y dunitas. Estos cuerpos están localizados en las grietas de la cristalización primaria.

Como regla general, las cromitas de estos yacimientos, cuando yacen en dunitas, tienen características metalúrgicas, mientras que cuando se asocian a peridotitas, se eleva su contenido de Al, y pasa entonces a desarrollarse la cromita refractaria.

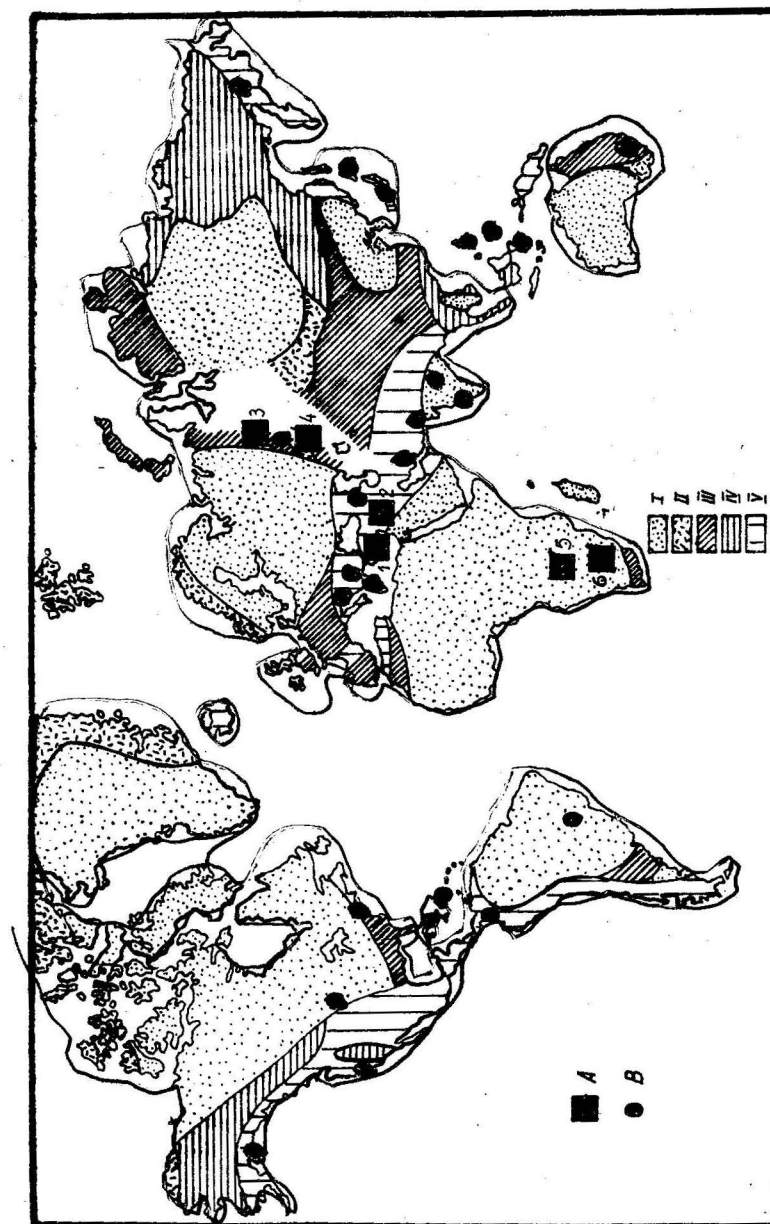


Figura 17

Principales yacimientos de cromo del mundo

I. Plataformas II. Zonas plegadas de edad Ca ledoniana III. Zonas plegadas de edad Herciniana IV. Zonas plegadas de edad Kimeridgiense V. Zonas plegadas de edad Alpina A. Regiones men íferas y yacimientos de significado mundial. 1. Dag-Ardi 2. Guíeman 3. Sarana (URSS) 4. Kempirsay (URSS) 5. Salukwe (Zambia) 6. Bushveld (África del Sur). B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local.

De acuerdo con Sokolov, cuanto mayor sea el contenido de Ca en el magma, menor es el contenido de  $Al_2O_3$  en la cromoespinela y mayor es el de Cr.

El tipo histeromagmático es el más importante de todos; los grandes yacimientos de este metal pertenecen a él, con excepción de algunos en África del Sur.

## 2. YACIMIENTOS DE PLACERES

Estos yacimientos se forman como resultado de la erosión y la meteorización de rocas ricas en cromitas, así como de yacimientos cromíticos.

Poseen significación industrial sólo los placeres eluviales-de-luviales, como es el caso de los de montaña Sarana, en los Urales septentrionales, URSS.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Las provincias mundiales del cromo son: África del Sur (Precámbrico); los montes Urales (Herciniano); la zona del mar Mediterráneo: Balcanes, Turquía, Cáucaso, etc., y el Cinturón del océano Pacífico: Japón, Filipinas, Indonesia, y Nueva Caledonia; estas dos últimas provincias son meso-cenozoicas.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Las principales regiones cromíferas de la URSS son los Urales y el Cáucaso. En los Urales y en toda su extensión, de norte a sur, se localizan ricos yacimientos de cromitas, asociados con la intrusión de peridotitas y dunitas de edad herciniana. Entre ellos son de gran interés los yacimientos Saranovsk y Alapaevsk en el norte y Verblizhegork, Ak-Karginsk y el grupo Kempirsay en el sur.

### YACIMIENTO SARANOVSK, URSS

Los cuerpos minerales de este yacimiento, —según Zimin (1938)— yacen en las profundidades de un macizo de peridotitas serpentizadas, las cuales atravesaron, en medio de filitas del Paleozoico inferior, en dirección meridional.



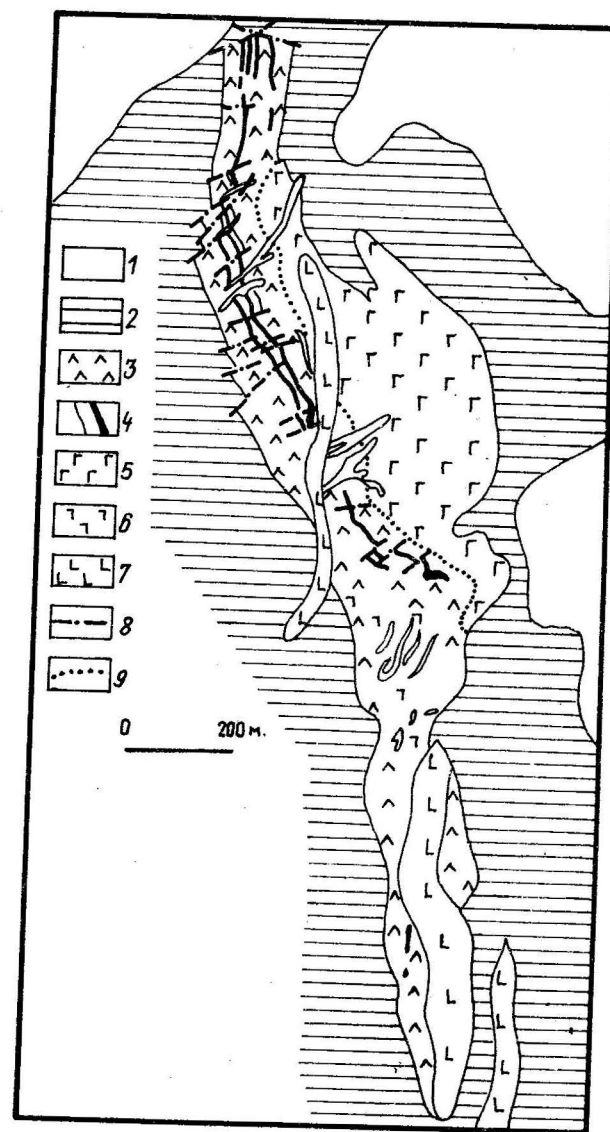


Figura 18

Mapa geológico esquemático del macizo cromítico de Saranovsk septentrional, URSS  
 1. Depósitos aluviales pantanosos-arcillosos 2. Esquistos cuarzo-sericíticos, cuarzo-sericíticos, cloríticos, epidóticos, actinolito-cloríticos y otros 3. Serpentinitas apoperidotíticas 4. Cuerpos meníferos cromíticos 5. Gabro-noritas 6. Diabasas metamorfozadas 7. Gabro-diabasas 8. Dislocaciones tectónicas 9. Límite peridotita-gabronorita.

El yacimiento tiene sus cuerpos minerales en forma de filones. Estos poseen contactos bruscos con las rocas encajantes y los cuerpos minerales principales son tres: uno central de 9,1 a 9,4 m de potencia; un cuerpo occidental de 3,9 a 4,2 m de espesor y un tercero (oriental), con potencia entre 2,3 a 2,4 m. En todos ellos la mena es masiva.

La mena es cromopicotita, con un contenido de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  de 35 a 42% y 18 a 20% de FeO. El yacimiento es histeromagmático.

#### YACIMIENTOS KEMPIRSAY, URSS

Este grupo de yacimientos, se encuentra emplazado —según Sokolov— en un enorme lacolito con 70 km de largo por 10 a 20 km de ancho en un área general aproximada de 1 000 km<sup>2</sup>, de rocas ultrabásicas serpentinizadas.

La edad del macizo es Variscico inferior. Durante el Jurásico, fue meteorizado, y en muchos lugares se conservaron yacimientos residuales de menas silicatadas de níquel y hierro.

La estructura interna del macizo, presenta la siguiente zonación.

(De arriba hacia abajo):

- peridotitas anfibólicas
- hazburgitas
- complejo listado de dunitas

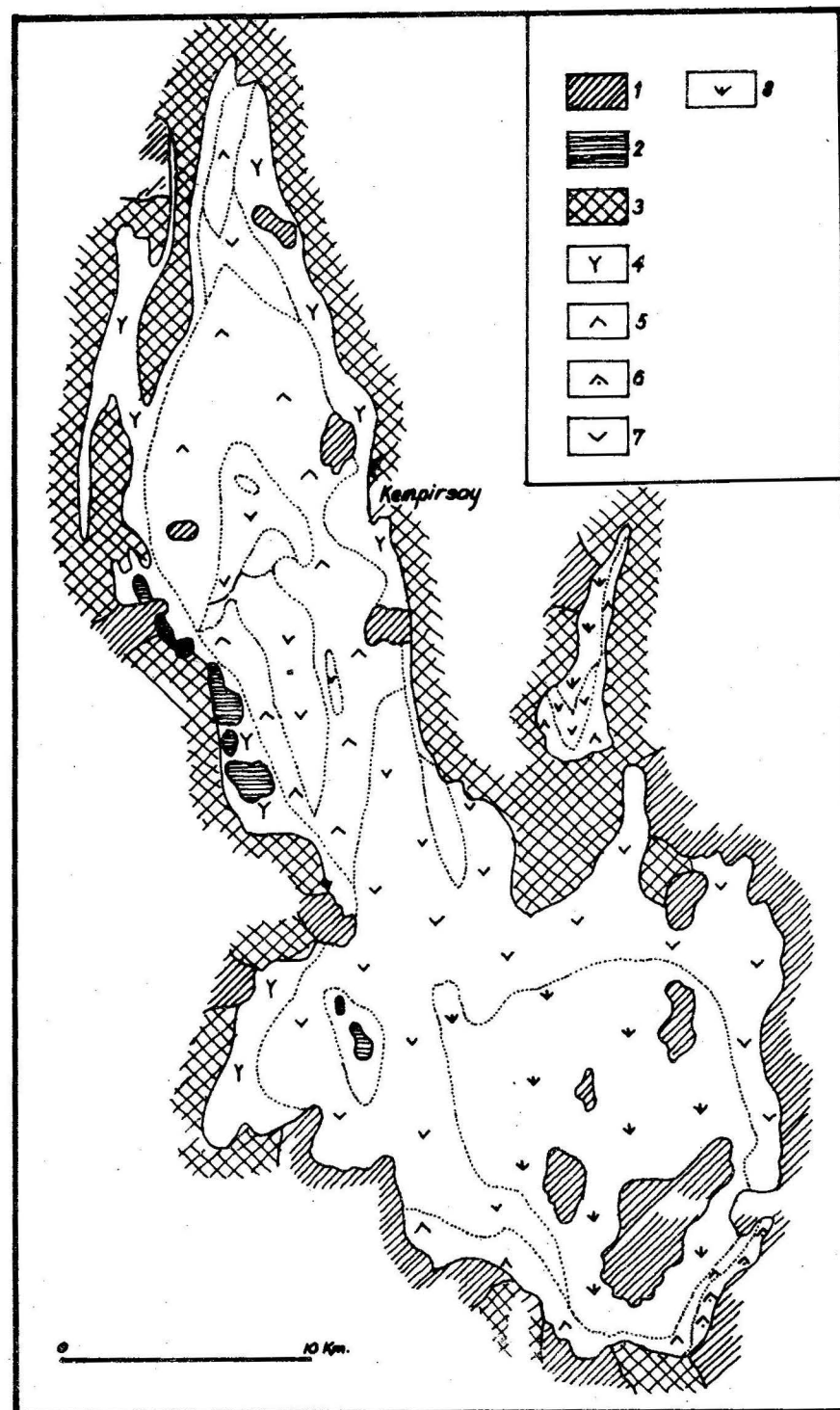
En el SE, la zonación es diferente:

- hazburgitas
- dunitas con enstatita
- dunitas (con las cuales se relacionan los mayores yacimientos de cromitas)

En los horizontes más profundos, es característica la alternación de dunitas y hazburgitas; con una dirección meridional y buzamiento brusco hasta el oeste. Los cuerpos minerales poseen las mismas condiciones de yacencia. Los yacimientos forman dos grupos: el del norte y los más importantes, ubicados hacia el suroeste.

Los cuerpos minerales se encuentran, principalmente, en las partes axiales de los pliegues y tienen la forma de *schlieren*, vetas de buzamiento brusco y lentes. Los cuerpos en forma de capas están presentes por grado.

Los mayores cuerpos tienen forma de lentes, en los yacimientos de Zhemchuzhin y Sputnik, y forma de vetas, en Zhemchuzhin y Almás. La di-



rección general del cuerpo mineral es meridional y su buzamiento hacia el oeste, bajo ángulos entre  $50^\circ$  y  $60^\circ$ .

Figura 19

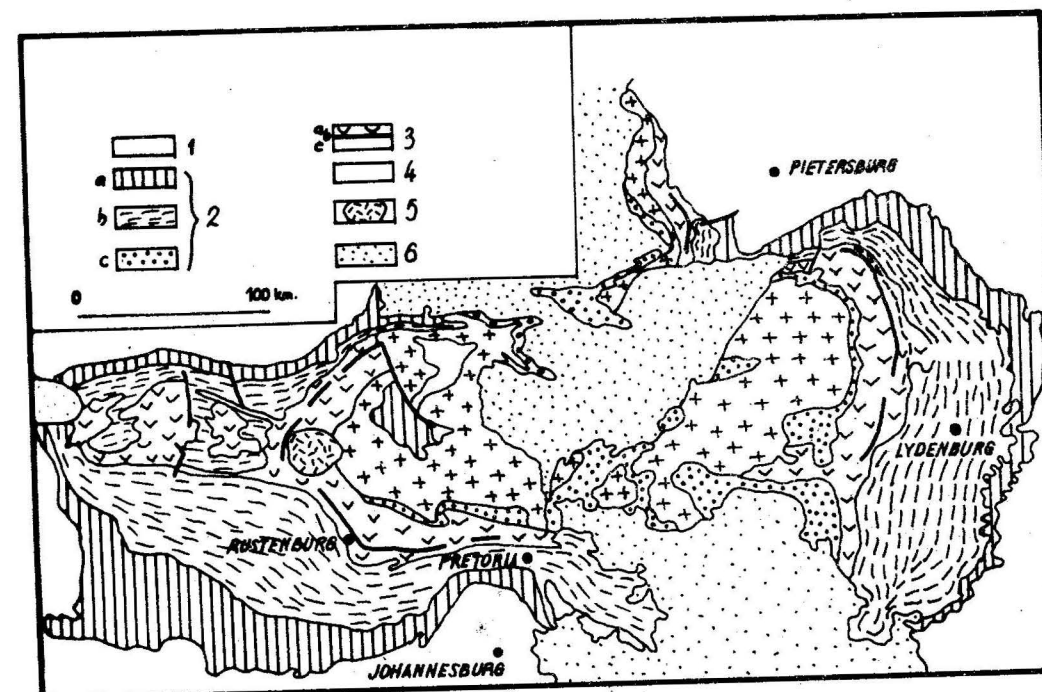
Mapa petrográfico esquemático del macizo ultrabásico de Kempirsay, URSS  
(V. P. Loginov y N. V. Pavlov)

1. Depósitos meso-cenozoicos
2. Klippen de rocas del techo (gabroides y rocas silíceas)
3. Rocas encajantes (gabroides, formaciones metamorizadas del Paleozoico y en parte Prepaleozoicas, incluyendo las efusivas y sus tobas)
4. Serpentinitas
5. Peridotitas masivas serpentinizadas (hazburguitas)
6. Peridotitas serpentinizadas (lerzolititas)
7. Complejo dunito-hazburguítico serpentinizado
8. Dunitas serpentinizadas.

Figura 20

Lopolito Bushveld en África del Sur  
(Schneiderhölm, Cameron y Emerson)

1. Formaciones pre-Transvaal
2. Formación Transvaal (parcialmente Precámbrico)
3. a) Serie dolomítica (y el Black Reef) b) Serie de Petroria c) Serie de Rooiberg
4. a) Norita b) Horizonte Merensky c) Grupo cromífero inferior (en la parte este)
5. Granito rojo
6. Rocas alcalinas
7. Formaciones (de arriba hacia abajo) Karroo, Cap y Waterberg.



## YACIMIENTOS DE RHODESIA Y ÁFRICA DEL SUR

Los yacimientos de esta provincia, están relacionados con el gigantesco complejo de Bushveld. Este extraordinario complejo de rocas básicas, principalmente noríticas, cubiertas por **granitos rojos** (granófiros), se intercala entre formaciones Precámbricas llamadas **sistema de Transvaal** y formaciones paleozoicas llamadas **sistema de Waterberg**.

La disposición general es la de una extensa cubeta sinclinal que aflora sobre 450 km de este a oeste. Por su estructura recibe el nombre de lopolito. En esta zona se encuentra el yacimiento Selukwe en Rhodesia, que se localiza en medio de esquistos talcosos, cloríticos y serpentiniticos, formados como resultado del dinamometamorfismo de las rocas ultrabásicas.

Los depósitos se localizan en el interior o cerca de Great Dike; las menas de Selukwe son metalúrgicas y contienen entre 50 a 54 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Los yacimientos de esta región son del tipo segregativo.

## EL CROMO EN CUBA

Los recursos cromíferos de la isla están concentrados en las provincias de Oriente y Camagüey. En todos los casos, se trata de yacimientos magmáticos asociados al cinturón hiperbásítico del norte de la isla.

Los yacimientos de cromitas fueron descubiertos a mediados del siglo pasado, y desde 1916 comenzaron a ser explotados. En 1942 Thayer publicó su trabajo sobre la geología de los yacimientos de cromo de Cuba. Flint, de Albear y Guild también han realizado estudios de nuestros yacimientos.

Recientemente, Adamovich y Chejovich (1963), Kenarev (1964), Diomin (1966), Murashko (1966) y Semenov (1968), han realizado trabajos sobre los yacimientos cromíticos, fundamentalmente, en la provincia de Oriente.

El trabajo de Semenov *Yacimientos cromíticos de Cuba* a pesar de su reducido volumen, es una recopilación muy valiosa de todos los trabajos anteriores, y debe ser consultado para obtener una información rápida, general y a la vez precisa, sobre estos yacimientos en Cuba.

Pavlov, Grigorieva y Muñoz Urbino, presentaron, en 1973, un interesante trabajo sobre las ultrabasitas cromíferas de Cuba, donde estudian, fundamentalmente, las provincias de Camagüey y Oriente.

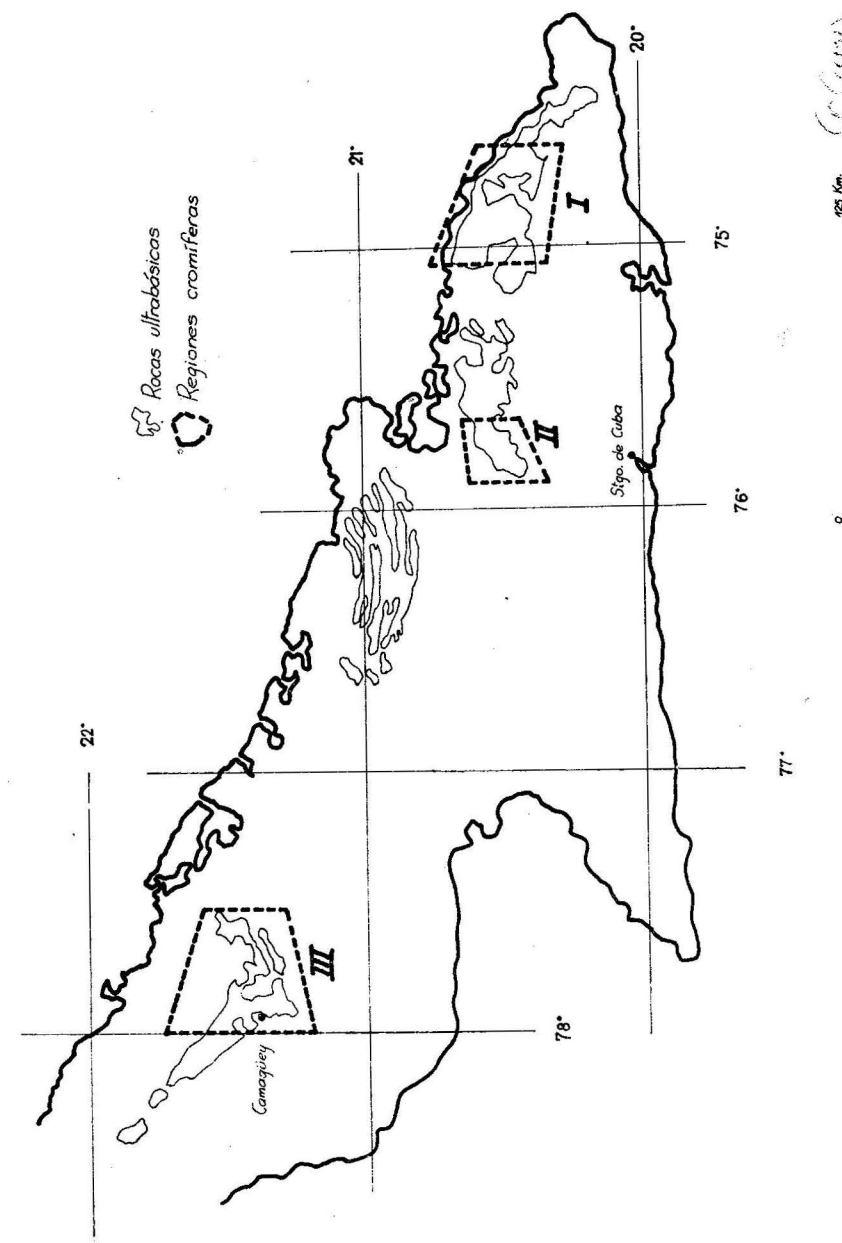


Figura 21

Principales zonas cromíferas de Cuba

I. Región de Pinar del Río, provincia de Oriente. II. Región de Matanzas, provincia de Oriente. III. Región de Camagüey, provincia de Camagüey.

Las rocas ultrabásicas ocupan aproximadamente el 4% del área de la isla de Cuba; la mayoría de las intrusiones ultrabásicas cubanas están compuestas por serpentinitas, entre las cuales se observan, relativamente pocas veces, zonas de hazburgitas y dunitas con distinto grado de serpentinización.

Por su estructura, las intrusiones de Moa-Baracoa, Camagüey y Santa Clara, son las más complejas, y presentan junto con las diferencias ultrabásicas, áreas ocupadas por gabroides (troctolitas, gabro olivínico, gabro y pegmatitas de gabro).

Semenov considera —a diferencia de los restantes autores y coincidiendo al ya enunciado por Flint, de Albear y Guild—, que las intrusiones cubanas corresponden a estructuras complejas, que fueron sometidas a una diferenciación gravitacional en la cámara del plutón.

Otro punto de vista, en relación con la formación de las cromitas, plantea dos etapas: una de penetración de las rocas ultrabásicas y, posteriormente, la penetración del magma gábrico, a lo largo de fallas.

El complejo de rocas ultrabásicas procede del Cretácico superior, si tomamos en consideración la presencia de cantos de estas rocas entre los conglomerados del Maestrichtiano; además, en diversos lugares de Cuba, este complejo atraviesa depósitos efusivo-sedimentarios del Cretácico inferior.

En el territorio de la isla están presentes menas, tanto metalúrgicas como refractarias.

Las menas metalúrgicas están concentradas fundamentalmente en la provincia de Oriente, vinculadas principalmente al cuerpo ultrabásico Pinares de Mayarí-Nicaró y, en menor grado, a la zona Moa-Baracoa; en la parte central, en el cuerpo de Holguín y en la provincia de Matanzas.

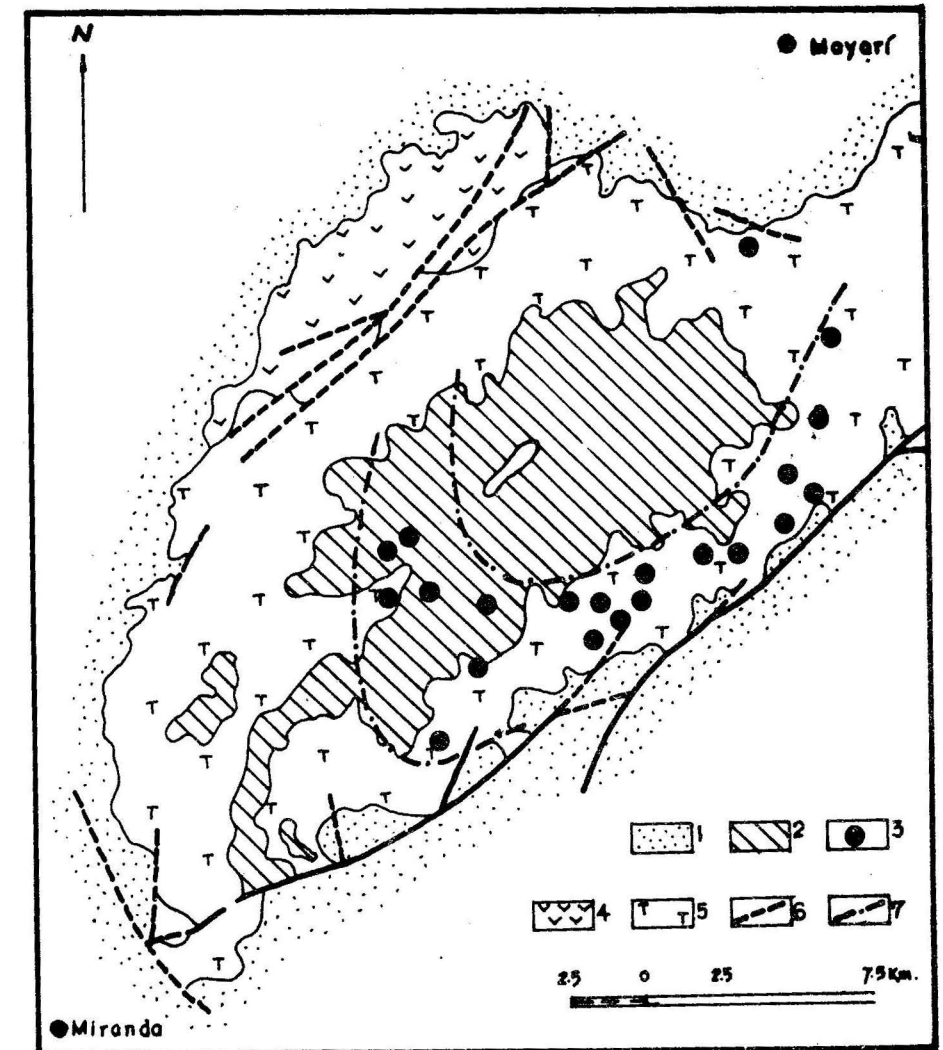
Se pueden reconocer cuatro grupos:

- Pinares de Mayarí, que es el mayor, e incluye los yacimientos Caledonia, Casimba, Caracol, Juanita, La Estrella de Mayarí, Nueva Caledonia, Sin Nombre y cerca de 40 manifestaciones pequeñas.
- Sagua de Tánamo, situado en la parte este del macizo Pinares de Mayarí, entre los ríos Grande y Sagua. Comprende 35 pequeños yacimientos: Albertina, Demajagua, Caridad y otros.
- Niña Magalys situado en las cercanías del contacto SW de la intrusión Moa-Baracoa. Comprende cerca de 12 manifestaciones minerales.

—Clemencia, en la parte central del cuerpo de Holguín comprende, Bad Look, Clemencia, Angelita Silva, Bob y Junior y otros.

Figura 22

Esquema de distribución de los yacimientos de cromitas metalúrgicas del grupo Pinares de Mayarí. (Según datos de Adamovich, Chejovich, Murashko y otros.)  
1. Depósitos sedimentarios del Cretácico y Terciario 2. Corteza de intemperismo laterítica 3. Yacimientos de cromita 4. Gabro-diabasa y gabro 5. Serpentinitas, hazburgitas serpentinizadas y dunitas 6. Fracturas 7. Límite de la zona mineral.





Murashko estudió en 1966, el grupo de Pinares de Mayarí, que es el más importante; los yacimientos están situados en las partes media e inferior de la pendiente SE de la meseta del mismo nombre.

Los yacimientos están asociados a segregaciones dunfíticas; el rumbo y buzamiento de los cuerpos se corresponde con el de los cuerpos dunfíticos. Los yacimientos más grandes son Caledonia y Casimba, en Loma Alta.

El cuerpo de Caledonia representa un depósito dividido por fallas, en bloques aislados. Sus dimensiones son las siguientes: 80 m, según el rumbo; 60 m, según el buzamiento y de 2 a 4 m de potencia; el rumbo del cuerpo mineral es NE, 70° a 80°, y el buzamiento de 30° a 35°, hacia el NW.

En general, el tamaño promedio de los cuerpos minerales de los yacimientos de cromitas metalúrgicas, no sobrepasa de los 30 a 40 m, según el rumbo; de 15 a 20 m según el buzamiento, y de 1 a 3 m de potencia.

La forma, carácter de los contactos de los cuerpos minerales y su asociación con las segregaciones de dunitas, aseguran que, el origen de las cromitas metalúrgicas cubanas fue por segregación magmática.

La composición mineral de la mena, es bastante uniforme. El contenido de espinela cromífera es de 10 a 50% en los minerales diseminados, y se eleva a 90% en los minerales macizos; los análisis químicos arrojan de 44 a 53% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 12 a 14% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 16 a 18% de  $\text{MgO}$ ; 8 a 10% de  $\text{FeO}$  más  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . De ello se deduce que por su composición química, las espinelas corresponden a la magnocromita y cromopicitita.

A diferencia de las cromitas metalúrgicas, las refractarias se concentran fundamentalmente en dos regiones:

- macizo de Moa-Baracoa
- este del macizo de Camagüey.

Estas cromitas se caracterizan por estar asociadas a partes determinadas de los cuerpos ultrabásicos, donde existe desarrollo de rocas del magma gábrico.

Los yacimientos se localizan en peridotitas serpentinizadas principalmente del grupo de las hazburgitas —en menor grado lherzolitas— y dunitas. En Camagüey, la región ha sido bien estudiada por Flint, de Albear y Guild, los cuales detectaron cerca de 155 yacimientos y manifestaciones, que han sido explotados total o parcialmente.

Estos yacimientos están situados en un área de colinas relativamente pequeñas que se extiende desde la ciudad de Camagüey, al oeste,

hasta el central Lugareño por el este. Al norte la región está limitada por la cadena montañosa de la Sierra de Cubitas, y al sur por las elevaciones de Loma la Entrada-Loma Bayatabo.

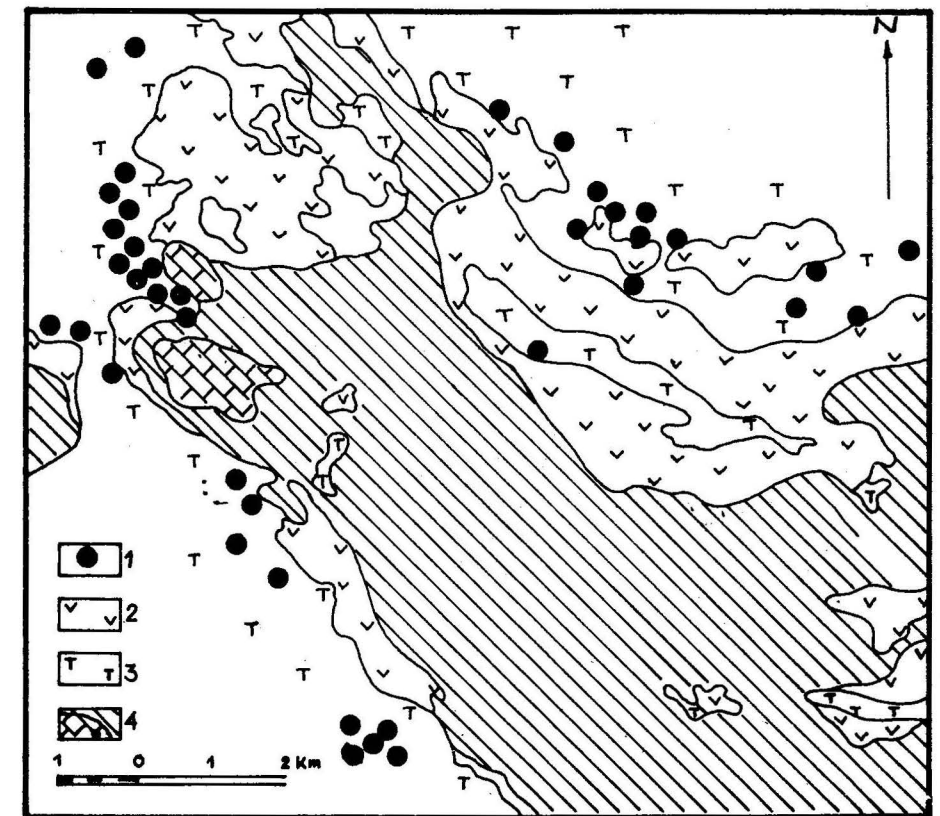
El rasgo más característico de los yacimientos de cromita de la región de Camagüey es su íntima asociación con la zona de contacto de las rocas ultrabásicas y gabroides. La mayoría de los yacimientos cono-

Figura 23

Esquema de distribución de los yacimientos de cromitas refractarias en la zona Loma Yucatán, Camagüey

(Flint, de Albear, Guild)

1. Yacimientos de cromita 2. Troctolitas, gabro-olivínico, gabro, anortositas 3. Serpentinitas, hazburgitas serpentinizadas, dunitas 4. Secuencia efusivo-sedimentaria del Cretácico con intercalaciones de calizas.



cidos yacen en una banda con un ancho de 0,5 a 1 km, la cual sigue, casi ininterrumpidamente, por la parte este de la intrusión, bordeando por su contorno el área de distribución de las troctolitas y el gabro.

Los cuerpos minerales en esta banda, se extienden paralelamente al contacto y buzcan generalmente bajo rocas gabroides, con ángulos que varían entre 30 y 40° hasta 80°. Según datos de Flint y otros, no se registran buzamientos en sentido contrario.

La zona cromítica de Moa-Baracoa, está situada en la parte este de Oriente, en los límites de la colina Cuchillas del Toa y sus contrafuertes, de norte a sur del litoral del océano Atlántico.

En esta zona se conocen cerca de 90 yacimientos y manifestaciones de cromitas refractarias, donde se localizan las reservas más importantes de Cuba y se distinguen los siguientes grupos de yacimientos: Merceditas-Yarey, Cayo Guam-Cromita, Delta, Cantarrana, Potosí, Nibujón, Amores, Moa y Lirial. Las principales reservas exploradas corresponden al grupo Merceditas-Yarey.

El rumbo y buzamiento de los cuerpos minerales, aunque varía, se corresponde, en general, con el rumbo de los contactos de los gabroides. Los cuerpos yacen, en la mayoría de los casos, en hazburgitas o en pequeños lentes de dunitas.

Los minerales diseminados, macizos y compactos, están compuestos por acumulaciones densas o concreciones de granos de espinelas cromíferas. El análisis químico reveló de 32 a 36% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 24 a 32% de alúmina, 16 a 17% de  $\text{MgO}$  y 16 a 17% de  $\text{FeO}$  más  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , en los yacimientos del grupo Merceditas y Camagüey II, lo cual permite señalar la espinela cromífera como un tipo intermedio entre la cromo-picotita y alumocromita.

Sobre la génesis de las cromitas, Kenarev, en su trabajo *Sobre la relación genética de las cromitas con las facies de hiperbasitas* hace una exposición comparativa de los distintos puntos de vista que se han enunciado hasta el presente.

En realidad casi todos los autores antes mencionados, han expuesto puntos de vista sobre la génesis de estos yacimientos; aunque el centro de las discusiones no está en la génesis en sí, sino en el mecanismo formador de las cromitas. Todos coinciden en señalar que en Cuba los yacimientos de cromitas son tanto histeromagmáticos, como de segregación.

## TITANIO

### GENERALIDADES

El titanio es un metal cuya utilización en la industria, se ha incrementado de manera extraordinaria. El Ti metalúrgico ha tenido en la actualidad, una demanda considerable para la producción de determinados aceros y aleaciones.

El acero al titanio con aluminio, manganeso, vanadio, hierro, cromo, cobre y níquel, tiene una gran utilización en la industria aeronáutica moderna, en la de construcción de maquinarias y también en la fabricación de reactores, barcos de todo tipo, instrumental quirúrgico, prótesis, etc. También se producen aleaciones especiales como son las de Fe -Ti -V; Ti -Al -Mn; (en proporciones 92-4-4) y  $\text{Al}_4\text{Ti}$  con 30,7% de Ti.

Además de utilizarse en la metalurgia, el Ti se usa también en la producción de pinturas blancas, linoleum, rayón, vidrios en general, fabricación de tintes y curtido de cueros.

La producción de Ti metalúrgico se inició en 1948 en EUA, y en la década del cincuenta estaba organizada en Gran Bretaña, Japón, Francia y URSS. La producción mundial de Ti se expresa en toneladas de concentrados a partir de sus minerales principales: rutilo e ilmenita.

El país mayor productor de concentrados de rutilo es Australia y de concentrados de ilmenita, EUA; además de India, Canadá y Noruega. Travancor, en la India es el yacimiento más explotado, y en Canadá, la región de Quebec. En la década del sesenta comenzó a ser explotado un enorme yacimiento de menas primarias rutilo-ilmeníticas de tipo metamorfogénico (?) en el estado de Oaxaca, en México, con un contenido en la mena de 20 a 25% de rutilo y reservas del orden de los 25 millones de toneladas.

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Ti se encuentra en el cuarto grupo del cuarto período del sistema periódico de los elementos. Su número atómico es 22 y su peso atómico igual a 47,90; se conocen cinco isótopos de Ti, y los más abundantes son los siguientes:

Isótopos	%
Ti <sup>48</sup>	73,45
Ti <sup>47</sup>	7,75
Ti <sup>46</sup>	7,95

En las combinaciones naturales, el Ti es un ión positivo tetravalente y trivalente, cuyos radios iónicos son 0,68 Å y 0,76 Å, respectivamente.

En los ciclos mayor y menor, el Ti se comporta de la siguiente forma: en el primero, en el ciclo endógeno, el Ti al igual que el Fe, muestra una tendencia definida a separarse pronto del magma. En consecuencia, la mayor parte del Ti está concentrada en los cristalizados iniciales, en forma de ilmenita y titano-magnetita.

El rutilo es raro en las rocas ígneas, pero se encuentra preferentemente en los gabros. En las rocas alcalinas, que son las más ricas en Ti, se encuentra concentrado con frecuencia en las pegmatitas. El contenido de Ti en las rocas es:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	0,03
Rocas básicas	0,9
Rocas medias	0,8
Rocas ácidas	0,23
Rocas sedimentarias	0,45

El Clarke de Ti en la corteza, es de 0,45; y, en las formaciones hidrotermales, apenas se dan casos de concentraciones elevadas de Ti.

En el ciclo menor, exógeno, los minerales de Ti son estables, sobre todo el rutilo y la ilmenita. Por tanto, durante la meteorización, gran parte del Ti permanece, y constituye acumulaciones en forma de placeres, que tienen importancia económica.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

El Ti puede formar varios minerales independientes; sin embargo sólo tienen significado económico, tres de ellos:

Minerales	Composición química	Contenido %
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	31,6
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	60
Titanita	TiCa(SiO <sub>4</sub> )O	24,5

Otros minerales de Ti son el ilmenorutilo (Ti.Nb.Fe)O<sub>2</sub> con 32% de Ti; perovskita TiO<sub>3</sub>Ca con 35,5% de Ti y la loparita (Na.Ce.Ca.) (Nb.Ti.)O<sub>3</sub> con 23,5% de Ti.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Se reconocen los siguientes tipos genéticos de yacimientos industriales de Ti:

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Los yacimientos de este tipo, están relacionados con rocas básicas y alcalinas. Entre ellos podemos reconocer yacimientos entre piroxenitas con menas titanomagnetíticas con contenidos de TiO<sub>2</sub> entre 2 y 6%; se explotan como menas de Fe ricas en V, ejemplo es el yacimiento Kachkanar al norte de los Urales.

También los localizados entre anortositas y gabroanortositas, noritas, a veces diabasas, que contienen grandes macizos de menas ilmeníticas o ilmenito magnetíticos con rutilo, apatito y algunos sulfuros.

Ejemplos de estos yacimientos son: Adirondacks en el estado de Nueva York, en EUA, el Distrito de Allard Lake, Lac Tio, en Canadá, Kusinsk en la URSS.

Por último, los yacimientos en sienitas nefelínicas, sienitas alcalinas y rocas alcalinas ultrabásicas, con las cuales se asocian menas de perovskita y titanomagnetita con apatito, ilmenita, titanita, pirocloro, etcétera. Ejemplo de este tipo, son los yacimientos de la península de Kola en la URSS; Oka, en Canadá, Jacupiranga en Brasil, así como otros localizados en EUA y Noruega.

## 2. YACIMIENTOS PEGMATÍTICOS

Este tipo está relacionado con pegmatitas alcalinas ricas en rutilo e ilmenita.

## 3. YACIMIENTOS RESIDUALES

Estos yacimientos se forman como resultado del surgimiento de cortezas de intemperismo sobre rocas básicas y alcalinas y son ricos en ilmenita, rutilo y otros minerales de Ti.

Los yacimientos de este tipo tienen, al igual que los placeres, un gran significado económico.

## 4. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

Son yacimientos en placeres, que se reconocen desde el Paleozoico y Mesozoico, hasta el Cuaternario. Las arenas (placeres) están enriquecidas por ilmenita y leucoxeno que contienen además rutilo; todas juegan un papel muy importante en la industria del Ti en la URSS.

Yacimientos característicos de este tipo se localizan en Ucrania, en la RSS de Kazajistán, RSS de Armenia y en las Repúblicas del Asia central.

## 5. PLACERES MARINO-COSTEROS Y ELUVIALES-ALUVIALES CONTEMPORÁNEOS

Estos tipos de yacimientos, tienen una enorme importancia económica —sobre todo los marino-costeros— para la India, Gabón, Sri-Lanka, Australia, EUA, Nueva Zelanda, Camerún, Brasil y Egipto. Las arenas contienen ilmenita, rutilo, circón, monacita, a veces también casiterita y otros minerales. El contenido de minerales de Ti llega hasta 60 y 80%.

En Australia, en Queensland, al N y S de Gales, se localizan placeres marino-costeros con potencias de 4 m, y un 20% de minerales útiles. Los concentrados presentan de 30 a 40% de rutilo, 27 a 51% de circón, 14 a 31% de ilmenita, 0,2 a 2% de monacita y también algo de casiterita, oro, platino, cromita, magnetita y granate. Se obtienen, cada año, entre 40 000 y 50 000 toneladas de concentrados de rutilo.

## 6. YACIMIENTOS METAMORFOGÉNICOS

Estos yacimientos yacen entre esquistos y contienen ilmenita, titanomagnetita y rutilo. Surgen como resultado del metamorfismo de rocas del magma gábrico. Tal es el caso de los yacimientos de Carolina del Norte en EUA.

También surgen yacimientos del tipo metamorfozados, resultado del metamorfismo de placeres titaníferos. Tal es el caso ya señalado del yacimiento situado en el estado de Oaxaca en México.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

En la región de la URSS, las provincias titaníferas más importantes son: Karelia, la península de Kola, el macizo cristalino de los Urales y el sur de la plataforma siberiana.

Otras zonas importantes son los escudos canadiense, brasileño, africano, indostano, fenoscandio y australiano.

Malishev subraya la relación de los yacimientos magmáticos de Ti con macizos de gabro del Precámbrico, raras veces del Paleozoico inferior, que yacen en zonas de transición de plataformas antiguas a geosinclinales Proterozoicas o del Paleozoico inferior.

Los yacimientos de Ti relacionados con los complejos alcalinos son mucho más jóvenes (hercinianos, mesocenozoicos) y representan formaciones de plataformas. La época más productiva para el titanio fue el Precámbrico; y son considerablemente menos ricas las épocas caldonianas y las más jóvenes.

Los yacimientos más grandes, están situados en los límites de los escudos; otros, considerablemente menores, se forman en la etapa inicial de desarrollo de las zonas plegadas o en el período de plataforma.



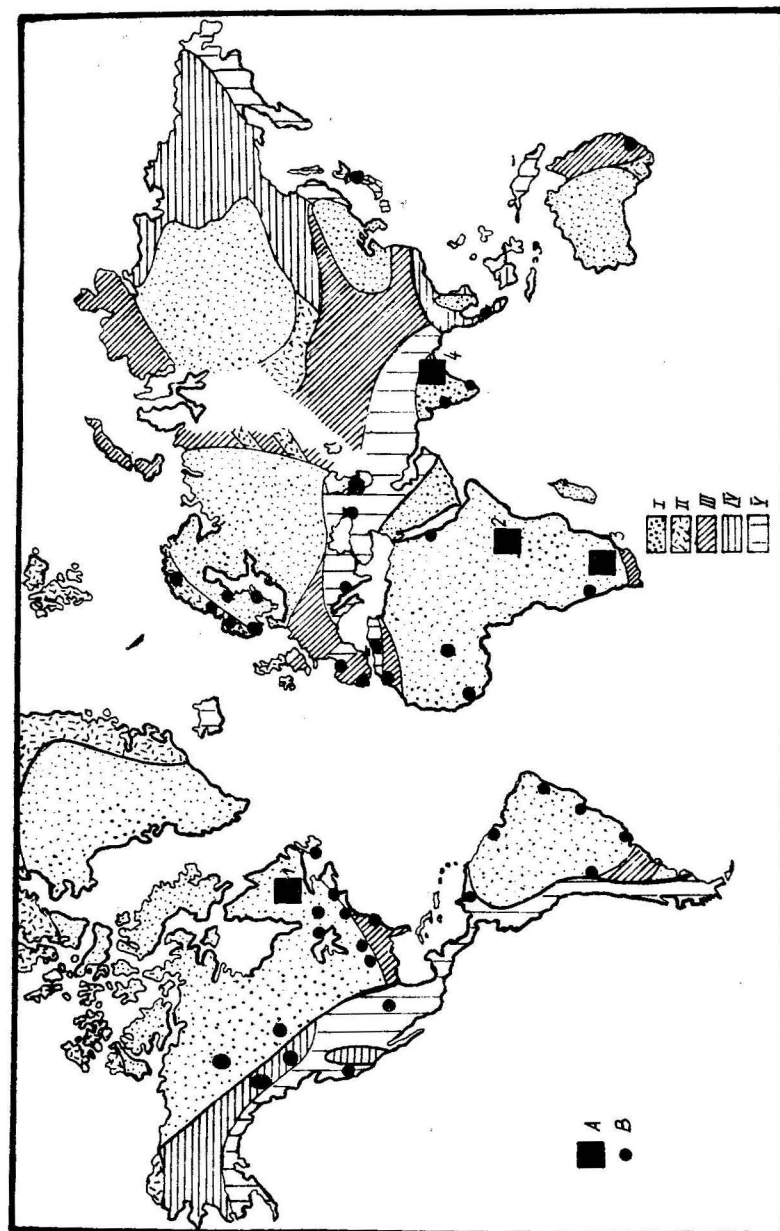


Figura 24  
Principales yacimientos de titanio del mundo (excluida la URSS) I. Plataformas II. Zonas plegadas de edad Caledoniana III. Zonas plegadas de edad Herciniana IV. Zonas plegadas de edad Alpidia  
A. Regiones meníferas y yacimientos de titanio mundial 1. Lac Tio (Canadá) 2. Liganga 3. Bushveld (África del Sur) 4. Mayurbhara (India) B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local.

## VANADIO

### GENERALIDADES

El vanadio fue descubierto en 1801 a partir de menas plumbíferas y algunos años después, en 1831, fue localizado en las menas del yacimiento Taberg, en Suecia.

La utilización industrial del V se inició en 1905, fundamentalmente en la metalurgia ferrosa, para la producción de ferrovanadio, vanadato de calcio o pentóxido de vanadio. El hierro fundido aleado con V, tiene una gran aplicación en la construcción de maquinarias, en la producción de partes y piezas de mecanismos que requieran dureza, así como resistencia a la tensión, al choque y a la fatiga.

El acero con 1% de V y más, juega un gran papel en la construcción de aviones, automotores, maquinaria, así como en la industria de los armamentos. A estos aceros se les adiciona determinadas cantidades de W, Cr, y Mo.

También se utiliza el V en la industria química (sobre todo el óxido de vanadio) y actualmente, como catalizador en sustitución del platino, en la producción de colorantes y en la industria fotográfica.

La producción mundial de V se ha incrementado considerablemente en los últimos años. La producción se elevó, en 1972, a 17 049 toneladas sin incluir los países socialistas. De este volumen, la República de África del Sur produjo 8 230 toneladas; otros países productores de V son: EUA, Perú y Zambia.

Se calcula que 6/10 partes de las reservas mundiales de minerales de V se concentran en los países del campo socialista.



## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El V está situado en el quinto grupo y el cuarto período de la tabla periódica. Su número atómico es 23 y su peso atómico es 50,942; en la naturaleza existe un solo isótopo de este elemento: V51. El V es uno de los oligoelementos más abundantes. Su Clarke es de 0,009.

El carácter geoquímico general del V es francamente litófilo aunque no sin una tendencia siderófila. En la litosfera superior es oxífilo; en el medio ígneo, se presenta en estados de valencia 3, 4 y 5 y sus radios iónicos respectivos son 0,74 Å, 0,63 Å y 0,59 Å.

En condiciones endógenas, las concentraciones más significativas del vanadio, están asociadas con las rocas básicas, gabros y sus pegmatitas, y, con menor frecuencia, con las rocas alcalinas. El contenido de vanadio en las rocas es:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	0,004
Rocas básicas	0,02
Rocas medias	0,01
Rocas ácidas	0,004
Rocas sedimentarias	0,013

Todos los iones de V (especialmente, el pentavalente) muestran tendencia a formar complejos con el oxígeno y en parte con el azufre. En las asociaciones hidrotermales, sólo se ha encontrado el V como componente accesorio de la vaninita en los filones de Ni-Co-U.

En condiciones exógenas, el V se asocia con Ca, Mg, Fe, Mn, C, As, P, Cu y U. Durante la meteorización, se incorpora gran cantidad de V a los minerales arcillosos; sin embargo, bajo ciertas condiciones, por ejemplo, en las regiones áridas, el V se concentra en el hidróxido de aluminio, para separarse durante la descomposición de las arcillas.

El V pentavalente, se moviliza con facilidad, y si en las aguas subterráneas o en las rocas existen metales pesados, se pueden producir grandes concentraciones locales de vanadatos de Cu, Pb, Z, y U; principalmente, en la zona de oxidación de yacimientos de estos metales y en presencia de calizas y calizas dolomíticas, que originan un pH adecuado para la precipitación de esos vanadatos.

Otra posibilidad de concentración de V en los sedimentos, es su transporte en forma de vanadato en las soluciones de la meteorización, las cuales, en condiciones reductoras —por lo general en presencia de sulfuro de hidrógeno—, precipitan su V en forma de  $S_5V_2$  en las pizarras bituminosas, asfaltos y rocas semejantes. En general, las rocas que contienen materia orgánica son más ricas en V que las desprovistas de ella.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

De la gran cantidad de minerales que contienen V, sólo unos cuantos de ellos tienen significación industrial; ellos son:

Mineral	Composición química	Contenido %
Roscoelita	$KV_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	19-29
Carnotita	$K_2U_2(VO_4)_2O_4 \cdot 3H_2O$	20
Patronita	$VS_2$ ó $V_2S_5$	hasta 25
Vanadinita	$Pb_5(VO_4)_3Cl$	19

También puede señalarse la decloisita  $(Zn,Cu)Pb(VO_4)(OH)$ , la tuyamunita,  $Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 8H_2O$  con 19% de  $V_2O_5$  y la turanita,  $Cu_5(VO_4)_2(OH)_4$ .

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los principales tipos genéticos de yacimientos industriales de V son:

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Los yacimientos magmáticos de menas titanomagnetíticas están relacionados con gabros y piroxenitas. El contenido de V en los concentrados de magnetita, llega generalmente de 0,5 hasta 1% y, a veces, hasta 2% de  $V_2O_5$ .

Los yacimientos de este tipo son complejos y contienen Fe-Ti-V (a veces Cu y Pt). Ejemplos son: Kusinsk, Pierboursk, Kachkanar y otros, en URSS; Taberg en Suecia, Montes Adirondacks en EUA, y el enorme yacimiento de Nshombo en Tanzania, así como en el estado de Bihar en la India.

## 2. YACIMIENTOS DE INFILTRACIÓN

Los yacimientos de este tipo son, en la actualidad, los de mayor explotación industrial. Se pueden reconocer los siguientes subtipos:

### *Areniscas carnotífticas y carnotífticas-roscoelífticas*

Tienen hasta 0,5% y más de  $UO_3$  y entre 1 y 2% de  $V_2O_5$ . A este subtipo pertenecen los importantes yacimientos de los estados de Utah y Colorado, en EUA, los yacimientos al sur de Australia, etc. Las menas de esta formación aportan aproximadamente la mitad del V que se produce mundialmente.

### *Menas patronífticas*

Están relacionadas con vetas y capas de asfalto. Las menas son muy ricas en vanadio (de 10 a 15% de  $V_2O_5$ ); contienen algo de Ni y Mo. El ejemplo típico es el yacimiento Minasragra en Perú, el cual aporta aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la producción mundial de vanadio.

### *Menas de vanadinita-decloisita*

En las zonas de oxidación de algunos yacimientos de Pb-Sn yacimientos de este tipo se localizan en la RSS de Kazajstán; Broken Hill, en Zambia; Tsumeb y Akenab, en Namibia. De este tipo de yacimiento se obtiene, aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la producción mundial de V.

## 3. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

En este tipo genético, se reconocen los siguientes subtipos:

### *Pizarras vanádicas*

El contenido de  $V_2O_5$  es de 0,5 a 1% y a menudo contienen Mo, Cu, U y otros elementos. Las reservas de V son enormes, y en un futuro, estos yacimientos jugarán un importante papel como fuente de V, puesto que contiene además, cantidades significativas de Mo y U.

### *Menas sedimentarias*

Menas oolíticas de hierro que contienen entre 0,05 y 0,1% de  $V_2O_5$ . Por ejemplo, los yacimientos de Lotaringia, en Francia; Wabana, en Canadá y Kerch, en URSS.

### *Menas sedimentarias de manganeso*

De 0,06% de V, en los yacimientos del norte de África y bauxitas en Italia.

### *Placeres titanomagnéticos contemporáneos*

Con arenas y areniscas ricas en  $V_2O_5$  equivalente a 0,1 y 0,3%.

### *Rocas caustobiolíticas*

Algunos yacimientos de asfaltitas en Perú y EUA, con 0,3 a 0,8% de V; en las cenizas del petróleo iraní, se encuentra hasta 5,03% de  $V_2O_5$  y 2,7% de NiO; en las cenizas de los carbones argentinos se localiza hasta 21,4% de V.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Las concentraciones mayores de este metal están relacionadas con pizarras bituminosas y silíceas del Cámbrico y el Silúrico; a menudo se localizan también en rocas del Pérmico y el Devónico. Concentraciones significativas se localizan en areniscas del Triásico, Jurásico, Cretácico y también en las menas titanomagnéticas de los Urales, India y Tanzania.

Las regiones más ricas en V, se encuentran en la cadena montañosa de Karatau en Kazajstán, URSS; la zona aledaña al Báltico; los estados occidentales de EUA; Perú, Tanzania y Namibia.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes de V, en el mundo.

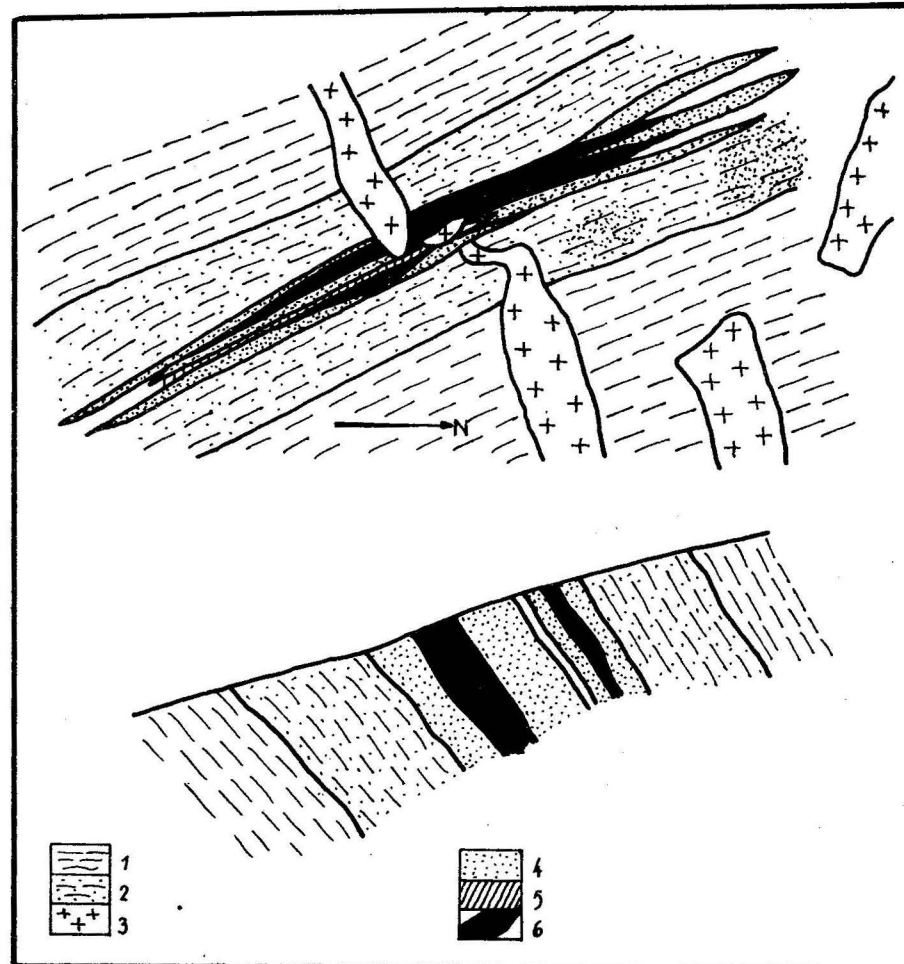
## YACIMIENTO MINASRAGRA, PERÚ

Este yacimiento está ubicado a una altura de 4 700 m. La región del yacimiento está formada por esquistos y pizarras arcillosas, areniscas y calizas de edad Cretácico, atravesados por diques de porfiritas (traquitas, riolacita, diabasas).

Figura 25

Yacimiento de vanadio Minasragra, Perú central (G. C. Amstutz)

1. Pizarras corrientes 2. Pizarras de "transición" 3. Diques de riolacita 4. Esquistos carbonosos con yeso y minerales de vanadio diseminados 5. Arcillas y/o carbón 6. Parte central de los esquistos ricos en sulfuros.



Existe una serie de cuerpos minerales verticales, vetas y lentes, que se localizan en las arcillas esquistosas. El cuerpo mineral principal es explorado en su dirección, a lo largo de 100 m, con una potencia que oscila entre algunos centímetros hasta 9 y 12 m.

La mena es muy rica, y contiene hasta 15% de  $V_2O_5$ , 1,5% de Ni y 0,5 a 1% de Mo. Desde el punto de vista mineralógico, es patronita en una matriz asfáltica que contiene S, Ni y Mo. Las condiciones de formación del yacimiento no están determinadas.

Sin embargo, las evidencias y la propia paragénesis mineral indican que sólo en condiciones hipergénicas pudo formarse el yacimiento, en estrecha relación con el proceso de formación del asfalto, y la acción del  $SH_2$ , sobre las aguas oxigenadas cargadas de V, Ni, y Mo.

## NÍQUEL Y COBALTO

### GENERALIDADES

La producción industrial de níquel, se inició en Suecia en los años 1825 y 1826; sin embargo, el cobalto, había sido utilizado desde la antigüedad en Egipto y posteriormente en Irán, Asiria, India y China, para las coloraciones "azul de cobalto", en la cerámica y la producción de vidrio.

Actualmente, la utilización del Ni se realiza, fundamentalmente, en la metalurgia, para la producción de aceros y aleaciones especiales, laminados de todos los tipos, para proporcionarles resistencia a altas presiones y temperaturas, así como a la corrosión. Una parte del Ni se utiliza en la industria química, en forma de revestimientos (níquelado).

La utilización del Ni en la industria moderna es, por tanto, de primordial importancia puesto que las propiedades que proporciona a los aceros y otras aleaciones, lo hace materia prima básica en muchas ramas industriales y, sobre todo, en la de construcción de equipos y maquinarias, partes y piezas de mecanismos y dispositivos mecánicos.

Los aceros al Ni contienen de 0,5 a 7% de Ni en los llamados **aceros de bajo níquel** y de 7 a 35% de Ni en los **aceros de alto níquel**. Los **latones y bronce al níquel**, contienen entre 0,5 y 7,5% de Ni. Se producen aceros de Ni y Cr llamados **nicrom**, que tienen gran demanda en el mercado industrial y el metal **monel** en la producción de monedas, aleado, generalmente, con 75% de Cu y 25% de Ni.

El Co comenzó a utilizarse en la metalurgia, en 1735, pero sólo después del año 1907, alcanzó verdadero significado. Los aceros al cobalto tienen gran utilización en la aviación, la industria de los armamentos, la química y en la construcción de maquinarias.

La **estellita**, un acero con Co, Cr, W, y Mo contiene 50% de Co y se utiliza mucho en la fabricación de instrumentos. El Co, junto al Ni

y al Al produce un acero llamado **magnético**; los aceros de Co y Ni con Fe y Ti, sustituyen al Pt en los cátodos de los electrodos.

Los aceros de Co y Ni, tienen por tanto, una gran significación en la economía industrial.

Los isótopos de Co se utilizan cada vez más en la medicina y en la técnica en general. Los carburos de Co, aleados con W, se utilizan en trabajos de perforación; el Co encuentra también una fuente de aplicación en los tintes para esmaltes y en vidriería.

Los principales países productores de níquel en el mundo son: Canadá, Nueva Caledonia y Cuba; grandes producciones se reportan también en Brasil, Birmania, India, Indonesia y Grecia. Por su producción y las reservas que posee, Canadá ocupa el primer lugar en el mundo. Cuba posee también enormes reservas de minerales níquel-cobaltíferos, las cuales se encuentran en franca fase de desarrollo.

El cobalto se produce en grandes cantidades en Zaire, así como en Zambia, Canadá y Marruecos. La producción mundial de Co en 1973, sin incluir a los países socialistas, fue de 21 850 toneladas. De este volumen Zaire produjo 15 502 toneladas.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Tanto el Ni como el Co, están situados en el octavo grupo y el cuarto período del sistema periódico de los elementos. Sus números y pesos atómicos, así como sus isótopos son:

	Número atómico	Peso atómico	Isótopos	%
Co	27	58,233	Co <sup>59</sup>	
Ni	28	58,71	Ni <sup>58</sup>	67,4
			Ni <sup>60</sup>	26,7

Del Ni se conocen cinco isótopos, pero sólo se han señalado los dos más abundantes.

Tanto el Co como el Ni pertenecen a la familia del Fe; ambos son siderófilos, aunque el Co lo es menos que el Ni. La mayor parte de estos metales se concentra en el núcleo terrestre; ambos metales tienen

una tendencia calcófila en la litosfera superior y manifiestan además, una tendencia litófila puesto que son componentes frecuentes de las rocas silicatadas. La relación Co/Ni en la corteza superior es de 1/3.

El contenido de Co y Ni en las rocas es como sigue:

Rocas	Ni %	Co %
Rocas ultrabásicas	0,02	0,02
Rocas básicas	0,016	0,0045
Rocas medias	0,0055	0,001
Rocas ácidas	0,0008	0,0005
Rocas sedimentarias	0,0025	0,002

El Clarke del Co es de 0,0018 y el del Ni es de 0,0058.

La afinidad del Ni y el Co con el S hace que ambos puedan concentrarse en los primeros sulfuros magmáticos. Por lo tanto, especialmente el Ni, es uno de los elementos típicos de las primeras segregaciones magmáticas de sulfuros, de la asociación pirrotina-pentlandita. La relación Co/Ni en los primeros sulfuros magmáticos es de 1/15; el Co no se incorpora a la pentlandita como lo hace el Ni, sino que queda oculto en la pirrotina.

Por su contenido, el Co es más abundante en los sulfuros postmagmáticos. En los sulfuros hidrotermales, la relación Co/Ni es completamente distinta a la anterior, lo que favorece sobremanera al Co.

El Co divalente puede incorporarse en los sulfuros magmáticos en razón al tamaño de sus iones (0,72 Å) muy semejante al del Fe divalente, y al del Ni divalente (0,69 Å). En las rocas ígneas, el Co y el Ni están ocultos en las estructuras de los silicatos; en consecuencia, son litófilos también en las condiciones de la litosfera superior.

El Co no forma minerales independientes en las rocas ígneas, y es probable que sustituya, en pequeñas proporciones, al Fe divalente en las estructuras de los silicatos. El Ni tiene tendencia a concentrarse en los primeros minerales magnésicos y ferromagnésicos que cristalizan, puesto que el tamaño del ión de Ni divalente es muy parecido al del Mg divalente (0,66 Å), y semejante al del Fe divalente. Por tanto, el olivino y la hiperstena son los vehículos principales del Ni entre los minerales de las rocas ígneas.

La relación Co/Ni de las rocas ultrabásicas es de 1/20 y 1/50, lo que significa, en comparación con la relación 1/3 en que aparecen en la corteza, que el Co es un elemento diseminado en la naturaleza en grado mayor que el Ni.

Durante la meteorización de las rocas ígneas, el Ni se mantiene en forma divalente, mientras que el Co pasa fácilmente a catión trivalente. Por lo tanto, en el ciclo exógeno (menor) existe mayor diferencia en la distribución de ambos elementos que en el ciclo endógeno (mayor).

Al meteorizarse las rocas ígneas, en particular las serpentinizadas, el Ni forma varios hidrosilicatos de composición química compleja, que estructuralmente son capas bidimensionales indefinidas. Son las llamadas **cloritas de níquel** y silicatos de Ni, como la pimelita, garnierita, revdinskita, etc. Durante la meteorización de los silicatos níquelíferos, puede, a veces, acumularse el Ni y formar filones de silicatos de Ni de elevada pureza.

Las serpentinitas apodunfíticas son propensas a contener mucho Ni. Durante la meteorización laterítica de la serpentinita, el Ni tiende a concentrarse en los residuos insolubles, formando yacimientos de gran extensión y de elevada riqueza, como es el caso de los yacimientos de la costa norte de la provincia de Oriente, en Cuba.

La serpentina se transforma primero en magnesita, por la acción de las soluciones meteorizantes que contienen CO<sub>2</sub>; esta magnesita se disuelve fácilmente en forma de bicarbonato de magnesio en la zona superior de la corteza de intemperismo que comienza a desarrollarse, y queda como residuo la sílice, los hidrosilicatos de Ni y Mg y el óxido de Fe. La sílice es arrastrada, posteriormente, hacia horizontes más profundos o fuera de la zona.

Por otra parte, el Co no forma hidrosilicatos durante la meteorización, sino que se mantiene en forma de catión trivalente, como hidróxido coloidal, en las soluciones, y con frecuencia se separa del Ni y se deposita junto con el Mn para formar asbolana, *wad* de cobalto y otros óxidos manganíferos.

La separación del Ni y el Co, generalmente no es completa y por eso —como sucede en los yacimientos cubanos— se puede explotar también el Co en algunos yacimientos de menas silicatadas residuales de Ni, generalmente en forma de asbolana, y como subproducto.



## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Entre los minerales ricos en Ni, se pueden reconocer dos grandes grupos:

### *Sulfuros y arseniuros de níquel*

Se encuentran en yacimientos magmáticos e hidrotermales. A este grupo pertenecen:

Minerales	Composición química	Contenido %
Pentlandita	(Fe,Ni)S	(22-42% Ni; hasta 1% Co)
Millerita	NiS	(64,7% Ni)
Niquelina	NiAs	(44% Ni)
Cloantita	NiAs <sub>2</sub>	(14,5 - 21,2% Ni)

### *Hidrosilicatos y otros hidróxidos*

Formados como resultado del intemperismo de rocas ultrabásicas niquelíferas. A este grupo pertenecen:

Minerales	Composición química	Contenido %
Revdinskita	3(Ni,Mg)O.2SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	(hasta 51% NiO)
Garnierita	(Ni,Mg)O.SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	(46% NiO)
Anabergita	3NiO.As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .8H <sub>2</sub> O	(37% NiO)

Para el Co los minerales con significado industrial son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Linneita	CoS <sub>4</sub>	(40-53)
Cobaltina	CoAsS	(hasta 35)
Esferocobaltina	CoCO <sub>3</sub>	(hasta 50-55)
Esmaltina	CoAs <sub>2-3</sub>	(hasta 24)
Asbolana	m(Co,Ni)O.MnO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	(hasta 32 CoO y hasta 11%)
Eritrina	Co <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .8H <sub>2</sub> O	(hasta 37,5% de CoO)

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los yacimientos de Ni y los de Co pueden agruparse en tres tipos de yacimientos industriales básicos:

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Los yacimientos de este tipo pertenecen al grupo de licuación. Para el Ni es muy importante la formación de menas sulfúricas de Cu-Ni; estas menas están relacionadas con rocas del magma básico: por ejemplo, noritas en Sudbury, Canadá; Bushveld, Insizwa, en África del Sur; piroxenitas en Columbia Británica, Canadá; peridotitas en Monchegorsk y Pechenga, en URSS; gabros en yacimientos de Canadá y Noruega; gabro-diabasas en Norilsk, URSS.

Generalmente estas intrusiones están enriquecidas con pirrotina, pentlandita y calcopirita. De acuerdo con el carácter de la menificación se reconocen dos grupos: menas sulfurosas masivas (capas, filones, brechas), y menas porfidicas.

Las menas del primer grupo caracterizan a los yacimientos de Sudbury, en Ontario, Canadá; los filones y lentes caracterizan a Monchegorsk, Pechenga y Norilsk, en URSS. La escala de los yacimientos de este tipo es gigantesca y las menas son muy ricas, con un contenido de Ni entre 2 a 4% y más; Cu desde 1 y 2,5% hasta 12%.

Las menas de Cu-Ni tienen un significado industrial extraordinario, puesto que aportan más del 80% de la producción mundial de Ni, un porcentaje considerable de Cu y, además, Pt. Este tipo genético tiene algún significado para el Co; que se presenta oculto en la pirrotina y también en forma de esmaltina y cobaltina. El contenido de Co en la mena, varía entre 0,01 y 0,2% y como promedio es de 0,07 a 0,08%.

### 2. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Con relación al Ni, son yacimientos de temperaturas medias, relacionados con granitoides. Estos yacimientos no tienen gran significación industrial; entre ellos se conocen:

*Yacimientos de la "formación de 5 elementos" (Co, Ni, Bi, Ag, U).*

Se localizan en Canadá y los montes Metálicos, donde el Ni se encuentra en forma de arseniuro.

#### *Yacimientos de la formación polimetálica*

El Ni se encuentra en forma de gersdorfitas (SAsNi) en las menas de Pb-Zn, en Birmania.

Además, el Ni se presenta en forma de impurezas en menas piríticas, como sucede en los yacimientos de Finlandia y en las menas cupro-cobaltíferas de bajas temperaturas de la formación de areniscas cupríferas Zaire y Zambia.

Los yacimientos hidrotermales constituyen para el Co, el tipo genético más importante. Reconocemos los siguientes subtipos:

#### *Yacimientos de temperaturas altas*

Constituidos por arsenopirita-glaucofana-cobalto en relación con los granitoides.

El cobalto se presenta, fundamentalmente, en forma de cobaltina, en asociación con arseniuros de Fe y Ni y a veces de Au, minerales de *skarn* y magnetita. A este tipo pertenece el yacimiento Bou-Azzer, en Marruecos y Dzhikhezan en URSS. El papel de este subtipo es significativo desde el punto de vista económico-industrial.

#### *Yacimientos de temperaturas medias y bajas*

De Co, Cu, y a veces, Ni, Ag, Bi, y U, relacionados con granitoides. Dentro de este subtipo reconocemos:

- formación linneita-calcopirita: yacimientos en Zambia y República del Congo, en areniscas y dolomitas del Cretácico,
- yacimientos de esmaltina-cloantita-niquelina-argentita del Canadá, Irán y de Azeirdbaiján, en la URSS,
- yacimientos de la "formación 5 elementos" de la región del Gran Lago del Oso y los montes Metálicos,
- formación polimetálica con Co.

El mayor significado industrial lo tienen las dos primeras formaciones.

### **3. YACIMIENTOS RESIDUALES**

Los yacimientos de la formación de menas silicatadas de Ni están relacionados con la formación de las cortezas de intem-

perismo sobre las rocas ultrabásicas. De acuerdo con la morfología de los cuerpos minerales se reconocen tres subtipos:

#### *Yacimientos de capas*

Forman cortezas de tipo superficial, con enormes reservas de Ni como los yacimientos de Cuba, Brasil, URSS y la República Popular China.

#### *Yacimientos de grietas*

Forman cortezas de tipo lineal de menas ricas en Ni; como los yacimientos de Nueva Caledonia, principalmente.

#### *Yacimientos cársicos de contacto níquelíferos*

Se desarrollan en las zonas de intersección de calizas con serpentinitas.

Un 15% de la producción mundial de este metal se obtiene de la formación de menas silicatadas de Ni. En estas cortezas de intemperismo, los minerales de Ni pueden contener determinadas proporciones de Co, sobre todo en forma de asbolana; es el caso de Cuba, Nueva Caledonia y el sur de la República Popular China.

## **PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS**

Los mayores yacimientos de Ni se localizan en zonas de plataformas y se formaron en el Precámbrico y el Paleozoico inferior. Entre los Precámbricos se encuentran los del escudo canadiense (Sudbury), el escudo escandinavo (Noruega y Finlandia), los yacimientos de la URSS, el escudo africano (región del Bushveld). Algunos yacimientos de menas sulfúricas se formaron en el mesozoico inferior, en los límites de la plataforma siberiana (Norilsk) y África (Insizwa).

Los yacimientos de menas silicatadas de Ni, del Paleozoico inferior, se encuentran en Brasil, y del Paleozoico medio y superior en los Urales.

Del Mesozoico se encuentran yacimientos en Cuba, Nueva Caledonia, Grecia e Indonesia; los yacimientos más importantes de Co están relacionados con granitoides Precámbricos y del Paleozoico inferior, como son los de Zaire y Zambia, y con intrusiones básicas de esa edad, como los de Sudbury, en Canadá.

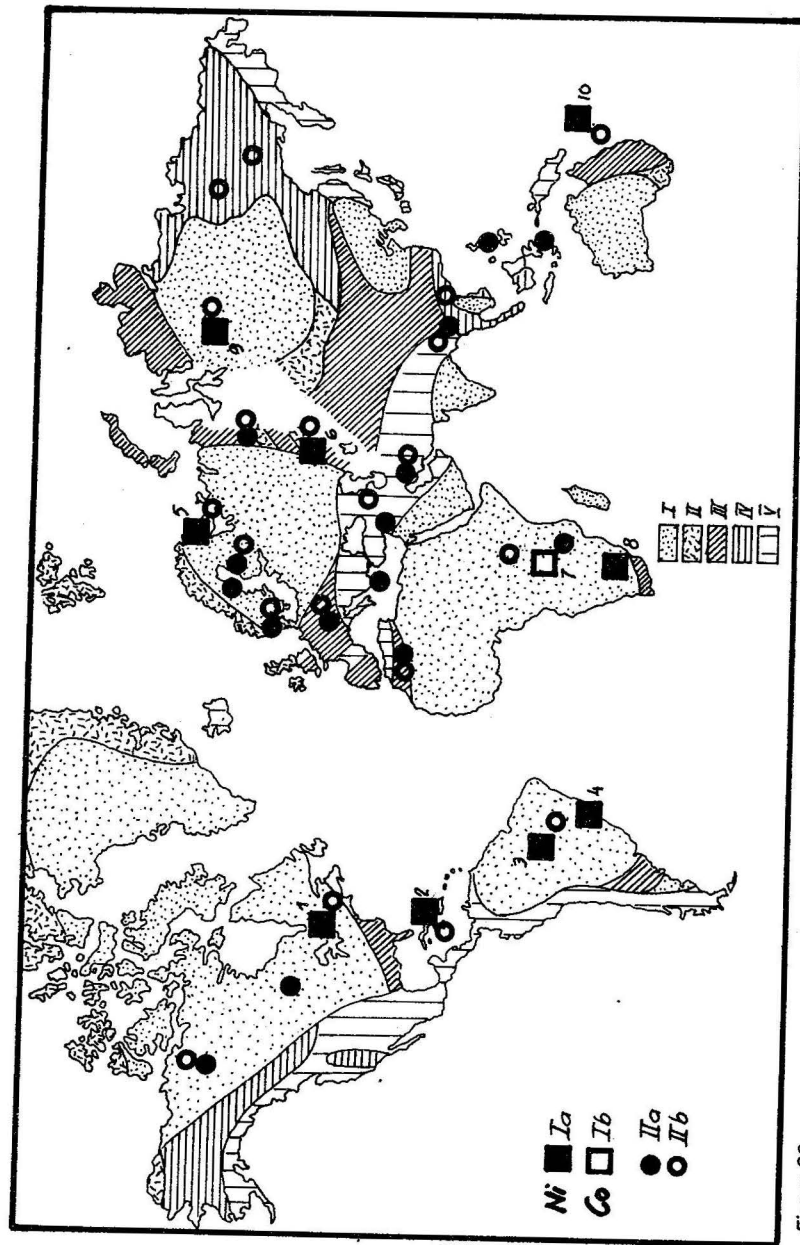


Figura 26

Principales yacimientos de níquel y cobalto del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas de edad Caledoniana III. Zonas plegadas de edad Herciniana IV. Zonas plegadas de edad Kimeridgiense V. Zonas plegadas de edad Alpinia IA y IB. Regiones montañosas y yacimientos de significado mundial 1. Sudbury (Canadá) 2. NE. de la provincia de Oriente, Cuba (Nicaragua, Pinar de Mayarí, Moa, Punta Gorda) 3. Goiás (Brasil) 4. Livramento (Brasil) 5. Mochegorsk-Pechenga (URSS) 6. Sur de los Urales (URSS) 7. Katanga Zaire 8. Bushveld (África del Sur) 9. Norilsk (URSS) 10. Nueva Caledonia. IIA y IIB. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

También, aunque en menores proporciones, se localizan concentraciones de Co en el Paleozoico superior, en Marruecos y montes Metálicos, y en el Mesocenoico (URSS).

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes de Ni-Co, en el mundo.

### YACIMIENTO SUDBURY, CANADÁ

Esta gigantesca región niquelífera canadiense, contiene más de cincuenta yacimientos y su explotación se inició en el año 1885. Constituye un formidable cuerpo con estructura en forma de lopolito, con dirección SW-NE y un área, aproximadamente, de  $3\,450\text{ km}^2$ .

La intrusión se encuentra entre la masa rocosa del Huroniano medio (areniscas, cuarcitas, anfibolitas, etc.) que sirven de base al macizo, y la serie Anamiki (conglomerados, tufas, esquistos, areniscas) del Huroniano superior, que sirve de techo al macizo. La potencia del lopolito Sudbury llega hasta  $3\text{ km}$ .

La composición petrográfica de la intrusión es: norita, norita pegmatítica y micropegmatitas, las cuales tienen en el plano, una disposición concéntrica y representan una intrusión llamada **diferenciada**.

Posteriormente intruyeron los granitos y dioritas cuarcíferas, ocurrió el brechado y luego la meniferación.

Entre los yacimientos de Sudbury, se distinguen dos tipos: depósitos marginales y depósitos comprimidos. Los del primer tipo se localizan en el contacto sur del lopolito y tienen la forma de depósitos de capa y lentes, con longitud hasta de  $1\text{ km}$ , potencia entre  $50$  y  $60\text{ m}$  y una extensión según la profundidad que oscila desde  $500$  y  $700\text{ m}$  hasta  $900\text{ m}$ .

Los yacimientos más grandes —Creighton, Levack, etc.— se encuentran en la zona de compresión y ruptura. Los minerales tienen texturas masivas, y se encuentran también brechas minerales diseminadas.

Los depósitos comprimidos son cuerpos en forma de diques, separados de la intrusión de norita o de dioritas cuarcíferas o de noritas con sulfuros en inclusiones. Estos diques están separados de la intrusión por una distancia de  $3\text{ km}$ , pero se unen con ella en profundidad.

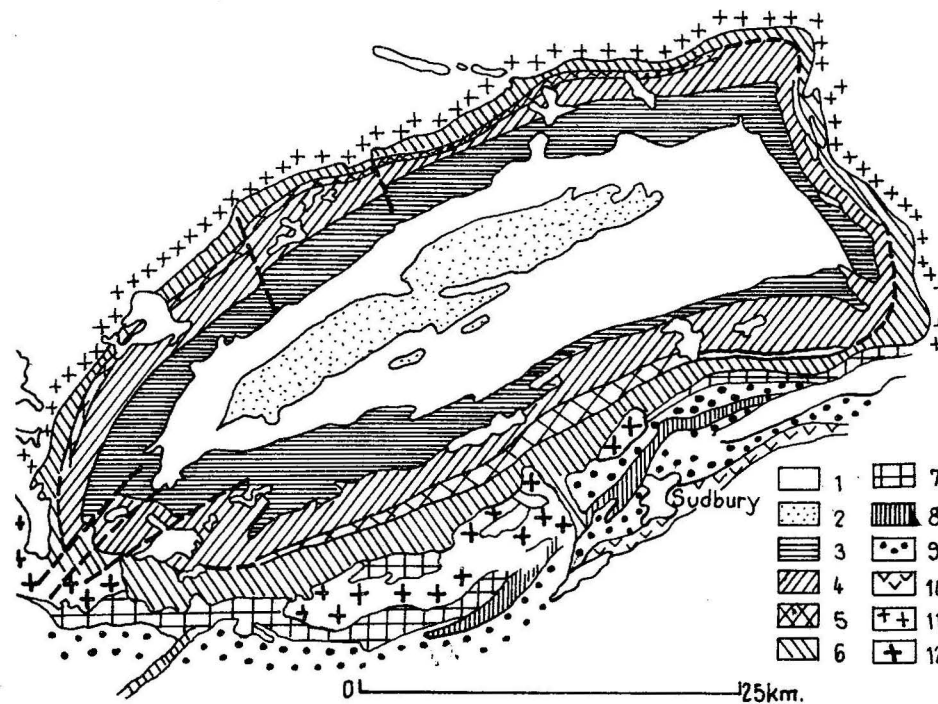


Figura 27

Mapa geológico de Sudbury, Canadá.

1. Cubierta pleistocénica y reciente
2. Formación sedimentaria de Onwatin-Chelmsford
3. Formación volcánica de Onaping (tobas, brechas, lavas riolíticas y andesíticas)
4. Granófiros (micropegmatitas)
5. Zona híbrida
6. Noritas (y dioritas cuarcíferas)
7. Formación vulcanógena sedimentaria de Stobie
8. Riolita de Cooper Cliff
9. Formación McKim-Missisagi (grauvacas, cuarcitas, conglomerados)
10. Gabro, anfibolitas de Sudbury
11. Complejo granítico antiguo
12. Granitos recientes.

Los cuerpos minerales tienen forma de columnas como en Victoria o de lentes como los de Frood. Tienen una longitud de 2 km con potencia hasta de 100 m y penetran a una profundidad de 1 km.

La composición mineralógica del yacimiento es pirrotina, pentlandita y calcopirita y asociada a ellas se encuentran magnetita, millerita, arseniuros de níquel y cobalto, minerales de platino y paladio y algunas veces, esfalerita y molibdenita. El contenido de la mena es de 2 a 4% de Ni, 1 a 2,5% de Cu, 0,08% de Co; además contiene algo de Ag y Au, así como decenas de gramos por tonelada de Pt y Pd. Las reservas de este yacimiento son colosales.

## YACIMIENTO NORILSK, URSS

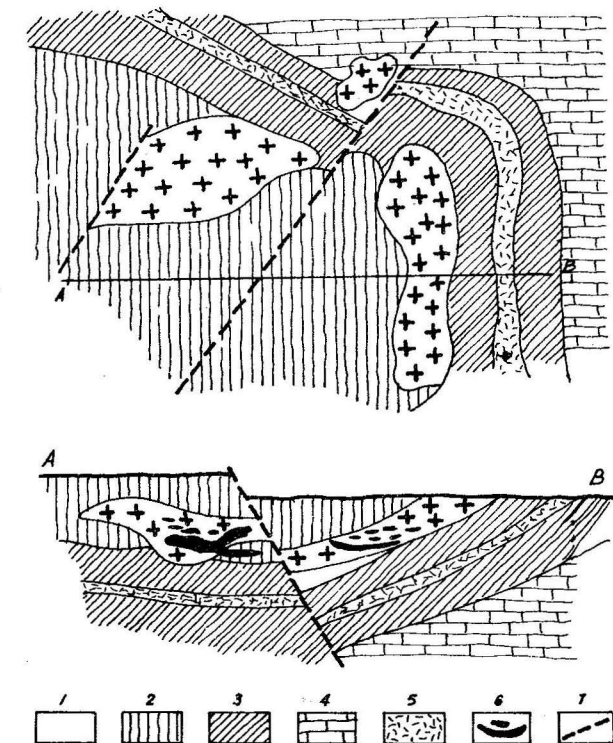
Se encuentra en los límites de la plataforma siberiana. La estructura tectónica de la región es característica de una zona de transición, de las condiciones de plataforma a las de geosinclinales.

Los principales elementos tectónico-estructurales son: el terraplén Jantaisk-Ribnivsk, paralelo al cual están dos zonas de fallas: Norilsk hacia el oeste e Imangdansk hacia el este. A lo largo de estas dos fallas penetró el magma de composición basáltica. La región se compone de intercalaciones de calizas y esquistos del Silúrico y Devónico, sobre los cuales se depositaron, transgresivamente, capas bituminosas efusivo-

Figura 28

Mapa geológico y perfil del yacimiento Norilsk, URSS

1. Intrusión de gabro-diabasa
2. Lavas
3. Formación arenosa-esquistosa-carbonosa del Pérmico-Carbonífero
4. Depósitos del Silúrico
5. Diabasas con piroxenos titaníferos
6. Mena sulfurosa
7. Fallas





sedimentarias del Triásico y Permo-Carboníferas (areniscas, esquistos, diabasas efusivas).

Entre estas capas se localizan cuerpos en forma de manto interestratificado (*sills*), y diques de gabro-diabasa, con los cuales genética y espacialmente se relacionan los yacimientos de menas sulfurosas de cobre y níquel. De arriba hacia abajo, el perfil de la intrusión es: gabro y gabro-norita, gabro-diabasa sin olivino, gabro-diabasa olivínico y olivino-biotítico, picrita gabro-diabásica y picrita.

En la composición mineralógica de las menas del yacimiento Norilsk, además de pirrotina, pentlandita y calcopirita (que son las fundamentales), se encuentra magnetita, pirita, millerita con bornita y cubanita. Además minerales del grupo del platino, así como telururos auríferos, galena, esfalerita y otros minerales.

### YACIMIENTOS DE NUEVA CALEDONIA

De los 16 000 km<sup>2</sup> de superficie de la isla, aproximadamente, 6 000 km<sup>2</sup> están formados por macizos de serpentinitas (el mayor mide 3 500 km<sup>2</sup>); las serpentinitas son post-eocénicas.

En el año 1865, Jules Garnier descubrió en estas rocas un mineral abundante, de color verde (garnierita) con un elevado contenido de níquel. El primer yacimiento industrial en forma de vetas fue explotado a partir de 1874.

La corteza de intemperismo, según Borisevich varía entre 50 y 100 m y en algunos lugares llega hasta 150 m. En cada caso, el espesor de las zonas de minerales útiles es mucho menor. El horizonte superior de la corteza de intemperismo presenta las lateritas ferruginosas (25 a 51% de Fe, desde 0,16 a 0,30% hasta 1,5 a 3% de NiO más CoO, y hasta 5% de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) las cuales van pasando hacia la profundidad, hasta la zona garnierito-serpentinítica.

Aquí la garnierita es el cemento de las brechas o forma vetas y filones con potencia hasta de 1 m, los cuales penetran en profundidades de 50 y 100 m y, a veces, hasta 150 m. En la parte inferior de la zona laterítica, tienen lugar, en ocasiones, procesos de formación de asbolana, con contenidos elevados de Co. El contenido de Ni en las menas garnieríticas de filón varía entre 3 y 4% hasta 9% y el Co en las menas asbolánicas hasta 3 y 4%.

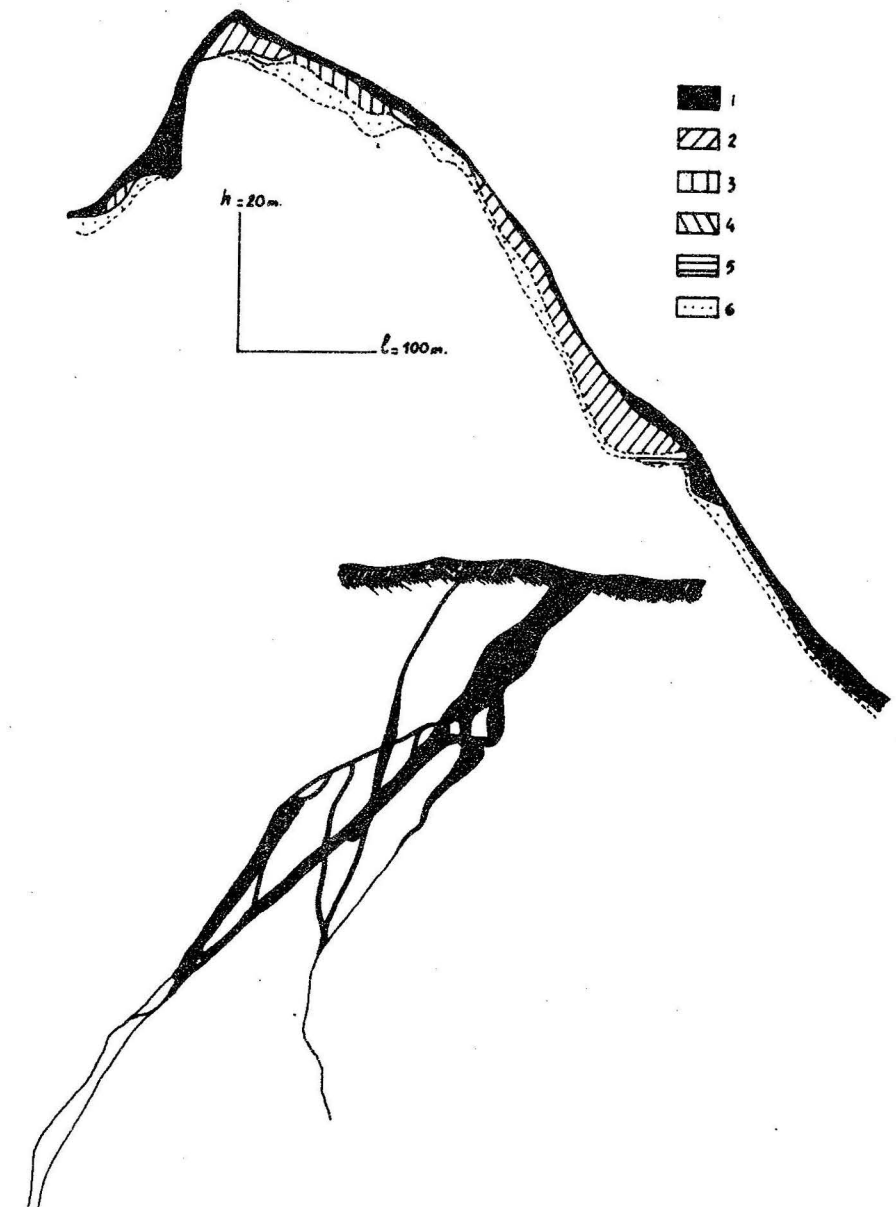


Figura 29

Yacimiento de níquel de Nueva Caledonia (Concesión Pin-Pin I)

1. Lateritas 2. Mineral con más de 5% de Ni. 3. Mineral entre 4 y 5% de Ni. 4. Mineral entre 3,5 y 4% de Ni. 5. Mineral entre 3 y 3,5% de Ni. 6. Mineral entre 2 y 3% de Ni.



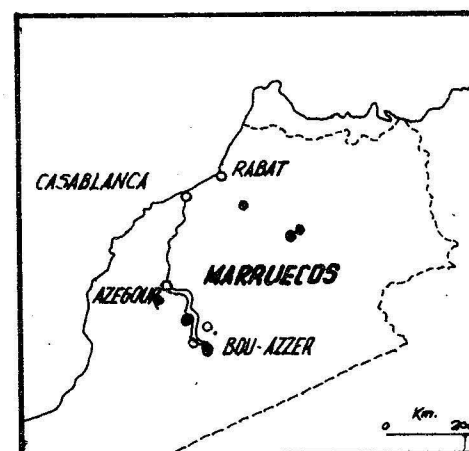
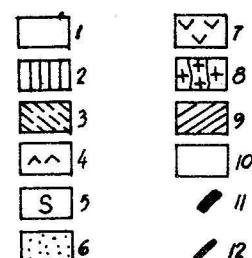
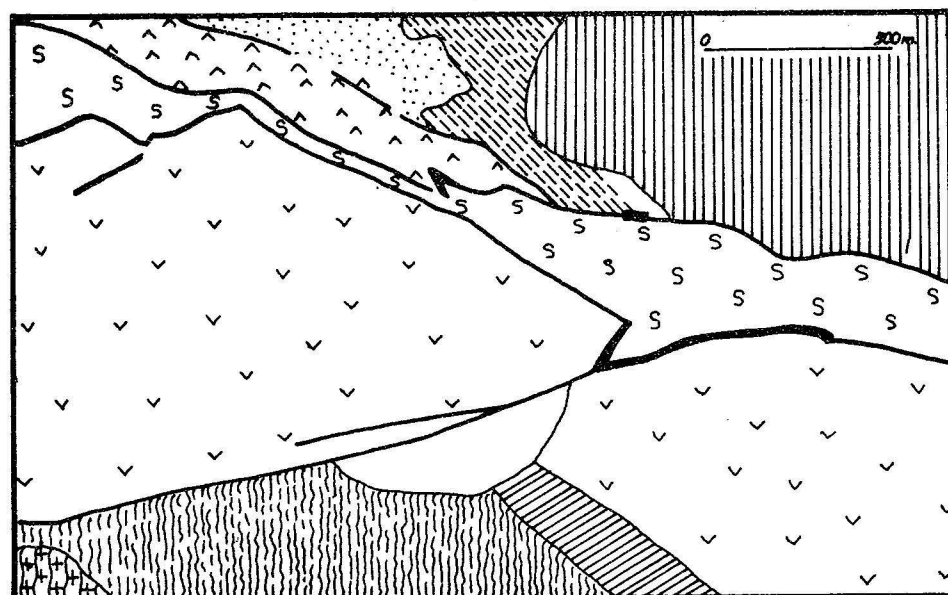


Figura 30

Yacimientos de cobalto y níquel de Bou-Azzer, Marruecos.  
(G. Jouravsky)

1. Aluviones y eluviones 2. Dolomitas, esquistos, andesitas 3. Complejo detrítico y volcánico superior 4. Rocas verdes 5. Serpentina 6. Dioritas cuarcíferas de grano fino, postectónicas 7. Dioritas cuarcíferas sintectónicas 8. Inyecciones de granito leucocrático en los neises 9. Hornblendita 10. Neis 11. Yacimientos de Co y Ni 12. Fallas.

## YACIMIENTO BOU-AZZER, MARRUECOS

En esta región las serpentinitas se extienden 60 km a lo largo del mayor accidente de las zonas aledañas: los montes Atlas. Sus rocas madres, peridotíticas, y los gabros transformados en rocas verdes (anfibolitas esquistosas) que las acompañan, se emplazaron a finales del Precámbrico medio, después de una enérgica fase orogénica.

Las deposiciones cobaltíferas se alojan en el contacto con las serpentinitas bien en roturas que las afectan (SW-NE), oblicuas, o en cúpulas entre éstas y las rocas del techo. La composición litológica de este techo rocoso es muy variable, al igual que su edad.

Estas deposiciones (más de setenta) tienen forma de aglomeraciones irregulares en las serpentinitas, filones en las rocas de contacto o filones en el contacto de las serpentinitas y otras rocas. El mineral normal está formado por arseniuros de Co, Ni, Fe, y sobre todo escuterudita (Co, Ni)As<sub>3</sub> y lollinguita cobaltífera con un poco de calcopirita en una ganga de calcita, dolomita, cuarzo, talco y clorita. Se supone que una parte considerable de esta ganga se ha derivado de la alteración y transformación de las serpentinitas.

## EL NÍQUEL EN CUBA

Las menas lateríticas de las cortezas de intemperismo de Cuba, fundamentalmente en su parte oriental, son conocidas desde hace más de 200 años. En 1762, durante el desarrollo de la guerra anglo-española, el perdigón fue objeto de atención para la obtención de hierro.

Después de 1902, EUA comenzó a mostrar interés por nuestras cortezas de intemperismo, relacionado con determinadas pruebas tecnológicas realizadas con las lateritas. Así, entre 1904 y 1907, en la región de Mayarí, las compañías norteamericanas realizaron trabajos de exploración en las lateritas. Los aceros producidos a partir de estas menas se denominaron aceros especiales Mayarí.

Durante todo este tiempo, las lateritas cubanas se estudiaban sólo como menas de hierro, y al níquel y al cobalto que contienen, no se les daba atención especial.

De 1901 hasta 1916, un grupo de científicos realizaron trabajos sobre las lateritas de Cuba; entre ellos resaltan los nombres de Hayes, Vaughan, Spencer, Weld, Kemp, Cox, Little, Cummings, Miller, Woolbridge, Drake, Leit, Meat y Guardiola.

La explotación de las menas lateríticas para su exportación comenzó en 1930, en relación con la crisis económica del capitalismo; poco después, cuando fueron abiertos los yacimientos de Ni de Nueva Caledonia y de Kalimantan, en Borneo, se comenzó a pensar en la posibilidad de considerar nuestras menas como niquelíferas y no como ferruginosas.

Fue entonces que las empresas norteamericanas comenzaron a realizar rápidamente estudios tecnológicos de las menas y organizaron el trabajo para la construcción de una planta procesadora; puesto que, producir una tonelada de Ni en nuestro país resultaba mucho más económico que trasladar el mineral en bruto a las refinerías en EUA.

En 1935 las empresas yanquis desarrollaron grandes trabajos de exploración en la región Nicaro-Mayarí y, en 1943, fue construida una planta en Nicaro, actualmente denominada Comandante René Ramos Latour. En dos años, de 1943 a 1945, la planta trató cerca de 1 900 toneladas de menas niquelíferas, con contenido de 1,39% de Ni; el producto final, sinter de Ni, se exportó hacia EUA.

Al mismo tiempo que esto sucedía, varias compañías norteamericanas, ante los éxitos obtenidos, se dedicaron a realizar trabajos de exploración en todas las áreas lateríticas del país, y señalaron las regiones más perspectivas; de esta época datan los trabajos de Tayer (1942), Tayer, Guild (1947), Baragwanath, Millán, Davis (1955), Fischer, Dressel (1959), Lewis, Straczek (1955), y otros.

Después del triunfo de la Revolución, en 1959, comenzó el proceso de estudio profundo y detallado de nuestros recursos niquelíferos sobre una base sistemática y de forma detallada. Una segunda planta había sido comenzada a montar en Moa, fue terminada por la Revolución y recibe hoy el nombre de Comandante Pedro Soto Alba. A diferencia de la planta de Nicaro, que produce sinter, esta produce sulfuro de Ni con contenidos hasta de 50 a 55% de Ni y 5 a 6% de Co.

Con la colaboración de especialistas del campo socialista, fundamentalmente de URSS, se han desarrollado importantes estudios para ampliar el conocimiento de nuestras menas lateríticas-ferruginosas-niquelíferas-cobaltíferas, tanto en el volumen de sus reservas, como en la calidad de las menas y las características de los yacimientos.

Adamovich y Chejovich (1964), Kudelasek, Marxova, Zamarsky (1966), Linchentat, Shirokova (1964), Finko, Korin, Formell Cortina (1968), Korín, Finko, Núñez Jiménez, Formell Cortina (1967), Buguelski, Formell Cortina (1968), Kumpera (1968), Strand (1968), y otros muchos más, han dedicado su trabajo a estos propósitos.

También un grupo de profesores de la escuela de Ingeniería geológica de la Universidad de Oriente: A. S. Vershinin, C. A. Crombet, A. Hurtado y E. Ruz Peña, han trabajado sobre distintos aspectos de las cortezas de intemperismo del norte de Oriente.

En los próximos años, los trabajos geológicos se verán incrementados ante la necesidad de garantizar los volúmenes de materia prima requeridos para aumentar la producción actual de sinter de níquel, a cifras significativas.

✓ Las reservas de minerales de los yacimientos niquelíferos de Cuba, constituyen del 27 al 28% de las reservas mundiales de minerales de níquel oxidados y silicatados. Junto a otras naciones como Canadá y Nueva Caledonia, nuestro país es un importante productor de este metal puesto que ocupamos el primer lugar en el mundo por la extracción de Ni, a partir de menas lateríticas.

De acuerdo con los estudios realizados por los geólogos y especialista del Ministerio de Minería y Geología, las reservas perspectivas de menas son las siguientes:

<i>Menas</i>	<i>Millones de toneladas</i>
Menas lateríticas ferruginosas	
Fe más de 4,5-5 y Ni menos de 1%	900
Menas lateríticas niquelíferas	
Ni entre 1,2 a 1,4%	430
Menas serpentínicas niquelíferas	
Ni entre 1,4 a 1,9%	120

En las menas lateríticas de la corteza de intemperismo de Cuba, además de Fe y Ni, se localiza Co, Mn, Al, Cr y otros metales. La relación Ni/Co en la mena es de 10/1.

Los macizos de rocas ultrabásicas serpentinizadas se extienden a todo lo largo de la costa norte de la isla de Cuba, en una extensión aproximada de 900 km. En los límites de estos macizos serpentínicos se localizan áreas de productos lateríticos niquelíferos con contenidos de Ni superiores a 0,7% y potencia no menor de 1 m. Estas áreas forman regiones meníferas características, las cuales incluyen, además de las lateritas anteriormente señaladas, los yacimientos de silicatos de níquel.

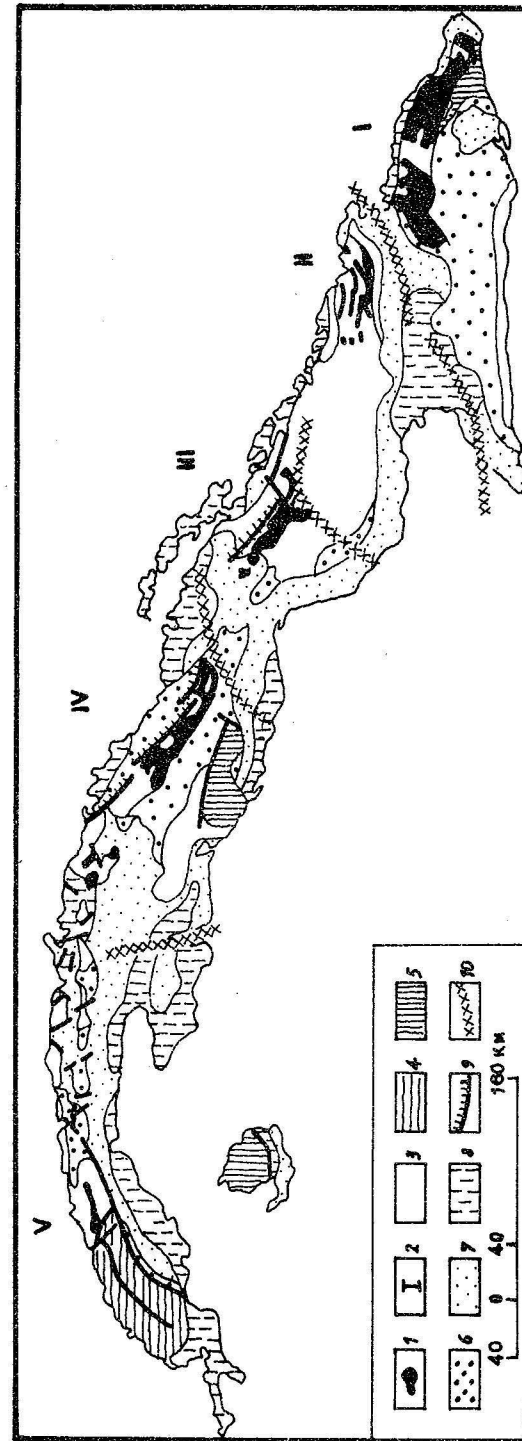


Figura 31

Posición de las ultrabásitas en la estructura geológica de la República de Cuba  
 1. Ultrabásitas 2. Regiones de desarrollo de las rocas ultrabásicas: I-Mayarí-Baracoa II-Holguín III-Camagüey IV-Santa Clara y V-Pinar del Río 3. Zonas anticlinoriales (Jurásico y Cretáceo) 4. Meganticlinorio de Pinar del Río (Jurásico) 5. Zona de desarrollo de rocas metamórficas Precretácicas 6. Zonas sinclinales (Paleógeno) 7. Oligoceno (?) y Mioceno 8. Zonas plioceno-cuaternarias 9. Zona de falla que divide el eugeosinclinal del miogeosinclinal 10. Zona de anomalías gravimétricas.

En la parte noroccidental de Cuba, en los límites de la meseta de Cajalbana, se localiza la región niquelífera de la provincia de Pinar del Río. La meseta representa en sí, un bloque tectónico compuesto de serpentinitas, el cual se extiende en dirección sublatitudinal; el área de la meseta no excede los  $50 \text{ km}^2$ , y en su superficie se localizan los productos de la corteza de intemperismo laterítica-niquelífera con una potencia entre 0 y 25 m y como promedio entre 2 y 3 m. La potencia de la corteza de intemperismo es mayor en las zonas tectónicas de serpentinitas agrietadas.

Los productos niquelíferos están representados por formaciones residuales ocrosas, ocroso-silicatadas y serpentinitas lixiviadas, frecuentemente nontronitizadas. El contenido medio de Ni, en las lateritas, se eleva a 1,23% y 41,5% de Fe; las reservas de estas menas, de acuerdo con los datos de la exploración geológica, no son inferiores a los 22 millones de toneladas y la región se considera como área de gran perspectiva.

Un poco alejado de la zona descrita anteriormente, hacia el ESE, en el territorio de las actuales provincias de La Habana, Matanzas y Las Villas, y con una extensión cercana a los 500 km, los macizos serpentínicos forman cuerpos meníferos relativamente pequeños. En zonas aisladas como Madruga, San Miguel de los Baños, etc., se encuentran cortezas de intemperismo niquelíferas profundamente erosionadas, con perfil nontronítico y de tipo lineal.

La segunda región niquelífera se localiza en el centro de la provincia de Camagüey; coincide con la meseta de San Felipe y su área es aproximadamente de  $130 \text{ km}^2$ .

Al igual que en la zona de Cajalbana, esta región se encuentra en áreas de desarrollo de perturbaciones tectónicas; la cota absoluta de la meseta es de 120 a 150 m sobre el nivel del mar. La composición petrográfica básica de la meseta de San Felipe es de serpentinitas, y en las partes superiores de las rocas, yace la corteza de intemperismo, formada por lateritas ferruginosas concrecionadas.

En las oolitas y concreciones ferruginosas irregulares, se incluyen vetillas de ópalo de varios colores (verde, blanco, etc.), con potencia de unas decenas de centímetros y en las partes centrales con magnesita. Estas vetillas y filones de magnesita silicificada, forman zonas en *echelon*, que reflejan un sistema de perturbaciones y agrietamiento total de la serpentinita.

Debajo de esta capa de concreciones ferruginosas, se localiza la formación ocroso-silicatada, la que conserva relictos de la estructura de

la serpentinita (ocres estructurales). La potencia media de la zona de nontronitas, llega a los primeros metros y en la serpentinita lixiviada, a través de sus grietas, se forman vetillas de ópalo con silicatos de níquel.

De acuerdo con los datos de la exploración, en la mayor parte de la meseta, los productos de alteración ocreo-ferruginosos y nontroníticos tienen una potencia promedio aproximadamente de 10 m y contienen como promedio 0,76% de Ni y 45% de Fe.

La zona inferior de la corteza de intemperismo se compone de serpentinita, más lixiviada que la anterior, con elevados contenidos de Ni en aquellas zonas donde se localizan minerales silicatados.

Las serpentinitas níquelíferas no han sido exploradas y sus reservas no se conocen. Los pronósticos de reservas de lateritas ferruginosas pobres en Ni se elevan a 450 millones de toneladas.

Además de la meseta de San Felipe, en la provincia de Camagüey se encuentran otros cuerpos serpentiniticos, pero sobre ellos sólo se localizan cortezas de intemperismo, profundamente erosionadas del tipo nontronítico.

En los alrededores de la ciudad de Holguín, se conocen algunos campos serpentínicos no muy anchos, los cuales representan afloramientos a la superficie de placas serpentiniticas de poca potencia; estas serpentinitas están lixiviadas y carbonatadas.

El contenido de Ni en estas rocas no es alto, y la región no posee interés económico.

La tercera región níquelífera y la más importante de Cuba, así como una de las más significativas de todo el mundo, se localiza en la provincia de Oriente.

A lo largo de la costa norte de esta provincia, en una extensión de 150 km, se localizan algunos campos de ultrabásitas; cada uno de estos cuerpos ultrabásicos, representan, por sí mismos, bloques tectónicos. La corteza de intemperismo no se ha conservado en toda la superficie de los macizos; pues, en los bloques más elevados de la región, aparece deformada.

Las áreas mayores de las cortezas de intemperismo, se observan en las superficies planas de los bloques, las que forman pendientes escalonadas en el macizo. En las pendientes abruptas y en los valles formados como resultado de la erosión profunda de los bloques, la corteza de intemperismo desaparece totalmente.

En ellas se encuentran, solamente, zonas esporádicas de una corteza lineal de intemperismo que se ha conservado en las pendientes;

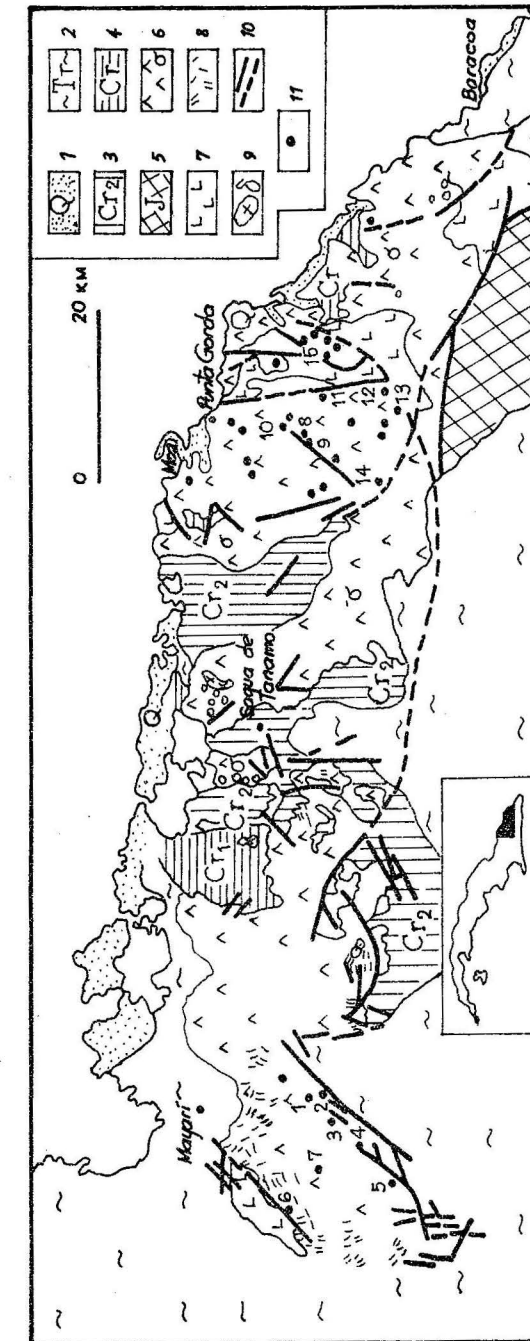


Figura 32

Esquema de la constitución geológica de la región en el macizo Mayarí-Baracoa (Construido con materiales de Adamovich y Chejovich.) 1. Depósitos cuaternarios 2. Depósitos terciarios 3. Depósitos tufógenos del Maestrichiano 4. Formación efusiva espilitodabásica del Cretáceo inferior 5. Esquistos del Jurásico 6. Rocas ultrabásicas 7. Gabro-díabasa, gabro, gabro olivínico 8. Serie de diques del complejo intrusivo del Cretáceo superior 9. Dioritas cuarcíferas post-cretáceas 10. Dislocaciones tectónicas confirmadas y supuestas 11. Yacimientos de cromita: 1) Caledonia 2) Estrella de Mayarí 3) Caracol 4) Cuchita 5) Juanita 6) Tanayo 7) Casimba 8) Cromita 9) Cayo Guam 10) Narciso 11) Delta 12) Melba 13) Merceditas 14) Yarey 15) Grupo Potosí 16) Grupo Sagua de Tanamo.



esta corteza forma y llena bolsones profundos relacionados con las zonas de fragmentación.

De acuerdo con los datos de Adamovich y Chejovich (1964), la corteza laterítica niquelífera, con potencia mayor de 1 m, abarca aproximadamente el 25% del área total de afloramiento de las serpentinitas a la superficie.

El área general de la corteza niquelífera industrial en esta provincia es de 550 km<sup>2</sup> y el resto de los 1 700 km<sup>2</sup> de los campos serpentínicos de Oriente, no posee meniferación de este tipo, y cuando esta existe, su potencia no llega a 1 m o está ausente por completo. En estos 550 km<sup>2</sup> se localizan los tres campos niquelíferos más importantes de Cuba: Pinares de Mayarí, Nicaro y Moa-Baracoa.

Pinares de Mayarí se encuentra al NW de la provincia de Oriente y tiene un área de 220 km<sup>2</sup> de los cuales de 120 a 150 km<sup>2</sup> son cortezas de intemperismo con contenidos industriales de Ni. Al norte de la provincia se localiza el campo menífero de Nicaro, con un área total aproximada de 100 a 120 km<sup>2</sup>; la meniferación niquelífera en esta región se localiza en porciones aisladas en los *klippen*<sup>1</sup>, de una corteza de tipo lineal-superficial desplazada. Forman parte de esta región, los yacimientos: Sol Líbano, Ocuja, Ramona y otros.

Hacia el NE de la provincia se encuentra la gran región niquelífera de Moa, con un área total de cortezas de intemperismo niquelíferas aproximadamente de 250 km<sup>2</sup>, donde las áreas meníferas con cortezas de tipo superficial, están mezcladas con cortezas de tipo lineal-superficial y lineal. Representantes típicos de los yacimientos niquelíferos cubanos en cortezas de intemperismo del tipo lineal, se forman en el área del yacimiento Moa: hacia el sur, se encuentra el área Atlantic, y, hacia el norte, Playa La Vaca. El área general de estos campos meníferos es de 35 km<sup>2</sup>, aproximadamente.

El gran yacimiento de Pinares de Mayarí, está relacionado con una zona de meseta, que se extiende en dirección NW a lo largo de 20 a 24 km, con un ancho de 6 a 8 km. De los 180 a 190 km<sup>2</sup> de superficie de la meseta, sólo de 60 a 80 km<sup>2</sup> pertenecen a las cortezas de intemperismo, la que representa un campo menífero que se relaciona con un testigo o remanente de un peniplano antiguo, que se ha conservado en el fondo de un relieve rejuvenecido.

<sup>1</sup> Del alemán, se aplica a zonas de tectónica compleja y a masas comprimidas de estratos que se dibujan como bolsas externas; ellas coronan las cumbres de las colinas o descansan sobre planos de empuje. (N. del E.)

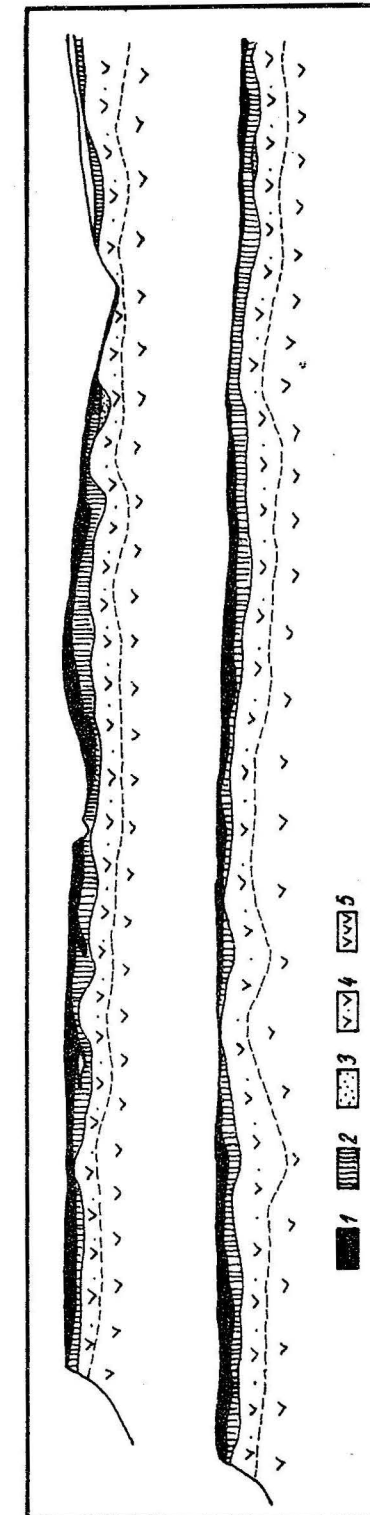


Figura 33  
Perfil a través del yacimiento niquelífero Pinares de Mayarí, provincia de Oriente, Cuba  
1. Lateritas ferruginosas (mena ferruginosa) 2. Laterita niquelífera (mena niquelífera oxidada) 3. Serpentinita lixiviada nontronitizada (mena niquelífera silicatada) 4. Serpentinita poco alterada 5. Serpentinita inalterada



La configuración rectangular de Pinares de Mayarí, está determinada por perturbaciones tectónicas y por depresiones de tipo regional: al norte la depresión de Nipe, y al sur el sinclinorio de Cuba oriental. La composición petrográfica del macizo de ultrabasitas serpentinizadas es relativamente homogénea.

En la superficie actual de la meseta de Pinares de Mayarí, afloran productos del intemperismo de las serpentinitas, los cuales son diferentes por su composición y contenido de Ni y reflejan la profundidad del corte erosivo de la corteza de intemperismo, puesto que posee un perfil de estructura zonal.

Las principales conclusiones que pueden obtenerse del estudio de este yacimiento son las siguientes:

- La capa menífera niquelífera de la meseta de los Pinares de Mayarí, se relaciona con una corteza de intemperismo de tipo superficial. Ella está superpuesta a una antigua superficie de peniplanización.
- La superficie de la capa menífera es de 60 a 80  $km^2$  y tiene una potencia relativamente estable de 7,4 m y una potencia de destape de 4 m (menas lateríticas ferruginosas).
- Las menas más ricas y las de mayor potencia coinciden con las zonas de perturbaciones y agrietamiento tectónico. En estas zonas se han formado bolsones que llegan a alcanzar hasta 18 m de potencia.
- La parte superior de la corteza de intemperismo se caracteriza porque está formada por menas niquelíferas oxidadas, con elevados contenidos de Fe (más de 40%) y también Mg y Ca en pequeñas cantidades. Los horizontes inferiores son más ricos en Ni y menos en Fe y corresponden a menas niquelíferas silicatadas. Se observa un incremento en los contenidos de Ca y Mg.

La región niquelífera de Nicaro se localiza hacia el norte de la provincia de Oriente, entre la meseta de los Pinares de Mayarí y el campo menífero de Moa. Esta región, al igual que la meseta de los Pinares de Mayarí presenta bloques tectónicos de poco tamaño, los cuales, hasta ahora, se han revelado sólo en forma fragmentaria.

En el mapa geológico 1:50 000 de Adamovich y Chejovich (1962), se pueden observar las zonas de perturbaciones tectónicas; los bloques están cortados por una gran zona de fallas de dirección submeridional, a lo largo de la cual, se ha formado el valle del río Levisa. Como resultado del desarrollo del sistema erosivo en el curso superior de este río, la parte central de la meseta se ha desmembrado en otras más pequeñas.

Antes del desmembramiento de la meseta por la erosión, se desarrollaron en sus contornos zonas aisladas de gran fragmentación, manifestadas principalmente, en sus bordes.

En la mayoría de las mesetas, se localiza una corteza de intemperismo superficial niquelífera de poca potencia que, por la estructura y composición de sus productos, se asemeja a la de Pinares de Mayarí, pero que, por su área y reservas, es considerablemente menor.

Todos los yacimientos importantes de Nicaro, coinciden con zonas de desarrollo de serpentinitas con elevado grado de agrietamiento, con zonas de fragmentación y grandes perturbaciones.

Cada una de estas zonas está relacionada con yacimientos niquelíferos de tipo superficial, lineal y mixtos. Como ya señalamos anteriormente, los yacimientos más importantes son Ocuja, Ramona y Sol Líbano.

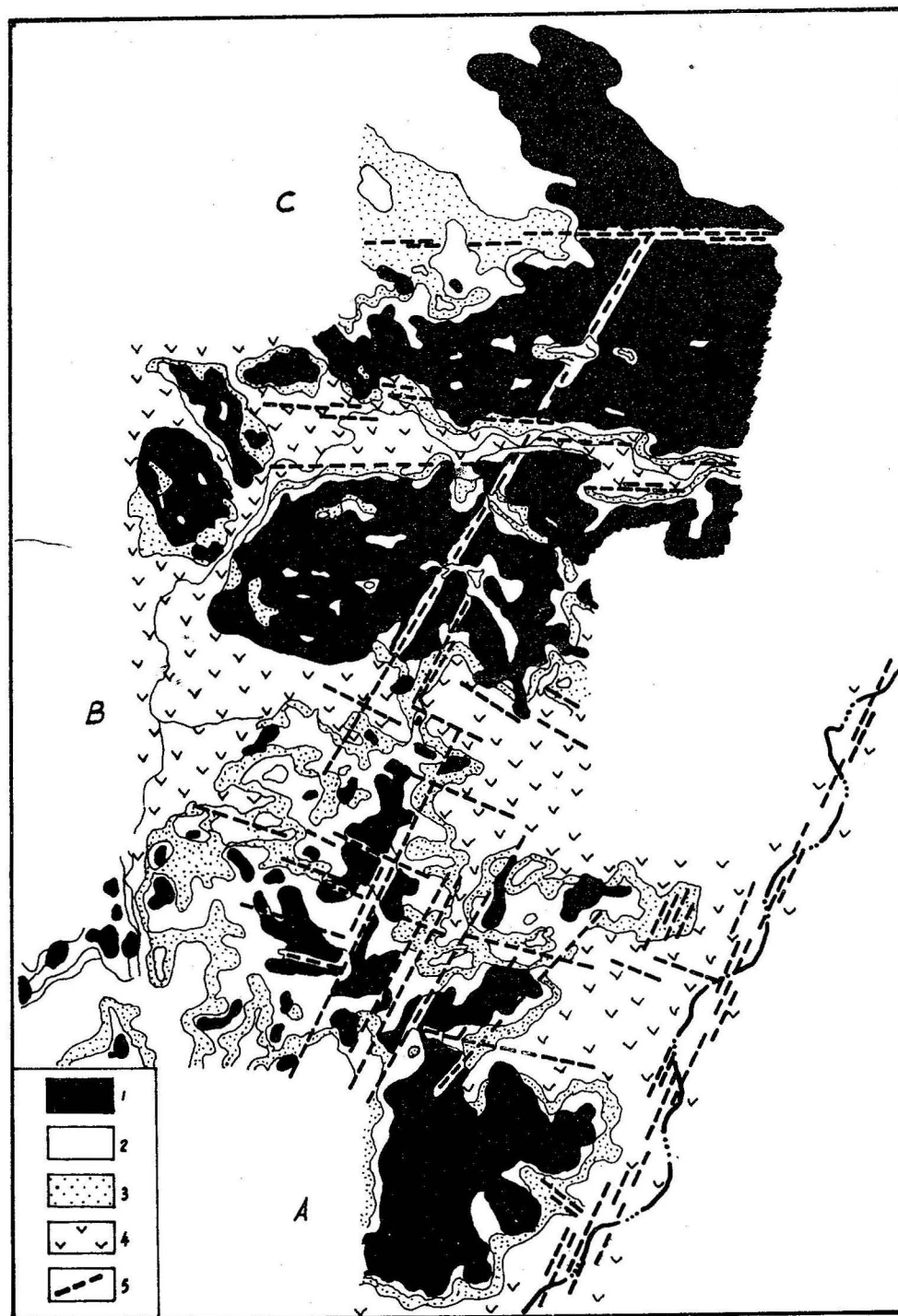
El campo menífero Moa, está representado por el yacimiento de ese nombre, así como por las zonas meníferas adyacentes: al norte, Playa La Vaca y, al sur, Atlántic. El campo se sitúa en la región NE de la provincia de Oriente; al este del río Moa se localiza el área de desarrollo del importante yacimiento de Punta Gorda.

El área de Moa es de 35 a 40  $km^2$ , aproximadamente, y comprende parte de la pendiente norte de las Cuchillas de Moa, compuestas por el macizo serpentínico de Mayarí-Baracoa, el cual tiene estructura tectónica de bloque; el campo menífero se sitúa en el flanco norte de un suave anticlinorio con estructura escalonada. El área de los distintos bloques oscila entre 5 y 8  $km^2$ ; los bloques de la costa norte (Playa La Vaca) se elevan a 40 m sobre el nivel del mar, mientras que los situados hacia el sur (Atlántic) alcanzan cotas absolutas entre 225 y 355 m sobre el nivel del mar.

Entre estos bloques se sitúan los tres correspondientes al yacimiento Moa, los cuales se encuentran en cotas absolutas entre 175 y 300 m, 150 m y 20 a 100 m sobre el nivel del mar. Todos estos bloques se sitúan en la ribera izquierda del río Moa, que ha erosionado un profundo valle en forma de V, en una zona de falla regional potente de dirección NE.

En algunas partes del área, se conservaron restos de cortezas de tipo lineal; sin embargo en el área denudada afloran principalmente serpentinitas lixiviadas compactas.

La estructura de bloques del yacimiento, está bien reflejada por los rasgos geomorfológicos, los cuales surgen como resultado de dislocaciones tectónicas disyuntivas. La mayoría de las fallas son pre-corteza, puesto que, a través de ellas, se desarrollaron bolsones de cortezas



de intemperismo, aunque se reconocen otras fallas post-cortezas, con desplazamientos verticales y en las cuales se localizan cortezas hasta de 30 m, en bloques hundidos.

Además de las grandes fallas que dividen el campo en bloques, existen otras de menor importancia.

La estructura de bloques del yacimiento Moa, presenta algunas regularidades, como el hecho de que los bloques mayores se localicen hacia el norte, en la región costera, donde se observan pequeñas inclinaciones ( $3^{\circ}$ - $6^{\circ}$ ) en dirección al mar; los bloques del sur tienen una superficie casi horizontal. La corteza de intemperismo de esta región se hace potente en la superficie de las zonas de bloques, y desaparece hacia las zonas de pendientes abruptas.

Las capas meníferas de Moa, a diferencia de las de Pinares de Mayarí, tienen perfil lineal-superficial. El área de desarrollo de estas cortezas es de 10 a 12 km<sup>2</sup> y las reservas son de 4 a 5 veces menores. El área menífera del yacimiento Moa está formada por cinco bloques, con áreas entre 0,2 y 8 km<sup>2</sup> cada uno, y representan pequeños campos residuales de cortezas de intemperismo que coinciden con las zonas de perturbaciones tectónicas y con áreas de serpentinitas de elevado grado de agrietamiento.

El perfil generalizado y esquemático del yacimiento Moa puede quedar de la siguiente forma (de arriba hacia abajo):

Zona	Potencia en m
Lateritas	1-10
Ocres estructurales	1-18
Nontronita	0-2
Serpentinita lixiviada	2-4
Serpentinita desintegrada	
Serpentinita no alterada	

Figura 34

Carta geológica esquemática de la corteza de intemperismo de las serpentinitas del yacimiento Moa, provincia de Oriente, Cuba (margen izquierda del río Moa)

1. Laterita ferruginosa (mena ferruginosa) 2. Menas níquelíferas (ocres) 3. Serpentinitas lixiviadas 4. Serpentinitas 5. Dislocaciones tectónicas A- Atlántico B- Moa C- Playa la Vaca

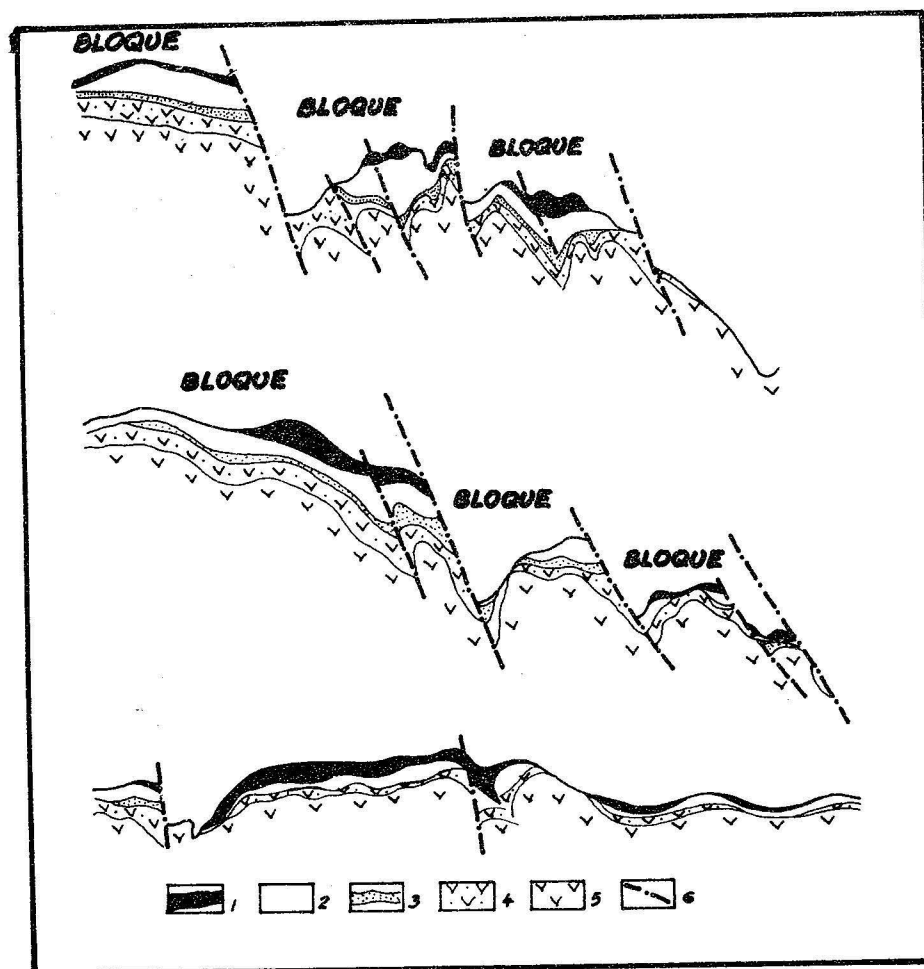


Figura 35

Perfiles geológicos del yacimiento níquelífero Moa, provincia de Oriente, Cuba  
Construido sobre la base de datos de exploración

1. Laterita ferruginosa (mena ferruginosa) 2. Ocheres níquelíferos (mena níquelífera oxidada) 3. Serpentinita lixiviada (mena níquelífera silicatada) 4. Serpentinita poco lixiviada (sin mena) 5. Serpentinita 6. Dislocaciones tectónicas inter-bloques.

Entre cada una de estas zonas, se localizan zonas de transición muy características; una de ellas, situada debajo del horizonte de lateritas, se caracteriza por la presencia de zonas de distribución de serpentinitas blandas lixiviadas (parcialmente nontronitizadas) con contenidos entre 1,2 y 3% de Ni. Este horizonte juega un papel significativo en

la explotación del yacimiento, pues se reconoce fácilmente a simple vista, y constituye el índice que sirve para marcar el punto de transición hacia las serpentinitas lixiviadas.

Tanto en Pinares de Mayarí como en Moa, la masa principal de los campos meníferos se compone de lateritas; sin embargo, en Pinares estas tienen potencias promedios menores que en Moa, donde alcanzan de 7 a 13 m y en los bolsones llega hasta 50 y 60 m, con contenidos promedios también, más elevados, de 1,30 a 1,76% de Ni. En las partes inferiores de los bolsones ricos, este contenido llega a 2 y 3%.

Los ocheres que se encuentran en las celdillas, cavernas y nidos (formados a su vez como resultado de la presencia de serpentinitas silicificadas en las partes inferiores de la laterita) generalmente contienen 0,60 a 1,20% de Ni.

En el campo menífero Moa, la serpentinita lixiviada contiene de 1 a 1,3% de Ni en los primeros dos metros y muy cerca de la zona de ocheres.

El campo menífero de Moa es un ejemplo típico, que ilustra el resultado de la erosión y de la conservación de las capas meníferas de la corteza de intemperismo, en bloques tectónicos de diferentes niveles y dimensiones; así como, también, diferencias por el grado de perturbación tectónica, del macizo serpentínico de Mayarí-Baracoa.

En la zona de desarrollo del área Punta Gorda, al este del río Moa, se ejecutan en la actualidad trabajos de exploración.

Se han reconocido tres grandes depósitos de minerales níquelíferos. Sus reservas se caracterizan por: potencia promedio de la capa menífera: 12 m; en mena laterítica níquelífera se han calculado 120 a 140 millones de toneladas y 50 millones de toneladas en menas níquelíferas del tipo serpentínico.

En relación con los tres yacimientos analizados las conclusiones generales pueden ser las siguientes:

- Las menas níquelíferas de Cuba, se formaron en el proceso de intemperismo de las serpentinitas níquelíferas; una parte pequeña de las menas surgió del intemperismo de rocas terrígeno-sedimentarias, en cuya composición predomina el material serpentínico. Además, existen en Cuba fundamentos geológicos para la búsqueda de menas del tipo de contacto-cársico.
- Por la forma de localización del Ni, la composición de la capa menífera y por las condiciones de yacencia en el perfil de la

corteza de intemperismo, las menas níquelíferas cubanas se dividen en:

*menas lateríticas oxidadas*, ricas en Fe y pobres en Mg, que yacen en las partes superiores de los perfiles de las cortezas de intemperismo;

*menas serpentínicas pobres en Fe y magnesianas*, las cuales yacen en las partes bajas del perfil de la corteza de intemperismo.

- Por los principios estructuro-morfológicos, en Cuba se observan tres tipos de cortezas de intemperismo níquelíferas con características industriales:

*Superficiales*: tienen una gran distribución espacial, con potencia estable aunque relativamente pequeña, y moderados contenidos de Ni.

*Lineales*: poseen menor área de distribución, potencia considerablemente mayor, y elevado contenido de Ni.

*Mixtas*: son menos estables en potencia, pero más ricas que las menas de las cortezas de intemperismo superficiales.

- Las condiciones de formación de la corteza de intemperismo níquelífera, sus tipos estructuro-morfológicos, grado de desarrollo y conservación de las capas minerales en las cortezas de intemperismo de las serpentinitas de Cuba, están subordinadas a la escala, forma y características del desarrollo de la estructura de los macizos hiperbasálticos.
- Las capas más ricas y potentes de menas níquelíferas están relacionadas con cortezas de intemperismo de tipo lineal, formadas por causa de la superposición del intemperismo laterítico sobre las zonas inferiores —ya enriquecidas con Ni— de la antigua corteza de intemperismo Pre-maestrichtiana de perfil nontronítico.

De esta forma las menas níquelíferas, ricas y potentes, de Cuba, se relacionan genéticamente con una corteza de intemperismo compleja y con diferentes edades geológicas.

## MOLIBDENO

### GENERALIDADES

El molibdeno metálico fue aislado por primera vez en el año 1781, por el químico sueco Scheele. Sin embargo, no fue hasta el segundo cuarto del siglo XX, que sus aplicaciones industriales se pusieron de manifiesto, sobre todo en la industria metalúrgica, para la producción de aceros y aleaciones especiales.

Las aleaciones de Mo son las más duras, intensifica la resistencia del acero y del hierro fundido y, además, eleva la ductilidad de estos productos. El acero con Mo tiene sus principales campos de utilización en las industrias de construcción de maquinaria y motores, en la de construcción de aviones. Para la fabricación de armamentos son muy utilizados los aceros al Mo con adición de Ni, Co, Cr, V y W.

Los aceros duros con contenidos de carburo de molibdeno, tienen una amplia utilización en la construcción de instrumentos y dispositivos mecánicos; además, el Mo se utiliza en la industria química, en la refinación del petróleo o simplemente como reactivo.

La producción mundial de Mo en 1973 fue de 158 millones de libras, (sin incluir en esta cifra las producciones de los países socialistas); de este volumen, EUA produjo 118 millones. Otros países productores son Canadá, Perú, México, Finlandia, Noruega, y Japón. En la URSS, las mayores reservas se localizan en la RSS de Armenia, en el Cáucaso septentrional y también en el territorio de las RSS de Kazajstán y Uzbekistán, así como en el NE del país soviético.



## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Mo, está situado en el sexto grupo y quinto período de la tabla periódica. Su número atómico es 42 y su peso atómico 95,94; se le conocen al Mo siete isótopos, siendo los más frecuentes:

Isótopos	%
Mo <sup>95</sup>	16,1
Mo <sup>96</sup>	16,6
Mo <sup>98</sup>	24,1

El Mo está muy relacionado con el W por sus propiedades químicas; sin embargo, en su comportamiento geoquímico tiene notables diferencias. El Mo es un metal francamente siderófilo con una tendencia calcófila definida.

El radio iónico del Mo tetravalente, al igual que el del W tetravalente, es de 0,70 Å; los del Mo hexavalente y el W hexavalente también son iguales, 0,62 Å, por lo que ambos metales pueden sustituirse mutuamente. El contenido de Mo en las rocas es el siguiente:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	$2 \times 10^{-5}$
Rocas básicas	$1,4 \times 10^{-4}$
Rocas medias	$9 \times 10^{-5}$
Rocas ácidas	$1 \times 10^{-4}$
Rocas sedimentarias	$2 \times 10^{-4}$

El Clarke en la corteza es del orden  $1,1 \times 10^{-4}$

El Mo tiende a concentrarse en los últimos diferenciados de la cristalización magmática; la mayor parte del Mo se concentra en forma de sulfuros en los procesos postmagmáticos formando yacimientos neumatolíticos e hidrotermales.

La formación de sales oxigenadas de Mo (molibdatos) no ocurre en grandes proporciones y tampoco tiene importancia alguna, puesto que el volumen principal de este metal, se encuentra en forma de sulfu-

ro. Los minerales de Mo se disuelven fácilmente durante la meteorización y forman óxidos y óxidos hidratados. Sin embargo, no forman yacimientos.

Si las soluciones que contienen Mo se ponen en contacto con sedimentos reductores, precipita este en forma de sulfuro. Tal es el caso de los sedimentos bituminosos de Mansfeld en RFA, que contienen hasta 0,019% de Mo.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Los principales minerales industriales del Mo son:

Metales	Composición química	Contenido %
Molibdenita	S <sub>2</sub> Mo	60
Powelita	MoO <sub>4</sub> Ca	45
Wulfenita	MoO <sub>4</sub> Pb	25
Ferrimolibdita	Fe <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	60
Ilzemanita	MoO <sub>3</sub> ·SO <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	69

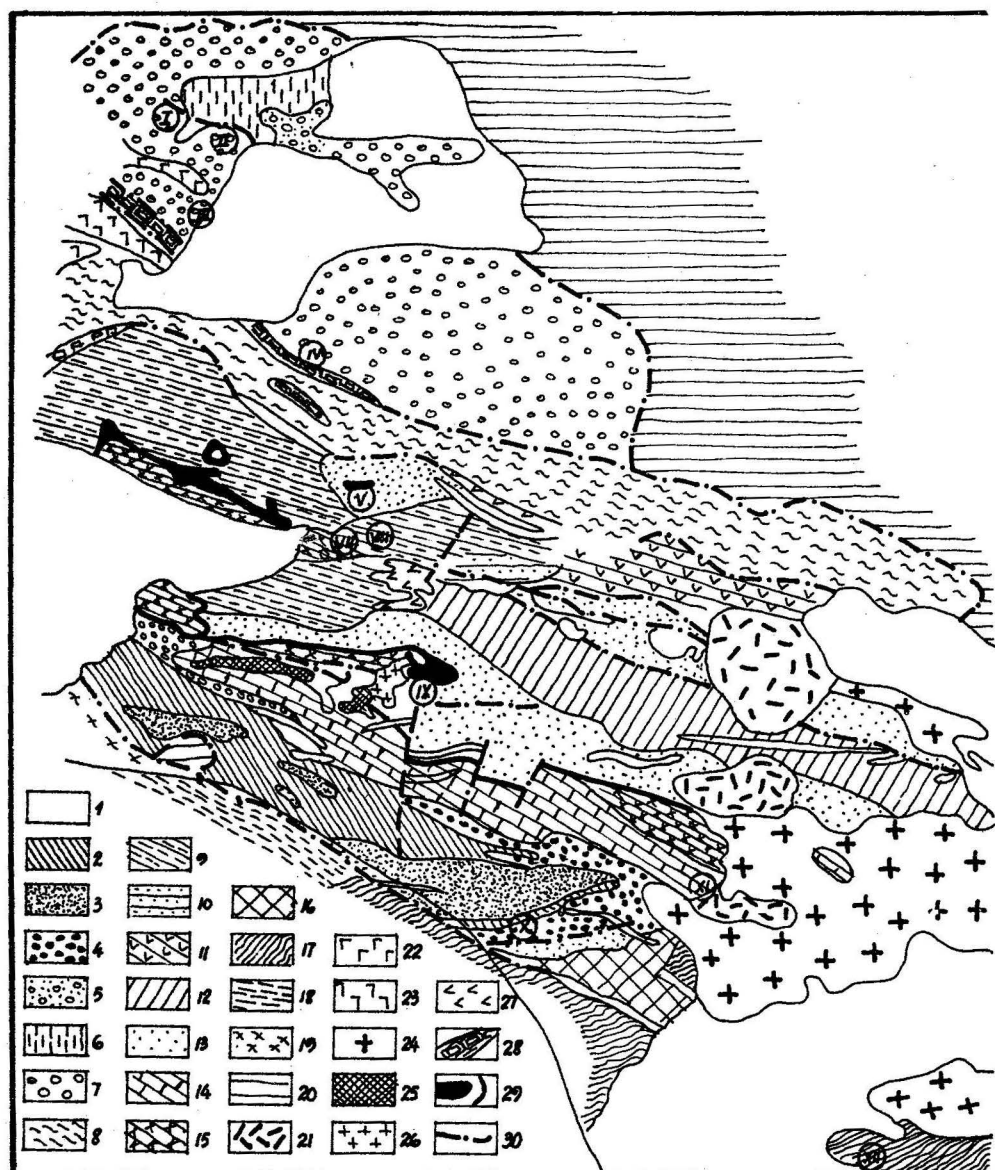
## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los principales tipos genéticos de yacimientos industriales de Mo son:

### 1. YACIMIENTOS DE PEGMATITAS

Son yacimientos asociados a procesos neumatolíticos tardíos de pegmatitas graníticas de molibdenita con wolframita, casiterita, bismutina, y a veces, calcopirita. Los cristales de molibdenita llegan a pesar hasta 1 kg.

Los yacimientos de este tipo, no tienen un tamaño muy grande y se localizan en Canadá, Transvaal, Australia, países escandinavos, así como en Karelia, y la RSS de Armenia, en URSS.



## 2. YACIMIENTOS METASOMÁTICOS DE CONTACTO, TIPO SKARN

Estos yacimientos están relacionados genética y espacialmente con granitoides moderadamente ácidos, y se localizan, generalmente, en el contacto de éstas con rocas carbonatadas,

Figura 36

Mapa geológico esquemático del yacimiento Tirni-Auz URSS (A. Pek)

1. Depósitos contemporáneos 2 al 4. Formación Mukulansk 5. Areniscas rojas 6. Esquistos y aleurolitas 7. Conglomerados y areniscas 8. Filitas 9. Formación vulcanogénica 10. Areniscas arcóicas de la formación de rocas verdes 11. Diabasas, porfiritas, albitófiros cuarcíferos 12. Plagiogranitos cuarcíferos 13. Hornblendita biotítica 14. Mármoles (en capas) 15. Mármoles macizos 16. Formación Eldzhurtinski 17. Migmatitas 18. Esquistos micáceos 19. Granito neis 20. Esquistos cristalinos 21. Liparitas 22. Porfiritas augíticas 23. Queratófido cuarcífero 24. Granitos Eldzhurtinski 25. Brecha de hornblendita biotítica con cemento de granito aplita 26. Granitoides leucocráticos 27. Rocas ultrabásicas 28. Rocas cuarzo-carbonatadas 29. Skarn 30. Dislocaciones tectónicas.

I-II-III Yacimientos Guitche Tirni Auz de Sb IV-V-VI Anomalías geofísicas VII Yacimiento sulfuroso Tirni Auz VIII Filones oro-arsenopiríticos IX Yacimiento Tirni Auz X Yacimiento Mukulansk en esquistos andalusíticos XI Yacimiento poli-metálico Pequeño Mukulansk XII Yacimiento Tintin.

transformadas en *skarn* de piroxeno y granate. Entre las rocas de *skarn*, generalmente está dispersa la scheelita; los *skarn* están surcados por vetas y filones de cuarzo con molibdenita y otros sulfuros, los cuales se formaron en la etapa más tardía del proceso hidrotermal.

La mineralización molibdenítica está situada, espacialmente, en diferentes partes de los *skarn* scheelíticos, y afloran parcialmente fuera de los límites de la zona de *skarn*, en los lugares de contacto de las rocas intrusivas y de las corneanas del exo-contacto.

El contenido de Mo es de 0,1 a 0,2%; a este tipo genético pertenece el yacimiento Tirni-Auz en el Cáucaso septentrional, URSS. También el de Pine Creek, en California, EUA, y Azegour, en Marruecos. El significado económico de este tipo genético como fuente de Mo no es grande.

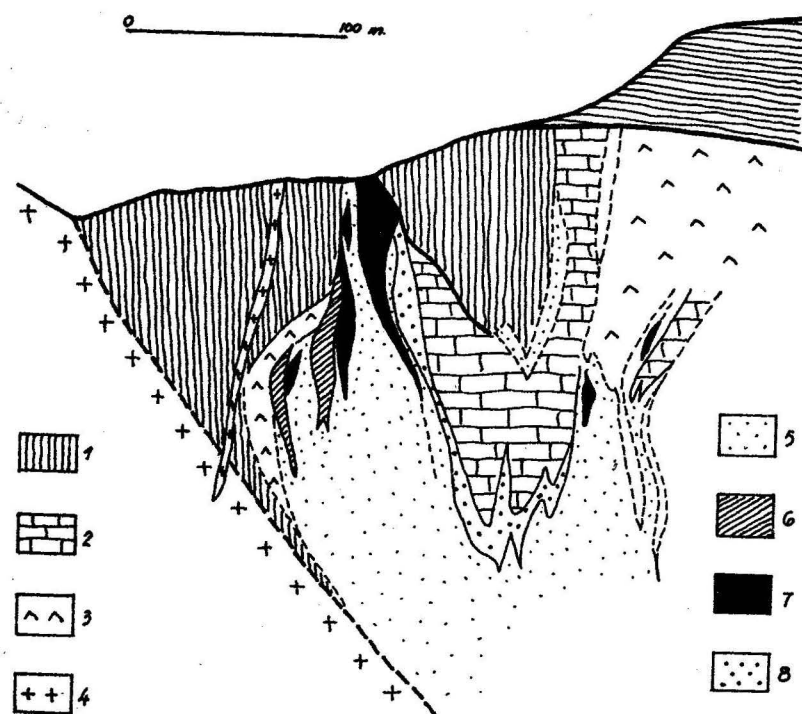


Figura 37

Corte a través del yacimiento Azegour, Marruecos  
(P. Bourg.)

1. Esquistos 2. Calizas 3. Rocas volcánicas 4. Granitos y pórfidos 5. Granatitas  
6. Molibdenita 7. Scheelita 8. Calcopirita

### 3. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Dentro de este tipo genético, es posible reconocer varios subtipos, como:

#### *Yacimientos de temperatura alta*

De la formación de vetas de cuarzo-molibdenita y greise (frecuentemente con wolframita, o huebnerita, raramente con casiterita, bismuto, berilo) relacionados estrechamente desde el punto de vista genético con granitoides (granitos) ácidos.

Las regiones de desarrollo de los yacimientos de este tipo frecuentemente coinciden con las regiones de desarrollo de yacimientos de cuarzo-wolframita y, a veces, de cuarzo-casiterita.

Los yacimientos de este tipo, se localizan en muchas regiones: en URSS, República Popular China, Australia, EUA, etcétera.

El contenido de Mo en las menas es, generalmente, alto (hasta 1% y más), pero las reservas frecuentemente no son grandes.

El significado industrial de este tipo no es muy importante pero tiene perspectivas de utilización, fundamentalmente en la URSS y la República Popular China.

#### *Yacimientos hidrotermales de temperaturas medias*

De la formación cobre-molibdenítica y menas molibdeníticas diseminadas (vetas intercaladas y porfídicas), estrechamente relacionadas desde el punto de vista genético con granitoides moderadamente ácidos.

La meniferación se localiza en los macizos de rocas intrusivas y en las zonas del exocontacto y de las cuarcitas secundarias, atravesadas por vetas intercaladas de cuarzo con sulfuros (pirita, molibdenita, calcopirita, bornita) e incrustaciones de estos mismos sulfuros en las rocas.

Los yacimientos de este tipo tienen una amplia distribución en las regiones de mineralización Cretácica: Kadsharán y Agarak, en Armenia; Almalik, en Uzbekistán; Kounrad, en Kazajistán; Climax y Bingham, en los estados occidentales de EUA; Cananea, en México; Chuquicamata, en Chile.

También se localizan en Yugoslavia, Grecia, Irán y Turquía.

Con este mismo tipo, se asocian los yacimientos Knaben, en Noruega y Mataasvara en Finlandia, que presentan vetas y *stockworks* con meniferación pirítica-calcopirítica-molibdenítica.

El contenido de Mo en el yacimiento Climax, en EUA, es de 0,3 a 0,5%; en Noruega y Finlandia es de 0,3 a 0,4%.

El tamaño de estos yacimientos es, frecuentemente, muy grande, y ellos aportan más del 90% del concentrado de Mo que se produce mundialmente. Este tipo no sólo es muy importante para el Mo, sino también para el Cu (un porcentaje muy elevado de este metal se obtiene de este tipo de yacimientos).

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

El Precámbrico es la edad de la formación de estos yacimientos en los países escandinavos (Noruega, Finlandia, Suecia); Canadá, África del Sur y algunos yacimientos pequeños de URSS.

La época Caledoniana es significativa para los yacimientos de cobre-molibdeno y cuarzo-molibdeno, de la RSS de Kazajstán, Uzbekistán y también para el yacimiento Azegour, en Marruecos.

En el Kimeridgiense, se localizan los yacimientos de cuarzo molibdenita de la región de Baikal y en el NE de URSS, así como los de la parte sur de la República Popular China.

La época más importante y significativa, es la Alpina, fundamentalmente el Terciario, en los límites de los sistemas montañosos jóvenes. Con esta época se relacionan los yacimientos de Cu-Mo y de *skarn* (molibdeníticos-scheelíticos) de URSS: Kadzharán, Agarak, y Tirni Auz; los yacimientos de Mo y Cu-Mo de los EUA, México, Perú, Chile y también Yugoslavia, Grecia Turquía e Irán.

Las principales provincias de Mo en el mundo son:

- La provincia Mesocenozoica del océano Pacífico, la cual abarca las regiones orientales de URSS, República Popular China, los estados occidentales de EUA, México y Chile.
- La provincia Mesocenozoica del mar Mediterráneo, que abarca el Cáucaso, Balcanes, Turquía y el Irán.
- La provincia Herciniana de URSS (RSS de Kazajstán y Asia central).
- La provincia Precámbrica canadiense-escandinava, con yacimientos en Canadá, Noruega, Finlandia y Suecia.

Las provincias más ricas y productivas son las dos primeras.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación describiremos las principales características geológicas uno de los yacimientos más importantes en el mundo.

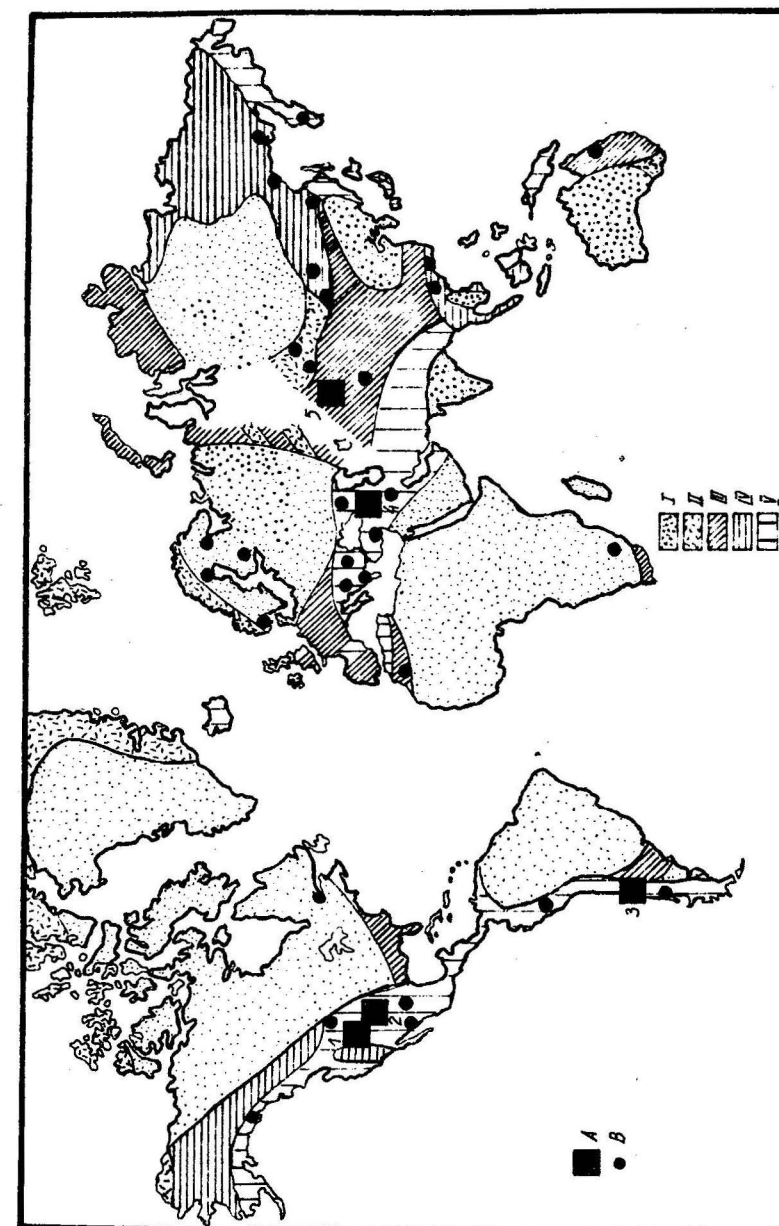


Figura 38

Principales yacimientos de molibdeno del mundo. I. Plataformas II. Zonas plegadas de edad Caledoniana III. Zonas plegadas de edad Herciniana IV. Zonas plegadas de edad Kimeridgiense V. Zonas plegadas de edad Alpina A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Bingham (EUA) 2. Climax (EUA) 3. Chuquibambilla (Perú) 4. Zangezur (URSS) 5. Kazajstán central (URSS) B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local



## YACIMIENTOS CLIMAX, EUA

Este yacimiento que se encuentra a una altura de 3 700 m, comenzó a explotarse en el año 1917.

La región está formada por granitos Precámbricos y neis, que contactan a lo largo de la falla **Mosquito** con rocas sedimentarias del Paleozoico, las cuales se desplazaron hasta 1 km. La mineralización se localiza a lo largo de la falla, que es postmineral; el cuerpo mineral tiene la forma de columna y zonación concéntrica.

Se reconocen tres zonas:

- Zona exterior, consistente en granito neis silicificado y sericitizado, con fenocristales de magnetita y, de vez en cuando, molibdenita. La potencia de esta zona oscila entre 300 y 600 m y el contenido de Mo no es industrial. Hacia la periferia, esta zona pasa a la de granito neis, no alterado.
- Zona intermedia compuesta de granito neis intensamente silicificado, cruzado por muchas vetillas finas de cuarzo, mezcladas con ortoclasa, pirita, molibdenita, y, a veces, fluorita, casiterita, monacita y topacio. La potencia de estas vetillas varía entre algunos milímetros y 5 cm; la molibdenita se concentra parcialmente en las salbandas de las vetillas. La potencia de la zona menífera es de 95 a 150 m; y continúa sin obstáculos hasta una profundidad de 600 m.

La meníferación pasa en las capas profundas, del granito neis a un stock de pórfido cuarzomonzonítico Terciario. El contenido de molibdenita de esta zona es de 0,5 a 0,84% (Mo 0,3 a 0,5%); tiene interés industrial y se explota intensivamente.

- Núcleo central, compuesto de cuarzo con un diseminado raro de molibdenita y pirita. La potencia de esta zona oscila entre 300 y 500 m, con un contenido bajo de Mo; en algunos lugares alcanza 0,1%.

Por el contenido, la composición de las menas y el carácter de las alteraciones, el yacimiento está relacionado con formaciones hidrotermales de temperaturas medias, y se relaciona genéticamente con la fuente de granitoides del Terciario; Mioceno (en duda) cuyos productos fueron el stock de porfírita cuarzomonzonítica y las menas.

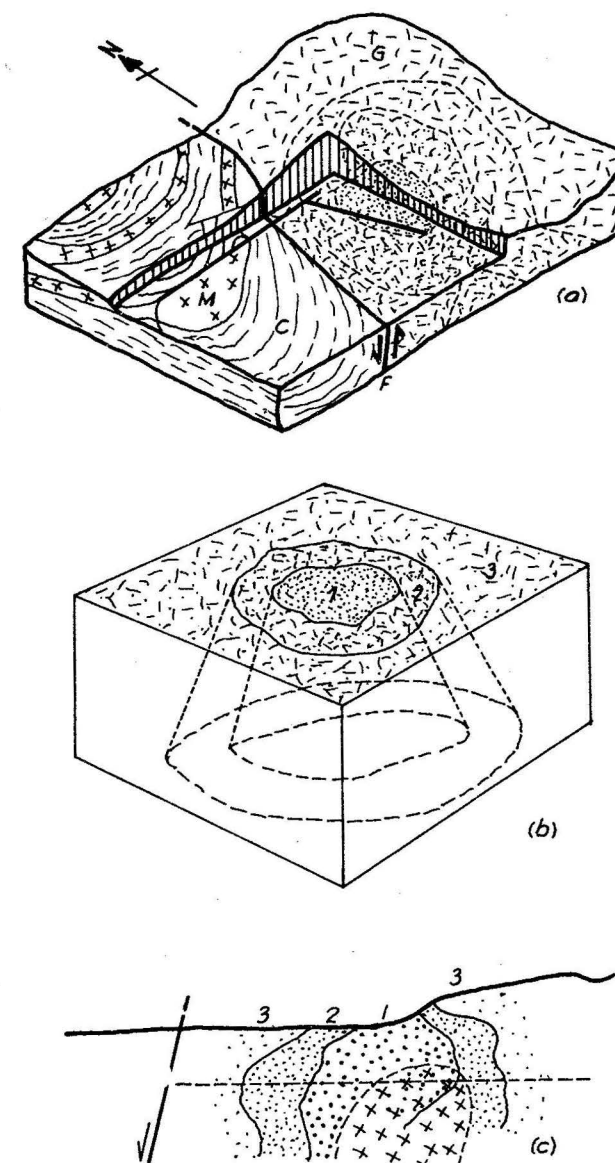


Figura 39

Yacimiento de molibdenita de Climax, Colorado, EUA.

(B.S. Buttler y J.W. Vanderwilt.)

a Bloque diagrama b Esquema idealizado c Corte más reciente G-granito Precámbrico M-Monzonita cuarcifera (Terciario) C-Carbonífero F-Falla (postmineral)  
1. núcleo muy silicificado 2 zona moderadamente silicificada conteniendo el mineral  
3. zona ligeramente silicificada.

## WOLFRAMIO (TUNGSTENO)

### GENERALIDADES

El wolframio o tungsteno fue aislado por primera vez en el año 1783, a partir del mineral tunstenita (scheelita) por el químico sueco Scheele, pero no fue hasta los finales de la década de 1890, que se conocieron las propiedades industriales del metal.

El principal uso del W está en la metalurgia, en la fabricación de aceros cortantes de elevada rapidez que requieran conservar su dureza, aun al rojo vivo. Estos aceros contienen hasta 20% de W con proporciones menores de Cr y V. El acero al wolframio se utiliza mucho en la fabricación de herramientas e instrumentos de corte, así como para la fabricación de armamentos.

Los aceros duros, generalmente tienen en su composición el carburo de wolframio (85 a 90% de carburo de wolframio y entre 5 y 15% de Ni o Co). Los aceros magnéticos especiales, contienen W y Co y los aceros de W con Co, Ni y Cr —con hasta 50% de W—, tienen una gran utilización para la fabricación de motores.

El W también se utiliza en la industria eléctrica y en la de colorantes textiles. La producción mundial de W fue, en 1973, de 44 500 toneladas, concentrada en la región del sureste de Asia, que produjo casi la mitad de este volumen total.

La República Popular China es el primer productor de W en el mundo. También se reportan importantes producciones en Birmania, Malayasia, Tailandia; Bolivia, la península de Corea, EUA, Portugal, Canadá, Brasil, Australia y España.

Las mayores reservas de W de URSS se localizan en las regiones limítrofes al lago Baikal y en Asia central, así como en la región

nororiental del país soviético; también en la RSS de Kazajstán y en el Cáucaso septentrional.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Como se señaló en el capítulo correspondiente al Mo, éste y el W tienen propiedades químicas muy parecidas, aunque desde el punto de vista geoquímico, presentan diferencias sustanciales.

El W se coloca en el sexto grupo, sexto período de la tabla periódica de los elementos; su número atómico es 74 y su peso atómico 183. Se le conocen 5 isótopos, pero los más frecuentes son:

Isótopos	%
W <sup>184</sup>	30,74
W <sup>186</sup>	29,22

El contenido de W en las rocas es como sigue:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	$1 \times 10^{-5}$
Rocas básicas	$1 \times 10^{-4}$
Rocas medias	$1 \times 10^{-4}$
Rocas ácidas	$1,5 \times 10^{-4}$
Rocas sedimentarias	$2 \times 10^{-4}$

El Clarke es del orden de  $1,3 \times 10^{-4}$

En general, se puede apreciar un enriquecimiento relativo de W en las rocas ácidas, aunque éste es más acentuado en el caso del Mo. El W puede formar varios minerales independientes, sobre todo en las pegmatitas, pero los más característicos son los hidrotermales. En el ciclo endógeno, el Mo tiene una gran afinidad con el S mientras que el W es típicamente oxífilo. Por ello, se forman preferentemente en este medio, los wolframatos y, sobre todo, la wolframita. Esta no es más que una mezcla isomorfa de la ferberita y la huebnerita, así como la scheelita, aunque esta última es más importante en los yacimientos metasomáticos de contacto.

En el medio exógeno, el comportamiento del W es muy parecido al del Mo.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Se conocen cerca de diez minerales, en cuya composición entra el W; pero tienen sólo valor industrial, los minerales del grupo de la wolframita y la scheelita. Los minerales más importantes de W son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Wolframita	$WO_4$ (Fe. Mn)	$WO_3$ -76,5 W-60,6
Ferberita	$WO_4Fe$	$WO_3$ -76,3
Huebnerita	$WO_4Mn$	$WO_3$ -76,6
Scheelita	$WO_4Ca$	$WO_3$ -80,6 W-63,9

El 75% de la producción mundial de concentrados de W proviene de la wolframita y la huebnerita; la scheelita aporta el restante 25%.

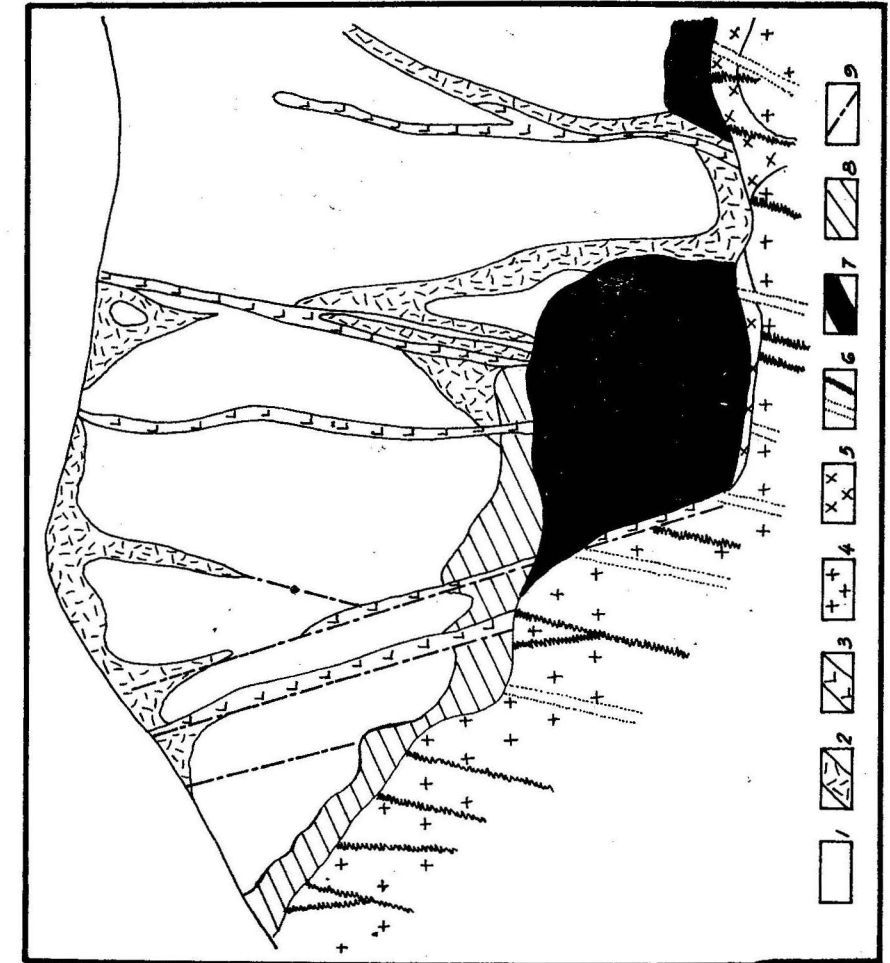
## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los tipos genéticos de yacimientos industriales más importantes para el W son los postmagmáticos y en especial los *skarn* y los hidrotermales.

### 1. YACIMIENTOS METASOMÁTICOS DE CONTACTO TIPO SKARN

Estos yacimientos se localizan, generalmente, en las zonas de contacto de granitos moderadamente ácidos y granitoides, con rocas carbonatadas. La scheelita (y más raramente la wolframita) coincide con el *skarn* de granate piroxeno, aparece frecuentemente, con los *skarn* silicificados o anfibolizados, y también dispersa en los *skarn* de forma bastante uniforme, o junto con cuarzo hidrotermal y sulfuros (pirrotina, calcopirita, esfalerita, raramente con pirita, arsenopirita, estannina, y bismutina) en forma de nidos y cuerpos filoneanos.

Figura 40  
Perfil geológico esquemático del yacimiento Ingichke, URSS  
1. Mármoles 2. Dolomitas  
3. Lampródidos 4. Granito biotítico 5. Granito leucocrático  
6. (a) zona de variación hidrotermal de granitoides (b) y filones de cuarzo-scheelita 7. Skarn de cuarzo-scheelita 8. Skarn alterados, brechosos y cuaríferos 9. Grietas tectónicas.



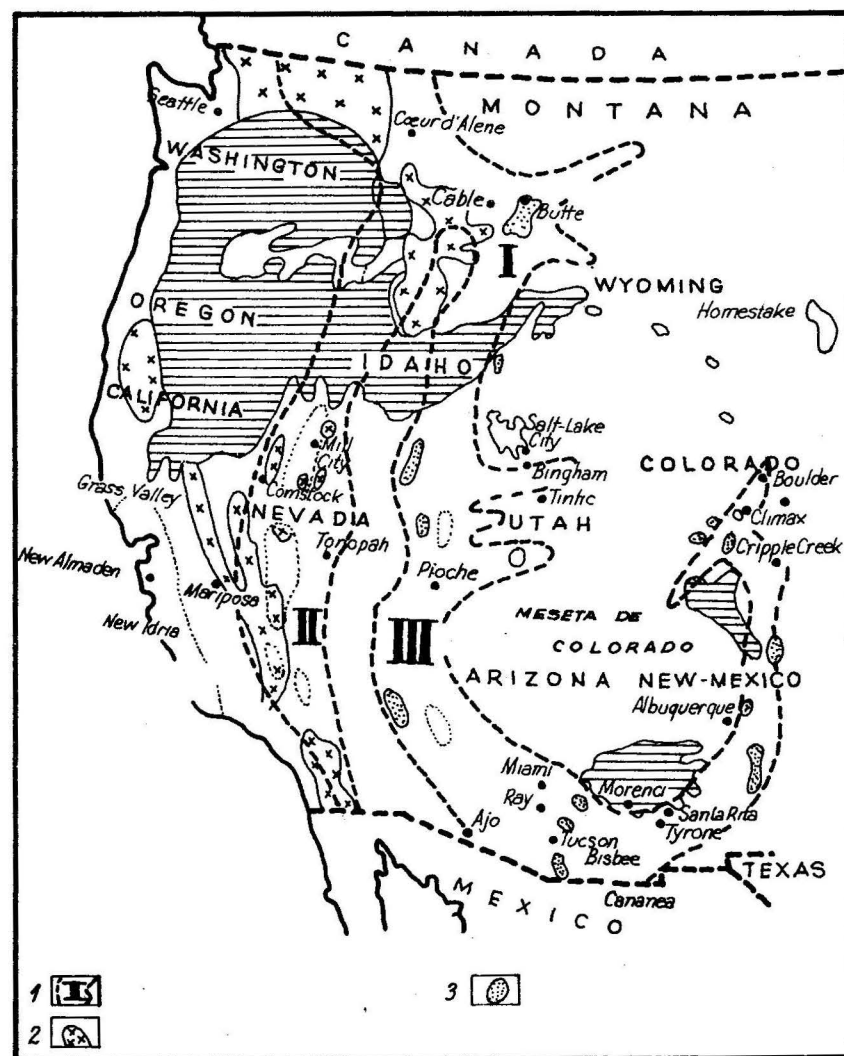


Figura 41

Distribución de los yacimientos de wolframio en el oeste de EUA

(P.F. Kerr).

1. I-II-III Arcos wolframícos del oeste de EUA 2. Intrusiones nevadianas 3. Intrusiones laramídicas.

El tamaño de los yacimientos es, a veces, muy grande: se explotan en URSS, principalmente en Asia Central, en los estados occidentales de EUA: California, Nevada; en el norte de Brasil; Sangdong, en República de Corea; Australia, y también en México y Marruecos.

El contenido de  $WO_3$  en las menas de los yacimientos de este tipo, oscila entre décimas de por ciento hasta 1%. Los yacimientos de metasomatismo de contacto aportan entre el 20 y 25% de la extracción mundial de concentrados de W.

## 2. YACIMIENTOS HIDROTHERMALES

Este es el tipo genético más importante de todos; en él se reconocen:

### *Yacimientos de temperaturas altas y medias*

Constituidos por menas de cuarzo-wolframíticas (y huebnerita), y representados por greisen meníferos y filones cuarzo meníferos; raramente cuerpos columnares, *stocks* y *stockworks*, formados a profundidades moderadas, en relación genética y espacial muy estrecha con granitos ácidos (en las zonas del endocontacto, como en las del exocontacto).

En la composición de la mena, juegan un papel fundamental el cuarzo y la wolframita (huebnerita); también se localiza casiterita, molibdenita, scheelita, bismutina, arsenopirita, pirrotina, esfalerita y otros sulfuros.

En los yacimientos de este tipo, las menas presentan, con frecuencia, textura bandeada, y no es rara la zonación vertical de la menificación, que se localiza en los horizontes superiores con un enriquecimiento de casiterita y bismutina; en los horizontes medios, el enriquecimiento es de wolframita y en los más profundos, de molibdenita (yacimientos al sur de la República Popular China).

Los yacimientos de greisen y vetas de cuarzo-wolframita y cuarzo-huebnerita, tienen una gran importancia para el W. El contenido de  $WO_3$  varía entre 1 y 3%; estos yacimientos se localizan en la URSS, República Popular China, Birmania, Bolivia, Portugal, península de Corea, España, Turquía y otros países.



#### Yacimientos de temperaturas medias

Forman vetas de cuarzo-scheelita y cuarzo-barita, frecuentemente auríferos. Estos yacimientos no tienen mucho desarrollo y son además, pequeños. Presenta interés económico un yacimiento boliviano, de este tipo: Ascención; los yacimientos de vetas de scheelita-oro en una serie de regiones de la URSS y algunos yacimientos de la provincia de Tshangsi, en la República Popular China, pertenecen a este subgrupo.

#### Yacimientos de temperaturas medias y bajas

Pertencen a la formación scheelita-ferberita-estibinita, en pequeñas profundidades y en estrecha relación espacial con *stocks* cercanos a la superficie y extrusiones de andesitadacita, riolita y pórfido de granito.

Este tipo tiene poca importancia geológica pero de él se obtienen concentrados de alta ley de metal y junto con ello, telururos de Au y Ag; a veces se obtiene cinabrio. Ejemplos de este tipo son: Atolia, en California; Yellow Pine, en Idaho; Boulder en Colorado todos en EUA; La Libertad, en Perú (ferberita con oro), y también una serie de yacimientos de la RSS de Georgia y en el Transbaikal oriental.

Podría separarse un tipo genético más: los placeres. Sobre todo son importantes aquellos que se forman a partir de yacimientos de vetas de cuarzo-wolframita y huebnerita y greisen, en menor grado de los *skarn* de scheelita. Placeres muy ricos se localizan en el sur de la República Popular China, Birmania y URSS.

### PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Los yacimientos Precámbricos son pequeños, del tipo pegmatítico y se conocen en África suroccidental, Australia, Canadá y Brasil.

En la época Caledoniana, se formaron las vetas cuarzo-casiterítica-wolframíticas de Nigeria, Zaire y Transvaal; también hay grandes yacimientos de *skarn* de scheelita en la parte nororiental de Brasil.

Los yacimientos hercinianos tienen, frecuentemente, grandes dimensiones; son de cuarzo-wolframita y del tipo *skarn*, y se localizan en una serie de regiones de URSS, Portugal, Australia, y también se conocen en España, Cornualles en Inglaterra, en los montes Metálicos y en Turquía.

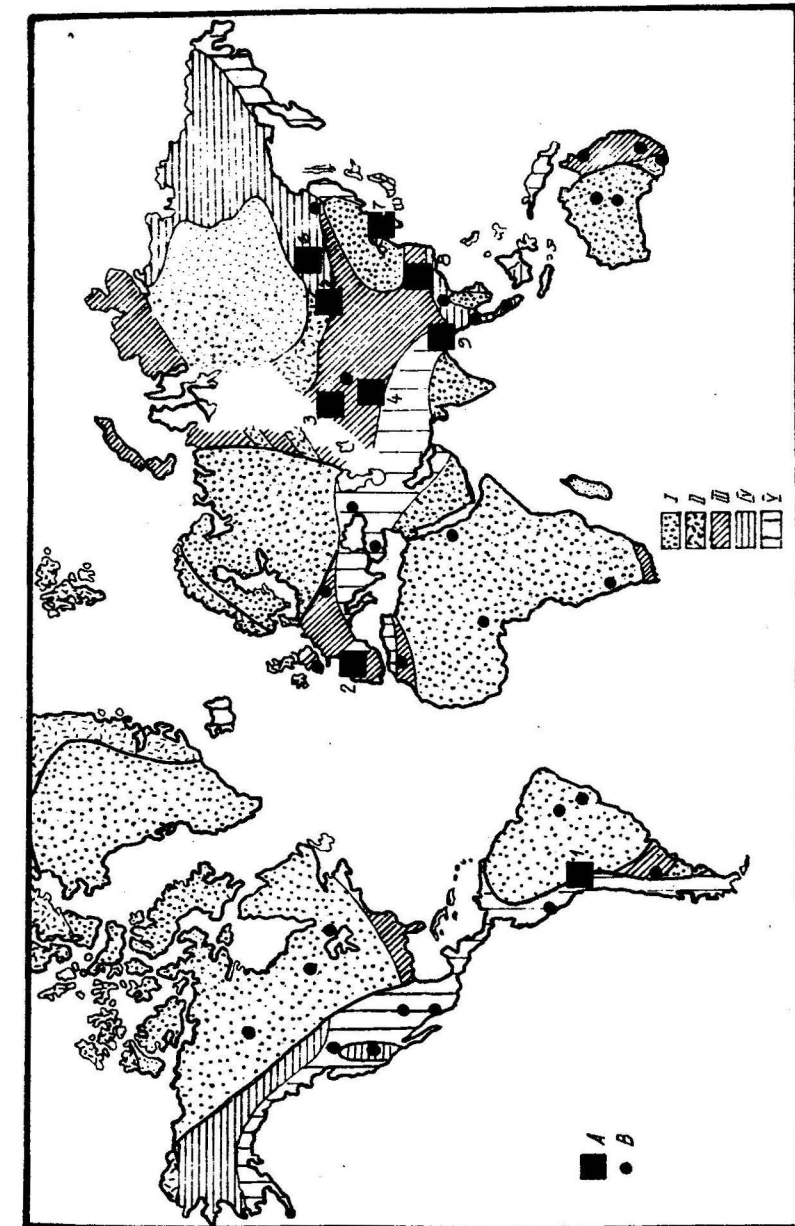


Figura 42

Principales yacimientos de wolframio del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimeridgienses V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Oruro (Bolivia) 2. Villa Real (España) 3. Kazajistán central (URSS) 4. Asia central 5. Djida, URSS 6. Transbaikal oriental (URSS) 7. Nieniax-Sangdong R. de Corea 8. Tshangsi R.P. China 9. Mauchi (Birmania). B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

La época metalogénica Kimeridgiense ( $J_3$ - $Cr_1$ ) es la más rica en W; con ella se relacionan muchos yacimientos de la URSS, República Popular China, Birmania, Malayasia, península de Corea (sobre todo de cuarzo wolframita y huebnerita) y también grandes yacimientos de *skarn* de scheelita en la cordillera Roca en EUA y México.

Los yacimientos Alpinos (de edad Terciaria), se encuentran en Bolivia (cuarzo-wolframita) y en EUA (scheelita-ferberita-estibinita). Hay que señalar, que las regiones más importantes y las más ricas en meniferación wolframítica en todo el mundo, coinciden territorialmente con las de estaño, y entre los filones y vetas de cuarzo wolframita y cuarzo-casiterita, así como los greisen meníferos, se establece frecuentemente, una estrecha relación.

En algunas regiones de la URSS, EUA, el noreste de Brasil, se desarrollan los *skarn* de scheelita. Allí la mineralización wolframítica se relaciona genéticamente con granitoides.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Se describirán a continuación, en forma general, las características geológicas de algunos yacimientos importantes en el mundo.

### YACIMIENTO SANGDONG, REPÚBLICA DE COREA

Este yacimiento, se localiza en la parte suroriental de la península coreana, en el paralelo 37, y es uno de los mayores de todo el mundo, dentro del tipo genético de los *skarn*.

La región se compone de rocas sedimentarias del Paleozoico y Triásico, las cuales son atravesadas por pórfidos graníticos de edad Cretácico superior. Los *skarn* scheelíticos se localizan en las rocas del Cámbrico, las cuales se componen de corneanas, esquistos y mármoles. Tiene seis depósitos en forma de capas, con buzamiento al norte, con ángulos entre  $15^\circ$  y  $30^\circ$ .

La longitud del cuerpo principal es de 1 500 m, su potencia es de 1,5 m. Los restantes cuerpos tienen dimensiones que oscilan entre 400 y 700 m, con espesores entre 0,4 y 7 m.

Los minerales más ricos se localizan en el cuerpo principal, formando una columna mineral de 525 m de largo, con potencia entre 4 y 5 m que sigue en profundidad, hasta 200 m. La scheelita está estrechamente asociada con cuarzo, biotita, fluorita y sulfuros.

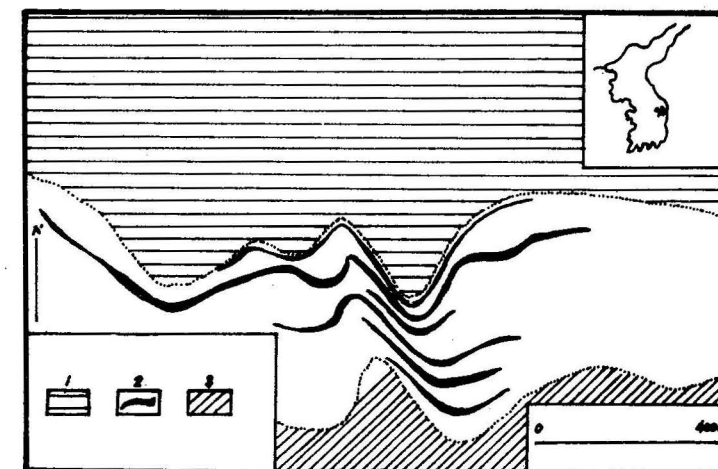


Figura 43

Esquema del yacimiento Sangdong, República de Corea

1. Calizas 2. Hornblenda con estratos de tactitas (*skarn*) 3. Cuarzitas.

El contenido de scheelita en los *skarn* meníferos es de 1 a 5%. Junto con la scheelita hay mucha pirrotina, y, además, molibdenita, bismunita, calcopirita, pirita. El contenido de  $WO_3$  en la mena es superior a 1,6 y 2%.

### YACIMIENTOS DE LA PROVINCIA DE TSHANGSI, REPÚBLICA POPULAR CHINA

En esta provincia se encuentran grandes yacimientos, los cuales aportan el 70% de la extracción de menas wolframíticas de la República Popular China. Solamente en la parte sur de la provincia, en un área aproximada de 30 000  $km^2$  se reconocen hasta 80 regiones wolframíticas.

El área menífera está compuesta por rocas del Paleozoico y Mesozoico inferior, las cuales han sido intruidas por granitos del Jurásico superior. Con ellas están relacionadas grandes concentraciones de W, principalmente en la provincia de Tshangsi y parcialmente en Yunán.

Con las intrusiones graníticas de la misma edad, también se relacionan grandes concentraciones de estaño y molibdeno, en la provincia de Yunán.

Los macizos graníticos intruyeron en dirección NE, a lo largo del eje de una estructura anticlinal del Kimeridgiense; uno de los batolitos

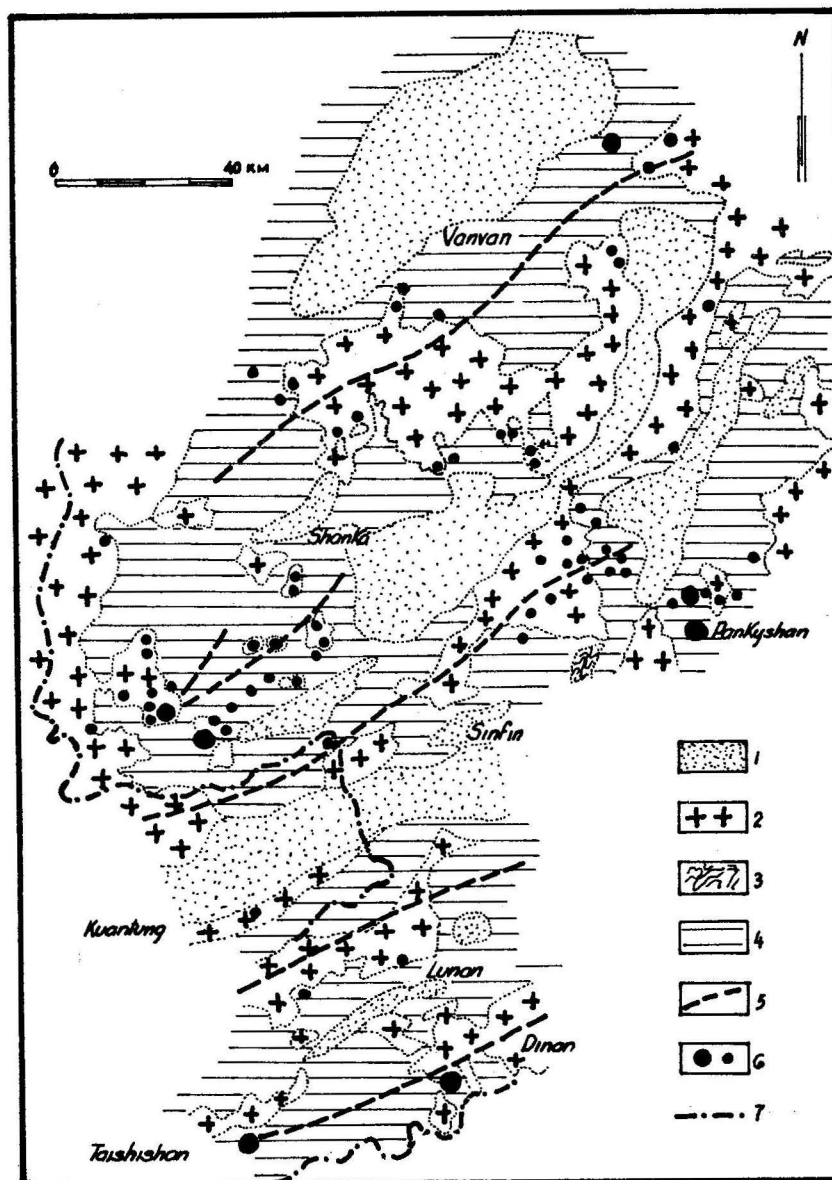


Figura 44

Mapa del campo wolframítico de la provincia de Tshangsi, República Popular China (Ke-Shin-Su)

1. Capas rojas continentales del Cretácico y Triásico inferior 2. Granitos post-terciarios-líasicos y pre-cretácico 3. Granito-neis 4. Rocas sedimentarias y metamórficas del Precámbrico-Terciario 5. Eje de los anticlinales 6. Yacimientos de wolframio 7. Límite de la provincia.

más grandes, tiene un área superior a los 12 000 km<sup>2</sup> e intruye en dirección meridional.

Los yacimientos de W yacen entre los granitos o en las zonas de exocontacto a lo largo de grietas muy alteradas tectónicamente. Según su dirección, los cuerpos minerales son continuos hasta 1 km y profundizan hasta 300 m, con potencia entre 0,1 y 0,6 m hasta 3 m.

Los filones de cuarzo-wolframita se enriquecen, frecuentemente, con molibdenita hacia lo profundo, y en las partes superiores se encuentran bismuto, bismutina y casiterita.

La mayor parte de los filones tiene dirección latitudinal y NE, con buzamiento fuerte (60° a 70°). Además de los filones se reconocen zonas greisenizadas, enriquecidas frecuentemente con casiterita, zonas de stockworks y lentes de menas cuarcíferas con potencia hasta de 50 m.

Entre los yacimientos pueden apreciarse los siguientes tipos:

- Filones pegmatíticos de cuarzo-ortoclasa-moscovita con turmalina, topacio y pequeñas cantidades de wolframita, casiterita y molibdenita. Ellos no tienen significado industrial.
- Yacimientos de greisen estanníferos, compuestos de cuarzo, mica, casiterita, fluorita, molibdenita, bismutina, scheelita, wolframita; son filones de cuarzo-wolframita-casiterita.
- Filones de cuarzo-wolframita de altas temperaturas, en cuya composición se encuentra: cuarzo, moscovita, mica de litio, ortoclasa, fluorita, turmalina, topacio, berilio, albita, sericita, clorita, wolframita, casiterita, scheelita, bismutina, molibdenita, pirita, calcopirita, arsenopirita, pirrotina, esfalerita, galena, bismuto nativo, magnetita, hematita, tenantita, estannina.

La textura de los filones es bandeada; en las salbandas se encuentra mica, wolframita y casiterita, y en el centro, cuarzo macizo. En la geodas se forman cristales de bismutina, casiterita, fluorita, topacio y scheelita. El contenido de WO<sub>3</sub>, oscila entre 0,5 y 4%; este es el tipo más importante, desde el punto de vista industrial, en la provincia de Tshangsi.

- Comparativamente mucho más pequeños son los yacimientos de filones de bajas temperaturas (y medias), ricos en sulfuros, formados por cuarzo y wolframita tardíos.

Entre los yacimientos mayores de esta provincia se encuentran: Tai-Shi-Shan, Si-Juan-Shang y Kua-Mi-Shan.

**COBRE****GENERALIDADES**

El hombre primitivo conoció el cobre y lo utilizó en armas, en la confección de objetos de arte o para el uso doméstico.

Actualmente es uno de los metales de mayor utilización, principalmente en la industria eléctrica, electrónica y de la química; en la construcción de maquinarias y de automóviles así como en la fabricación de diversos tipos de instrumentos.

Es un metal fácilmente aleable: con el Sn produce bronce; con el Al, bronce de aluminio; con el Zn, latón, al igual que con el Zn y el Ni; tiene mucho uso, y siempre hay una gran demanda en el mercado mundial.

Un hecho significativo es, que el volumen de producción de los minerales de cobre, así como del metal propiamente dicho, se ha multiplicado por tres a partir de la década del 50 hasta la del 70; sin considerar los volúmenes de producción de los países del campo socialista. Se comprende entonces, la importancia de este metal para la industria y en la vida moderna.

La producción mundial de mineral de Cu fue en 1973 (sin las producciones de los países socialistas), de 6 millones de toneladas, correspondiendo principalmente a Zaire y Zambia, en África; EUA, Perú y Chile, en América y Australia. En los países socialistas se produce Cu, sobre todo en URSS, donde se localizan reservas importantes y enormes complejos metalúrgicos.

**CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS**

El cobre está situado en el primer grupo, cuarto período del sistema periódico de los elementos; su número atómico es 29 y su peso atómico es de 63,54. Se conocen dos isótopos de Cu:

Isótopos	%
Cu <sup>63</sup>	70,13
Cu <sup>65</sup>	29,87

Desde el punto de vista geoquímico, el Cu es un elemento netamente calcófilo, aunque presenta una cierta tendencia siderófila. Está comprobado que el Cu muestra una gran afinidad con el S y que es uno de los componentes más típicos de las menas de los sulfuros. Esta propiedad es el factor que determina la forma de presentación del Cu en la corteza terrestre, y es evidente, que la mayor parte de este metal en la litosfera superior está contenido en sulfuros y sulfosales.

El Cu se concentra en las rocas básicas, como tendencia general. Esto se expone en los siguientes valores:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	0,002
Rocas básicas	0,01
Rocas medias	0,0035
Rocas sedimentarias	0,0057

El Clarke es 0,0047.

En las rocas ígneas el Cu se presenta preferentemente en forma de calcopirita; aunque es probable que el Cu pueda sustituir al Fe en presencia de poco S, esta sustitución es posible por la gran semejanza de los radios iónicos del ión cuproso (0,72 Å) y del ión ferroso (0,80 Å).

El Cu se concentra con bastante facilidad y regularidad en las menas de los primeros sulfuros magmáticos; la parte del Cu que no pasa a la formación pirrotina-pentlandita-calcopirita, continúa en el proceso de diferenciación magmática, hasta separarse en los procesos neumato-



lfticos y fundamentalmente en los hidrotermales. En estas últimas formaciones, el Cu se encuentra junto a la Ag, Sn, Pb, Zn, Fe, Ni, Co, U y otros metales.

Durante la meteorización de los yacimientos de Cu (calcopirita) en la zona de oxidación y en la de enriquecimiento secundario se forman minerales de Cu de importancia económica.

El Cu se disuelve con facilidad en forma iónica y se deposita después en grandes proporciones como sulfato, carbonato, óxido, silicato o aún cobre nativo. Otra parte queda retenida por adsorción, en sedimentos de compuestos hidrolizados.

Como ya se señaló, el magma básico es rico en Cu; esto es válido también para los derivados efusivos y extrusivos; por lo tanto, se cree que las emanaciones volcánicas submarinas aportan al mar una parte del Cu. Por eso, en muchos yacimientos sedimentarios de Cu, este metal puede proceder de las mencionadas emanaciones.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La mineralogía del Cu es muy amplia; se conocen más de ciento cincuenta minerales, entre los cuales los de mayor significado industrial son los sulfuros. Sin embargo, en dependencia de las condiciones físico-químicas (endógenas o exógenas) predominarán los sulfuros y sulfosales o los óxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros secundarios o hipergénicos.

Los minerales industriales de Cu son los siguientes:

Metales	Composición química	Contenido %
Cobre nativo	Cu	Hasta 100
Calcopirita	$\text{CuFe}_2\text{S}_2$	35,4
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,3
Covelina	$\text{CuS}$	66,4
Calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,8
Tenantita	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_3$	57,5
Tetraedrita	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$	52,3

continuación

Metales	Composición química	Contenido
Enargita	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	48,3
Domeikita	$\text{Cu}_3\text{As}$	71,7
Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88,8
Tenorita	$\text{CuO}$	79,8
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57,4
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55,3
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,1
Brocantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56,2
Atacamita	$\text{CuCl} \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	59,5

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los principales tipos genéticos de yacimientos de Cu, son los siguientes:

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

En el proceso de diferenciación magmática, el Cu junto con el Fe y el Ni, así como algunos otros metales, se asocian con el S y se desprenden, como resultado del proceso de licuación del magma menífero, rico en azufre. Estos yacimientos son muy importantes para el Ni, puesto que el Cu está presente en forma de impureza o mineral secundario; también son importantes para el Pt y el Co. En todos los casos, el mineral de Cu es la calcopirita, con un contenido de Cu generalmente entre 1 y 2%; a este tipo genético pertenecen los yacimientos de Sudbury, en Canada y Monchegorsk, Pechenga y Norilsk, en la URSS.

## 2. YACIMIENTOS METASOMÁTICOS DE CONTACTO TIPO SKARN

Para los yacimientos de este tipo, es característica la relación genética y espacial con los *skarn* de piroxeno-granate que se formaron como resultado de la interacción de macizos graníticos moderadamente ácidos con capas de calizas.

Los cuerpos minerales tienen la forma de nidos, lentes, y depósitos tabulares. Su dimensión es variable y, generalmente, no son grandes. Los principales minerales meníferos son calcopirita, pirrotina y magnetita, y el contenido de Cu es, generalmente, alto (3 a 10%).

Yacimientos de este tipo son Bisbee y Morenci en EUA, y Turinsk en URSS.

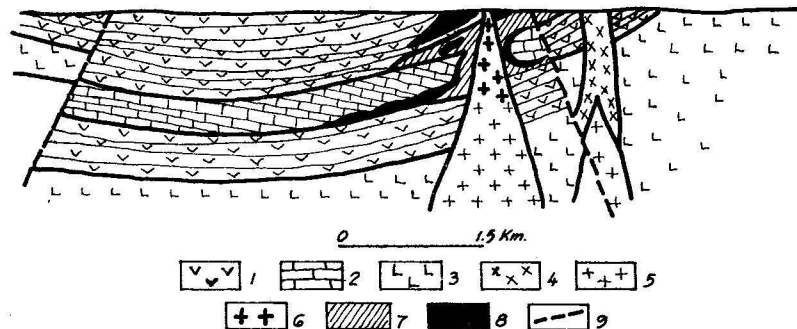


Figura 45

Perfil geológico del Campo menífero Turinsk, URSS

(I. P. Baklaev)

1. Porfiritas, sus tufas y rocas tufogénicas 2. Calizas 3. Espilitas, porfiritas diabásicas, areniscas tufogénicas y esquistos 4. Dioritas 5. Dioritas cuarcíferas 6. Gabro-dioritas 7. Skarn 8. Cuerpos minerales 9. Dislocaciones tectónicas.

## 3. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Este es el tipo genético más importante para el Cu. En él se distinguen:

### Yacimientos de temperaturas altas

De las formaciones cobre-turmalina y cobre-estaño, relacionados con intrusiones poco profundas y con las raíces de volcanes.

La mineralización característica es la calcopirita, bornita, enargita, tenantita, asociadas con la turmalina, junto con molibdenita o casiterita; los grandes yacimientos son raros. Como ejemplos podemos citar a Braden, en Chile; y otros de menores dimensiones, como Akenobe, en Japón; Telemarken, en Noruega; Cerro de Pasco, en Perú y los yacimientos de Manchuria.

### Yacimientos de temperaturas medias

Se pueden subdividir en tres tipos, de acuerdo con sus condiciones de formación y el carácter de la mineralización:

— Formación de **cobre porfídico**, genéticamente relacionada con *stocks* hipoabisales de granitoides, moderadamente ácidos. La mineralización se localiza en las cúpulas de los *stocks* (en sus partes periféricas superiores) y en las rocas del exocontacto. Las rocas encajantes sufren una intensa alteración, que da lugar a la formación de *cuarcitas* secundarias.

El cuarzo y los minerales meníferos (pirita, calcopirita, bornita y a veces molibdenita) forman cuerpos minerales que tienen forma de vetillas. El contenido de Cu no es muy alto, como promedio 0,8 a 1% y a veces algo menos, con impurezas de Mo (desde milésimas hasta 0,05 y 0,1%). También se localiza un poco de renio.

Cerca del 50% de todas las reservas de Cu del mundo, se encuentran en yacimientos de este tipo. En él se localizan los yacimientos de Cu mayores del mundo, como Chuquibambilla, en Chile; Bingham, en EUA y otros.

En URSS, pertenecen a este tipo, los yacimientos Kounrad y Boschekul, en Kazajstán; Almalik, en Uzbekistán; Kadzharán, Agarak y otros en la RSS de Armenia.

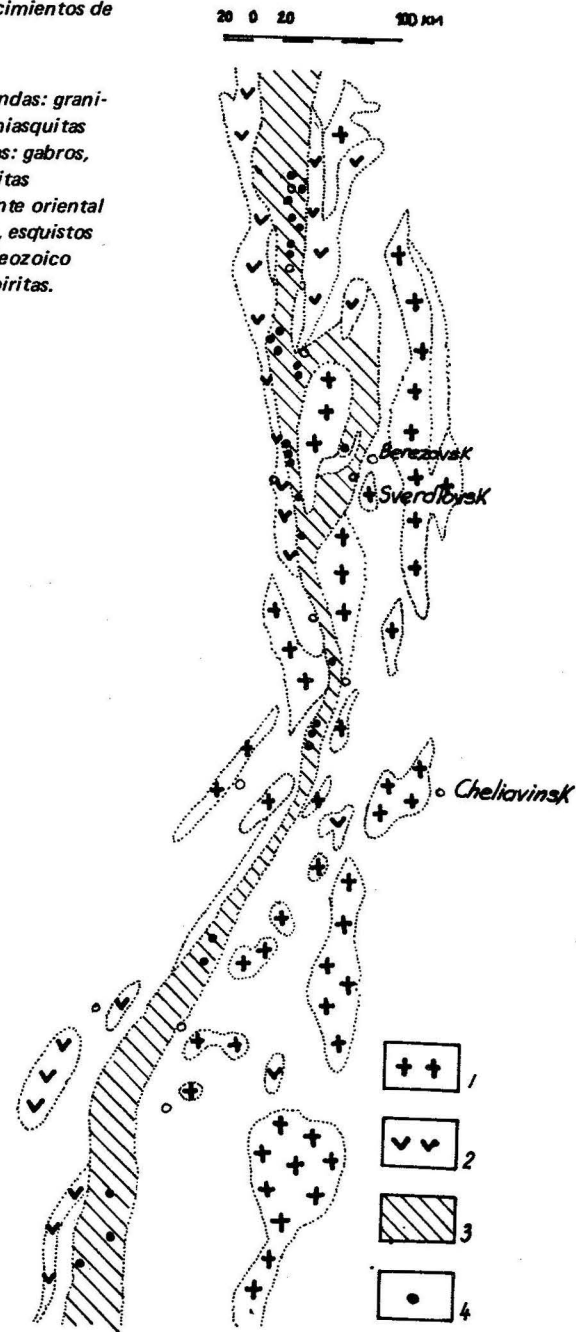
— Formación de yacimientos de piritas con cobre, estrechamente relacionada con capas efusivo-sedimentarias y efusivas, entre las cuales se forman lentes, depósitos, cuerpos en forma irregular de menas pirito-calcopiríticas (con mezcla de menas grises, bornita, enargita, barita, esfalerita, galenita y otros).

Las menas son ricas, en contenidos de Cu, entre 2 y 3% y más; los yacimientos tienen a menudo, escalas significativas y desempeñan un papel muy importante en la producción mundial de este metal. Yacimientos de este tipo se localizan en Degtiarsk, Karpushy, Kabat y otros, en los

Figura 46

Mapa esquemático de los yacimientos de piratas de los Urales, URSS  
(S.A. Bajromeev)

1. Rocas ígneas ácidas profundas: granitos, granodioritas, sienitas, miasquitas
2. Rocas básicas y ultrabásicas: gabros, piroxenitas, peridotitas, dunitas
3. Rocas verdes de la pendiente oriental de los Urales (efusivos, tufas, esquistos y rocas sedimentarias del Paleozoico inferior)
4. Yacimientos de piratas.



Urales; Río Tinto en España; Bor, en Yugoslavia; Ergani-Maden, en Turquía; así como yacimientos en Japón, EUA, Canadá y República Popular China.

Estos yacimientos están relacionados genéticamente con intrusiones subvolcánicas y las raíces de aparatos extrusivos entre los cuales yacen.

Figura 47

Sección transversal de las masas de mineral de Río Tinto (Huelva, España)  
(D. Williams)

A- Depósito Perrunal B- Filón San Dionisio, sección central C- Filón sur.

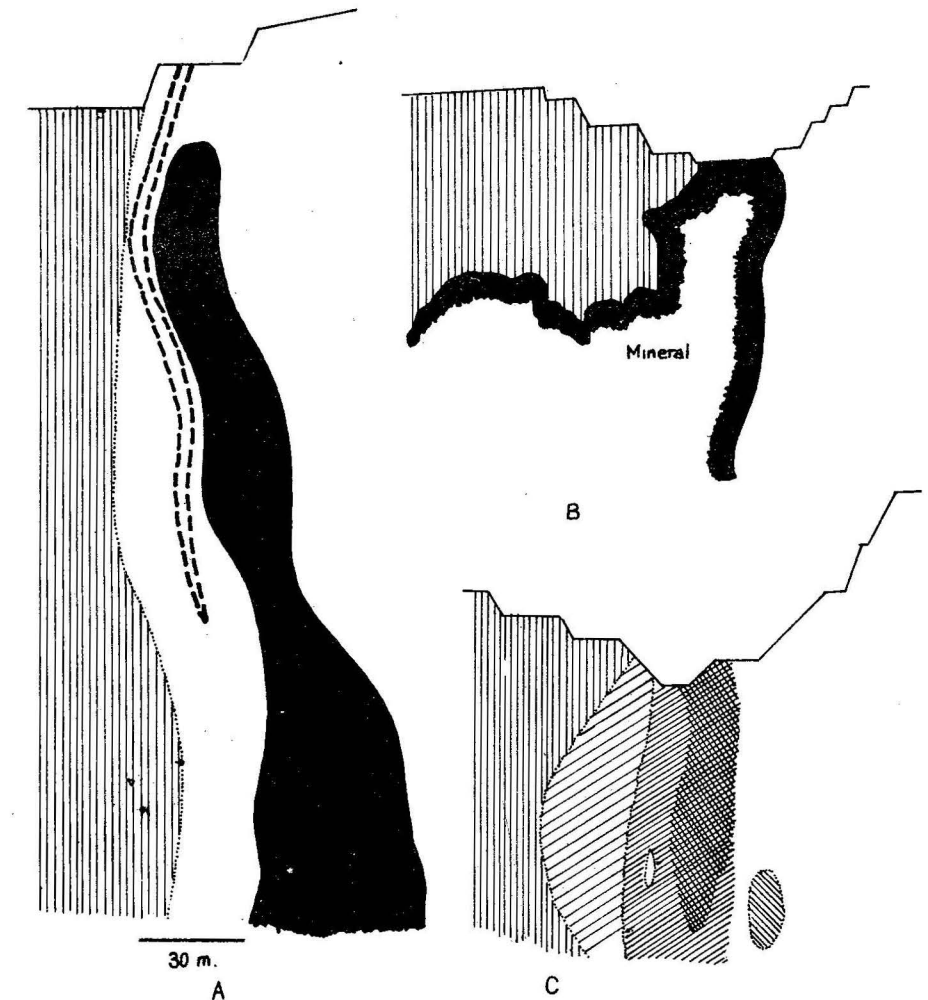




Figura 48  
Yacimiento de areniscas cupríferas de Chambishi en Zambia  
(Davidson)  
La zona menífera está representada en negro.

- Yacimientos de vetas ricas en sulfuros de cobre, entre los cuales se puede reconocer la formación de yacimientos de pirita-calcopirita, como Kafán, en la RSS de Armenia, y vetas de enargita en Butte, Montana, EUA. La mena contiene de 3 a 5% de Cu y el tamaño de estos yacimientos es significativo aunque es un tipo raro de yacimiento.

#### *Yacimientos de temperaturas bajas*

Relacionados, probablemente, con intrusivos de yacencia profunda; estudiaremos dos formaciones:

- Formación de areniscas cupríferas en forma de capas, con sulfuros de Cu (calcosina, bornita, calcopirita) "cementando" areniscas por ejemplo, Dzhezkazgán, en la URSS; y yacimientos en Zaire y Zambia.

Las menas son extraordinariamente ricas, con un contenido de Cu entre 2 y 3%; la génesis de estos yacimientos no está aún muy bien definida; algunos investigadores los consideran del tipo sedimentario.

- Formación de cobre nativo con zeolitas en conglomerados (aglomerados) y efusivos de composición básica. El mayor de estos yacimientos se encuentra en el estado de Michigan, en EUA, en la zona del Lago Superior. La mena contiene cerca de 1% de Cu y algo de Ag (en forma de Ag nativa).

#### 4. YACIMIENTOS DE INFILTRACIÓN

Son areniscas cupríferas compuestas de carbonatos de Cu crisocola, cobre nativo y calcosina, las cuales forman el cemento de las areniscas. El tamaño de estos yacimientos no es generalmente grande. Ejemplos de este tipo se encuentran en la región pre-uraliana, en Bolivia, y en Asia central.

#### 5. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

Se trata de la formación de esquistos cupríferos (*Kupferschiefer*); ante todo, este tipo está representado por el yacimiento Mansfeld en RFA. Los sulfuros de Cu (bornita, calcosina, calcopirita) impregnan los esquistos y se diseminan a lo largo de ellos en forma de segregaciones de Cu. Las menas son ricas con un contenido cercano a 3% de Cu algo de Zn, Pb, Ag, Mo. Los yacimientos se formaron en condiciones de *facies* ricas en  $SH_2$  y con un papel activo de las bacterias.



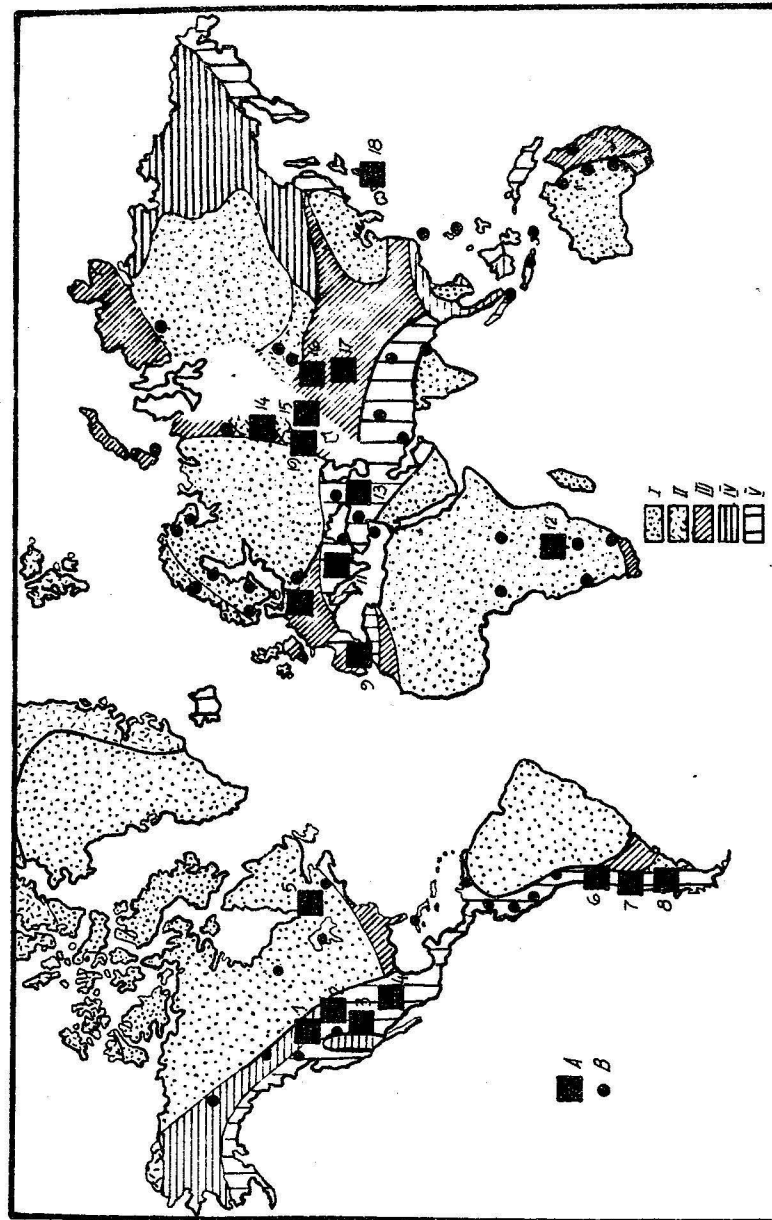


Figura 49

Principales yacimientos de cobre del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimeridgianas V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Butte, Montana (EUA) 2. Utah, Colorado (EUA) 3. Jerôme (EUA) 4. Cananea (México) 5. Sudbury (Canadá) 6. Chuquibambilla (Chile) 7. Potrerillos (Chile) 8. Braden (Chile) 9. Huélfia (España) 10. Mansfield (RFA) 11. Bor (Yugoslavia) 12. Katanga-Zambia 13. Zangezur (URSS) 14. Urales centrales (URSS) 15. Dzhezkazgan (URSS) 16. Kounrad (URSS) 17. Almalik (URSS) 18. Bessí (Japón) 19. Urales del sur (URSS). B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

### Provincia Precámbrica

República del Congo, Zaire, con yacimientos del tipo de areniscas cupríferas; la región del Lago Superior, con yacimientos de Cu nativo asociados a zeolitas. La región de Sudbury en Ontario, Canadá, con yacimientos sulfurosos de Ni-Cu. En esta provincia se obtiene  $\frac{1}{4}$  de la producción mundial de cobre.

### Provincia Paleozoica

Comprende el Paleozoico medio y superior. Se encuentra en los Urales, con yacimientos de piritas y de *skarn*; en las RSS de Kazajstán y Uzbekistán, con yacimientos de cobre porfídico, y el yacimiento Dzhezkazgan de areniscas cupríferas. Esta provincia tiene una gran importancia para la URSS.

### Provincia Mesocenoica

Del Terciario y parcialmente Cretácico, se encuentra en la zona del mar Mediterráneo, con yacimientos de pirita en los Balcanes, Turquía, en la isla de Chipre, en Irán y Armenia, en forma de cobre porfídico. En la zona del cinturón del océano Pacífico, en Canadá; los estados occidentales de EUA; México, Perú y Chile se encuentran yacimientos gigantes de Cu-Mo de tipo porfídico, vetas y piritas cupríferas, y también yacimientos de piritas en Japón y Finlandia.

De esta provincia Mesocenoica, se obtienen casi las  $\frac{3}{4}$  partes de la producción mundial de Cu.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Se explicarán, brevemente las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes del mundo.

### CAMPO CUPRÍFERO DE BISBEE, ARIZONA, EUA

Este campo cuprífero, fue descubierto en el año 1877. En esta región descansan 1 500 m de calizas de edad Paleozoica y cuarcitas, sobre esquistos del Precámbrico, en la zona de penillanura. Sobre la superficie muy erosionada de las calizas descansan entre 1 200 y 1 500 m de sedimentos del Cretácico, separados de las rocas anteriores por un conglomerado basal.

Los sedimentos del Cretácico son atravesados por rocas ígneas de composición monzonita cuarcífera y pórfido granítico de edad cretácico superior (final) y principios del Terciario.

Asociada con esta actividad ígnea se encuentra una mineralización, tipo *skarn*, que se localiza en forma de masas minerales metasomáticas de cuatro clases:

- reemplazamientos tabulares masivos de sulfuros en capas de calizas,
- cuerpos tubulares de sustitución de sulfuros masivos en calizas,
- tubos de brecha silíceas,
- sustituciones diseminadas en pórfidos.

En la región, las capas fueron plegadas ligeramente e inclinadas suavemente hacia el este y quebradas en bloques por numerosas fallas normales. Existe una importante falla pre-mineral llamada Dividend, que puso en contacto sedimentos Paleozoicos y esquistos Precámbricos que afloran en el NE y que constituyen una localización importante para la metalización.

Cerca de los pórfidos, las capas de calizas puras están marmorizadas o alteradas como minerales de silicatos cálcicos. Las capas de calizas impuras se han alterado para formar silicatos de Ca, Fe y Al, con algo de magnetita, típicos de estos procesos de metasomatismo de contacto, así como cuarzo o calcedonia. Ninguna alteración acompaña al pórfido, que en sí mismo no está metalizado; los cuerpos de sustitución se encuentran tanto en la caliza alterada, como en la no alterada.

Las chimeneas son principalmente masas de piritas masivas con calcopirita y bornita, así como cantidades escasas de bornita, tenantita, esfalerita y galena, con ley promedio de 4% de Cu. Alejado de los lentes, aparecen incrementados los contenidos de blenda y galena, y más lejos aún existen depósitos de plomo argentífero con cuarzo y calcita; los minerales diseminados son pirita, calcopirita, bornita y calcosina.

#### YACIMIENTO CERRO DE PASCO, PERÚ

Las minas de Cerro de Pasco, están situadas en Cerro de Pasco, Morococha, Yauricocha y Casapalca, y es la primera, el principal centro productor de cobre del país.

El distrito minero Cerro de Pasco, está situado a 180 km al N29E de la ciudad de Lima, en las estribaciones occidentales de la Cordillera Central de Perú, y a una altura de 4 330 m sobre el nivel del mar.

Los depósitos minerales se encuentran en las zonas E y S de una chimenea volcánica Terciaria, rellena por rocas piroclásticas e intrusivas. El cuello volcánico, de sección elíptica y con orientación N-S, corta una serie de rocas sedimentarias que van desde el Paleozoico inferior hasta el Terciario inferior y están dispuestas en un amplio anticlinal de doble hundimiento.

El cuello volcánico se ha formado en la intersección de dos sistemas de fracturas, oblicuas al plegamiento regional, las cuales, en conjunción con los plegamientos locales de las estructuras plicativas regionales, evidencian una compresión más intensa en la parte norte del distrito.

El aspecto morfológico actual del cuello volcánico y de los depósitos minerales, los cuales fueron intensamente erosionados en época Prepleistoceno y elevadas posteriormente hasta los niveles actuales, es el de una superficie ondulada, típica de un proceso de semipeniplanación.

En el distrito minero Cerro de Pasco como en otras localidades de la Cordillera Central de Perú, se registran dos tipos de actividad ígnea: la primera es una fase explosiva, y está representada por acumulaciones de aglomerados y piroclásticos que ocupan la mayor parte de la estructura volcánica; la segunda es una fase intrusiva, y está caracterizada por la inyección de rocas monzonito-cuarcíferas, hipoabisales. La metalización está genéticamente relacionada con la primera etapa de la fase ígnea intrusiva; diques postminerales de monzonita cuarcífera albitizada, marcan la última etapa de la actividad ígnea en el distrito.

En la margen oriental del cuello volcánico se emplazó el cuerpo de sílice-pirita de 1 800 m de longitud por 300 m de ancho máximo, dentro del cual se han localizado cuerpos tubulares de pirrotina y cuerpos irregulares de menas metálicas.

Los estudios mineralógicos indican que la deposición de las menas metálicas se ha efectuado en un tiempo prolongado en el orden siguiente:

- Minerales de Pb-Zn.
- Minerales de Cu-Ag.
- Minerales de Ag.

Los depósitos de Cu son de tres clases:

- Masas de cobre en un depósito masivo de piritas.
- Vetas transversales de Cu-Ag.
- Mantos de Cu en calizas.

Antiguamente todas las masas de mineral producían menas ricas de calcosina supergénica que se extendían hasta una profundidad máxima de 150 m por debajo de la zona oxidada.

El mineral de Cu más abundante en la parte central del distrito, es la enargita; en cambio, en las porciones N y S es la luzonita. En general los minerales de Cu están asociados a la pirita. Las asociaciones mineralógicas indican que la pirita-enargita se depositó en un medio ácido.

### YACIMIENTO CHUQUICAMATA, CHILE

Este yacimiento, el mayor del mundo de todos los de menas de "cobre porfídico", se halla en Antofagasta a 144 km del océano Pacífico y a una altura de 2 800 m sobre el nivel del mar. Es un enorme depósito de minerales oxidados de baja ley, explotado a cielo abierto, notable por sus inmensas reservas de minerales y la diversidad de éstos.

Según A. V. Taylor, una intrusión de pórfido diorítico y granodiorítico acompañó al intenso plegamiento y fracturó los productos volcánicos y sedimentarios mesozoicos de fines del Cretácico.

A este fenómeno siguieron erupciones andesíticas, erosión prolongada, levantamiento en el Plioceno y vulcanismo; erosión, formación de gravas, levantamiento y, posteriormente, comenzó a desarrollarse la aridez reciente.

La mineralización localizada por una intensa fracturación del terreno acompañó a las intrusiones porfídicas y la erosión del Plioceno expuso los depósitos, los oxidó y transformó en minerales solubles que subsistieron por la extrema aridez del clima.

El depósito mineral es una masa de piritas porfídicas de 3,2 km de largo por 1,1 km de ancho y 450 m de profundidad; las perforaciones han localizado los sulfuros hasta una profundidad de 585 m.

La roca encajante está intensamente sericitizada y silicificada, y se reconocen hasta cinco etapas de alteración. Se supone que la mineralización primaria se debió a un reemplazamiento hidrotermal del pórfido, que produjo cuarzo, sericita, hematita, pirita y enargita, con tetraedrita, calcopirita, blenda, bornita y molibdenita. Está presente también una considerable cantidad de covelina, pero ésta y la alunita posterior son, probablemente, supergénicas.

La meteorización produjo una zona lixiviada superior, que no se presenta en todas partes; una zona oxidada subyacente que constituye, actualmente, la masa mineral, y una zona de mineral mezclado de óxidos y sulfuros. Debajo de ésta se encuentran los sulfuros.

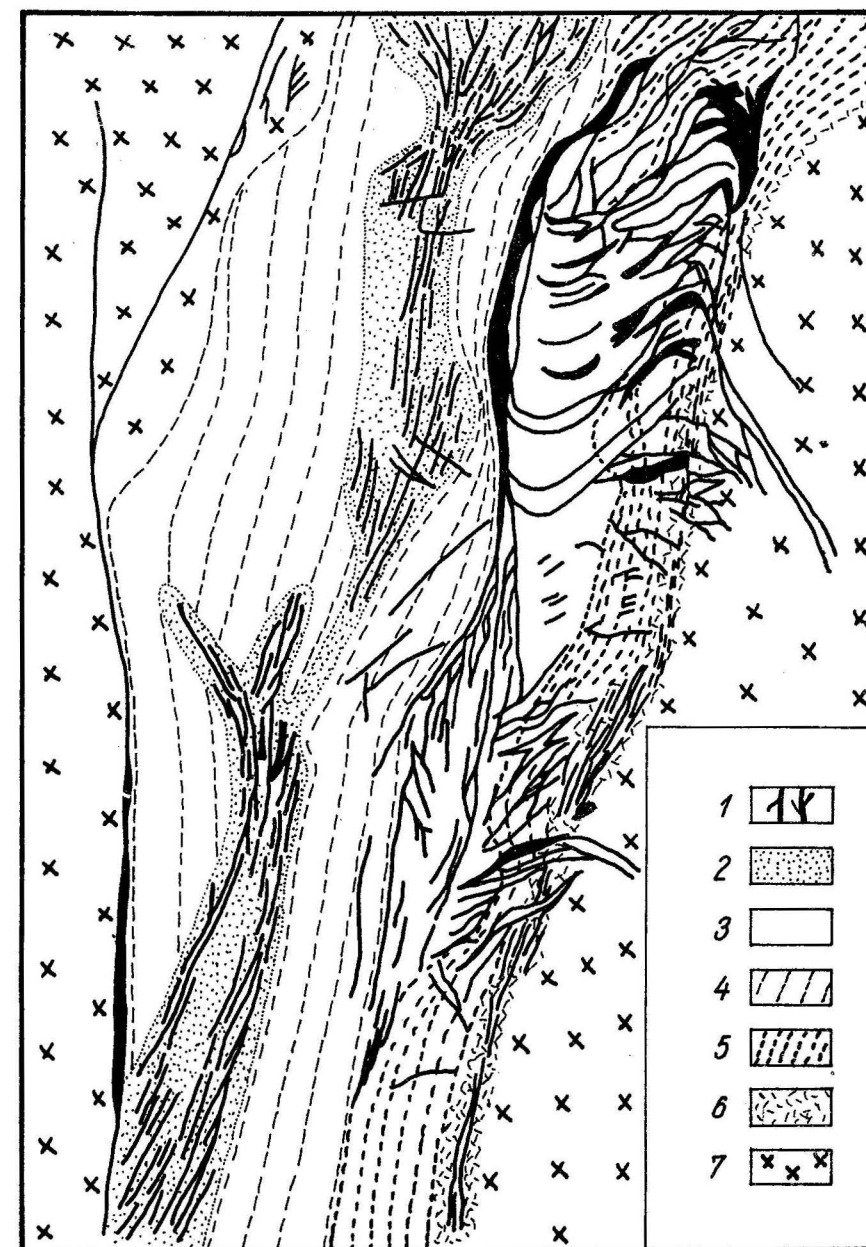


Figura 50

Estructura del yacimiento de menas porfídicas de cobre Chuquicamata, Chile

1. Vetillas meníferas y grietas mineralizadas 2. Zona de óxidos 3. Zona oxidada y sericitizada 4. Zona sericitizada y cuarcificada 5. Zona albitizada y cuarcificada 6. Zona cloritizada 7. Granodioritas inalteradas.

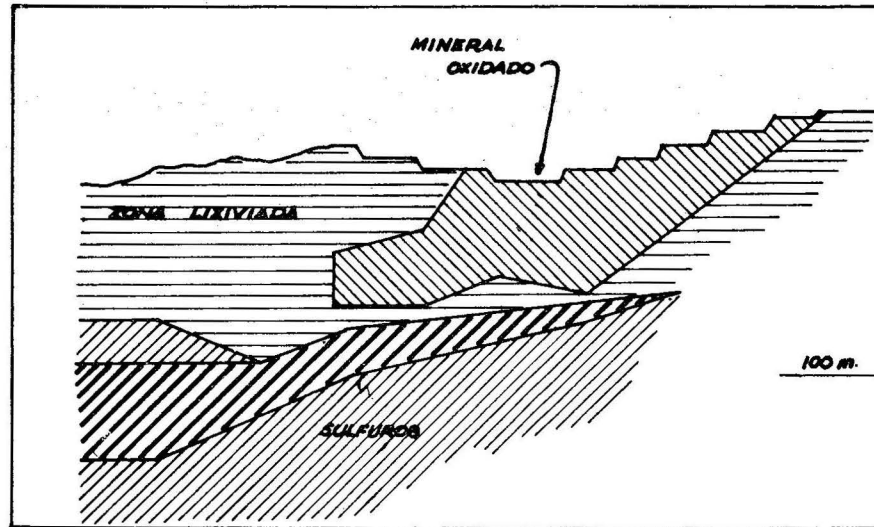


Figura 51  
Sección transversal de la masa mineral de Chuquicamata, Chile.

Los óxidos comprenden asociaciones de minerales cupríferos nada comunes, los que, generalmente, no se encuentran en otras regiones más húmedas, pero que en las condiciones del desierto de Atacama, son asociaciones normales. Ellos son: antlerita,  $\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$ ; atacamita  $\text{Cu}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6$ , calcantita,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , krophnkita,  $\text{NaCu}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Existen otros minerales, pero su presencia es menos frecuente.

Los sulfuros supergénicos, conocidos por las perforaciones, están formados por calcosina-covelina con restos no sustituidos de sulfuros primarios. Entre la zona de óxidos y la zona mixta, puede existir otra zona lixiviada intermedia producida por el ascenso del nivel de las aguas, lo que produjo la lixiviación de los minerales oxidados solubles.

La mineralización primaria fue coetánea con la intrusión porfídica; la oxidación y la lixiviación durante el clima húmedo del Terciario medio, produjo una capa lixiviada y una zona profunda de sulfuros supergénicos. El levantamiento pliocénico inició la erosión, eliminó la mayor parte de esta capa y en las condiciones de clima árido convirtió la parte superior de la zona de sulfuros, en minerales oxidados.

#### YACIMIENTO KOUNRAD, URSS

Este yacimiento que se encuentra en el norte de la costa del lago Balkash en Kazajstán, fue descubierto en 1928.

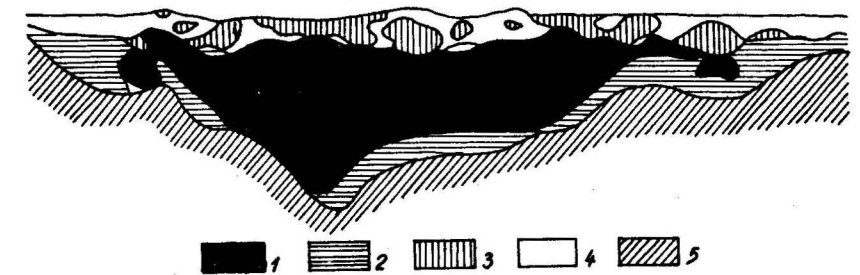


Figura 52  
Perfil esquemático a través del cuerpo menífero del yacimiento Kounrad, URSS (K.S. Gazizov)  
1. Mena calcosínica industrial 2. Mena calcosínica pobre 3. Mena oxidada industrial 4. Mena lixiviada 5. Menas primarias pobres.

De acuerdo con N. I. Nakovnik y K. S. Gazizov, la región se compone de capas efusivo-sedimentarias del Silúrico y Devónico, las cuales son intersectadas por granitoides y granitos del ciclo herciniano. En las aureolas de contacto de los granitoides las rocas del Silúrico y Devónico se transforman en cuarcitas andalusíticas.

En la montaña Kounrad, el stock de pórfido granodiorítico se transforma, en su parte superior, en cuarcita sericitica, con vetillas de cuarzo con magnetita, rutilo, turmalina, y cuarzo con calcopirita y pirita.

En las rocas efusivo-sedimentarias, en la zona del exocontacto, se forman cuarcitas sericito-andalusíticas (con 50 y 80% de andalusita, algo de corindón, topacio, barita, alunita) sin vetillas de cuarzo.

La meniferación cuprífera se localiza en las cuarcitas sericiticas, en la parte superior del stock de pórfido granodiorítico, que alcanza una profundidad de 300 a 400 m; las menas pobres de Cu (hasta 0,4% de Cu) pasan nuevamente a pórfidos granodioríticos.

Los principales minerales meníferos son: pirita y calcopirita; la molibdenita y la tenantita son más raros. Los minerales industriales se forman como resultado de los procesos de oxidación y enriquecimiento secundario.

El perfil del yacimiento, de arriba hacia abajo, es el siguiente:

- Zonas de menas oxidadas, con potencia entre 2 y 50 m, y 20 m como promedio. Los principales mi-



nerales son: limonita, malaquita, azurita, crisocola, cuprita, cobre nativo, calcosina.

- Sub-zona de menas lixiviadas con potencia de 30 m, como promedio.
- Zona de calcosina con potencia promedio de 110 m. Esta zona industrial principal en el yacimiento tiene además de calcosina, un poco de bornita, covelina y sulfuros primarios.
- Zona de menas primarias con pobre contenido de Cu (0,4%).

### YACIMIENTOS DE PIRITAS CUPRÍFERAS EN LOS URALES, URSS

Hacia la ladera oriental de los Urales, en una franja meridional entre los 60° y 52° de latitud norte, se conocen más de treinta yacimientos de piratas cupríferas, los cuales se localizan en un territorio donde se han desarrollado "rocas verdes" del Silúrico superior y Devónico inferior, intersectadas por pórfidos de granito, pórfido diorítico, albitófiros y aplitas.

Los depósitos minerales tienen la forma de lentes y se extienden en dirección meridional de acuerdo con la dirección principal de la cresta uraliana.

En la época del plegamiento herciniano, las capas fueron alteradas, dislocadas y sometidas al metamorfismo regional, el cual fue intenso en distintas partes de las crestas de los Urales.

Figura 53

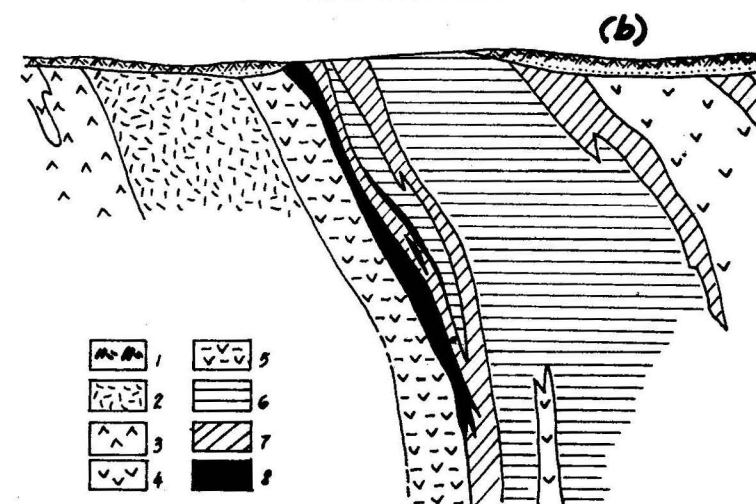
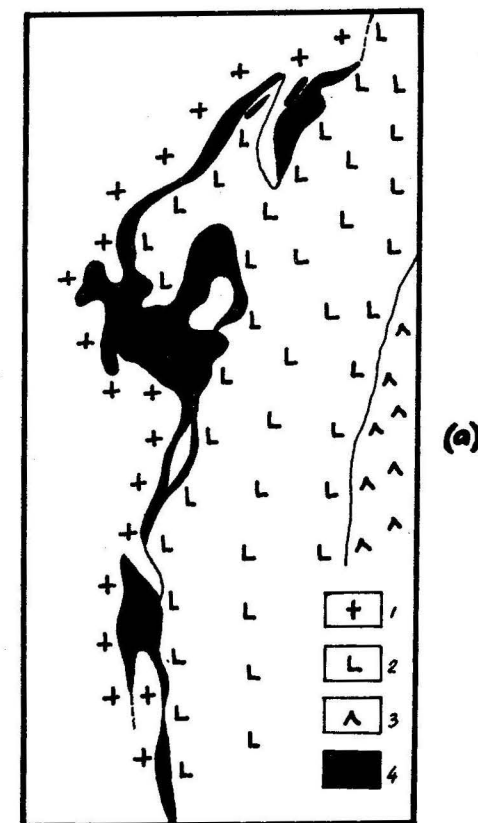
Yacimientos de piratas cupríferas de los Urales, URSS

A. Mapa geológico de un yacimiento de piratas del tipo Urales del sur.

1. Albitófiros y albitófiros cuarcíferos y sus tufas 2. Porfiritas diabásicas, espilitas, sus tufas y tufobrechas 3. Porfiritas plagioclásicas y sus tufas 4. Hematitas pardas de la zona de oxidación del yacimiento pirítico

B. Perfil del yacimiento de piratas de los Urales centrales

1. Capa de suelo 2. Tufitas metamorfizadas y esquistos verdes con intercalaciones finas de esquistos silíceos, carbonosos y mármoles 3. Porfiritoïdes 4. Porfiritoïdes albiticos 5. Porfiritoïdes cuarzo-albiticos 6. Esquistos cuarzo-cloríticos, clorítico-epidóticos y cuarzo-sericíticos 7. Esquistos cuarcífero sericíticos 8. Menas piríticas



Las rocas más intensamente dislocadas y metamorfizadas se encuentran en los Urales centrales, donde las rocas vulcanógenas se han transformado en depósitos piríticos yacientes en porfiroides y esquistos cloríticos y sericíticos.

Hacia el norte y el sur de los Urales centrales, las rocas han sido metamorfizadas con menor intensidad, y en el sur de los Urales, las rocas no han sufrido este proceso.

A. N. Zavaritsky y sus colaboradores, destacan dos grandes grupos de yacimientos de piritas: los no metamorfizados, desarrollados en el sur de los Urales, y los fuertemente metamorfizados en los Urales centrales.

En los yacimientos del sur, los depósitos yacen en rocas efusivas y los cuerpos minerales tienen forma compleja. En las menas se desarrolla ampliamente la textura colomórfica. Los cuerpos minerales en la zona central tienen forma de lentes alargados. Entre estos dos tipos yacen zonas de metamorfismo intermedio.

Sobre la base de los estudios realizados en estos dos tipos principales de yacimientos, los investigadores señalan que los yacimientos de piritas se formaron en la época del diastrofismo y la alteración metamórfica herciniana, y en relación genética con las rocas vulcanógenas en las cuales ellos yacen. Ejemplo de estos yacimientos son: Kalatinsk, Karpushijinsk, Degtiarsk Sibán, Nuevo Sibán y otros.

#### YACIMIENTO BUTTE, MONTANA, EUA

Este famoso distrito minero, es uno de los más importantes de EUA y del mundo. La meniferación se concentra en un área no mayor de 20 km<sup>2</sup> cerca del gran batolito Boulder (2 000 km) de edad Terciario y de composición cuarzo-monzonita, que intruye masas rocosas efusivas del Paleozoico y Cretácico; este batolito es cortado, a su vez, por diques de aplitas y pórfidos cuarcíferos estériles, que son atravesados por siete sistemas de fisuras y diques de riolita más recientes.

En la zona antes descrita se localiza la parte mineralizada central, formada por Cu-As (enargita-calcosina con mezcla de bornita, pirita y más raramente calcopirita y esfalerita). Alrededor de la zona central se encuentra la zona intermedia con menas de esfalerita y galena, rodocrosita con un pequeño contenido de Cu y Ag.

La zona periférica bordea a la anterior y se caracteriza por el desarrollo de las menas de Ag; es rica también en Mn (rodocrosita), menas grises y esfalerita. Lo descrito anteriormente es un buen ejemplo de zonación horizontal: Cu (y en ocasiones As), Pb y Zn, y Ag.

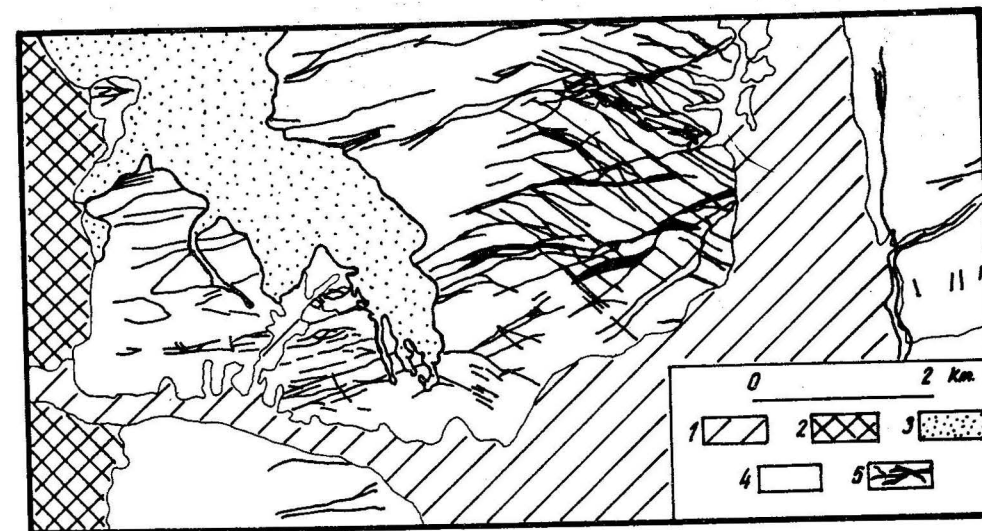


Figura 54

Campo filoneano del yacimiento cuprífero de Butte en EUA

(E. Perry)

1. Depósitos fluviales 2. Tufas basálticas y riolíticas del Terciario tardío 3. Riolitas del Terciario medio 4. Monzonitas cuarcíferas del Terciario inicial 5. Filones meníferos.

La meniferación tiene la forma de vetas o filones con una longitud de 2 y 3 km, y potencia desde 1,5 m hasta 3 m y con una profundidad de 1 200 m. Estas vetas forman varios sistemas; el más importante es el llamado Anaconda que está integrado por vetas latitudinales; que tienen forma de "cola de caballo" y son desplazadas por otro sistema de dirección NW llamado vetas azules, en razón a su elevado contenido de covelina. Ambos sistemas, a su vez, son desplazados por otros más jóvenes de dirección NE (sistema Stewart).

Las vetas minerales se componen de cuarzo, rodocrosita, calcosina, enargita, bornita, calcopirita, esfalerita, galena, menas grises con mezclas más raras de huebnerita y colusita Cu<sub>3</sub>(As, Sn, V)S<sub>4</sub>.

El contenido de Cu es de 4 a 5% y el de Ag llega de 60 a 90 g/t. Es interesante señalar que, a una profundidad superior a los 1 000 m se encuentra calcosina primaria en su forma rómbica, a temperatura inferior a los 91°.



Figura 55

Sección norte-sur del distrito cuprífero de Butte Montana, cerca del pozo Anaconda, EUA.

A Zona de oxidación B Zona de calcosina

## YACIMIENTOS DE KATANGA Y ZAMBIA, ÁFRICA

En esta importantísima región cuprífera africana se concentra la cuarta parte de las reservas mundiales de Cu y se produce más del 20% de la extracción mundial de minerales cupríferos. De los yacimientos de esta región se obtiene, además de Cu, la mayor parte de la producción mundial de Co, y de las menas de algunos de estos yacimientos se obtiene, también, uranio, en cantidades aproximadas a  $\frac{1}{4}$  de la producción mundial anual.

Entre los numerosos yacimientos de Cu de la región, merecen destacarse los de Estrella del Congo y Kambove, en la República del Congo así como Roan Antilope, N'Changa, Rokana y Mufulira en Zambia. En la figura 48 se observa un perfil esquemático de uno de los yacimientos de la región.

La región está compuesta por capas alternas de areniscas, esquistos, y dolomitas del sistema Katanga del Proterozoico superior (con duda); en este complejo rocoso se desarrolla una faja mineral de más de 500 km, en dirección NW-SE, con un ancho entre 45 y 100 km.

La mineralización se localiza en las areniscas con cemento carbonatado y en las dolomitas; los esquistos sirvieron de "pantalla" al paso de la mineralización.

Los cuerpos minerales tienen la forma de capas, lentes y nidos; y su tamaño es variable. Por su dirección los cuerpos se extienden hasta 2 400 m; por la potencia de 10 a 20 m y la meniferación se desarrolla en profundidad hasta unos 900 m. En algunos yacimientos se reconocen de uno a tres horizontes meníferos.

En la región de Katanga la mineralización se localiza en pliegues anticlinales, en tanto que en Zambia lo hace en los pliegues sinclinales. Para los yacimientos de Zambia es característico una estrecha relación espacial de la meniferación con las intrusiones de granitoides, y la meniferación más intensa cerca de los macizos intrusivos.

En la composición de la mena participan sulfuros de cobre —bornita, calcosina, calcopirita—, a los cuales acompañan la piritita, esfalerita, galena, linneita, más raramente las menas grises y, entre los minerales filoneanos, se encuentran el cuarzo, la calcita y la adularia.

Los minerales meníferos se desarrollan en forma de diseminados (hasta de 1 mm), en medio de un cemento arenoso y en rocas carbonatadas; y forman raras veces venillas muy finas. El principal interés industrial lo posee el Cu, cuyo contenido en los sulfuros primarios llega hasta 3,5 y 7%; también presenta interés el contenido de Co (hasta 0,5%) junto con el Zn (hasta 2% y más) y el Pb. En algunos yacimientos al NW de Katanga las menas contienen Ag, Au y Pt.

Las menas oxidadas contienen de 10 a 12% de Cu, 1 a 3% de Co (en forma de esferocobaltina y asbolana) y de 1 a 2% de  $V_2O_5$ ; ellas se desarrollan hasta los 200 m de profundidad, y son intensamente explotadas.

Sobre la génesis del yacimiento existen varias opiniones. La mayoría de los investigadores —y entre ellos W. Lindgren— consideran estos yacimientos como hidrotermales (teletermales), y los relacionan genéticamente con rocas básicas intrusivas. El control estructural de la meniferación, el papel de pantalla de los esquistos, la composición de la mena (la calcosina cúbica y otros sulfuros se forman a temperaturas superiores a 91° y hasta los 200°), fundamentan esta teoría.

Schneiderhöhm señala, que no es común la asociación del Cu, Co y V en los yacimientos hidrotermales, y señala que en esta región la meniferación tiene relación con las aguas superficiales de circulación profunda, o sea, lo considera como un proceso de infiltración.

Recientemente, V. S. Domarev señaló, que todos los yacimientos del tipo areniscas cupríferas y entre ellos los de esta región son sedimentarios y posteriormente metamorfizados.

## YACIMIENTOS DEL LAGO SUPERIOR, EUA

Este distrito minero se encuentra en el estado de Michigan, en la península de Keweenaw, y fue explotado desde la antigüedad por los indios de la región. En la actualidad, es intensamente explotado y se obtiene, además de Cu, que es la producción fundamental, algo de Ag.

La región está compuesta por capas de la serie de Keweenawan de edad Proterozoico superior, con potencia hasta de 4,5 km entre las cuales se intercalan capas de lavas básicas (meláfiro con conglomerados y areniscas). Los meláfiro componen 3 800 m de esta serie, y el resto de las rocas 700 m.

La meniferación se localiza en la parte central de la península, se extiende en dirección NE, por 500 km, con un ancho de 3 a 6 km. De esta extensión total la zona de menas industriales alcanza 100 km. De acuerdo con el carácter de la mineralización se pueden apreciar tres tipos de yacimientos:

- Filones de fisura, rellenos de calcita, cobre nativo, con mezcla de plata nativa y domeikita.
- Lavas amigdaloides con Cu nativo, carbonatos, adularia y zeolita en las oquedades de las lavas, y en cemento brechoso de meláfiro. La potencia de la meniferación en las partes de las envolturas de los meláfiro es de 4 a 10 m, y se extiende hasta 9 km, a una profundidad mayor de 2 km; el contenido de Cu es cerca del 1%. De este tipo se obtiene la mitad de la extracción de Cu de la región.
- Capas de conglomerados meníferos, fundamentalmente las capas Gleka y Calumet, con potencias cada una de 2 a 10 m, las cuales se extienden a lo largo de algunos kilómetros y hasta una profundidad de 2 400 m.

El Cu nativo y sus acompañantes "cementan" los conglomerados. El contenido de Cu generalmente es de 2 a 4%. En este tipo de yacimiento se obtiene la otra mitad de la producción de Cu de esta región.

Buttler y Broderick consideran que estos depósitos, únicos, fueron formados por soluciones hidrotermales ascendentes, desprendidas de las rocas básicas subyacentes.

## EL COBRE EN CUBA

Los minerales de Cu se conocen en Cuba desde hace mucho tiempo. El yacimiento El Cobre, es uno de los más viejos en el área latinoamericana y del Caribe.

Antes del triunfo de la Revolución en 1959, se explotaban fundamentalmente los yacimientos Matahambre y El Cobre, y se conocían otros yacimientos y manifestaciones a todo lo largo del país. A partir

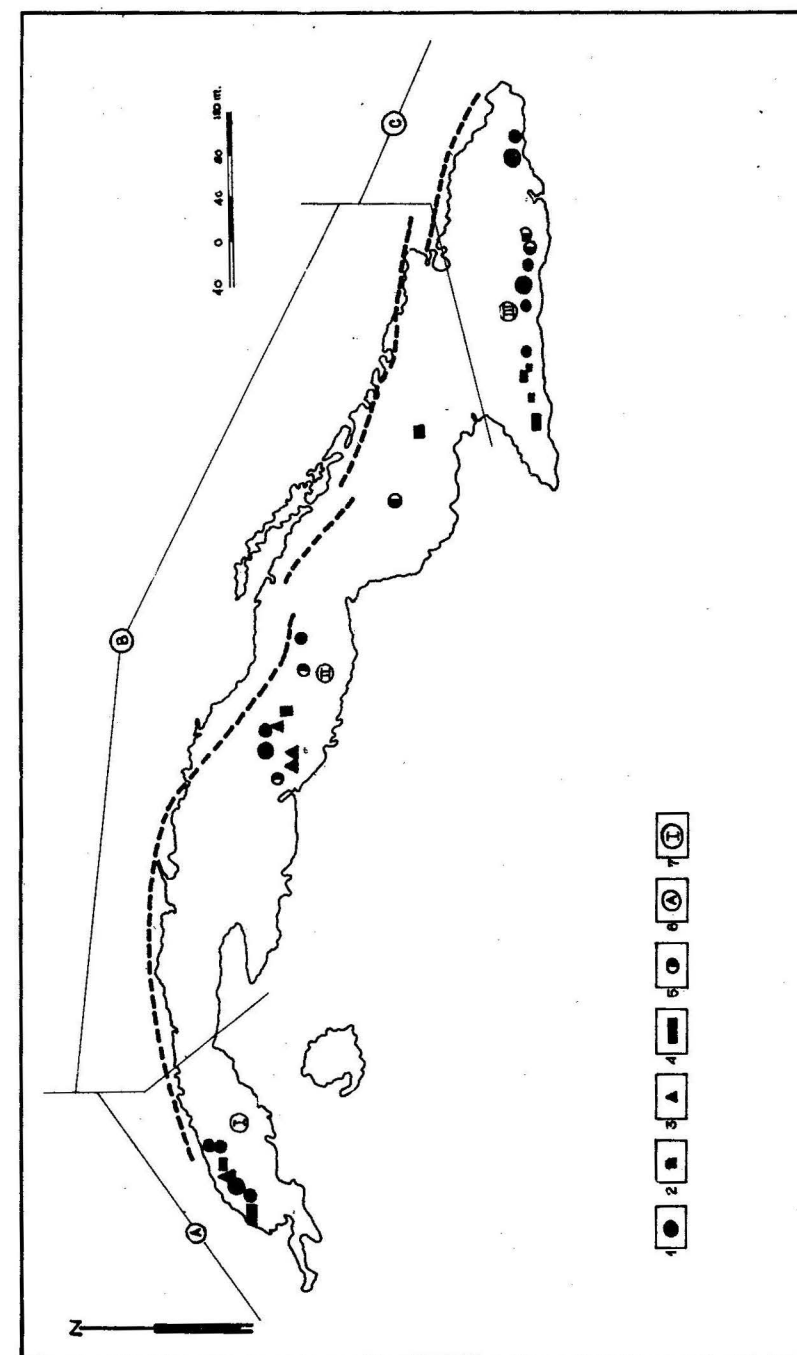


Figura 56

Regiones cupríferas de Cuba. 1. Formación cuprífera de Pinar del Río. 2. Formación cuprífera de Las Villas. 3. Formación cuprífera de Matanzas. 4. Formación cuprífera de Cienfuegos. 5. Formación cuprífera de Sancti Spiritus. 6. Formación cuprífera de Sagua. 7. Formación cuprífera de Oriente.



del triunfo revolucionario, se comenzó a desarrollar un programa de estudios sistemáticos tendientes a conocer, con mayor exactitud, nuestros recursos cupríferos. Estos estudios nos permiten, hoy en día, poseer un conocimiento mucho más exacto acerca de las condiciones geológicas de formación, así como las leyes de distribución de estos yacimientos, tanto en el espacio como en el tiempo.

En todas las provincias de la isla de Cuba se conocen manifestaciones y yacimientos de este metal; sin embargo, las regiones más importantes son:

- Pinar del Río
- Las Villas
- Oriente

Estas tres regiones están emplazadas en la zona eugeosinclinal cubana.

Merecen particular atención los trabajos realizados por los geólogos de la Dirección General de Geología y Geofísica: Tijomirov, Lisitsin, Escobar, Norman, Sajarov, Bogdanov, Bolotin, Golovchenko, Gorielov, etcétera, así como de los colaboradores científicos del Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de Cuba: Laverov, Cabrera, Tolkunov, Malinovsky, Carasou, etcétera.

Como resultado de estos trabajos, además del conocimiento más profundo sobre nuestros recursos cupríferos, se han aumentado las reservas perspectivas, lo que repercutirá favorablemente en la industria metalúrgica cubana.

Actualmente se conocen más de ciento setenta manifestaciones y yacimientos de Cu en la isla de Cuba, fundamentalmente del tipo de filones y vetas de pirita-calcopirita. Además se desarrollan, aunque en menor grado, yacimientos de piritas, Au-sulfurosos y más raramente, *skarn* y yacimientos de Cu-Mo. En todos los casos la edad de la mineralización es Preoligocénica.

Los yacimientos de Pinar del Río están, en su mayoría, emplazados en áreas de desarrollo de rocas arenosas y esquistosas del Jurásico inferior y medio. Otros yacimientos se asocian a efusivos y efusivo-sedimentarios más jóvenes (Cretácico).

En Las Villas y Oriente, la mineralización cuprífera está emplazada en área de desarrollo de rocas efusivo-sedimentarias del Cretácico y el Paleógeno.

Laverov, Malinovsky, Tolkunov, Cabrera y otros (1972), señalan la división de la zona eugeosinclinal (a los efectos del análisis metalógico) en tres grandes bloques tectónicos: occidental, central, y oriental,

los cuales se caracterizan por estructuras diferentes y edades de formación también diferentes; también es distinto el perfil geológico de cada bloque.

Los yacimientos del occidente de la isla de Cuba (Pinar del Río) se localizan en el subpiso estructural inferior del piso estructural geosinclinal, en el bloque tectónico occidental.

En la región central, la localización de los yacimientos está relacionada con el subpiso estructural medio del bloque tectónico central, y en los yacimientos de la región oriental, se establece su relación con el subpiso estructural superior del bloque tectónico oriental.

En las menas de estos yacimientos, además de Cu se encuentran como mezcla o impurezas: Co, Ni, Cr, Ti, V, Mn, Ba, Sr, Ge, y Ga. Los yacimientos de Cu se han formado en sentido general, en profundidades que oscilan entre 1 000 y 1 500 m.

En la obra *Geología de los yacimientos minerales de Cuba* publicada en 1973 por las Academias de Ciencias de Cuba y de la URSS se encuentra un trabajo titulado *Características comparativas de los yacimientos de cobre en Cuba*, realizado por Tolkunov, Malinovsky, Cabrera y Carasou, el que constituye; por ser el primer análisis comparativo de las características de los yacimientos y regiones cupríferas de la isla, un notable aporte al desarrollo de la geología económica cubana.

Los yacimientos de Cu de la región menífera de Pinar del Río, ocupan la parte más occidental de la isla, en un área aproximada de 6 000 km<sup>2</sup>. Se conocen setenta yacimientos y manifestaciones de cobre y menas piríticas-polimetálicas, así como algunos yacimientos de barita y oro. Los yacimientos se distribuyen en una forma irregular, y la mayoría de ellos —más del 60%—, son de Cu.

Los mayores se localizan en el flanco-norte del anticlinorio de Pinar del Río; el 15% de los yacimientos se encuentran en la parte oriental de la región, en los límites de la zona estructural-facial Bahía Honda y una última parte se localiza al sur del anticlinorio de Pinar del Río.

El área que cubre el anticlinorio de Pinar del Río, está constituida, en su mayor parte, por formaciones terrígenas de areniscas y esquistos del Jurásico inferior-medio (formación San Cayetano). En la parte central del anticlinorio se localizan calizas del Jurásico, en estructuras en forma de graben-sinclinal, no muy grandes.

El magmatismo se manifiesta en los límites de la región menífera de Pinar del Río, con menor intensidad que en las regiones meníferas central y oriental. Un cuerpo importante de ultrabásitas (Cajalbana),

se conoce en la parte oriental de la región menífera. En dirección E, del macizo señalado, penetran cuerpos en forma de diques potentes de serpentinitas, a través de las fisuras que producen las fallas profundas.

A lo largo de las fallas, en la zona sinclinal central del anticlinorio de Pinar del Río, se localizan pequeños cuerpos de serpentinitas.

En la parte occidental de la región se encuentra también un macizo relativamente grande de gabroides.

En relación con la meniferación, el mayor interés lo presentan las manifestaciones tardías del magmatismo de composición media y básica. Entre ellas se destacan basaltos, andesita-basalto y porfiritas de edad Cretácico superior, las cuales se desarrollan ampliamente hacia el este de la región, donde se mezclan con la meniferación cuprífera industrial.

Más jóvenes aún son las formaciones efusivas de composición media (andesita, dacita, etc.). En algunos lugares, los efusivos del Cretácico superior son atravesados por *stock* de dioritas, y junto con ellas la formación de diques de espesartita.

Finalmente, la manifestación más tardía del magmatismo, son intrusiones de forma irregular, más raramente *stocks* isométricas de lava-aglomerados de composición dacito-andesíticas o dacíticas.

La meniferación hidrotermal en la región de Pinar del Río está representada principalmente por dos formaciones meníferas:

- Pirítico polimetálica
- Diques de pirita-calcopirita

En la región de Pinar del Río se reconocen tres zonas meníferas (llamadas regiones por Lisitsin, en 1969):

- Matahambre-Francisco
- Mantua-Castellanos
- Júcaro-Buenavista

Las dos primeras se ubican en los límites de la zona anticlinoria de Pinar del Río, y la tercera está localizada en la zona plegada de Bahía Honda.

En la zona Matahambre-Francisco se encuentra el mayor yacimiento de cobre de Cuba: Matahambre, el cual yace en capas arenosas-esquistosas del Jurásico inferior y medio de la formación San Cayetano.

Este yacimiento se formó, probablemente, en el Eoceno superior, en períodos posteriores a sus rocas encajantes, a una profundidad entre 1 500 y 2 000 m y si tomamos en consideración la presencia de bismuto nativo, la temperatura de las soluciones hidrotermales en el

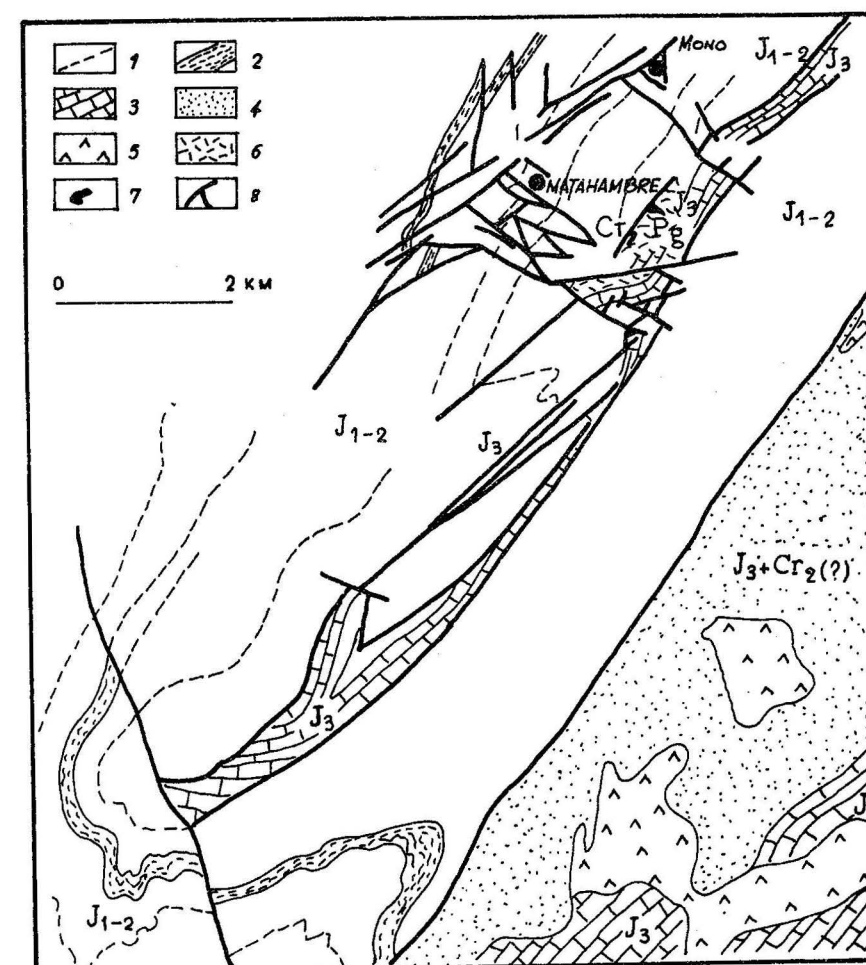


Figura 57

Esquema de la constitución geológica del campo menífero Matahambre-Mono (Malinovski y Carrasú)

1. Areniscas y esquistos del Jurásico inferior y medio (Formación San Cayetano)
2. Horizonte esquistoso
3. Calizas del Jurásico superior
4. Depósitos carbonatados y no diferenciados del Jurásico superior-Cretácico superior (?)
5. Serpentinitas
6. Rocas efusivo-sedimentarias del Cretácico superior-Paleoceno
7. Dioritas, andesitas-dacitas
8. Fallas

tiempo en que se verificó la formación de los cuerpos minerales, no sobrepasó los 270°.

La ausencia de control magmático indica, de forma manifiesta, que las fuentes de la mineralización se localizan a grandes profundidades. Este hecho se hace evidente a partir de las aureolas de mineralización venosa, ampliamente distribuidas cerca de los cuerpos minerales así como la ausencia de síntomas de lixiviación.

El papel fundamental, en el control de la mineralización, lo posee el factor tectónico. El yacimiento está emplazado en el lugar de intersección de fallas, en la zona de transición entre el sinclinorio central, en su parte norte, y también el flanco norte del anticlinorio de Pinar del Río.

Los cuerpos minerales del yacimiento se inclinan hacia el lugar de intersección de la falla Manacas con las fallas Alfa y Beta.

El factor litológico ha desempeñado un importante papel en el control de la mineralización; las areniscas y las aleurolitas, así como los horizontes donde se interestratifican estas rocas con los esquistos, son los horizontes más favorables.

En los límites del campo menífero Matahambre se reconocen dos tipos de meniferación industrial: de cobre (calcopirítica) principalmente en el yacimiento Matahambre y pirito-sulfurosa (pirítica) con galena, esfalerita y calcopirita.

La meniferación de cobre es la que posee un interés básico y práctico; y se concentra en el bloque central del yacimiento (intersección de las fallas antes mencionadas). Las menas se encuentran formando una serie de cuerpos lenticulares en una zona de 500 m de extensión y alcanza una profundidad superior a los 1 600 m. El contenido medio de Cu en las menas, oscila entre 3,5 y 4%.

La región menífera de Las Villas se encuentra en la parte central del bloque tectónico central en la zona eugeosinclinal, y abarca un área casi de 6 000 km<sup>2</sup>. Se localizan yacimientos de cobre de las formaciones de vetas de pirita-calcopirita, y menas piríticas y yacimientos de cuarzo-sulfuros con oro *skarn* y Cu-Mo, de poca importancia.

En los límites de la región menífera se pueden conocer tres grandes estructuras geológicas: anticlinorio de Santa Clara, el sinclinorio de Cuba central y el anticlinorio de Trinidad según Pusharovsky y otros, 1967.

En la región menífera de Las Villas, se ha manifestado el magmatismo intrusivo de forma intensa. En el Cretácico superior tuvo lugar

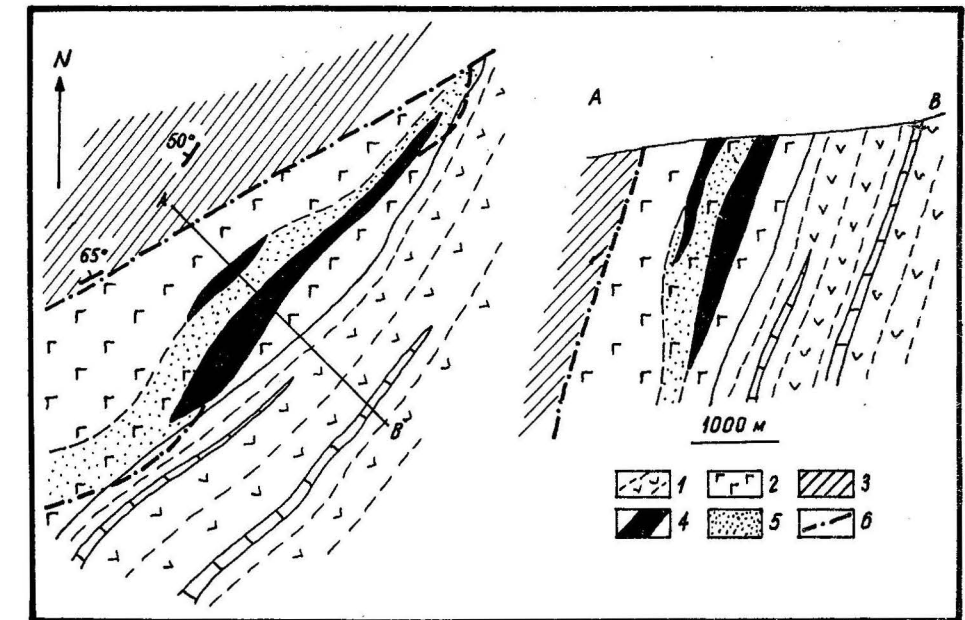


Figura 58

Plano y perfil geológicos del yacimiento Júcaro, Pinar del Río, Cuba  
(Zarianov)

1. Capas efusivo-sedimentarias con intercalaciones de calizas del Cretáceo superior
2. Porfirita basáltica
3. Esquistos
4. Cuerpos minerales de sulfuros
5. Zona de desarrollo de la mineralización en vetillas y diseminada
6. Fallas.

la penetración de rocas intrusivas de composición básica y ultrabásica en dos zonas subparalelas: los anticlinorios de Santa Clara y Trinidad.

Entre las capas metamórficas del flanco norte del anticlinorio de Trinidad, se aprecian diversas intrusiones pequeñas, de rocas ultrabásicas alteradas a serpentinitas, las que forman una zona, no grande, de dirección sublatitudinal. Estas intrusiones yacen frecuentemente en concordancia con las rocas metamórficas y se formaron en pequeñas profundidades.

El magmatismo (granitoides) se localiza, en lo fundamental, en la zona de encuentro del sinclinorio de Cuba central con el anticlinorio de Trinidad. Aquí se formó un gran cuerpo intrusivo de granitoides que se extiende en dirección latitudinal a lo largo de decenas de kilómetros.

Posterior a los granitoides se formaron intrusiones subvolcánicas de porfiritas y pórfidos liparíticos, los cuales se desarrollan en el con-

tacto norte de los granitoides del Escambray. Ellos se encuentran, por excepción, en las partes centrales del sinclinorio de Cuba central. El grupo más joven de intrusivos lo constituyen las llamadas intrusiones menores y diques de distribución regional.

Se pueden reconocer tres zonas meníferas con tipos característicos de yacimientos de cobre:

- San José-La Buena, al norte
- San Fernando-Los Cerros, al centro
- Victoria-Guachinango, al sur.

Esta última zona se localiza en el flanco norte del anticlinorio de Trinidad, donde se reconocen tres yacimientos grandes: Carlota, Victoria y Guachinango y algunos yacimientos sin importancia, de menas piríticas.

La zona se extiende entre 40 y 50 km de longitud por cerca de 5 km de ancho, en dirección latitudinal. En su constitución geológica desempeñan un papel significativo las rocas metamórficas del Jurásico y las intrusiones de rocas ultrabásicas y básicas intensamente alteradas, de edad Cretácico.

Los yacimientos presentan uno o varios cuerpos, algunos de los cuales son grandes. Así, el lente menífero del yacimiento Guachinango se extiende a lo largo de 800 m, con un ancho de 200 m y una potencia máxima de 31 m, con cuerpos minerales en forma de lente que yacen en concordancia con las restantes capas. Los contactos del cuerpo mineral con las rocas encajantes no son claros.

Los depósitos meníferos tienen, en su mayoría, una constitución masiva y se componen de piritas con pequeñas cantidades de pirrotina, calcopirita, esfalerita, galena y otros minerales. La mena se caracteriza frecuentemente por las estructuras colomórficas sin muestras de metamorfismo.

El contenido de Cu y Zn en las menas es alto, y alcanza 5,7% de Cu y 3% de Zn, aunque el contenido medio es mucho menor. En Guachinango la ley de Cu es de 0,81%, y de Zn, de 0,80%; en Carlota, el Cu alcanza 0,79% y el Zn llega a 0,43% (Hill, 1958; Bolotin, 1968, 1969). Entre otros elementos mezclados característicos se encuentran: Co, Ni, Cr, Ti, Mn, As, Ge, y Ga.

El yacimiento de piritas típico de la zona es Carlota; este yacimiento se conoció en 1884; hasta el presente se han extraído algunos millones de toneladas de menas piríticas con contenidos medios de Cu de 0,79%; Zn 0,43%; Fe 36,5%; S 38,38% (Bolotin, 1969).

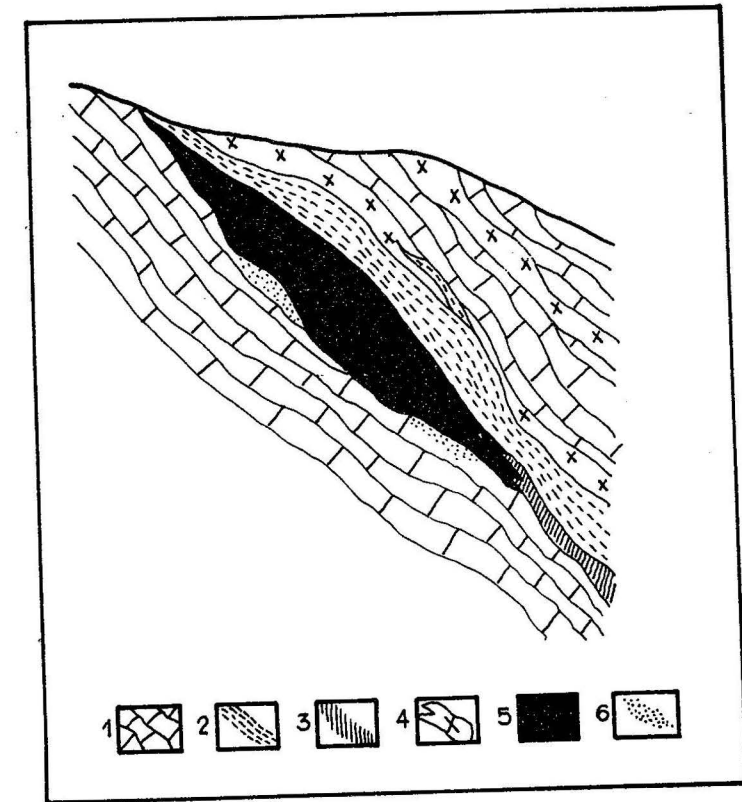


Figura 59

Perfil geológico del yacimiento Guachinango  
(Bolotin, Tolkunov, Cabrera)

1. Calizas marmorizadas con esquistos
2. Esquistos carbonato-micáceos con grafito
3. Dolomitas
4. Intrusivos de rocas básicas y ultrabásicas
5. Cuerpo mineral cupro-pirítico
6. Zona de incrustaciones de sulfuros.

El yacimiento se localiza en la porción occidental de la zona menífera Victoria-Guachinango, en una zona donde se desarrollan los esquistos grafito-micáceos y calizas con grafito de edad Jurásico. Estas rocas tienen dirección sublatitudinal, con buzamiento hacia el norte de 30° a 70°.

Los cuerpos minerales se componen básicamente de pirita; raras veces se presenta pirrotina, calcopirita, esfalerita, galena, tenantita, plata nativa y oro. Los cuerpos tienen la forma de lentes y sus contactos con las rocas encajantes no son claros.



Finalmente, la región menífera de Oriente se localiza en la parte sur del bloque tectónico oriental, y se extiende por más de 200 km en dirección sublatitudinal, con un espesor promedio de 20 km. En sus límites se conocen grandes yacimientos cupríferos de vetas de pirita-calcopirita, así como numerosos y pequeños yacimientos de pirita, cuarzo-sulfuro con oro y *skarn*.

En ella se reconoce la zona menífera El Cobre-Gran Piedra, situada en la parte central de la región menífera oriental, en la zona de articulación del anticlinorio de la Sierra Maestra con el sinclinorio de Cuba central.

En esta región tiene amplio desarrollo la formación El Cobre ( $\text{Cr}_2\text{Pg}_2$ ), formada por rocas efusivo-sedimentarias de composición andesítica fundamentalmente, las cuales son atravesadas por intrusiones subvolcánicas, intrusivos (granitoides) y pequeñas intrusiones de dioritas y porfiritas diabásicas.

En esta zona se desarrollan dislocaciones tectónicas de dirección cercana a la latitudinal, y también otras de dirección NW y NE; por encima de la formación El Cobre yacen sedimentos del Oligoceno y del Cuaternario, los cuales no encierran ni rocas magmáticas ni yacimientos minerales.

En la zona El Cobre-Gran Piedra se conocen yacimientos de las siguientes formaciones: filones o vetas de pirita-calcopirita, *skarn* y menas piríticas. Tienen mayor importancia los yacimientos de la primera formación: El Cobre, San José, Siciliana, etc. Ellos se localizan en la zona de desarrollo de las rocas vulcanógenas más jóvenes (Paleoceno-Eoceno) y, generalmente se relacionan con intrusivos subvolcánicos y *facies* de cráter de composición andesítica y liparita-dacítica. Los yacimientos se localizan tanto en las zonas de endocontacto como en las del exocontacto.

La característica estructural de los yacimientos, está muy relacionada con las rocas antes mencionadas, así como su morfología y su estructura interna. Los cuerpos minerales buzan en la misma dirección y ángulo que las rocas extrusivas; los yacimientos se caracterizan por estructuras complejas, las cuales van variando según la profundidad.

En los horizontes superiores, ellos representan una zona de potentes *stockworks*; esta potencia va disminuyendo en la profundidad hasta observar, en las partes inferiores del yacimiento, zonas filoneanas aisladas, de poca potencia.

El control de la meniferación, es, fundamentalmente, estructural aunque también puede establecerse algún control litológico. La distribución espacial de la meniferación está determinada, en lo fundamental,

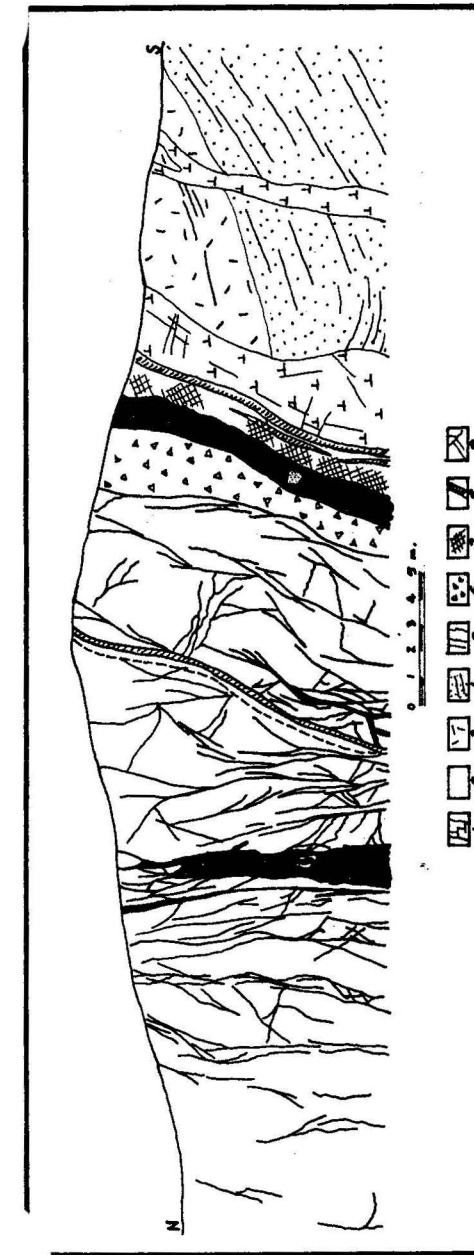


Figura 60  
Estructura geológica de la zona de mineralización Gitanilla, yacimiento El Cobre (flanco oriental del río El Cobre), provincia de Oriente, Cuba.  
1. Dique de porfiritas diabásicas 2. Toba-aglomerados de dacitas 3. Toba-brecha de dacita-andesita 4. Toba areniscas estratificadas 5. Vetitas y vetillas de cuarzo, calcita con pirita, calcopirita y otros sulfuros 6. Brechas tectónicas 7. Zona de rocas intensamente fracturadas 8. Milonitas tectónicas y arcillas 9. Grietas tectónicas pequeñas.

por las estructuras de grietas; las zonas meníferas tienen una gran extensión, tanto por su rumbo como por su buzamiento. En ellas se reconocen: cuarzo, clorita, epidota, calcita, yeso, anhidrita, barita, menas grises, sulfosales de bismuto y numerosos minerales hipogénicos. Las zonas meníferas se emplazan en rocas propilitizadas y cuarcificadas; la formación hidrotermal se desarrolló en cuatro estadios de mineralización.

Los yacimientos se formaron después de todas las rocas magmáticas, posiblemente en el Eoceno superior. Se conocen en el campo menífero diques más jóvenes de diabasas y porfiritas diabásicas, los que atraviesan los cuerpos minerales.

El yacimiento más interesante y mayor de esta zona es El Cobre, el cual ha sido explotado desde la época colonial, y de donde se ha extraído un volumen cercano a los 3 millones de toneladas de menas de alta ley (2,53 a 20%) en Cu. En la actualidad los trabajos de exploración realizados por los especialistas cubanos y soviéticos (Golovchenko, Sajarov, Escobar y otros) han permitido detectar nuevas e interesantes áreas metalíferas en Gitanilla y Mina Grande.

El yacimiento El Cobre tiene una estructura compleja y yace entre las rocas vulcanógeno-sedimentarias, extrusivas, y pequeñas intrusiones de edad eocénicas. La principal dislocación tectónica es la falla El Cobre; la que tiene una dirección latitudinal y buza abruptamente ( $75^{\circ}$ - $85^{\circ}$ ) hacia el sur.

La falla representa una zona potente (hasta algunas decenas de metros), de variación hidrotermal y rocas trituradas. Las principales zonas meniferizadas (Blanca, Mina Grande y Gitanilla) yacen en medio de ella, con dirección transversal NE.

La meniferación cuprífera se relaciona espacialmente, de forma estrecha, con los intrusivos subvolcánicos y cuerpos de *facies* de cráter de composición andesito-dacítica. Los cuerpos minerales son grandes (algunos cientos de metros según la dirección), y por su estructura componen una zona de filones que se siguen en profundidad desde 500 hasta 700 m.

La meniferación de Cu se observa en todas las rocas donde se encuentran los yacimientos; sin embargo los cuerpos minerales más potentes y ricos yacen en regiones de potencia grande, de las vulcanitas. Para la localización de la meniferación, las zonas más interesantes son aquellas de variación de los elementos de yacencia de las rupturas tectónicas.

Cerca de los cuerpos minerales se observa una intensa variación hidrotermal; esta variación, por su tipo, está cercana a la propilitización y a las segundas cuarcitas. Entre los minerales hipogénicos de los filones meníferos se reconocen: clorita, sericita, cuarzo, calcita, yeso, anhidrita, barita, fluorita, pirita, calcopirita, pentlandita, pirrotina, galena, esfalerita, sulfosales de bismuto, oro, plata y otros.

En el yacimiento se desarrolla ampliamente la zona de oxidación con numerosos minerales secundarios de Cu, Fe y Mn.

Las formaciones hidrotermales se desarrollaron en cuatro estadios:

Primero:

— Zonas de cloritización, albitización, sericitización y cuarcificación en las rocas y filones de cuarzo y pirita con calcopirita.

Segundo:

— En este estadio se formaron los principales cuerpos meníferos.

Tercero:

— Filones de cuarzo y cuarzo-calcita con galena, esfalerita, calcopirita, sulfosales de bismuto y plata.

Cuarto:

— Vetillas de cuarzo y calcita (postmineralización).

La reconstrucción paleovulcánica ha indicado que la meniferación cuprífera se formó a profundidades entre los 1 000 y 1 500 m de la superficie.

## PLOMO, CINC Y PLATA

### GENERALIDADES

El plomo fue conocido por el hombre desde la antigüedad; en nuestra época tiene una gran importancia y utilización industrial. Cerca del 50% de la producción total de Pb se utiliza en la industria electro-técnica, y una parte significativa es utilizada en la producción de acumuladores y en la industria de producción de cables. El Pb se utiliza también en la industria atómica y en la producción de distintas aleaciones.

El cinc tiene, un amplio uso, tanto en forma de metal puro, como en forma de aleaciones; así, la aleación del Zn con el Cu (latón) se utiliza en la industria eléctrica; las aleaciones de Zn con Al y Mg, juegan un importante papel en la construcción de aviones, y en algunas otras ramas de la industria ligera. Es muy utilizado en el proceso de galvanización, que consiste en revestir el acero con una capa de Zn, para evitar la oxidación de aquél.

La plata se utiliza, fundamentalmente, como metal precioso, en la producción de joyas, objetos de arte, etc., así como en la producción de monedas. Otra parte de la producción de Ag se utiliza en las industrias cinematográfica y fotográfica, así como en la electrotecnia.

En la naturaleza el Pb y el Zn se encuentran generalmente, unidos, formando los yacimientos de Pb-Zn o polimetálicos, que, a veces, contienen cantidades significativas de otros metales, como por ejemplo, Ag, Au, etcétera.

(Tanto es así, que el 50% de la extracción mundial de Ag se obtiene como resultado de la explotación de yacimientos polimetálicos de Pb y Zn. En estos yacimientos la Ag aparece generalmente asociada a la galena y a las menas grises.)

Las mayores reservas de Pb y Zn de los países capitalistas están en Australia, Canadá y EUA. La producción minera de Pb en 1972, fue

aproximadamente de 2,5 millones de toneladas. Los países antes mencionados fueron los mayores productores y, en primer lugar EUA. La producción minera de Zn en 1972 fue de 4,3 millones de toneladas, siendo Canadá el mayor productor.

✕ La producción de Ag fue en el mismo año de 243 millones de onzas, y los principales productores fueron EUA, México y Australia, entre otros; de todas estas cifras se excluyen a los países del campo socialista donde se concentran también grandes reservas de estos metales.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El plomo se sitúa en el cuarto grupo, sexto período, del sistema periódico de los elementos. Su número atómico es 82 y su peso atómico 207,19; se le conocen cuatro isótopos en la naturaleza:

Isótopos	%
Pb <sup>204</sup>	1,5
Pb <sup>206</sup>	23,6
Pb <sup>207</sup>	22,6
Pb <sup>208</sup>	52,3

Las tres series radiactivas derivadas del uranio (U<sup>238</sup>), actinouranio (U<sup>235</sup>) y torio (Th<sup>232</sup>), terminan con la formación de los tres isótopos radiogénicos del Pb: Pb<sup>206</sup>, Pb<sup>207</sup>, Pb<sup>208</sup>. Existe un cuarto isótopo, Pb<sup>204</sup>, el cual no está relacionado con la desintegración radiactiva y se cree sea Pb primario.

El cinc se sitúa en el segundo grupo del cuarto periodo del sistema periódico; su número atómico es 30 y su peso atómico 65,37. Se le conocen cinco isótopos en la naturaleza y los más abundantes son:

Isótopos	%
Zn <sup>64</sup>	50,9
Zn <sup>66</sup>	27,4

La plata está situada en el primer grupo y el quinto período del sistema periódico de los elementos, su número atómico es 47 y su peso atómico 107,87; en la naturaleza se conocen dos isótopos de Ag:

Isótopos	%
Ag <sup>107</sup>	51,9
Ag <sup>103</sup>	48,1

Es necesario señalar, antes de proseguir este análisis, que a pesar de las disparidades químicas existentes entre estos tres elementos, se presentan en la naturaleza frecuentemente unidos, dadas sus características geoquímicas. En efecto, el Pb, el Zn y la Ag están estrechamente relacionados con granitoides moderadamente ácidos, y raras veces con rocas ácidas y básicas.

Los contenidos de Pb y Zn en las rocas son:

Rocas	Pb %	Zn %
Rocas ultrabásicas	0,00005	0,003
Rocas básicas	0,0008	0,013
Rocas medias	0,0015	0,0072
Rocas ácidas	0,002	0,006
Rocas sedimentarias	0,002	0,008

El Clarke del Pb-Zn en la corteza terrestre es del orden 0,0016 para el Pb y 0,0083 para el Zn.

El Pb se presenta en la litosfera superior en forma de sulfuros o en forma de sulfosales, y podemos decir que es un elemento calcófilo.

Las mayores concentraciones de Pb se forman durante los procesos postmagmáticos y, principalmente, en los yacimientos hidrotermales, que son las únicas fuentes conocidas de este metal, en el ciclo endógeno.

El Zn es un metal cuyas asociaciones características son litófilas y calcófilas. La geoquímica del Zn está determinada, fundamentalmen-

te, por la semejanza de los radios del ión Zn divalente, con los de los elementos de la familia del Fe y el Mg.

El Zn, es característico de los procesos hidrotermales de temperaturas medias o bajas; la esfalerita o blenda, que es el mineral más abundante de Zn, posee la particularidad de atraer a su red una cantidad notable de otros elementos como Cu, Cd, Hg, Ga, In, Ge, Fe, Mn, Co y Sn.

La Ag es un elemento calcófilo, que se presenta, fundamentalmente, en forma de sulfuros y en parte con el selenio. La Ag al pertenecer al mismo subgrupo que el Cu, se parece mucho a éste en su forma de presentación en la litosfera superior.)

En el ciclo mayor, la Ag, gracias a su semejanza con el Au, y sobre todo con el Cu, puede concentrarse en los primeros sulfuros magmáticos; sin embargo, las formaciones neumatolíticas e hidrotermales son los vehículos más característicos para la Ag.)

Durante el ciclo menor la Ag es capaz de disolverse fácilmente, al igual que el Cu, en forma de sulfato, descender hasta los horizontes inferiores de la superficie terrestre y allí, donde las aguas subterráneas contactan con estas soluciones argentíferas supergénicas, se precipita la Ag, en forma de sulfuro secundario: acantita (Ag<sub>2</sub>S) o en forma de Ag nativa.)

En las regiones áridas, la Ag se precipita fundamentalmente en forma de cloruro de Ag (querargirita.)

El Pb forma la anglesita SO<sub>4</sub>Pb, en un proceso lento. Este sulfato es medianamente soluble por lo que se mueve poco. En presencia de CO<sub>2</sub> se forma carbonato, que es mucho menos soluble y que constituye el compuesto de plomo más estable en la zona de oxidación (cerusita).

El Zn se disuelve con facilidad en forma de sulfato o de cloruro, y de esta forma es arrastrado, tanto por las aguas superficiales como por las aguas subterráneas. De ahí, que en las zonas de meteorización de los yacimientos de polimetales de Pb-Zn se observe una zona clarificada para el Zn. No obstante, en ocasiones, estas zonas de meteorización pueden experimentar enriquecimiento de Zn como resultado de su redeposición, en forma de sulfuro hipergénico, así como en forma de óxido, carbonato o silicato.



## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Los minerales principales del Pb son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Galena	SPb	86,6% (contiene mezclas de Sb, Bi y Ag.)
Jamesonita	$S_{14}Pb_4FeSb_6$	50,8%
Boulangerita	$S_{11}Sb_4Pb_5$	55,4%
Bournonita	$S_3SbCuPb$	42,6%
Cerusita	$CO_3Pb$	77,6%
Anglesita	$SO_4Pb$	68,3%

Los principales minerales de Zn son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Esfalerita	SZn	67% (con impurezas de Cd In Ga Ge y Co.)
Wurtzita	SZn (exagonal)	63%
Smithsonita	$CO_3Zn$	52%
Calamina	$Zn_4(Si_2O_7)_2 \cdot H_2O$	53,7%

Los principales minerales de Ag son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Plata nativa	Ag	Hasta 100%
Electrum	Ag Au	15-20%
Argentita	$SAg_2$	87,1 %
Proustita	$S_3AsAg_3$	65,5 %
Pirargirita	$S_3SbAg_3$	60,0 %
Querargirita	$ClAg$	75,2 %

(La galena argentífera es el mineral industrial de la plata que puede contener hasta 2% de Ag así como menas grises.)

De los minerales y menas de los yacimientos polimetálicos de Pb-Zn-Ag se obtiene oro, el cual se presenta en forma nativa o de telururo, y el cobre en forma de calcopirita. Los polimetales de Pb-Zn tienen un gran contenido en Cd, y su principal fuente de obtención es a partir del enriquecimiento y posterior tratamiento de la esfalerita. También se obtienen importantes cantidades de In, Ge y Ga, a partir de estos yacimientos.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los yacimientos de Pb-Zn-Ag se forman como resultado de los procesos postmagmáticos y fundamentalmente de los procesos hidrotermales; de estos, los de temperaturas altas y medias son característicos para el Pb y el Zn, y los de bajas temperaturas para la Ag.

### 1. YACIMIENTOS METASOMÁTICOS DE CONTACTO TIPO SKARN

Los yacimientos de este tipo se encuentran en las regiones de desarrollo de capas carbonatadas y granitoides moderadamente ácidos. Generalmente los cuerpos se localizan en el contacto de calizas con las intrusiones; otras veces a lo largo de grietas que surgen en el contacto de estas rocas.

Yacimientos de este tipo son: Tetiuge, en el Extremo Oriente, y otros en la RSS de Tadzikiyistán y la RSS de Kazajstán, en la URSS; en Franklin-Furnace, New Jersey, EUA (Zn-Mn); Sala, en Suecia, y Trepca, en Yugoslavia.

La importancia económica de estos yacimientos es secundaria.

### 2. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

A este tipo genético pertenecen los yacimientos de polimetales más importantes. Se reconocen:

#### Yacimientos de temperaturas altas

A este subtipo pertenecen los yacimientos mayores del mundo como: Broken Hill, en Australia, y Sullivan, en Canadá, los cuales aportan cerca del 30% de la extracción

mundial de Pb. En los yacimientos de este tipo, los sulfuros de Pb y Zn reemplazan metasomáticamente a rocas metamórficas silicatadas antiguas, y forman enormes cuerpos en forma de lentes como en el yacimiento Sullivan y otros de forma muy compleja, como Broken Hill, en Australia.

Los sulfuros de plomo y zinc se asocian con magnetita pirrotina, casiterita, granate, turmalina, albita y mica. Las alteraciones hidrotermales-metasomáticas más frecuentes son la turmalinización, la albitización y la cloritización.

#### *Yacimientos de temperaturas medias*

Los yacimientos polimetálicos formados a esta temperatura son los más importantes.

Los minerales meníferos son: galena, esfalerita, menas grises, pirita, calcopirita con mezcla de minerales de plata, oro, a veces uranio, y torio. Entre los minerales filoneanos se reconocen el cuarzo, la barita, carbonatos, clorita y sericita.

De acuerdo con la morfología de los cuerpos minerales y las condiciones de su yacencia, se pueden reconocer tres subtipos:

- Cuerpos lenticulares metasomáticos en rocas efusivo-sedimentarias (yacimientos polimetálicos del Altaí Mineral y Salair, en la URSS; Bawdwin, en Birmania).
- Cuerpos metasomáticos de forma irregular en rocas carbonatadas (yacimientos del Transbaikal, en la RSS de Kazajstán; Coeur d'Alene y Leadville en EUA; Cerro de Pasco, en Perú; Santa Eulalia en México; Touissit Bou-Beker, en Marruecos).
- Vetas de menas polimetálicas formadas como resultado del relleno de grietas (yacimiento Sadón en el Cáucaso, Freiberg en la RDA).

Las alteraciones hidrotermales más frecuentes en las rocas encajantes son la sericitización de las rocas silicatadas, así como la dolomitización y la cuarcificación de las calizas.

#### *Yacimientos de temperaturas bajas*

Estos yacimientos se desarrollan en dos formaciones:

- Formación de Pb-Zn en capas carbonatadas como resultado de procesos de metasomatismo hidrotermal. Por su

composición las menas son simples (galena, esfalerita y pirita), masivas y diseminadas, que forman vetas y filones y a veces cuerpos en forma de capas con desarrollo de procesos de cuarcificación de las dolomitas y las calizas.

A este tipo pertenecen los yacimientos de la cresta de Karatau (Turlan, Mirgalims, y otros), en la URSS; yacimiento Olkush en Polonia, pequeños yacimientos en Bélgica, así como el de Tri-State y los yacimientos del SE de Missouri en EUA. Esta formación aporta el 50% de la extracción mundial de Zn.

Muchos investigadores consideran que estos yacimientos son sedimentarios, en razón a su composición mineralógica simple y a la forma de sus cuerpos minerales.

- Formación argentífera y también auro-argentífera, cobalto-argentífera y estaño-argentífera, la cual aporta la mitad de la extracción total de Ag.

Los yacimientos están estrechamente relacionados con intrusiones subvolcánicas y cráteres de volcanes, y yacen entre ellos o en capas efusivas. A este tipo pertenecen los yacimientos de Ag de México (Pachuca y Veta Madre); yacimientos de Au-Ag en México, Chile, Perú y los estados occidentales de EUA; yacimientos de menas de Co-Ag en Canadá; y de Sn-Ag en Bolivia, como Cerro Potosí, y en Argentina, Picritas.

### **3. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS**

Este tipo genético consiste en la formación de menas sedimentarias de Pb, Zn y Ag. Se localizan impurezas de Ag en las menas del yacimiento sedimentario Mansfeld en la RFA; el Pb y el Zn también se concentran en el yacimiento Mëggen, con barita y pirita, formando un diseminado en areniscas y esquistos del Devónico. El contenido medio de Zn es cerca de 5% y el de Pb de 0,1%.

### **PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS**

Los grandes yacimientos de menas polimetálicas no se conocen ni en el Precámbrico ni en la época Caledoniana (con excepción de Broken Hill, en Australia, cuya edad es Precámbrica).

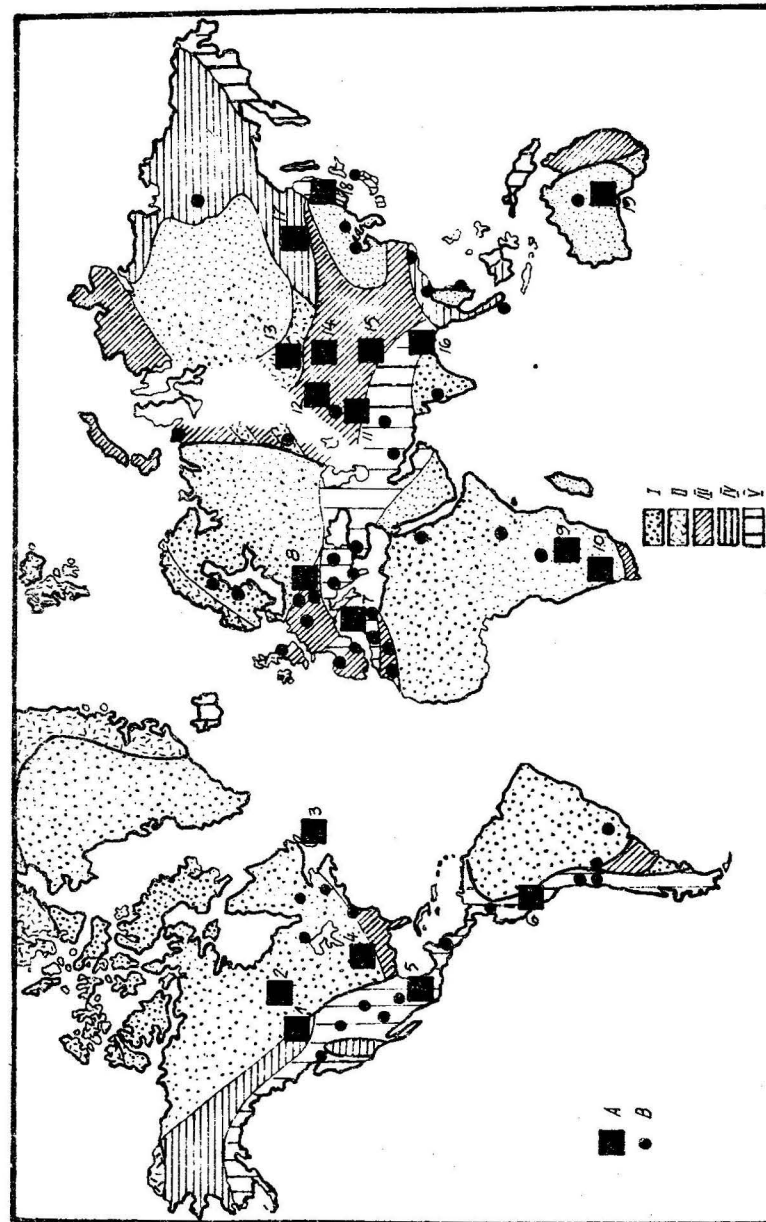


Figura 61

Principales yacimientos de plomo, cinc y plata del mundo I. Plataformas I. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimeridgienses V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones montañosas y yacimientos de significado mundial 1. Sullivan (Canadá) 2. Flin-Flon (Canadá) 3. Buchanan (Canadá) 4. Missouri (EUA) 5. Veta Madre (México) 6. Cerro de Pasco (Perú) 7. Cerdeña 8. Olkysh (RFA) 9. Broken Hill (Zambia) 10. Tsumeb (África del sur) 11. Karatau (URSS) 12. Kazajstan central (URSS) 13. Saldi (URSS) 14. Altai (URSS) 15. Tíbet 16. Bawdwin (Birmania) 17. Nerchinsk (URSS) 18. Tetuje (URSS) 19. Broken Hill (Australia).

La época Herciniana presenta las siguientes provincias: Altai y Salair, Karatau y Karamazar, en la URSS. De la época Kimeridgiense son los yacimientos del Cáucaso del norte (Sadón y otros), en URSS; Transbaikal en URSS, Columbia Británica (Sullivan) en Canadá; EUA y Polonia.

Los yacimientos polimetálicos Alpinos se conocen en Japón Filipinas, Nueva Zelanda, Chile, Perú, algunos en EUA y México. Muchos de ellos son ricos en plata, y aportan la mitad de la extracción mundial de este metal y la cuarta parte del plomo y el cinc.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación se describen algunos de los yacimientos más importantes del mundo.

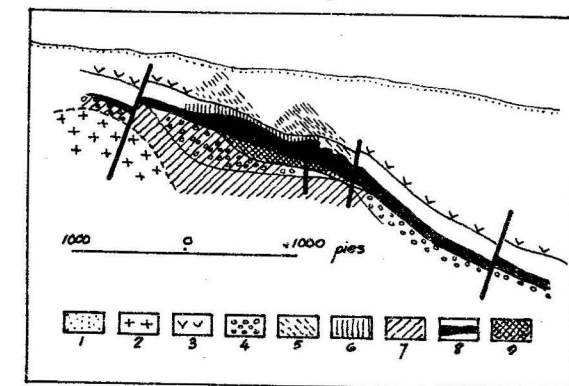
### YACIMIENTO SULLIVAN, COLUMBIA BRITÁNICA, CANADÁ

Este es uno de los mayores yacimientos de Pb y Zn en el mundo, y aporta más del 95% de la producción de Pb y un 75% del Zn canadienses.

Figura 62

Perfil latitudinal vertical del yacimiento Sullivan, Canadá

1. Sedimentos 2. Diorita y granófiros 3. Piso de las cuarcitas superiores 4. Conglomerados subyacentes 5. Roca albítica 6. Roca clorítica 7. Roca turmalínica 8. Mena 9. Pirrotina.



El depósito consiste en un lente de sulfuros que mide 1 850 m de largo por 83 m de potencia máxima, el cual yace en medio de una zona de cuarcitas y argilitas del Precámbrico, paralelo con las rocas estratificadas, que se formó por reemplazamiento metasomático.

Las menas se componen de galena argentífera, esfalerita (marmatita), pirita, pirrotina con pequeñas cantidades de calcopirita, arsenopirita, boulangerita, magnetita, granate, actinolita, turmalina y casiterita.

Los contenidos medios de los minerales principales son: Pb, 8 a 10%; Zn, 4 a 6%; Ag, 50 hasta centenas de g/t; Sn, 0,06%. Con los concentrados de Zn se puede obtener además, In (cada año se obtienen hasta 20 toneladas).

El yacimiento es de génesis hidrotermal, de altas temperaturas, formado por reemplazamiento metasomático.

### YACIMIENTOS POLIMETÁLICOS DEL ALTAI, URSS

En la constitución geológica del Altai mineral, las rocas más antiguas son neises y esquistos del Cámbrico y el Precámbrico. Sobre ellos descansan, en discordancia, capas de esquistos y rocas efusivas del Devónico y Carbonífero inferior, atravesadas por intrusiones granodioríticas y pórfido cuarcíferas del Herciniano.

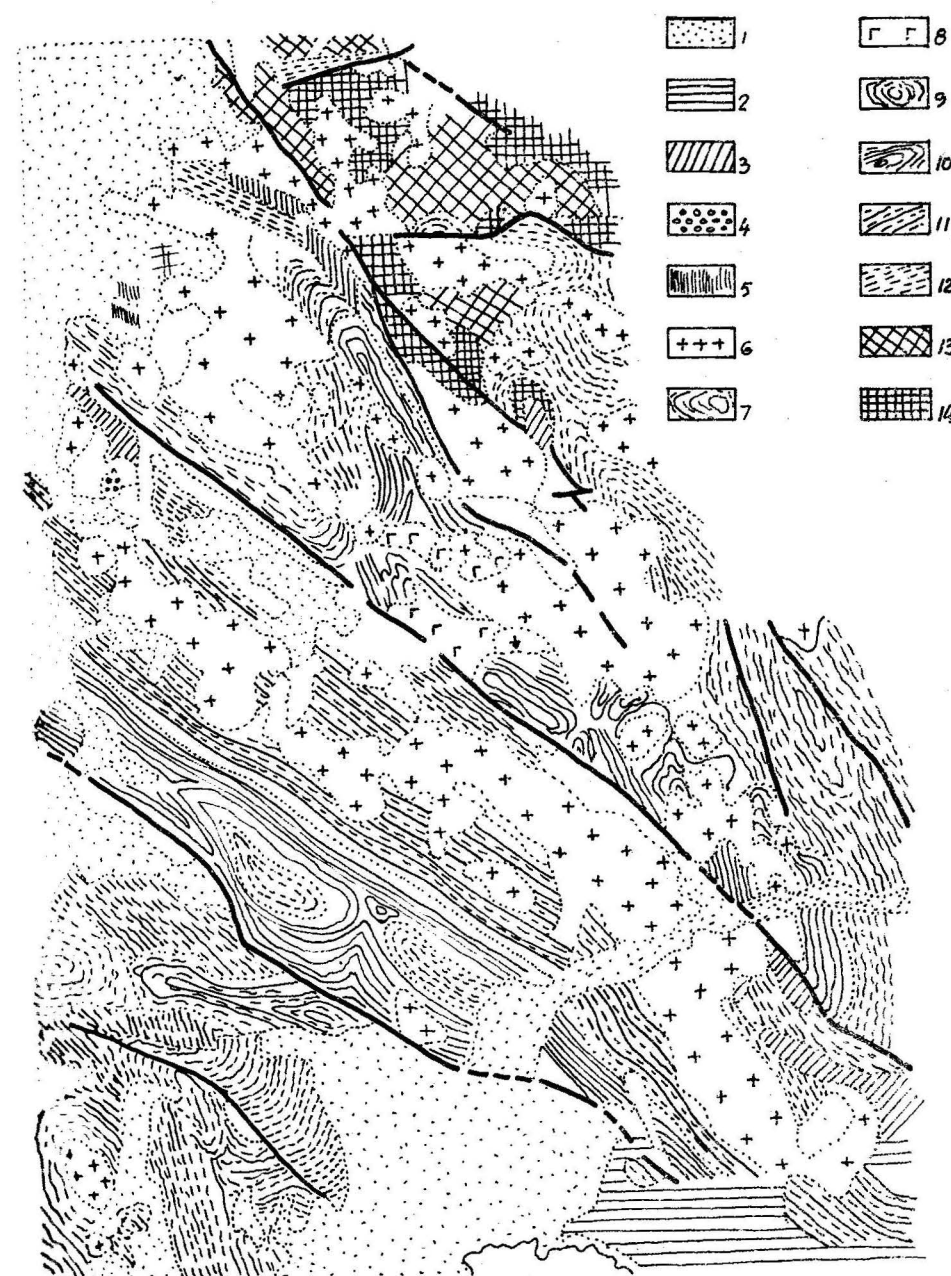
Para la localización de las rocas intrusivas y de la meniferación, tienen mayor importancia las zonas de quebrantamiento tectónico. Una de ellas, se extiende a lo largo de la orilla de Irtysh; otra, paralela a ella, se extiende 70 km en dirección NE.

Entre los límites de esta zona se presentan los *stock* de porfiritas cuarcíferas, y la meniferación. Los minerales macizos forman lentes y depósitos, con una longitud hasta de 350 m, con potencia de 10 m hasta una profundidad de 2 000 m. La zona de los minerales diseminados se encuentra generalmente en el piso de los minerales macizos y alcanza una potencia oscilante entre 40 y 70 m.

Figura 63

Mapa geológico-estructural del SE de Altai con los principales yacimientos minerales (V. P. Nejoroshev)

1. Depósitos cuaternarios 2. Depósitos terciarios 3. Esquistos cristalinos 4. Intrusiones básicas y rocas filoneas 5. Pórfidos intrusivos y filoneas 6. Granitos y granodioritas 7. Pérmico inferior 8. Capas efusivo-tufogénicas del Paleozoico superior 9. Depósitos del Visiano superior 10. Depósitos del Visiano inferior y Tournaiano superior 11. Devónico, Carbonífero 12. Devónico 13. Silúrico 14. Cámbrico-Silúrico.





La mena se compone de esfalerita, galena, calcopirita, enargita, oro nativo, combinaciones telurúricas de Au, Ag y Pb, así como cuarzo, biotita, barita, carbonatos y sericita. Hasta una profundidad de 70 a 80 m, los minerales están oxidados.

En los límites de la zona cercana a Irtysh, se sitúan los yacimientos de Cu-Zn: Belousov y Nicolaev; y en la zona nororiental, los yacimientos polimetálicos: Zirianovsk, Leninogorsk (Riddersk) y Emeinogorsk.

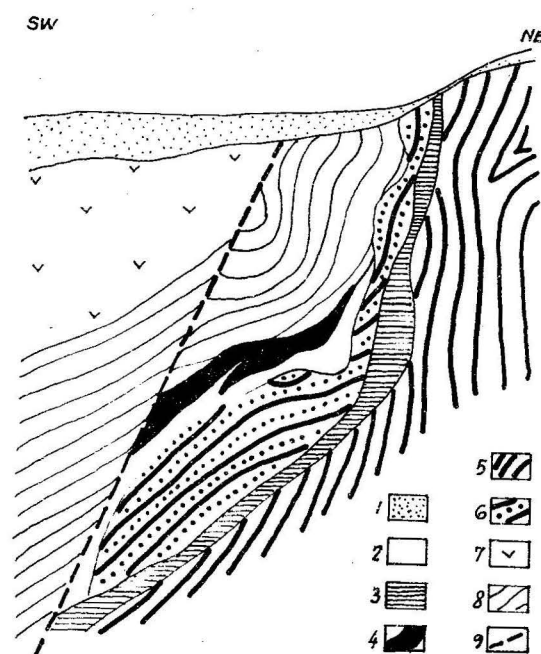
Los yacimientos del Altai pertenecen al grupo de temperaturas medias, al tipo de lentes en esquistos, relacionados genéticamente con fuentes de granitoides (*stock* de pórfido granítico) y coinciden estrechamente en el espacio y en el tiempo con la meniferación.

Figura 64

Perfil esquemático del yacimiento Riddersk, Altai Mineral, URSS

(N. N. Kurek)

1. Sedimentos 2. Sericitolitas con sulfuros diseminados 3. Sericitolitas carbonáticas y cuarcíferas 4. Menas polimetálicas 5. Microcuarcitas 6. Microcuarcitas con sulfuros diseminados 7. Tufitas rojo-verdosas 8. Esquistos arcillosos 9. Grietas tectónicas.



A. I. Semenov considera, que la meniferación se relaciona con la actividad volcánica del Devónico medio. Señala que en los límites del Altai mineral se desarrollan ampliamente potentes capas de espilitas, queratófidos, tobas y tobas-brechas, esquistos, areniscas y calizas del  $D_1$ - $D_2$ . Con los efusivos se asocian estrechamente intrusiones subvolcánicas de pórfidos, los cuales tienen forma de *stock* y mantos interestratificados que participan en la construcción de los aparatos volcánicos del Devónico.

Los yacimientos polimetálicos del Altai se relacionan paragenéticamente con la *facie* subvolcánica de *stock* y mantos interestratificados de pórfidos albiticos de edad Devónico. Sin embargo, las investigaciones de V. P. Nejoroshev y otros, han demostrado que este punto de vista no es adecuado, puesto que la meniferación yace en capas del  $D_2$ - $C_1$  coincidiendo con las fallas post-hercinianas y puede estar relacionada, sólo con intrusivos hipoabisales de granitoides hercínicos.

## YACIMIENTOS DE LA CRESTA KARATAU, URSS

Estos yacimientos se encuentran en la RSS de Kazajstán, y es característico para la meniferación de estos yacimientos:

- coincidencia con capas de rocas carbonatadas (calizas, dolomitas),
- grandes áreas de distribución espacial de la meniferación,
- gran desarrollo de menas con características metasomáticas,
- composición simple en las menas (galena, esfalerita, pirita marcásita, calcita, dolomita, siderita, barita, un poco de cuarzo y a veces fluorita) formadas a temperaturas cercanas a los 100°C,
- contenidos industriales de Pb y Zn y generalmente bajos en Ag (1 a 2 g por cada 1% de Pb). Con excepción de las menas ricas en baritas donde el contenido de Ag es de decenas y centenas de gramos por cada 1% de Pb,
- las variaciones en las rocas encajantes, cercanas a las menas, son la dolomitización, baritización y más raramente la cuarcificación.
- ausencia en las regiones meníferas de rocas ígneas.

Kniasev observa dos tipos morfológicos de meniferación:

- cuerpos minerales de tipo fisural con menas ricas, generalmente oxidadas, y
- menas sulfurosas diseminadas, pobres.

Por su tipo genético este yacimiento pertenece al grupo de los de bajas temperaturas, teletermales, y se asocian con intrusiones de granitoides no descubiertos por la erosión. Sin embargo, existen otros investigadores que consideran al yacimiento como sedimentario, basándose en el criterio de que la meniferación dispersa es singenética con las rocas carbonatadas, y explican los cuerpos filoneanos y *stockworks* como resultado de procesos de diagénesis y metamorfismo postmineralización.

#### YACIMIENTOS DE LA CUENCA DE LOS RÍOS MISSISSIPPI Y MISSOURI, EUA

Esta zona abarca una gigantesca región criptobatolítica, en la acepción de Emmons, con yacimientos de temperaturas bajas de reemplazamiento metasomático de menas diseminadas en rocas carbonatadas. Se reconocen las siguientes regiones:

##### — Missouri del sudeste

Esta zona produce mucho plomo y alguna plata. Los yacimientos representan depósitos metasomáticos de menas diseminadas en la dolomita cuarcificada Bonnetterre, de edad Cámbrico. Los depósitos se extienden en una longitud de 300 m y una potencia de 3,5 a 4 m. La mena generalmente es porfídica. El mineral principal es la galena; además hay mucha marcasita y algo de eigenita,  $S_4(Co, Ni)_3$ , pirita, calcopirita y calcita.

##### — Mississippi del suroeste y región del Tri-State.

Esta región es muy rica en menas de Zn (2 a 3%) con algunas cantidades de Pb. Las menas se localizan en la caliza de la formación Boone, de edad Carbonífero inferior, la cual está cubierta por esquistos arcillosos.

La forma de los cuerpos meníferos es la de depósitos irregulares con una longitud hasta de 3 km, y potencia hasta de 24 m.

La composición de la mena es esfalerita, alguna galena, wurtzita, marcasita, pirita, calcopirita; más raramente enargita y millerita. Entre los minerales filoneanos se reconocen cuarzo, carbonato y barita.

La génesis de los yacimientos de la cuenca de los ríos Missouri y Mississippi, ha sido objeto durante mucho tiempo de discusión entre los investigadores; unos los consideran de infiltración y otros como teletermales.

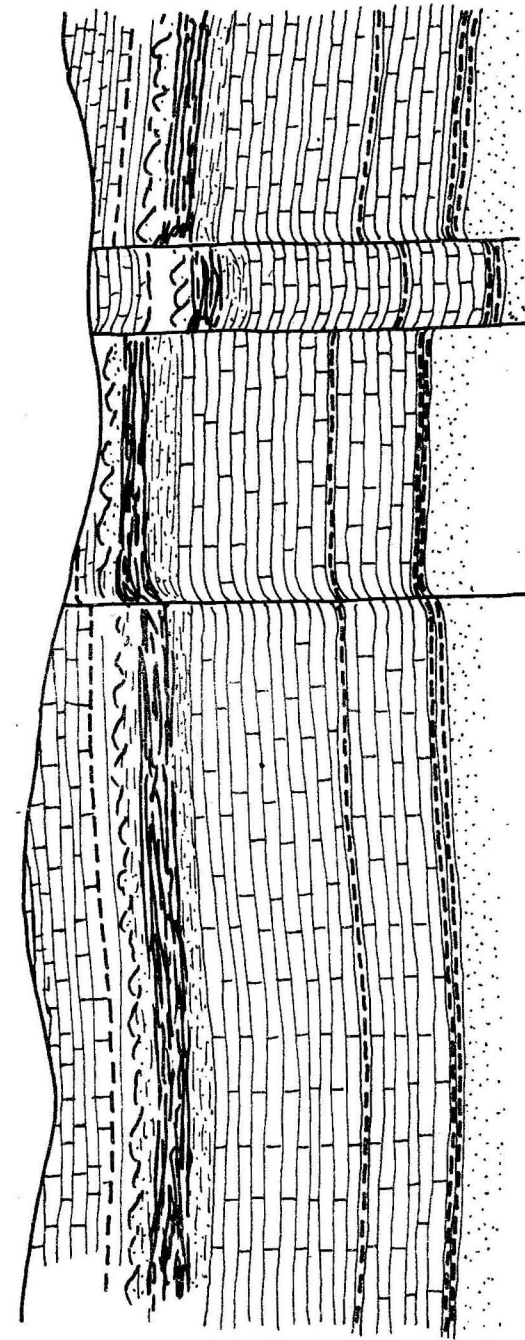


Figura 65  
Yacimiento de capas de menas diseminadas de Pb en Mississippi, EUA

Aunque las rocas ígneas no afloran en la región, se pueden dar los siguientes argumentos a favor del criterio hidrotermal:

- intensa silicificación de las rocas,
- temperatura de formación de 115° a 135°C,
- presencia de minerales tales como la enargita, que no se encuentran en yacimientos exógenos.

#### YACIMIENTOS ARGENTÍFEROS MEXICANOS: PACHUCA Y VETA MADRE

El yacimiento Pachuca se explota desde el año 1534. Las vetas meníferas se localizan hacia las fallas de dirección NW y yacen entre series sedimentarias del Cretácico inferior y extrusivos del Terciario (andesitas, riolitas, traquitas). Las vetas son de crustificación y brechosas, con potencia de 2 a 5 m y se extienden hasta una profundidad de 600 m.

La mineralización se desarrolló en dos etapas; en la segunda se formaron los minerales de plata: argentita, polibasita y estefanita.

El yacimiento Veta Madre se explota desde el año 1548 y es uno de los yacimientos de Ag más ricos del mundo. En la región, rocas sedimentarias de edad Precretácica son atravesadas por riolitas, andesitas, pórfido granítico y monzonitas, y cubiertos con efusivos. Todas estas rocas están perturbadas con fallas con las cuales coincide la mineralización.

La falla Veta Madre se extiende 25 km y con ella coincide el filón de igual nombre, al cual controla estructuralmente; este tiene una potencia hasta de 20 m. Una meniferación intensa se produce en una zona de unos 5 km, formando columnas minerales (bonanzas) con longitud de 200 a 400 m.

Figura 66

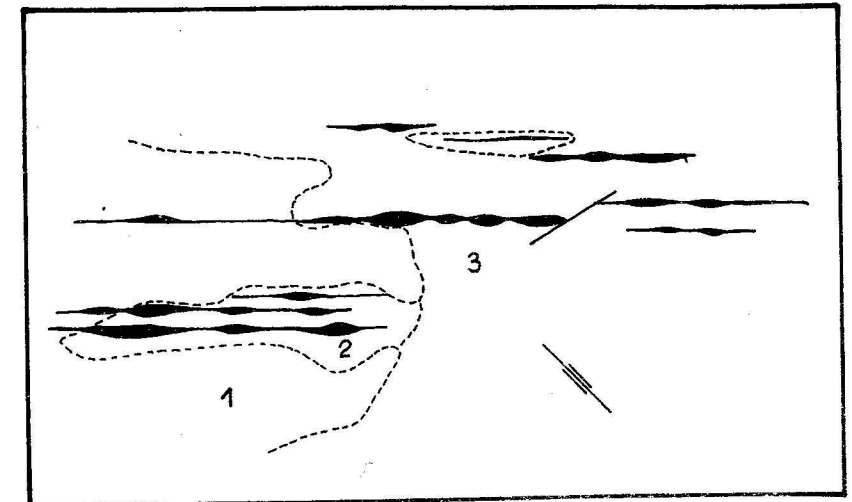
A. Guanajuato (México) con indicación de la localización de masas de mineral a lo largo de tres sistemas de filones. Obsérvese los engrosamientos y estrechamientos de éstos.

1. Zona de granitos 2. Zona de basaltos 3. Veta Madre

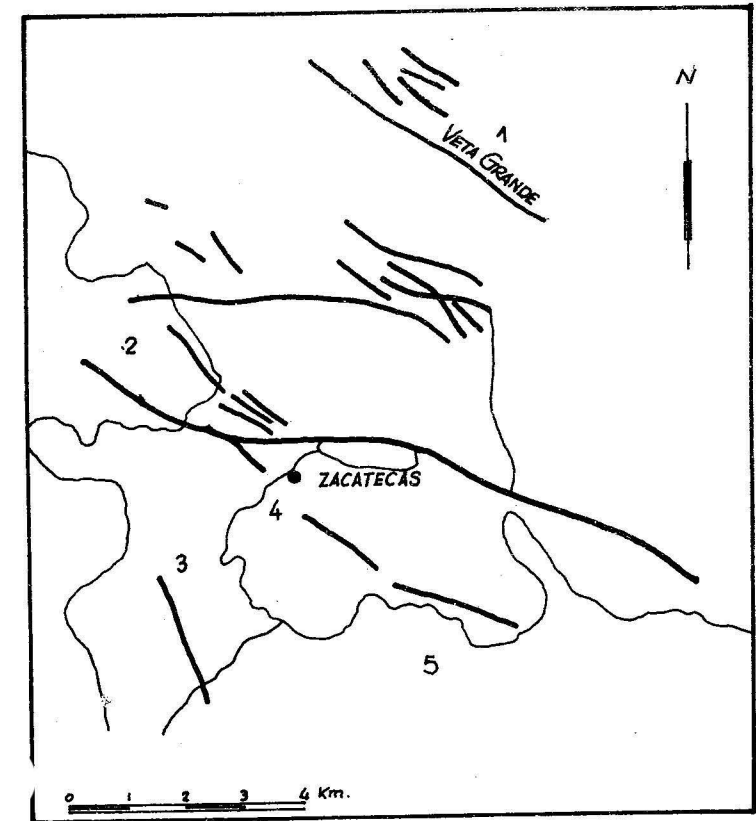
B. Vetos del distrito argentífero Zacatecas, México.

(Bastin-Botsford)

1. Vetos 2. Pizarras cretácicas 3. Dioritas 4. Aglomerado andesítico 5. Riolitas



(a)



(b)

La mena, crustificada, se compone de cuarzo con sulfuros y antimonio de Ag, sulfuros de metales coloreados, azurita, barita, fluorita, zeolitas. La relación Ag/Au en el yacimiento es de 100/1; en la región se desarrolla la propilitización y cuarcificación de las rocas. Los yacimientos de Ag mexicanos aportan la tercera parte de la extracción mundial de Ag. En la zona de Guanajuato y Zacatecas existen, además, otros yacimientos, pero los descritos son los más interesantes e importantes de todos.

## YACIMIENTOS POLIMETÁLICOS EN CUBA

Los yacimientos polimetálicos de Pb-Zn están relacionados en nuestro país, fundamentalmente con yacimientos hidrotermales de menas piríticas y pirito-cupríferas, en menor grado.

Figura 67

Esquema de la constitución geológica del yacimiento Mono, Pinar del Río, Cuba (Horizonte 2)

1. Esquistos arcillosos-carbonosos y aleurolitas
2. Areniscas
3. Mena pirítica masiva
4. Mineralización pirítica de vetillas diseminadas en areniscas
5. Distocaciones disyuntivas.

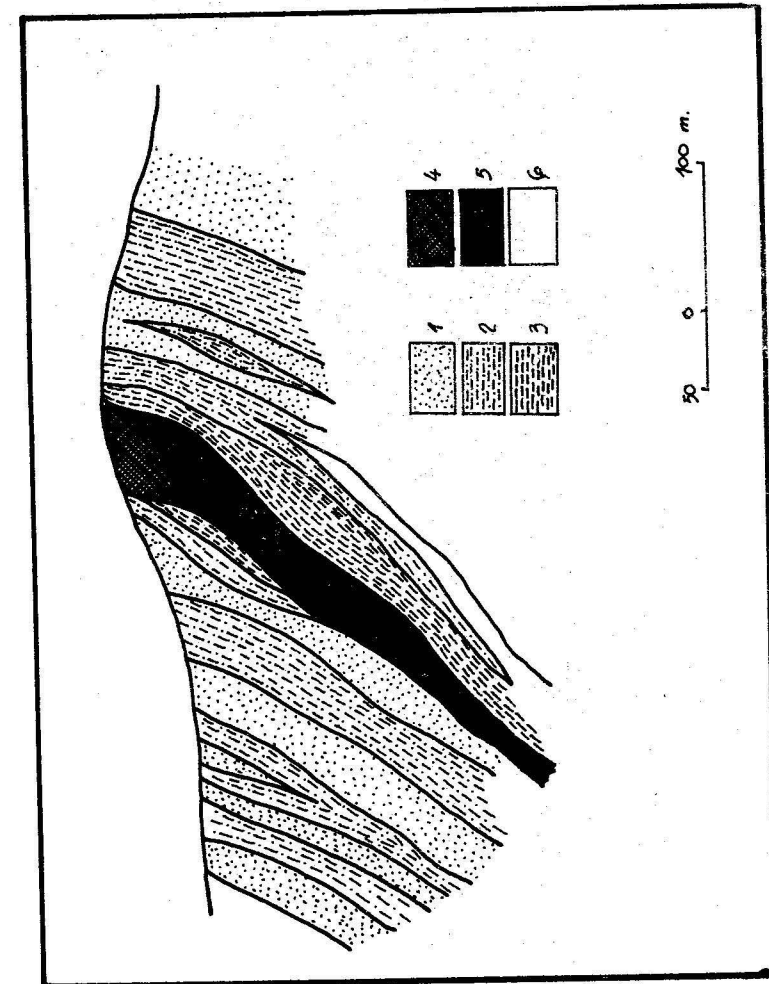
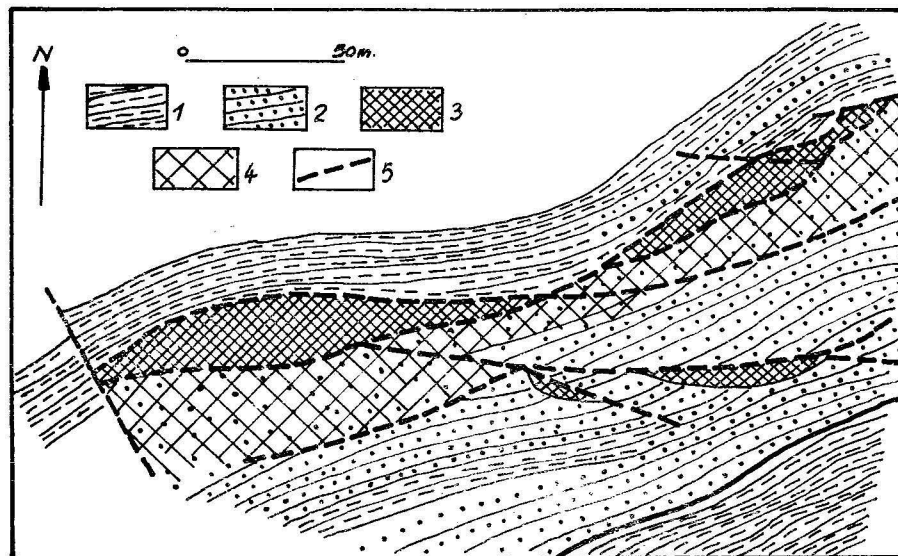


Figura 68  
Perfil geológico esquemático del yacimiento Santa Lucía, Pinar del Río, Cuba  
(E. Díaz Rodríguez)  
1. Areniscas 2. Aleurolitas 3. Esquistos arcillosos carbonados 4. Sombro de hierro  
5. Cuerpo mineral 6. Contactos litológicos



La provincia de Pinar del Río, es la que presenta el mayor número de zonas y áreas mineralizadas. La mineralización pirítica con Pb-Zn está presente, por ejemplo, en los límites del yacimiento Matahambre (cuerpo 70 hacia el norte de la falla Manacas); hacia el NE de Matahambre se explota en la actualidad el yacimiento Mono y a 3 ó 4 km al sur de Matahambre se localizan las manifestaciones Nieves y Mineral.

A diferencia de los filones de calcopirita de la región, estos coinciden en su yacencia con las rocas encajantes, generalmente esquistos.

El yacimiento Mono representa dos grandes lentes (la longitud de cada uno es de 100 m con potencia de 15 a 30 m) de pirita sulfurada con contenidos también de pirrotina, esfalerita, calcopirita, galena, cuarzo y siderita.

En el piso del cuerpo mineral se localizan areniscas, en tanto que en el techo se localizan esquistos argilito-carbonosos; el contacto del cuerpo mineral es claro, tectónico. De acuerdo con los datos de Poplavski (1964), el contenido de Cu es de 0,6%; Pb, de 1,6% y Zn, de 4,7%.

En la región se desarrollan los procesos de cuarficación y piritización, y se desarrolla, además, la zona de oxidación con la formación del "sombrero de hierro". Las impurezas características de las menas primarias son: Au 0,4 g/t; Ag, 22 g/t; Bi 50 g/t; Co 60 g/t y Cd, 200 g/t. Sin embargo no se reporta la presencia de Ge, Se y Te, impurezas típicas de las menas de muchos yacimientos piríticos.

También en la zona de Santa Lucía, en la región menífera Mantua-Castellanos se desarrollan intensos trabajos de exploración, para determinar las características de una importante mineralización de Pb-Zn en forma de menas pirito-esfaleríticas en esquistos carbonoso-arcillosos.

## ESTAÑO

### GENERALIDADES

El estaño, uno de los primeros metales conocidos por el hombre, tuvo su principal utilización en las aleaciones con el cobre, para obtener bronce. La muestra más antigua de bronce data de 3 500 a 3 200 años a. n. e., en Mesopotamia. En la actualidad el estaño sigue teniendo una gran utilización para aleaciones con cobre, pero con tecnologías modernas, y tratamientos especiales para obtener bronce de distintas clases.

Además, una gran cantidad de estaño se utiliza en forma de hojalata para la industria alimenticia, entre otros, para la producción de recipientes y envases. La industria química utiliza el estaño para la producción de diversos reactivos.

En la actualidad casi las 2/3 partes de la extracción de minerales estanníferos proviene de los países y regiones del sudeste asiático: Malaya, Indonesia, sur de la República Popular China, Birmania, Tailandia; también aportan determinadas cantidades de estaño otros países como Bolivia, Nigeria, República del Congo, Ruanda y Burundi y la isla de Tasmania. En la URSS se localizan enormes regiones estanníferas.

Sin incluir las producciones de la URSS y la República Popular China, se obtuvo en 1972 un aproximado de 198 000 toneladas de concentrados.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Sn está situado en el cuarto grupo y el quinto período del sistema periódico de los elementos. Su número atómico es 50 y su peso

atómico es 118,69. Se conocen diez isótopos de Sn en la naturaleza, pero los más difundidos son:

Isótopos	%
Sn <sup>116</sup>	15,5
Sn <sup>118</sup>	22,5
Sn <sup>120</sup>	28,5

A pesar de que el Sn es fuertemente siderófilo con una tendencia calcófila, en la litosfera superior tiene un carácter evidentemente oxífilo. El Sn puede ser bi- y trivalente y sus radios iónicos son 0,93 Å y 0,71 Å respectivamente. El monóxido de estaño no existe en la naturaleza, mientras que el dióxido es la forma más común de presentarse.

En las rocas ígneas el Sn se encuentra, básicamente, en forma de casiterita.

A medida que avanza el proceso de diferenciación magmática el mineral se hace más abundante y se observa un notable incremento en los últimos cristalizados magmáticos o sea, los granitos y especialmente en las pegmatitas.

Las concentraciones más importantes de casiterita se forman durante los procesos neumatolíticos e hidrotermales. El contenido promedio de Sn en las rocas es como sigue:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	0,00005
Rocas básicas	0,00015
Rocas ácidas	0,0003
Rocas sedimentarias	0,001

El Clarke en la corteza es de 0,00025

En el greisen se concentra como promedio entre 0,08 y 0,8% de Sn; en los filones neumatolíticos la casiterita, junto a la wolframita y a menudo con la molibdenita, forma grandes yacimientos.

En los yacimientos hidrotermales tienen importancia —como componentes de las menas estanníferas— el sulfuro de estaño, especialmente la estannina, Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>. Durante la meteorización de los granitos y las

pegmatitas estanníferas o de yacimientos preexistentes, la casiterita, en razón a su gran resistencia a la desintegración física y química, forma acumulaciones importantes, tipos de placeres aluviales y eluviales, de enorme significado industrial. De ahí el contenido incrementado de Sn en las rocas sedimentarias.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La mineralogía del Sn es bastante simple, y limitada a unos pocos minerales; el mineral más importante y, a la vez, la única mena industrial es la casiterita, SnO<sub>2</sub>, la cual contiene entre 69 y 78% de Sn. Otro mineral de importancia es la estannina, que contiene cerca de 27% de Sn. Este último mineral generalmente se encuentra en paragénesis con la galena, esfalerita, casiterita y otros minerales.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

De acuerdo con los trabajos realizados por S. S. Smirnov, así como los de otros geólogos soviéticos, se pueden reconocer los siguientes tipos genéticos de yacimientos:

### 1. YACIMIENTOS DE PEGMATITAS

La formación de pegmatitas estanníferas está estrechamente relacionada con granitos ácidos y ultra-ácidos y se desarrollan en muchas regiones del mundo.

La mineralización de estaño generalmente coincide con las partes de los cuerpos pegmatíticos metasomáticamente alterados y se caracterizan, como regla, por la distribución de la menificación hacia los bordes. Las pegmatitas se relacionan con las del tipo cuarzo-microclina: con albita, turmalina, moscovita (frecuentemente topacio), espodumena, etcétera.

Las pegmatitas estanníferas y los placeres que se forman como resultado de la meteorización de los "yacimientos madres" se explotan en muchos países. En la URSS se conocen en la región de Kalba-Narimsk, en el Sayán oriental, en la cresta del Turquestán; también se conocen en la República Popular China, Zaire, Nigeria, Ruanda, Burundi y otros países.

Las pegmatitas estanníferas tienen gran importancia económica, pero no forman grandes yacimientos. A partir de ellas se obtiene aproximadamente el 10% de la producción mundial de concentrados de estaño.

## 2. YACIMIENTOS DE SKARN

La casiterita en estos yacimientos coincide, generalmente, con los *skarn* de piroxeno-granate o de granate y se acompaña de magnetita o de sulfuros. Los yacimientos de este tipo, generalmente no son grandes; la casiterita en la mena se distribuye de una forma irregular. De este tipo se conocen yacimientos en la URSS, en la RSS de Azeirdbaiján y en otros países.

## 3. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Dentro de este tipo genético podemos reconocer dos subtipos:

### *Yacimientos de temperaturas altas*

Formación cuarzo-casiterítica la que está asociada a granitos ácidos y ultra-ácidos, al igual que las pegmatitas. Está representada por filones de cuarzo-feldespato, cuarzo-topacio, cuarzo y turmalina y también por greisen moscovítico y greisen turmalínico, formando frecuentemente *stockworks*.

La casiterita en estos yacimientos se acompaña de albita, microclina, moscovita, topacio, turmalina, fluorita; a veces wolframita, molibdenita, bismutina, arsenopirita, etcétera.

Es característico el desarrollo de un intenso proceso de greisenización de las rocas. La casiterita generalmente forma grandes cristales que se distribuyen, de forma muy irregular, en gran parte de la mena y coinciden frecuentemente hacia las salbandas de las vetas.

Estos yacimientos tienen pocas veces gran significado industrial por sí mismos; sin embargo, los enormes y ricos placeres que se asocian con ellos los hacen muy importantes económicamente. Se encuentran en la URSS (Transbaikal y el noreste de la URSS); una gran parte de los yacimientos del sudeste de Asia son de este tipo; los yacimientos de los montes Metálicos (Zinnwald y Altenberg); Cornualles en Inglaterra, así como yacimientos en Bolivia, Zaire y Nigeria. De esta formación y de sus placeres se obtiene entre 60 y 70% de la producción mundial de Sn.

### *Yacimientos de temperaturas altas y medias*

Formación sulfuro-casiterítica. Generalmente los yacimientos de esta formación están asociados a granitoides moderadamente ácidos, emplazados a poca o a no muy

grandes profundidades. Distinguimos dentro de esta formación mineral:

- Los de temperaturas altas-medias, asociados con granitoides ácidos y moderadamente ácidos, los que se forman generalmente a profundidades pequeñas, temperaturas moderadas y en condiciones cercanas a la superficie.

La casiterita está acompañada por cantidades significativas de sulfuros: pirrotina, arsenopirita, calcopirita, esfalerita, galena, y también cloritas y turmalina-ferruginosa, cuarzo y carbonatos.

Los yacimientos tienen, frecuentemente, una gran significación industrial, y se caracterizan por un elevado contenido de Sn en la mena.

Al meteorizarse, los yacimientos primarios del tipo descrito, no forman grandes placeres. A este tipo pertenecen grandes yacimientos de menas ricas, en la URSS, Bolivia (Llallagua y otros), Tasmania (Zeejan) y también yacimientos en Japón (Akenobe y Mitata).

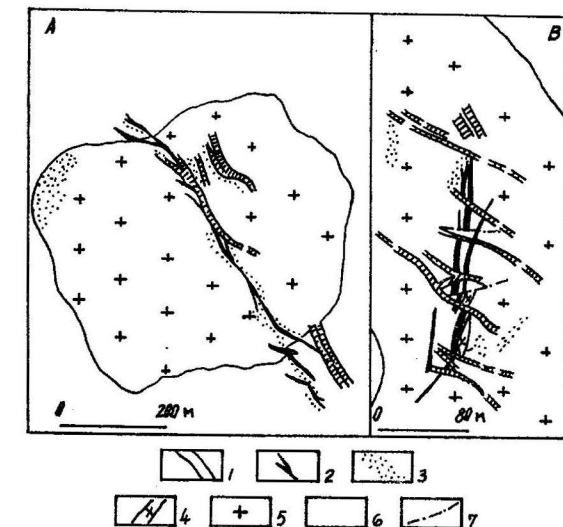
Figura 69

Yacimientos de la formación filoneana cuarzo-casiterita-wolframita en Primorie, URSS

1. Diques de porfiritas 2. Filones cuarzomeníferos 3. Greisenización 4. Aplitas 5. Granitos 6. Rocas sedimentarias 7. Fallas.

A. Yacimiento Ust-Mikulinsk

B. Yacimiento Chapáev.



— Yacimientos de Sn polimetálicos, de temperaturas medias, en los cuales la casiterita forma pequeños cristales en la mena y se encuentra estrechamente vinculada con la galeña y la esfalerita. Estas menas son muy difíciles de beneficiar, y de ellas se obtienen concentrados complejos a partir de los cuales se producen aleaciones de Sn especiales junto a otros metales.

Yacimientos de este tipo se localizan en Primorie, Transbaikal oriental, en la URSS; Monserrat, en Bolivia y Chihuahua, en México.

#### *Yacimientos de temperaturas bajas*

Los yacimientos de Sn-Ag están relacionados con *stocks*, cerca de la superficie, de riolitas, y por su composición son muy parecidos a los descritos anteriormente. Ejemplos son los yacimientos de Oruro y Potosí, al sur de Bolivia y Picritas en Argentina.

De los yacimientos de la formación sulfuro-casiterítica se obtiene entre 20 y 30% de la producción de Sn. Bolivia es el país que tiene mayor producción.

#### 4. YACIMIENTOS DE PLACERES

En la actualidad los yacimientos de placeres juegan un papel extremadamente importante en la extracción y producción mundial de Sn, puesto que aportan entre el 50 y 60% de la producción.

Se forman como resultado de los procesos de meteorización de pegmatitas estanníferas y yacimientos hidrotermales de altas temperaturas de la formación cuarzo-casiterítica. Entre los placeres de Sn se conocen tipos morfogenéticos distintos, como eluviales, deluviales, aluviales, costeros (marinos y lacustres) y enterrados.

Los que tienen mayor significación industrial son los placeres aluviales y los deluviales-aluviales. La longitud de los placeres aluviales no es mayor de 3 a 5 km, y, a veces, 8 km o más.

La casiterita en estos placeres se acompaña de otros minerales de elevado peso específico, como la wolframita, scheelita, magnetita, granate, circón y otros. Estos placeres se localizan en la URSS, en los países del sudeste asiático ya mencionados, así como en Bolivia, Nigeria, Zaire.

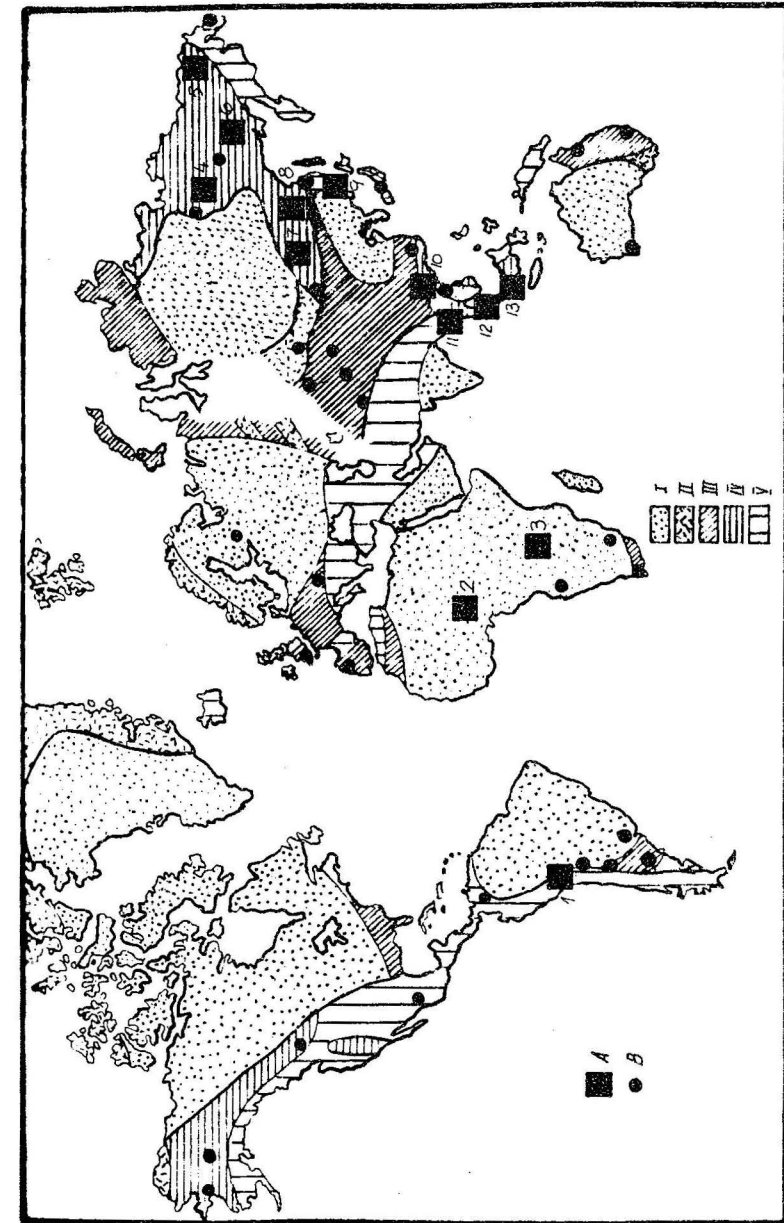


Figura 70

Principales yacimientos de estaño del mundo I. Regiones de plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínianas IV. Zonas plegadas kimerioides V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Llallagua (Bolivia) 2. Bauchi (Nigeria) 3. Miumba (África) 4. Dagestán (URSS) 5. Nauna-Anguema (URSS) 6. Kolima (URSS) 7. Transbaikal oriental (URSS) 8. Jinchuan R.P. China 9. Sijoti-Alin (URSS) 10. Kon Chui R.P. China 11. Ta voi (Tailandia) 12. Malaya 13. Banka (Sumatra). B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local



## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Yacimientos antiguos del Precámbrico y el Paleozoico inferior, se conocen en Sayán oriental y en Karelia, URSS; en Zaire, Nigeria, Ruanda, Burundi, Transvaal y el sur de Australia.

En la época Herciniana no se encuentran grandes yacimientos de Sn; se localizan algunos en Kazajstán y en el Asia central, y también en los montes Metálicos, en RFA; Cornualles, en Inglaterra y en la isla de Tasmania.

La época Kimeridgiense es la más importante de todas; en ella se formaron los yacimientos del SE y NE de Asia, los cuales, junto con sus placeres, aportan casi el 70% de la producción mundial de Sn.

La época Alpina tuvo gran significado en la formación de yacimientos del tipo sulfuro-casiterita en Bolivia; también se conocen estos yacimientos en la URSS, Argentina y Japón.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación describiremos las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes en el mundo.

### YACIMIENTOS DEL SUDESTE DE ASIA

Esta gigantesca región estannífera está formada por la península de Malaya, Birmania, Tailandia, parte de Indonesia y las provincias del sur de la República Popular China. Aquí se concentran las 2/3 partes de las reservas mundiales (sin incluir la URSS) y cerca del 70% de la extracción anual.

En la zona, capas sedimentario-metamórficas han sido intensamente dislocadas y atravesadas por granitos del Kimeridgiense (Jurásico superior-Cretácico inferior).

Para todas estas provincias, así como para todas las provincias meníferas del NE de Asia, es característica la presencia del boro, fundamentalmente en forma de turmalina y casiterita como mineral accesorio de los macizos graníticos.

Los yacimientos de placeres son los más explotados, y en menor grado los yacimientos madres, los cuales pertenecen a los siguientes tipos: en primer lugar los filones y *stockworks* de cuarzo casiterita

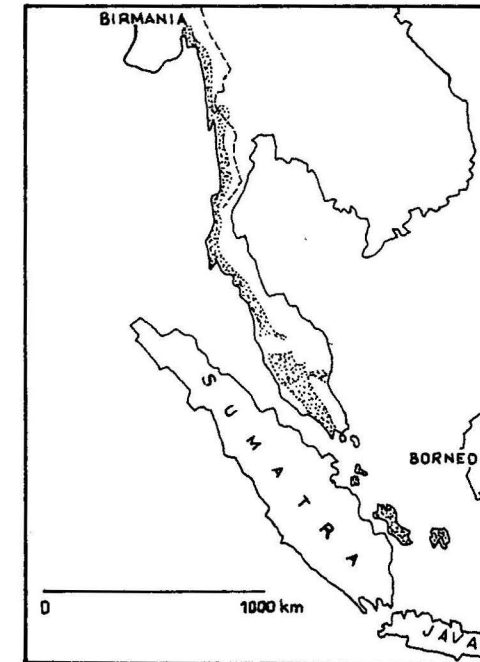


Figura 71

Área de distribución de yacimientos de estaño en Birmania, Malasia e Indonesia (W.R. Jones)

(frecuentemente con wolframita), greisen estanníferos y raramente se encuentran yacimientos de sulfuro-casiterita, *skarn* y pegmatitas de Sn.

El productor más importante en toda la región, y también de todo el mundo, es Malaya, donde se conocen miles de yacimientos y valiosísimos placeres formados como resultado de la meteorización; por ejemplo, en las regiones Perak, Selangor.

En las condiciones de clima tropical, los yacimientos primarios son alterados hasta una profundidad de 200 m, y forman un material disgregado y enriquecido, muy fácil de explotar. Estos placeres eluviales tienen una potencia generalmente hasta de 60 m, y contienen casiterita, turmalina, topacio, circón y magnetita. El contenido de casiterita es hasta de 6 kg/m<sup>3</sup>.

Además de los placeres eluviales, se explotan los placeres aluviales y marinos; en la actualidad los yacimientos primarios no son explota-

dos intensamente. Muestran particular interés los filones cuarzo-casiteríticos y greiseníticos de Sn en Tandzhong-Toalang, Malaya y también los grandes yacimientos de sulfuro-casiterita Beatriz-Main, en el mismo lugar.

### YACIMIENTOS DE BOLIVIA

En la cordillera central de los Andes, en una zona aproximada de 800 km de largo, que atraviesa todo el territorio boliviano, y se ramifica penetrando al sur en Argentina y al norte en Perú, se localiza la zona más grande del mundo donde se explotan yacimientos primarios de Sn.

La región estannífera se compone de areniscas, esquistos arcillosos y cuarcitas del Paleozoico, los cuales son cubiertos por series continentales del Mesozoico, así como areniscas y tufitas del Terciario.

Además, en el Paleógeno tuvo lugar un intenso plegamiento, acompañado con la penetración, por el norte, de granodioritas hipoabissales y monzonitas cuarcíferas y, hacia el sur, por cuerpos intrusivos pequeños de granitoides, los cuales representan etmolitos, diques y cuellos volcánicos.

Con estas intrusiones, así como con las rocas extrusivas se relacionan genéticamente los yacimientos de Sn y otros metales que se reconocen en los siguientes grupos:

- Zona de pegmatitas con Sn, W y Mo.
- Zona de yacimientos de W representados por yacimientos de cuarzo-wolframita y sulfuro-scheelita con wolframita.
- Zona de yacimientos de sulfuros de Bi.
- Zona de yacimientos hidrotermales de Sn, de temperaturas altas y medias.
- Zona de yacimientos hidrotermales de menas de Pb-Zn-Ag de temperaturas medias-bajas.
- Zona de yacimientos de Sb (con ferberita y scheelita) y Au (teleruros de Au) de temperaturas bajas.
- Zona de Hg.

Entre los yacimientos de Bolivia, se pueden reconocer dos tipos:

- Yacimientos, llamados de la serie normal, los cuales se desarrollan hacia el norte y parcialmente hacia el sur del país, y están relacionados con macizos intrusivos.

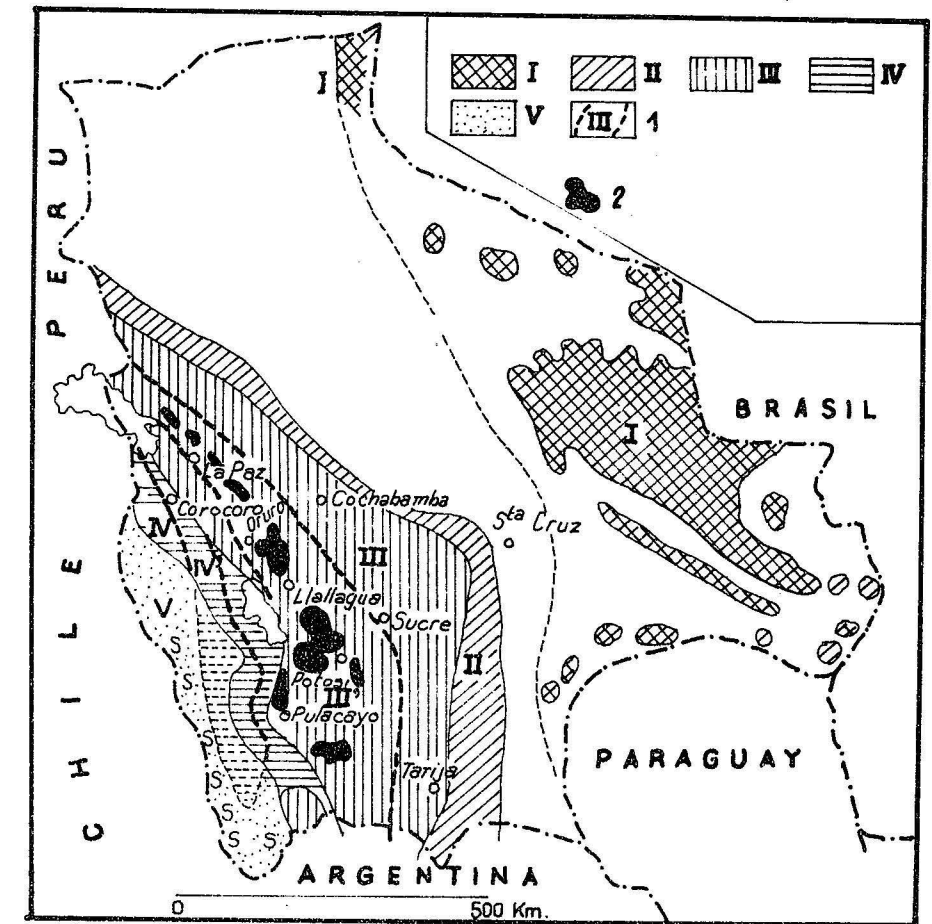


Figura 72

Esquema de zonas estructurales y metalogénicas de Bolivia  
(F. Ahlfeld)

I. Escudo brasileño: recubierto al oeste por sedimentos Cuaternarios y Terciarios (Gran Chaco) II. Zona sub-andina: Paleozoico, Mesozoico, Cenozoico en pliegues paralelos. Esta es una zona petrolífera III. Cordillera andina central y oriental. Paleozoico. Vulcanismo terciario (dacitas, latitas riolitas) y rocas graníticas terciarias (al norte de Oruro. La zona III' está ricamente mineralizada en Sn, W, Ag, Sb, Zn, Pb, Bi y Au. IV. Altiplano: Terciario y Cuaternario En IV' depósitos de Cu (Corocoro), Ag, Pb, Zn V. Cordillera andina occidental. Vulcanismo reciente: Terciario superior y Cuaternario, en su mayoría básico.

1. Límite de las zonas metalogénicas 2. Vulcanismo Terciario (al SE. de Oruro) y plutonismo granítico Terciario (al N. de Oruro)

- Yacimientos cercanos a la superficie, desarrollados en la parte central de Bolivia y relacionados con dacitas y riolitas extrusivas.

Con el primer tipo se encuentran los filones de cuarzo-casiterita con wolframita, estrechamente relacionados con pegmatitas, como los de Fabulosa y Joilqui, yacimientos de sulfuro-casiterita con turmalina y pirrotina en Caracoles y, a veces, con bismutina como en Tasna.

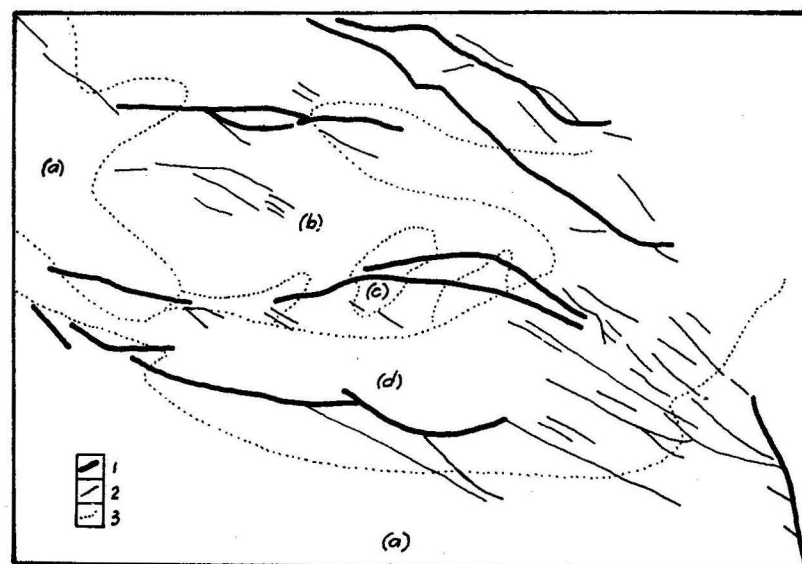
Con el segundo grupo se relacionan los yacimientos de Sn más interesantes de Bolivia y además los de mayor interés para los investigadores desde el punto de vista científico: Uncia-Llallagua, Jorol, Potosí, Colbechaca y otros. Entre todos ellos sobresale Llallagua; este yacimiento aporta el 60% del Sn boliviano. El yacimiento se encuentra en medio de un *stock* de pórfido cuarcífero, al cual atravesaron rocas sedimentarias Paleozoicas. En la figura 73, se puede apreciar el sistema de grietas, característico de este yacimiento.

Figura 73

Sistemas de fisuras de la mina de estaño de Llallagua, Bolivia

(Turneure)

(a) Cuarcita (b) Brecha porfídica (c) Brecha clástica (d) Pórfido 1. Vetas tipo San José, buzamiento 55°-75° 2. Vetas tipo Serrano, buzamiento 80°-90° 3. Contactos.



## ARSÉNICO

### GENERALIDADES

En la actualidad el arsénico es utilizado por la metalurgia, en pequeñas proporciones, que consume en determinadas aleaciones con el antimonio y el plomo. Además el As se utiliza en la industria del vidrio, así como en la producción de medicamentos. Un uso importante del As es como pesticida, en forma de arseniato cálcico, para combatir determinadas plagas en el algodón, así como las malas hierbas.

Actualmente la mayor cantidad de As se obtiene de la explotación y posterior tratamiento metalúrgico de menas arseniacales (cupropiríticas, polimetálicas, auropiríticas).

Las mayores reservas están concentradas en Suecia, México y EUA. URSS y República Popular China también poseen grandes reservas. La producción anual de arsénico blanco ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) es aproximadamente de 60 000 a 70 000 toneladas.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El As es un metal raro en la litosfera; es preferentemente calcófilo, aunque en la litosfera superior tiene una tendencia oxífila; se combina fácilmente con el S, Se y Te para formar sulfosales con varios metales pesados, preferentemente Fe, Cu, Ni y Co.

El As está situado en el quinto grupo, cuarto período del sistema periódico, su número atómico es 33 y su peso atómico de 74,92; sólo se le conoce el isótopo  $\text{As}^{75}$ .

Las rocas ígneas pertenecientes a los primeros estadios de la cristalización magmática, son pobres en As, pero en el período pegmatítico, se separa una cantidad notable de éste en forma de arsenopirita y lollinguita.

El Clarke del As en la corteza es de 0,00017.

La mayor parte del As se concentra en las etapas neumatolítica e hidrotermal.

Durante la meteorización, el As se oxida con bastante facilidad, formando distintos compuestos, pero no llega a formar concentraciones industriales importantes.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La mineralogía del As es muy rica; se conocen más de ciento veinte minerales de este metal, de los cuales tienen significado industrial los siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Arsenopirita	FeAsS	46
Lollinguita	FeAs	72,8
Rejalgar	AsS	70,1
Oropimente	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	61
Enargita	3Cu <sub>2</sub> S.As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	hasta 20-22
Escorodita	FeAsO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	27-36

El As, puede encontrarse algunas veces en la naturaleza, en forma nativa.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Todos los tipos genéticos de yacimientos de As pertenecen al grupo de los postmagmáticos; pequeñas concentraciones de As se localizan en los yacimientos de licuación y en algunas pegmatitas, pero no tienen significado industrial.

### 1. YACIMIENTOS DE SKARN

Yacimientos de contacto metasomático (tipo *skarn*) de menas arsenopiríticas y lollinguitas. Se conocen en la URSS, Asia Central; Polonia, Silesia, y Japón. Tampoco tienen una gran significación económica.

## 2. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

El tipo más importante de yacimiento para el As es el hidrotermal en sus tres rangos de temperaturas:

### Yacimientos de temperaturas altas

Formación arsenopirítica que se caracteriza por el contenido de arsenopirita (a veces la lollinguita), además de pirrotina, casiterita, wolframita, scheelita, bismutina, bismuto nativo, cobaltina y oro nativo. Entre los minerales filoneanos se encuentran cuarzo, turmalina, actinolita.

De acuerdo con la morfología de los cuerpos minerales se pueden reconocer:

- Yacimientos de vetas como los de Transbaikal, el Cáucaso y en los Urales del sur.
- Depósitos metasomáticos en rocas carbonatadas, en Asia central y Japón.
- Lentes en esquistos, como en Boliden, al norte de Suecia. De acuerdo con la composición de la mena y el tipo de impurezas, se distinguen yacimientos de: As puro, As-Cu, Cu-Au-As, Sn-Co-As, Sn-As, W-As, Bi-As.

Los yacimientos de esta formación constituyen uno de los tipos genéticos fundamentales y aportan un considerable porcentaje de la producción de As.

### Yacimientos de temperaturas medias

Formación de menas polimetálicas, los cuales se caracterizan porque en las menas, junto con la arsenopirita, tienen gran importancia la enargita, tenantita, sulfuros de cobre, esfalerita galena; los minerales filoneanos son cuarzo y carbonatos.

De acuerdo con su morfología se reconocen:

- Yacimientos de vetas, como los de Transbaikal en URSS y Butte en EUA.
- Depósitos metasomáticos en Asia central.

Por la composición de las menas se encuentran yacimientos de arsénico-polimetálicos, arsénico-oro-polimetálicos, arsénico-cobre. Estos yacimientos, en comparación, con el tipo anterior —de altas temperaturas—, tienen menor importancia.



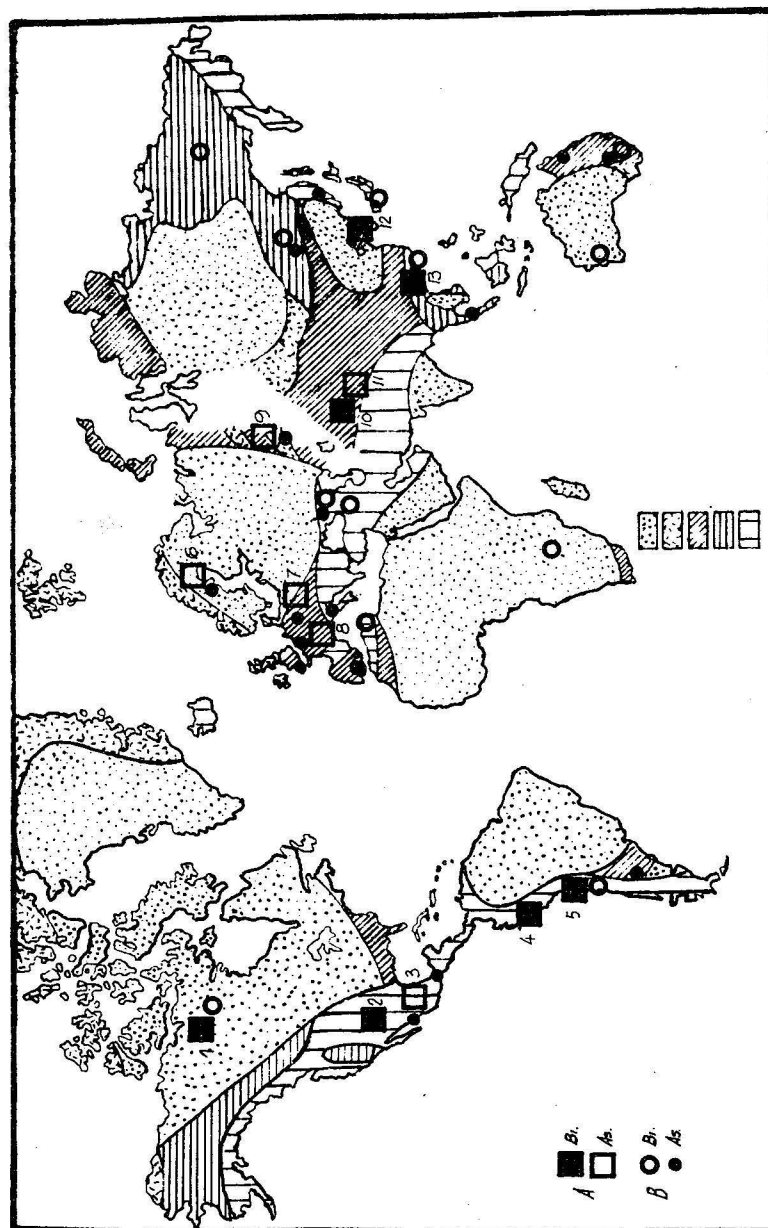


Figura 74

Principales yacimientos de bismuto y arsénico del mundo. I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimerídicas V. Zonas plegadas andeíticas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Gran Lago del Oso (Canadá) 2. Tiutiu (EUA) 3. México central 4. Cerro de Pasco (Perú) 5. Tasna (Perú) 6. Boliden (Suecia) 7. Silesia 8. Od (Francia) 9. Kochkarsk (URSS) 10. Adrasmán (URSS) 11. Asia central (URSS) 12. Sangdong de Corea 12. Yunán R.P. China. B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

### Yacimientos de temperaturas bajas

Corresponden a la formación mineral rejalgro-ropimente, con los cuales se acompañan pequeñas cantidades de arsenopirita, melnicovita, marcasita, a veces un poco de estibina y cinabrio. Entre sus minerales filoneanos se encuentran generalmente cuarzo, calcedonia, carbonatos, nacrita y caolinita.

De acuerdo con la morfología de sus cuerpos se reconocen:

- Filones, como en Armenia.
- Zonas de brechas, como en Kirguisia; bolsas, en Azeirdbaiján y Turquía.

Los yacimientos de menas en filones y zonas de brecha, generalmente cristalizan con geodas y drusas; las menas de los stock son colomórficas.

Por su composición se pueden distinguir yacimientos de arsénico puro, y de arsénico-mercurio. Las menas de rejalgro y ropimente se explotan en la URSS, Turquía, Rumanía y la República Popular China. Están ligados, a menudo, con fuertes termales que contienen As; las aguas termales de diferentes regiones donde existe actividad volcánica contienen hasta 400 mg// de arsénico y se considera que poseen propiedades terapéuticas.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Del Precámbrico encontramos el gran yacimiento sueco de Boliden; en la época Herciniana, muchos yacimientos de URSS, como son los de Asia central y el sur de los Urales; Silesia en Polonia y los yacimientos de Francia.

De la época Kimerídica se encuentran yacimientos en URSS y República Popular China y de la Alpina, los yacimientos del Cáucaso y Transbaikal, en URSS; Turquía, Japón, México y los estados occidentales de EUA.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación nos referiremos a las características geológicas del yacimiento más importante de arsénico, en el mundo.

## YACIMIENTO BOLIDEN, SUECIA

El yacimiento Boliden se encuentra al norte de Suecia y presenta lentes de menas sulfúricas en medio de cuarcitas andalusíticas-sericíticas, formadas como resultado del metamorfismo de efusivos ácidos del Precámbrico.

Los lentes tienen rumbo latitudinal y buzamiento brusco hacia el sur, y se localizan cerca del contacto de las cuarcitas sericíticas con los esquistos negros. El lente principal se exploró, de acuerdo con su dirección, hasta 600 m, con una potencia promedio de 19 m (aunque en las zonas de ensanchamientos llega hasta 40 m). La mineralización alcanzó 170 m, en profundidad.

En el proceso de meniferación se reconocen tres estadios:

- Arsenopirita, pirita, calcopirita, esfalerita, cobaltina y, entre los minerales meníferos, cuarzo y apatito. Además sulfuros de plomo antimonio y bismuto. Los minerales de este estadio forman lentes.

- Calcopirita, telururos de oro y bismuto, seleniuros, oro nativo en forma de vetillas, las cuales coinciden con diques de lamprófidos, que cortan las menas del primer estadio.

- Pirita, y algo de calcopirita, los cuales forman cuerpos grandes.

En correspondencia se reconocen menas de Cu-As con impurezas de Au (el principal tipo de mena contiene 10% de As, 2,25% de Cu, 30% de S, 17 g/t de Au, 70 g/t de Ag y un poco de Co, Bi y Se; además, menas de Cu ricas en Au y Te y menas piríticas con pequeños contenidos de Cu.

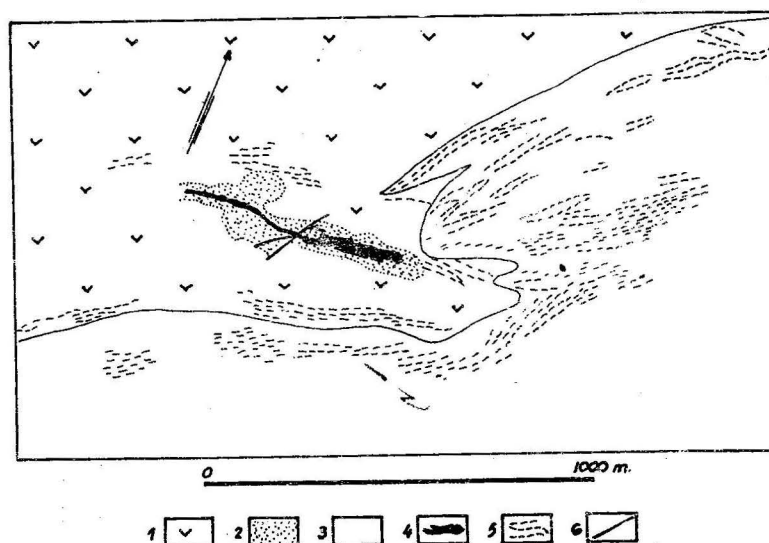
Las reservas de uno de los lentes principales se eleva a 700 000 toneladas. Las anomalías geofísicas han ayudado a detectar hasta treinta cuerpos lenticulares, de los cuales algunos son grandes. El yacimiento es hidrotermal de altas temperaturas, formado a pequeñas profundidades y por analogía similar a los yacimientos de piritas de los Urales; genéticamente está relacionado con las raíces de los efusivos en medio de los cuales yace y sufrió junto con ellos, los procesos del metamorfismo.

Figura 75

Mapa geológico del yacimiento Boliden, Suecia.

(O. Edman)

1. Rocas vulcanógenas 2. Zona de alteración 3. Filitas 4. Mena 5. Anomalías eléctricas 6. Fallas



## BISMUTO

### GENERALIDADES

El bismuto se consideró, durante mucho tiempo, como una variedad del plomo o del estaño y fue en el siglo XVII que se aisló como un metal independiente.

El Bi se obtiene fundamentalmente como subproducto del proceso de refinación del plomo. La temperatura de fusión del Bi es 271°C, y las aleaciones del metal con el Pb, Sn, Cd y Hg tienen una enorme importancia en la industria tipográfica y del libro en general.

La más ligera de todas las aleaciones del Bi tiene una temperatura de fusión de 47°C, y en el punto eutéctico tiene una composición de 40,95% de Bi, 22,10% de Pb, 10,65% de Sn, 8,20% de Cd y 18,10% de In.

Pequeñas cantidades de Bi se utilizan en la medicina y en la producción de reactivos. El Bi ha comenzado a tener importancia, en la actualidad, aplicado a la industria de la energía atómica y en relación con este hecho, se ha despertado un gran interés por su búsqueda.

La producción minera en 1972 fue aproximadamente de 8,5 millones de libras. Perú es el principal productor del mundo; le siguen en importancia México y Bolivia. Perú obtiene el Bi a partir del Pb, Cu y Ag; Bolivia, básicamente a partir del Cu y México a partir del Pb.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Bi está situado en el quinto grupo, sexto período de la tabla periódica de los elementos; su número atómico es 83 y su peso atómico es 208,98. En la naturaleza se conoce un solo isótopo de Bi: el  $\text{Bi}^{209}$ . El Clarke de Bi en la corteza es del orden de  $10^{-7}$  y su contenido en las rocas ígneas, es despreciable.

Al igual que el As y el Sb se acumula durante los procesos neumatolíticos e hidrotermales, y es un elemento preferentemente calcófilo; su mineral más importante, la bismutina, es un sulfuro.

Durante los procesos de meteorización, el Bi forma varios minerales secundarios, ninguno de los cuales tiene importancia económica.

### MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Las asociaciones más características del Bi son las siguientes: Bi con W, Sn, As y Mo en los yacimientos hidrotermales de altas temperaturas, relacionados con los granitos. Bi con Cu; Bi con Co, Ni, Ag, U; Bi con Au, en yacimientos de temperaturas medias relacionados con granitoides moderadamente ácidos.

Se conocen hasta cincuenta minerales con contenido de Bi; de esta cantidad muchos son sulfosales compuestas de Bi con Pb y Cu, telururos, carbonatos de Bi y silicatos raros. Entre ellos tienen significación industrial los siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Bismuto nativo	Bi	95-99
Bismutina	$\text{Bi}_2\text{S}_3$	* 81,2
Emplekita (y otros sulfobismutitos de Cu)	$\text{CuBiS}_2$	62,0
Galenobismutita (y otros sulfobismutitos de Pb)		55
Bismutita	$\text{Bi}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})$	87

### TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Todos los tipos genéticos de yacimientos pertenecen al grupo de los postmagmáticos. Entre ellos se pueden ver:

#### 1. YACIMIENTOS METASOMÁTICOS DE CONTACTO, TIPO SKARN

De bismuto con meniferación hidrotermal, representada por Bi, Sn, Mo, As y W.

A este tipo pertenecen algunos yacimientos de Asia central (Bi, con As y Sn); Sangdong, en República de Corea (Bi con W); Baitca, en Rumania (Bi con Mo). Las dimensiones de estos yacimientos no son grandes.

## 2. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Este es el tipo genético más importante de yacimientos para el bismuto.

### *Yacimientos de temperaturas altas*

- Filones de cuarzo-wolframita y greisen con arsenopirita, casiterita y bismutina. Ejemplo: yacimientos del Transbaikal en URSS y en el SE de la República Popular China.
- Formación sulfuro-casiterita con bismutina formada a pequeñas profundidades. Este es un tipo muy productivo para el Bi, y en este grupo se encuentran los yacimientos de Tasna en Bolivia, y otros.

### *Yacimientos de temperaturas medias*

- Yacimientos de Bi y Cu los cuales se explotan para la extracción de ambos metales. Se localizan en Adrasman, RSS de Tadzhikia, y Bohegiano en la provincia de Toscana, en Italia.
- Yacimientos de Au-Bi como Aldán en Australia.
- Yacimientos de la "formación de 5 elementos" (Ni, Co, As, Bi, U) como en los montes Metálicos y en Canadá;
- Yacimientos de piritas con mezcla de Bi como los de Cerro de Pasco, en Perú.

## 3. PLACERES

De bismuto y bismutita asociados con los yacimientos madres, los cuales se localizan en Transbaikal, URSS, Bolivia y el sur de la República Popular China.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Concentraciones significativas de Bi se conocen en los yacimientos Precámbricos de Canadá, en los yacimientos Hercinianos de URSS, Australia y montes Metálicos. (Ver figura 74.)

Los yacimientos del Kimeridgiense se conocen en la URSS, península de Corea y el SE de la República Popular China.

Las concentraciones más significativas se encuentran en territorios de época Terciarias, en Bolivia, Perú, México, EUA, Japón, Italia.

Las provincias más ricas son: NW de Canadá, Bolivia, Montes Metálicos y Perú.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación se describirá, en forma general, un yacimiento representativo en bismuto, en el mundo.

### YACIMIENTOS TASNA, BOLIVIA

Este yacimiento fue el principal productor de Bi en el mundo. La región se compone de esquistos arcillosos y cuarcitas del Silúrico, los cuales son cortados por diques de diorita cuarcífera y alterados a *cherts* de cuarzo-turmalina bajo la acción de un macizo de granito no aflorado.

Cerca de los contactos de los diques de diorita cuarcífera, yacen los cuerpos minerales ricos en casiterita y wolframita; al E de ellos, a una altura de 4 200 a 4 500 m se localizan cinco vetas paralelas con elevados contenidos de Bi.

Según su dirección los filones se extienden de 500 a 600 m, con una potencia de 0,6 a 2 m, y yacen en medio de cuarcitas turmalinizadas. Los filones se componen de cuarzo (10%) y minerales meníferos (90%) fundamentalmente sulfuros. Entre los minerales meníferos podemos reconocer la bismutina, calcopirita, pirrotina, y pirita, con mezcla de cristales grandes de wolframita, arsenopirita y pequeñas cantidades de esfalerita, estannina, jamesonita y bismuto nativo.

Hasta una profundidad de 60 m, la mena está asociada con mucha bismutita; las menas primarias contienen de 2 a 8% de Bi.



## ANTIMONIO

### GENERALIDADES

En la antigüedad el antimonio era utilizado como colorante; sus aplicaciones industriales comenzaron en el siglo xx.

El Sb forma parte de la composición de una serie de aleaciones las cuales se caracterizan por su rigidez y dureza. La propiedad del Sb de dilatarse en lugar de contraerse cuando está sometido a procesos de enfriamiento, facilita su utilización en la fabricación de aleaciones metálicas para tipos de imprenta, etcétera.

De las aleaciones del Sb las más importantes son las de Sb-Pb y Sn-Sb; las primeras se utilizan en placas de baterías de acumuladores y revestimiento de cables eléctricos. Otros compuestos y aleaciones son: Pb-Sb-Cu (metal Britannia); Pb-Sn-Sb (peltre); Sn-Sb-Cu-Zn (metal Queen) y Cu-Sb-Zn-Fe (Sterline).

La producción de Sb fue en 1972, aproximadamente de 69 000 toneladas de menas. La República de África del Sur, la República Popular China, Bolivia y la URSS, son los mayores productores. También produce México, Yugoslavia, Turquía y otros países.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Al igual que el As y el Bi, el Sb es un componente raro de la litosfera. Es un elemento calcófilo, preferentemente, aunque en la litosfera superior tiene una tendencia oxífila.

El Sb se sitúa en el quinto grupo y quinto período de la tabla periódica; su número es 51 y su peso atómico 121,75; se le conocen dos isótopos en la naturaleza.

Isótopos	%
Sb <sup>121</sup>	56
Sb <sup>123</sup>	44

El Clarke de Sb en la corteza es del orden de  $10^{-5}$ .

El contenido de Sb en las rocas ígneas es muy bajo (del orden  $10^{-5}$ ) y sólo en las rocas básicas se aprecia un ligero incremento (del orden de  $10^{-4}$ ).

Al igual que el bismuto y el arsénico, el antimonio se concentra principalmente en el proceso hidrotermal en forma de sulfuros y sulfosales.

Durante la meteorización, el Sb forma varios óxidos ninguno de los cuales llega a constituir yacimientos minerales de importancia económica.

### MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Entre los principales minerales del Sb se encuentran los siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Antimonita	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	71,3
Tetraedrita	Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	hasta 15-20
Boulangerita	Pb <sub>5</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub>	25,7
Jamesonita	Pb <sub>4</sub> FeSb <sub>6</sub> S <sub>14</sub>	29,5
Servantita	Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	75,2-83,5
Valentinita	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Estibiconita	Sb <sub>3</sub> O <sub>6</sub> OH	

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Las concentraciones de Sb sólo se conocen en los yacimientos hidrotermales, y dentro de ellos las concentraciones industriales están localizadas sólo en los de bajas temperaturas.

De acuerdo con la morfología de los cuerpos minerales se reconocen filones y zonas de capas brechadas y lentes en calizas silicificadas.

### 1. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Sobre la base de sus condiciones de formación y sus características principales, se pueden reconocer dos formaciones minerales:

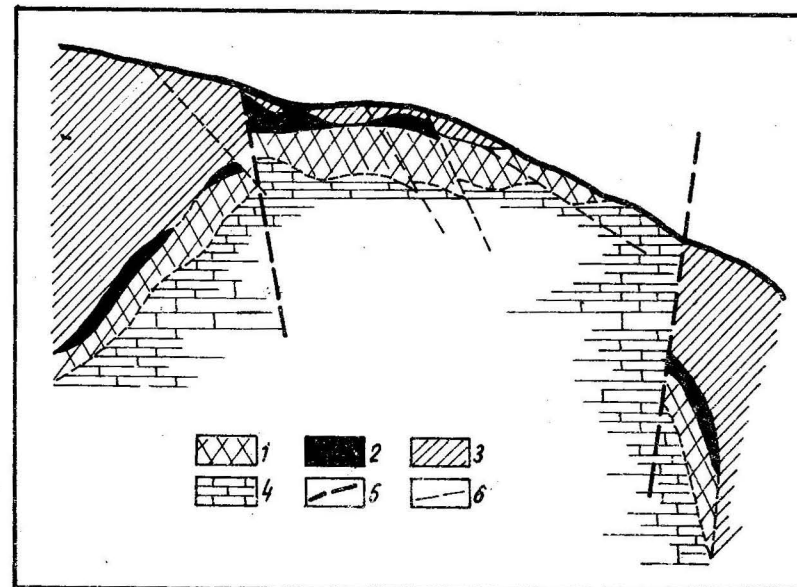
- Formación de yacimientos de cuarzo-fluorita-antimonita, de profundidades moderadas, con composición mineralógica

Figura 76

Perfil transversal del cuerpo menífero del yacimiento Kadamdzhan, URSS

(A. K. Poliakov)

1. Cuerpo menífero 2. Mena industrial 3. Esquistos 4. Calizas 5. Follas primarias 6. Fallas secundarias.



simple (cuarzo, fluorita, antimonita, a veces cinabrio), la cual yace, generalmente entre rocas sedimentarias y metamórficas, excepcionalmente entre rocas intrusivas.

Este tipo está representado por los mayores yacimientos, como los del sur de la República Popular China, el norte de Bolivia, México y los Balcanes.

En la URSS pertenece a este tipo, el yacimiento Kadamdzhan en Asia central.

- Formación de yacimientos de ferberita-scheelita-antimonita, en pequeñas profundidades, frecuentemente en estrecha relación con emanaciones minerales calientes, en regiones de actividad vulcanógena joven.

Las menas de los yacimientos de este tipo tienen una composición compleja y contienen, además de los minerales señalados, wolframita, scheelita, telururos de oro y otros minerales. A este tipo pertenecen los yacimientos de Japón, Italia; una parte de los yacimientos de México, Bolivia, y el yacimiento Atolia en California, EUA. En URSS se conocen en el Transbaikal del este y en el Cáucaso.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

No se conocen yacimientos de Sb en el Precámbrico, ni tampoco en el Paleozoico inferior y medio; en la época Herciniana se conocen algunos en la URSS.

La época Kimeridgiense presenta yacimientos en URSS y también grandiosos yacimientos en el SE de la República Popular China (algunos de edad Terciaria).

La mayor parte de los yacimientos, son grandes, y se localizan en la época Terciaria; como los yacimientos de Italia, Yugoslavia, Turquía, Cáucaso, Argelia, Japón, sur de la República Popular China, México, Bolivia, los estados occidentales de EUA, Perú y Chile.

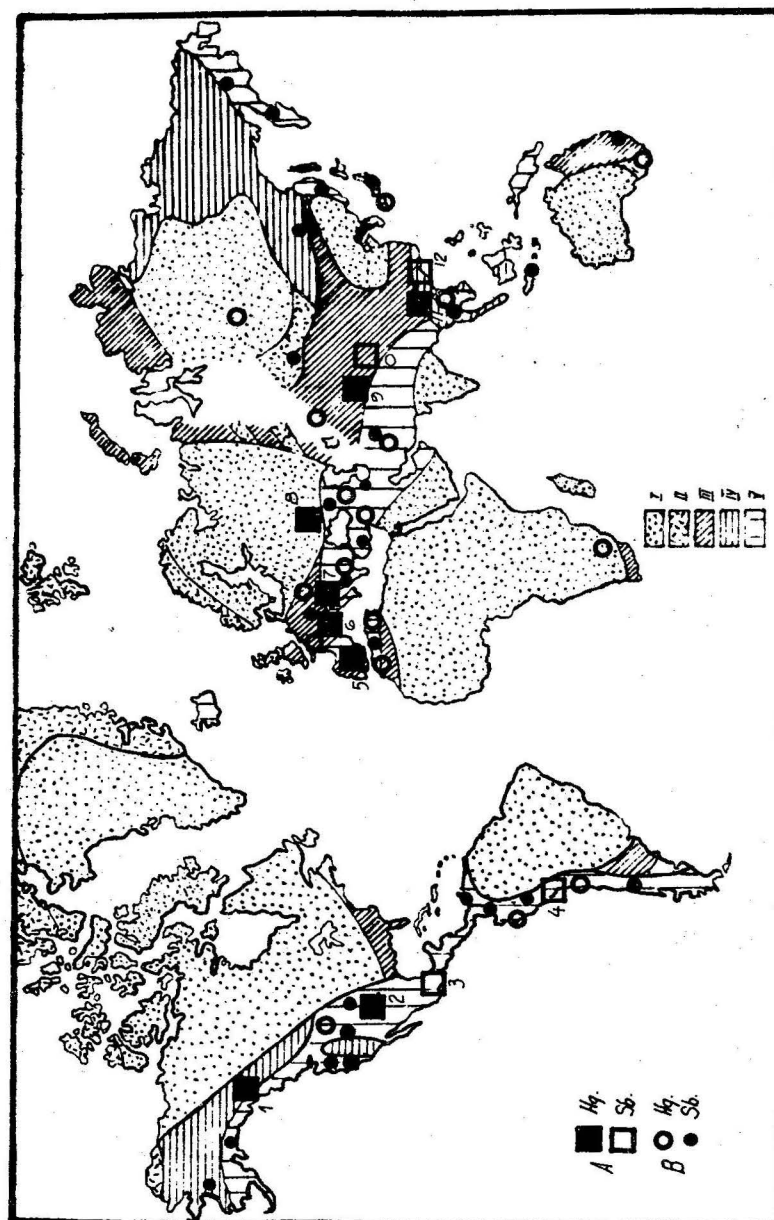


Figura 77

Principales yacimientos de antimonio y mercurio del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercinianas IV. Zonas plegadas kimeridgianas V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Pinchi Lake (Canadá) 2. Huitsuko (México) 3. San Luis Potosí (México) 4. Charolgue-Carmen (Perú) 5. Almadén (España) 6. Monte Amiata 7. Idría (Yugoslavia) 8. Nikitovka (URSS) 9. Jaidarkán (URSS) 10. Kadangzhai (URSS) 11. Kue-Choi, R.P. China 12. Hsi-Kuang-Shan, R.P. China B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos las principales características geológicas de uno de los yacimientos más importantes de antimonio, en el mundo.

### YACIMIENTO HSI-KUANG-CHAN, REPÚBLICA POPULAR CHINA

Este yacimiento se encuentra en Hunán, en el SE de la República Popular China, cerca de la ciudad de Changsha, en los límites de un campo de Sb-Hg, el cual se extiende en una longitud mayor que 700 km.

Calizas, esquistos y arseniscas del Paleozoico (Silúrico-Carbonífero), con una potencia cerca de 500 m, yacen en el flanco de un anticlinal, que ha sido erosionado en su núcleo y donde sobresalen capas inferiores de brecha silícea, que se formó durante la trituration y metasomatismo de las calizas silúricas.

La forma de los cuerpos minerales es de capa, y la potencia del depósito es más de 50 m; en el techo se localizan los esquistos que sirvieron de "pantalla". La brecha silícea está atravesada y cementada por estibinita en forma de masa compacta y cristales de hábito acicular.

En algunas partes, sobre la mineralización de Sb se sobrepone una capa más tardía de Hg, en forma de finas vetillas de calcita con cinabrio y pirita.

El yacimiento es de filones y *stockworks* con lentes y venillas de potencia de 0,5 a 1 m y ricos en estibinita (el contenido de Sb es de 15 a 20%) con contenido promedio de 6%. La meniferación se desarrolla en un área superior, a los 20 km<sup>2</sup>; las reservas del yacimiento son fabulosas: 1,5 millones de toneladas de menas ricas.

La meniferación está relacionada genéticamente con granitoides del Jurásico superior o del Terciario inferior. Otros depósitos se encuentran en Yunán, Kuenchán, Kuangtung, Sechuán y Kuangsi.

## MERCURIO

### GENERALIDADES

En la edad antigua se conoció el mercurio en China y en Grecia. En el año 300 a.n.e. los griegos explotaron los grandes yacimientos españoles de Almadén.

Actualmente, el Hg se utiliza en la industria farmacéutica, en la fabricación de espejos, instrumentos de medición, etc. Su gran utilización e importancia está en la obtención de Au, Ag, Cd, Pb y Bi a partir de sus menas primarias, en los procesos de amalgamación. En los últimos tiempos, el Hg ha comenzado a utilizarse en las turbinas.

El principal país productor del mundo, y a su vez el de mayores reservas conocidas, es España, el cual posee el 75% del total mundial fundamentalmente en un solo yacimiento: Almadén. Importantes reservas se localizan en Italia, EUA. República Popular China, Canadá, Perú y México. En 1972 se produjeron 274 000 *flask*.<sup>1</sup>

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Hg está en el segundo grupo y sexto período de la tabla periódica. Tiene número atómico 80 y peso atómico de 200,6 y se le conocen 6 isótopos en la naturaleza, entre los cuales los más difundidos son:

Isótopos	%
Hg <sup>202</sup>	29,8
Hg <sup>200</sup>	23,1

<sup>1</sup> Medida de peso cuya unidad equivale a 76 libras de mercurio. (N. del E.)

Entre los elementos calcófilos, cuyos potenciales de ionización son relativamente altos en comparación con otros metales, el mercurio ocupa el primer lugar; por esto, la facilidad del mercurio para recuperarse de distintas combinaciones con formación de metales nativos en la naturaleza. El Hg es más "noble" que la Ag y el Au; este potencial elevado determina muchas peculiaridades geoquímicas en este metal.

El Clarke de Hg en la corteza, es del orden de  $10^{-6}$  y su difusión en las rocas ígneas también es extremadamente bajo.

Como regla general, los minerales de Hg se concentran en el proceso hidrotermal, y alcanzan su mayor punto en el rango de las temperaturas bajas.

Según los cálculos, sólo el 0,02% del Hg se encuentra en los yacimientos y queda el restante (99,98%), en forma dispersa.

### MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Se conocen hasta veinte minerales de Hg pero sólo uno posee significado industrial:

Mineral	Composición química	Contenido %
Cinabrio	SHg	86,2

Tienen menor importancia la livingstonita SHg<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> y la mena blanca de Hg, shabasita que contiene hasta 17% de Hg.

### TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Las concentraciones industriales de Hg pertenecen al tipo de yacimientos hidrotermales de temperaturas bajas, relacionadas genéticamente con fuentes intrusivas y vulcanógenas. Ejemplos de esta relación de yacimientos de Hg con el magmatismo se establecen excepcionalmente, puesto que, generalmente, los yacimientos están bastante alejados de sus fuentes.

En algunos casos es posible establecer la relación entre estos yacimientos y los granitoides, de composición moderadamente ácida y sus derivados alcalinos.



En muchos lugares los campos de Hg-Sb coinciden espacialmente con campos de desarrollo de hiperbasitas, y coinciden con zonas de fallas regionales profundas. Es necesario señalar que esta relación de las hiperbasitas con los yacimientos de Hg es sólo estructural, puesto que, a lo largo de estas fallas regionales, generalmente tienen lugar intrusiones más jóvenes de granitoides y rocas alcalinas con las cuales se relaciona, estrechamente, la mineralización de Sb-Hg, desde el punto de vista genético.

De acuerdo con la morfología de los cuerpos se reconocen:

- depósitos de capa —tipo Almadén, Idria, Nikitovsk, Jaidarkán— con cinabrio y con silicificación de areniscas y calizas,
- zonas de vetas y *stockworks*, como es el caso de monte Amiata.

Entre las rocas encajantes de los yacimientos de Hg las más importantes son las areniscas y las cuarcitas, en las cuales se concentra el 75% de las reservas mundiales. El 23% se obtiene de las reservas en calizas, generalmente brechadas y silicificadas, y sólo un 2% proviene de esquistos y otras rocas.

Los minerales principales en los yacimientos de Hg son los de cinabrio, en asociación con pirita, marcasita, rejalgar, arsenopirita de temperaturas bajas y también menas grises, galena, esfalerita, calcopirita y telururos de oro. Entre los minerales filoneanos se localizan generalmente el cuarzo, calcedonia, ópalo, calcita, dolomita, barita, alunita, fluorita, zeolitas, caolinita y nacrita.

De acuerdo con las asociaciones mineralógicas se pueden distinguir las siguientes formaciones:

- Yacimientos de cinabrio y Hg puro, los cuales se explotan especialmente para la obtención de Hg y también constituyen el tipo principal; como los yacimientos de España, Italia, Yugoslavia, Canadá, EUA, México y la URSS.
- Antimonita-cinabrio con yacimientos en la República Popular China y la URSS.
- Yacimientos de Hg, polimetálicos (algunos yacimientos en la URSS, y California en EUA).
- Oro-mercurio con telururos de Au (pequeños yacimientos en Chile).
- Mercurio-arsénico, con los que, junto al cinabrio, se concentran cantidades significativas de rejalgar y oropimente.

## 1. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Sobre la base de las condiciones geológicas de formación se pueden reconocer dos subtipos de yacimientos:

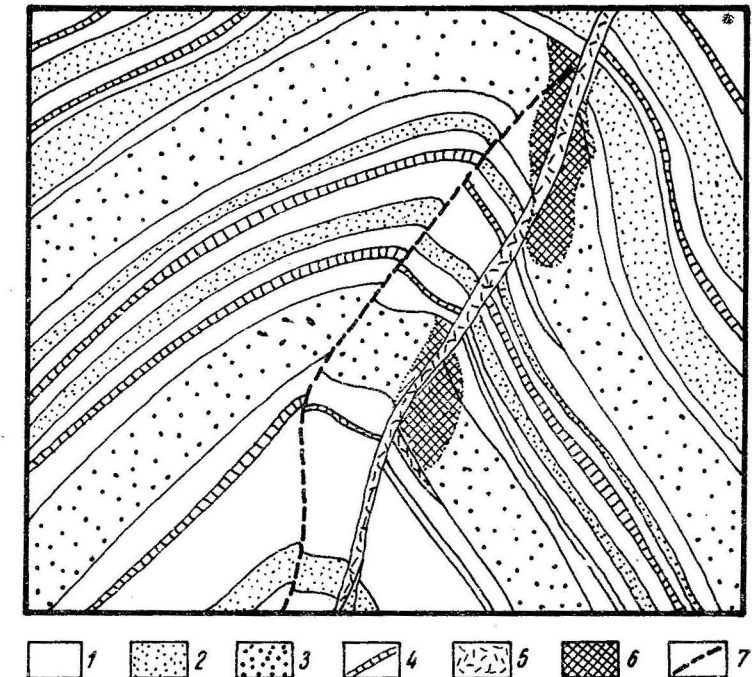
- El primer tipo de yacimientos se forma a profundidades moderadas, yaciendo entre rocas sedimentarias (areniscas, cuarcitas, calizas cuarcificadas) y en relación con granitoides, moderadamente ácidos, no descubiertos a la superficie.

A este tipo de yacimientos pertenecen Almadén, Idria, Avala, Nikitovsk. Es característica en ellos una composición mineralógica sencilla, y la meniferación se mantiene a profundidades de 700 m y más.

Figura 78

Perfil de la cúpula Sofiiski del yacimiento Nikitovsk, URSS  
(S. D. Stupak)

1. Esquistos 2. Areniscas 3. Areniscas Sofiiski y Chegarniskie 4. Calizas 5. Filones Cortantes 6. Regiones mineralizadas 7. Fallas



- El segundo tipo se forma a pequeñas profundidades y en condiciones cercanas a la superficie, en relación con la actividad volcánica y fuentes minerales termales.

La edad de estos yacimientos es Cuaternario o actual y para ellos es característica la composición compleja de la mena, estructuras colomórficas y carácter criptocristalino del cinabrio (a menudo no es visible a simple vista) y disminución brusca de la mineralización con la profundidad.

Estos yacimientos descansan entre rocas efusivo-sedimentarias del Terciario y Cuaternario o en tufas calcáreas. A este tipo pertenecen: monte Amiata en Italia y, también, Steamboat Spring, en EUA.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

No se conocen yacimientos Caledonianos de Hg. De la época Hérciniana se conocen una serie de yacimientos en la URSS, aunque algunos geólogos consideran estos yacimientos de la época Kimeridgiense o de la Alpina.

Los mayores yacimientos de Hg se consideran Postkimeridgianos o Alpinos y otros yacimientos son del Cuaternario. La provincia más productiva es la del mar Mediterráneo, la cual encierra los grandes yacimientos de España, Italia, Yugoslavia y Argelia. También son importantes los de Turquía y Checoslovaquia.

Otra provincia en importancia es la del Pacífico, la cual comprende algunos yacimientos de URSS, Japón y también en República Popular China.

La tercera provincia está situada en Asia central.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos las principales características geológicas del yacimiento más importante del mundo.

### YACIMIENTO ALMADÉN, ESPAÑA

Este yacimiento se encuentra a 150 km al SW de Madrid, en las laderas de Sierra Morena. Aunque hace muchos años que se explota, todavía contiene grandes reservas de minerales de mercurio.

La región está compuesta de cuarcitas y esquistos bituminosos del Silúrico y Devónico, atravesados por diques de pórfidos cuarcíferos y diabasas. Los cuerpos minerales tienen forma de capas y coinciden con tres capas de cuarcitas porosas.

La potencia media de las capas minerales es de 10 a 25 m con una longitud según su rumbo de 300 m, y una meniferación que llega hasta profundidades mayores a los 700 m. La mena se compone de cinabrio, pequeñas cantidades de pirita, barita, carbonatos, cuarzo y mercurio nativo. Estas se depositaron en las cuarcitas sericitizadas y parcialmente en rocas posteriores.

La mena contiene 2 a 5% de Hg y en algunos lugares como en el cuerpo San Pedro, alcanza hasta 20%.

Figura 79

Perfil del yacimiento de mercurio Almadén, España  
1. Mena 2. Areniscas 3. Cuarcitas 4. Rocas ígneas



## ALUMINIO

### GENERALIDADES

El aluminio se obtuvo por primera vez, en el año 1825, a partir de la bauxita. En el siglo xx su utilización ha tenido un incremento considerable; principalmente por las ventajosas propiedades físicas y químicas de este metal: no se oxida a la intemperie, tiene bajo peso específico y su resistencia mecánica es relativamente grande.

Las aleaciones de Al con Cu, Mg, y Mn —**duroaluminio**— se utilizan tanto en la industria ligera, en general, como en la de construcciones. En la actualidad tiene un gran interés práctico la aleación del Al con elementos de las tierras raras, que le permite resistir elevadas temperaturas.

Las aleaciones de Al tienen una enorme importancia para la industria de la construcción de aviones, automóviles y ferrocarriles.

En 1972 la producción mundial de bauxita fue aproximadamente de 69 millones de toneladas, y corresponden a Australia y Jamaica los primeros lugares. Producciones importantes se reportan en Surinam, Guyana, URSS, Francia, Guinea, Grecia, Yugoslavia y Hungría.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Al está ubicado en el tercer grupo y tercer período del sistema periódico de los elementos; posee número atómico 13 y peso atómico de 26,98, se le conoce un solo isótopo:  $\text{Al}^{27}$ .

Como sabemos, el Al es el metal más abundante en las rocas de la parte superior de la corteza terrestre (*sial*). El Al es totalmente litófilo y falta casi por completo en las partes profundas de la tierra.

El contenido de Al en las rocas es:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	0,45
Rocas básicas	8,76
Rocas medias	8,85
Rocas ácidas	7,70
Rocas sedimentarias	10,45

El Clarke es del orden 8,05

En la litosfera superior, el Al siempre aparece combinado con el oxígeno. En los primeros cristalizados magmáticos, los contenidos de Al se obtienen a partir de las plagioclasas y espinelas; también en las etapas posteriores, los feldespatos son minerales principales de Al.

Las rocas de la serie alcalina, contienen más Al que las calco-alcalinas; además de los feldespatos, las micas contienen Al así como otros minerales, aunque en proporción mucho menor. En resumen, bajo condiciones endógenas, el Al se concentra mucho más en las rocas alcalinas ricas en leucita y nefelina y, también, en determinadas rocas como anortositas, y durante el proceso de alunitización, el cual está relacionado con la variación hidrotermal de capas vulcanógenas.

En condiciones exógenas, el Al permanece disuelto en soluciones, tanto ácidas (pH menor de 4) como alcalinas (pH mayor de 9), y precipita el hidróxido a un pH aproximado a 7. En esas condiciones, el Al puede unirse al  $\text{SiO}_2$  y al  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y bajo determinadas condiciones físico-químicas y geológicas formar minerales arcillosos en las cortezas de intemperismo.

El Al se concentra en los procesos exógenos, a partir de la meteorización de rocas alcalinas, ácidas, a veces básicas (*trapps*), formando yacimientos residuales; otras veces el Al migra en forma de soluciones (verdaderas y coloidales), y se deposita en cuencas marinas o lacustres, formando yacimientos sedimentarios.

### MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La bauxita es la principal fuente de obtención de aluminio. Además, también se utilizan en la actualidad las rocas nefelínicas y leucíticas, menas alunínicas, así como esquistos sillimaníticos, cianíticos y andalusíticos.

Unidos a éstos, se encuentran otros minerales, los cuales forman en su mayoría, parte de las arcillas:

Minerales	Composición química	Contenido de $Al_2O_3$ %
Diaspora	$HAIO_2$	84,97
Bohemita	$AlOOH$	84,9
Hidroargilita (gibbsita)	$Al(OH)_3$	65,4
Nefelina	$(AlSiO_4)Na$	34,0
Leucita	$(AlSi_2O_6)K$	23,5
Alunita	$Al_3K(SO_4)_2(OH)_6$	37,0
Caolinita	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	hasta 40
Sillimanita	$Al(SiO_4)O$	63,1
Distena	$Al_2(SiO_4)O$	63,1
Andalusita	$Al_2(SiO_4)O$	63,1

La bauxita representa una mezcla de minerales de Al, entre los cuales desempeñan un papel fundamental los óxidos hidratados de Al, diaspora, bohemita e hidroargilita.

Tienen menor importancia en la composición de la bauxita, los óxidos e hidróxidos de hierro, sílice, óxido de titanio, carbonato de calcio y magnesio, etcétera.

De acuerdo con su composición mineralógica, tendremos bauxitas hidroargílicas, bauxito-diasporo-bohemíticas, etc.

Para el tratamiento metalúrgico de las bauxitas, se deben observar las siguientes normas:

- que el contenido de  $Al_2O_3$  no sea menor a 45%;
- que el módulo de sílice ( $Al_2O_3/SiO_2$ ) no sea menor a 2,6 ni mayor a 3,4;
- que el coeficiente de alcalinidad ( $Na_2O + K_2O/Al_2O_3$ ) sea cerca de 1;

Sobre la base de estas normas se establecen menas de distintas calidades o grados.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los yacimientos de Al más importantes se forman en el ciclo exógeno. Se reconocen dos tipos genéticos básicos:

### 1. YACIMIENTOS DE INTEMPERISMO

En estos yacimientos, la bauxita representa productos residuales de la meteorización laterítica de rocas aluminosilicadas en condiciones de clima tropical, con un periodo de seca y otro de lluvia.

Son característicos los cuerpos minerales en forma de capas y las transiciones lentas de la mena hacia las rocas sobre las cuales ella descansa. En los yacimientos de Brasil, República Popular de Guinea, África del Sur, Guyana y Ghana, las rocas madres son alcalinas, o ácidas. En India las rocas son efusivos básicos (*trapps*) en la meseta del Dekán. Los yacimientos de bauxita del tipo descrito son de edad Terciario y Cuaternario.

### 2. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

A este tipo pertenecen los yacimientos más importantes de la URSS. Se pueden reconocer dos subtipos: yacimientos geosinclinales y de plataformas.

#### Yacimientos geosinclinales

Para los yacimientos de este tipo son características las siguientes cuestiones:

- los yacimientos están relacionados con sedimentos cercanos a la costa; descansan en capas potentes de rocas carbonatadas,
- los horizontes de bauxita se sitúan transgresivamente en capas carbonatadas,
- los cuerpos minerales tienen la forma de capas.

Algunas capas aisladas de bauxitas pueden extenderse por varios kilómetros y las capas en sentido general por decenas y centenas de km. Se observa una extensión continua de las capas de bauxita a lo largo de toda la zona geosinclinal. En dirección vertical las bauxitas desaparecen bruscamente:

- la morfología de los cuerpos minerales repite el relieve de las calizas. Si ellas están carsificadas, las oquedades están enriquecidas;



- en los yacimientos de este tipo las capas de bauxita y las rocas en las cuales ellas descansan están dislocadas;
- las menas son diaspóricas y bohemíticas;
- las menas pueden haber sufrido procesos de metamorfismo.

Este tipo de yacimiento tiene gran importancia en URSS y los países de la cuenca del Mediterráneo.

A ellos pertenecen los yacimientos dispersos en la región bauxítica del norte de los Urales, y otros yacimientos en Siberia Occidental, España, Francia, Italia, Yugoslavia, Rumania, Grecia, Hungría, etcétera.

#### Yacimientos de plataformas

Las características principales de estos yacimientos son:

- los yacimientos se relacionan con series de carácter continental, fundamentalmente *facies* lacustres-pantanosas;
- la forma y la morfología de los cuerpos minerales está determinada por el carácter de las depresiones antiguas que conforman el relieve; en estas depresiones se localizan los cuerpos minerales. Se reconocen yacimientos de dolinas, depresiones u hondonadas (lacustres) y cársicos;
- en los yacimientos de dolinas son característicos los cuerpos en forma de capas; en los lacustres los cuerpos tienen forma de lente, tanto por su área como por su espesor. En los cársicos los cuerpos tienen formas complejas e irregulares: lentes, bolsas, etcétera;
- los cuerpos minerales y las rocas yacen en concordancia, frecuentemente en posición horizontal;
- en la composición de la mena, se aprecia el desarrollo de la hidroargilita (gibsita). Sólo por excepción, en los yacimientos antiguos, se encuentran monohidratos de Al, diaspora y bohemita.
- las bauxitas y las rocas asociadas con ellas no están metamorfizadas.

El tamaño de estos yacimientos generalmente no es grande.

### PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

Las mayores concentraciones de bauxitas del tipo laterítico conocidas, coinciden con las áreas de edad Terciario y Cuaternario de la

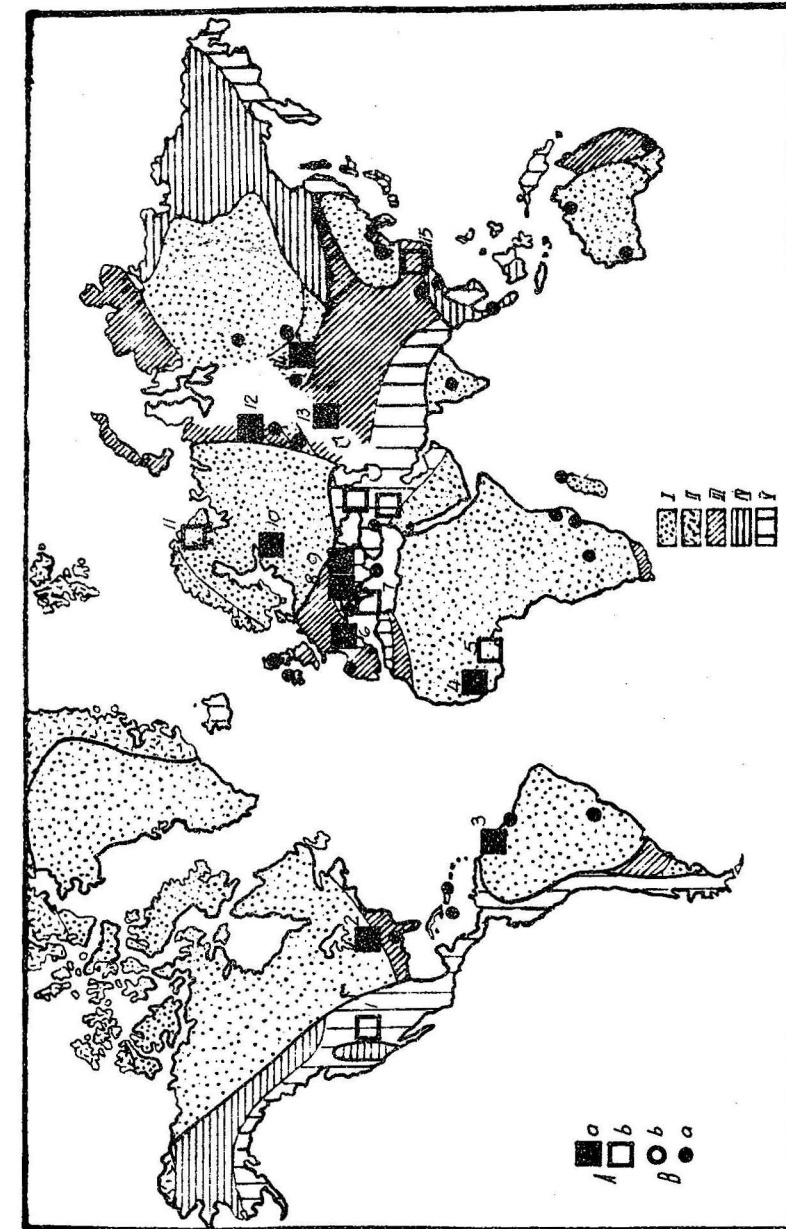


Figura 80

Principales yacimientos de la serie aluminica del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Utah (EUA) 2. Arkansas (EUA) 3. Guyana (América del Sur) 4. Ghana (Africa) 5. R. de Guinea (Africa) 6. Bor (Yugoslavia) 7. Vesubio (Italia) 8. Dalmacia (Balcanes) 9. Bakoni (Yugoslavia) 10. Tjivinsk (URSS) 11. Jibini (URSS) 12. Krasnaia Shapochka (URSS) 13. Turgai (URSS) 14. Berdsk (URSS) 15. Fanshan, R. P. China. (a) Bauxita, (b) Leucita, nefelina. B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local.

India, África del Sur, Namibia, América del Sur (Guyana y Surinam). En Jamaica se conocen grandes reservas.

Los yacimientos mayores de bauxitas del tipo sedimentario, coinciden en zonas de series de edad Paleozoico medio, en los Urales y Salair, en URSS; así como en series de edad Cretácico superior y Paleógeno en la zona del mar Mediterráneo.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación describiremos las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes en el mundo.

### YACIMIENTO DE GUYANA Y SURINAM

Los yacimientos de esta región se formaron, según Harder, sobre una antigua superficie basal que comprende esquistos y neises, así como rocas ígneas básicas y sílfceas. Primero se formaron arcillas residuales, las que posteriormente se transformaron en bauxitas.

La depresión costera del Terciario produjo una inundación, y las acumulaciones de bauxita fueron tapadas por arenas y arcillas; otras fueron arrastradas por el mar. Posteriormente hubo regresión, elevación del continente (proceso este que continua en la actualidad), lo que ocasionó que la erosión eliminase los sedimentos aún no consolidados y expusiera los depósitos bauxíticos. Estos tienen forma de capas y lentejones, de un espesor que llega hasta 12 m. El mineral contiene entre 58 y 63% de  $Al_2O_3$ ; 2 y 5% de sílice y 3-6% de  $Fe_2O_3$ .

### YACIMIENTOS DEL NORTE DE LOS URALES, URSS

En esta región se encuentran una serie de yacimientos tales como el Krasnaia Sapochka y otros; el campo bauxítico se extiende en dirección meridional a lo largo de 150 km. El yacimiento coincide con el período de receso en la deposición de rocas carbonatadas del Silúrico superior y el Devónico medio.

En la zona, los yacimientos se presentan en depósitos en forma de capas, y se extiende por algunos kilómetros, con buzamiento hacia el NE, en ángulos entre 25° y 45° a lo largo de cientos de metros, con potencia media de 4 m.

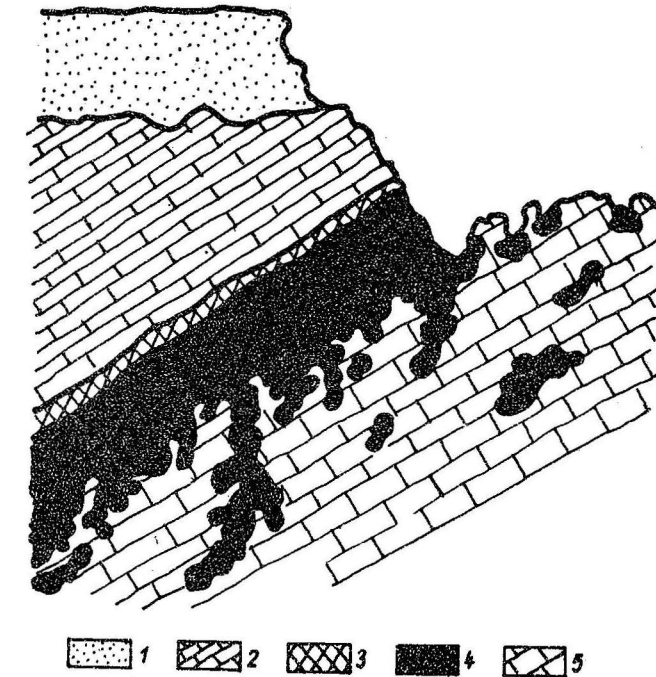


Figura 81

Perfil del cuerpo bauxítico de los Urales septentrionales

1. Sedimentos 2. Calizas grises 3. Bauxitas verde-grisáceas 4. Bauxitas rojas 5. Calizas masivas

Las bauxitas yacen entre calizas del Silúrico superior (piso) y calizas del Devónico medio (techo). El contacto superior es claro, pero el inferior es cársico; en el perfil vertical de los depósitos meníferos se pueden apreciar tres horizontes:

- *Inferior*, con bauxitas porosas y esponjosas, que contienen residuos de calizas;
- *Medio*, u horizonte menífero con bauxita oolítica con elevada calidad (48 a 70%  $Al_2O_3$ ; 4 a 15%  $SiO_2$ ; hasta 30% de  $Fe_2O_3$ );
- *Superior*, con bauxitas esquistosas y arcillas caoliníticas que contienen algo de pirolusita. El contenido de bauxita es bajo.

La mena se compone, en lo fundamental, de diaspora, bohemita, schamosita con mezcla de pirita y hematita. La hematita pura y la magnetita se relaciona con el metamorfismo de las menas. El yacimiento pertenece al tipo geosinclinal.

## MAGNESIO

### GENERALIDADES

El magnesio metálico, en forma pura, fue obtenido por primera vez en 1829 y la producción de aleaciones de magnesio con carácter industrial comenzó después de 1886.

El Mg es un metal estratégico, y el incremento de su producción en este siglo ha sido vertiginoso, pues encuentra utilización en la industria de la aviación, automóviles, armamentos, pirotecnia, etc. Este metal se utiliza tanto en forma pura, como en forma de aleaciones. La aleación más importante es de magnesio con aluminio (11%), cinc (4%) y manganeso (2,5%). A veces a esta aleación se le adiciona circonio, torio, elementos raros, litio, berilio, cadmio y algunos metales más.

Las aleaciones del magnesio tienen un bajo peso específico y una elevada resistencia mecánica. La producción de Mg metálico en 1972 fue de 268 000 toneladas; EUA, Noruega, Japón, Italia, Canadá, URSS y la República Popular China son grandes productores. Algunos estimados señalan que las reservas mundiales de magnesita, el mineral principal de Mg, es de 9,4 miles de millones de toneladas, están localizados, los mayores volúmenes, en la República Popular China, República Popular Democrática de Corea, Nueva Zelanda y la URSS. Grandes yacimientos se localizan también en Brasil, Grecia, Turquía, España, Yugoslavia, Austria, Checoslovaquia, India, etcétera.

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Mg está comprendido en el segundo grupo y el tercer período del sistema periódico de los elementos; su número atómico es 12 y su peso atómico es 24,31. En la naturaleza se le conocen tres isótopos:

Isótopos	%
Mg <sup>24</sup>	77,4
Mg <sup>25</sup>	11,5
Mg <sup>26</sup>	11,1

El Mg es uno de los elementos principales de la litosfera superior; es fuertemente litófilo y se encuentra combinado sólo con el oxígeno. El contenido de Mg en las rocas es:

Rocas	%
Rocas ultrabásicas	25,9
Rocas básicas	4,6
Rocas medias	2,18
Rocas ácidas	0,56
Rocas sedimentarias	1,34

El Clarke es 1,87.

Se observará que el medio propio del Mg son las rocas ultrabásicas; en efecto, las partes inferiores de la corteza terrestre, están formadas por rocas ricas en magnesio: *síma*.

En el proceso hidrotermal, las soluciones pueden formar yacimientos de este metal con elevados contenidos. Durante el ciclo menor, el Mg se disuelve en forma de cloruro y sulfato; después de varias transformaciones, el Mg puede concentrarse en sales; y otra parte puede integrarse a las dolomitas diagenéticas.

Como resultado de la meteorización de rocas ricas en Mg, como las ultrabásicas, el metal puede ser removilizado y concentrado en forma de depósitos de infiltración.

La cantidad de minerales que contienen magnesio es numerosa, sobre todo en el grupo de los silicatos; sin embargo la tecnología para la obtención del Mg, a partir de estas fuentes, todavía no está elaborada.

Los minerales que tienen mayor importancia económica son:

Mineral	Composición química	Contenido %
Magnesita	$\text{MgCO}_3$	28,8
Dolomita	$(\text{CO}_3)_2 \text{Ca, Mg}$	13,2
Carnalita	$\text{ClK} \cdot \text{Cl}_2 \text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	8,8
Bischofita	$\text{Cl}_2 \text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	12,0
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	41,6

Unidos a estos minerales, se encuentran rocas como: magnesita, dolomita, rocas carbonatadas, rocas ricas en brucita, etc., y también, las aguas de los mares y de los lagos que contienen sales cloruradas y sulfatadas de Mg. A pesar de ser la magnesita, la dolomita y las rocas carbonatadas, fuentes del metal, se estudiarán en el curso —correspondiente a los yacimientos minerales no metálicos—, en los capítulos sobre "Sales minerales" y "Materiales de construcción".

## PLATINO Y PLATINOIDES

### GENERALIDADES

El platino fue extraído, por primera vez, a mediados del siglo XVIII junto con el oro, en placeres de este metal situados en Perú, y era considerado aún como una impureza. Fue descubierto como elemento químico en 1785, y al principio del siglo XIX se inició su utilización industrial.

Los metales de este grupo se caracterizan por poseer elevados puntos de fusión, ser muy buenos conductores de la electricidad y químicamente estables. Estos aspectos condicionan su utilización actual progresiva en las industrias química y electrotécnica aunque, sobre todo en los países capitalistas, su uso tradicional es en joyería y también para trabajos dentales. Además, el platino y los platinoideos se utilizan en la industria de la aviación, y en la de automóviles en general.

El Pt es muy poco utilizado en su forma pura, mas frecuentemente se utiliza para aleaciones con iridio, oro, rodio, cobre, níquel y otros metales.

Las mayores producciones de platino y platinoideos se encuentran en URSS, Canadá, África del Sur, Colombia, EUA (Alaska). Una gran cantidad de estos metales se extrae como resultado del enriquecimiento de menas de Cu-Ni, como en Sudbury, Ontario, Canadá.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

De acuerdo con su posición en la tabla periódica, los metales de este grupo se suelen dividir en dos subgrupos:

- metales ligeros: rutenio, rodio, paladio,
- metales pesados: osmio, iridio, platino,



Los metales ligeros están comprendidos en el octavo grupo del quinto período y los pesados, en el octavo grupo, sexto período. Sus números y pesos atómicos respectivos son:

	Número atómico	Peso atómico
Rutenio (Ru)	44	101,1
Rodio (Rd)	45	102,91
Paladio (Pd)	46	106,4
Osmio (Os)	76	190,2
Iridio (Ir)	77	192,2
Platino (Pt)	78	195,09

El platino y los platinoideos forman un grupo geoquímico muy coherente; casi siempre se encuentran juntos en la naturaleza, porque los volúmenes atómicos de los elementos de ambos subgrupos son casi iguales, como consecuencia de la contracción lantánida.

Los contenidos de estos metales en las rocas se encuentran en millonésimas de por ciento, con un incremento en las rocas ultrabásicas, que va disminuyendo hacia las rocas ácidas. Los metales del platino son fuertemente siderófilos, siendo éste el rasgo más notable de su carácter geoquímico general.

La resistencia de los metales del Pt a combinarse con otros elementos, y lo elevado de sus puntos de fusión, hacen que se concentren preferentemente en las primeras fracciones que se separan durante la cristalización magmática.

Por su tendencia calcófila, los metales del Pt se concentran también en los primeros sulfuros magmáticos; en los yacimientos de sulfuros, predomina el Pd sobre cualesquiera de los otros metales de este grupo. Los minerales de Pt durante la meteorización de rocas que los contienen o de sulfuros magmáticos primarios, no migran, sino que se quedan en los residuos para formar placeres, los cuales tienen una gran significación económica.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Además de la forma más generalizada de presentarse el Pt en la naturaleza, que es en forma nativa, pueden formarse determinadas com-

binaciones con el S, As y Sb o bien en "aleaciones naturales". Sus minerales principales son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Polixeno	(Pt, Fe)	80-88% Pt; 5-11% Fe.
Ferroplatino	(Pt, Fe)	71-79% Pt; 16-19% Fe.
Iridio ósmico	(Ir, Os)	hasta 65% Ir.
Nevyanskita	(Ir, Os)	46-77% Ir; 21-49% Os.
Sisverskita	(Os, Ir)	68% Os; 17% Ir; 9% Ru; 4,5% Rh.
Platino paládico	(Pt, Pd)	hasta 40% de Pd.
Espirrilita	PtAs <sub>2</sub>	52-56% Pt; 40-42% As.
Cooperita	PtS	80-82% Pt; 14-17,5% S.
Estibopaladinita	Pd <sub>3</sub> Sb	70,5 Pd; 26% Sb.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los yacimientos de platino y platinoideos se concentran básicamente en dos tipos genéticos de yacimientos: magmáticos y placeres.

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Entre los yacimientos de este tipo se pueden reconocer dos subtipos:

#### *Yacimientos histeromagmáticos*

Estos yacimientos se localizan entre dunitas y están paragenéticamente relacionados y estrechamente ligados con las segregaciones de cromoespinelas, surgidas en las etapas tardías de la cristalización del magma dunítico. Se relacionan poco con peridotitas y piroxenitas. Estos yacimientos, llamados tipo Ural se desarrollan ampliamente en el norte y el centro de los montes Urales, en URSS.

Los cuerpos minerales están representados por nidos, lentes, cuerpos tubulares por excepción y venillas de pequeñas dimensiones. Los minerales de Pt se asocian poco con la titanomagnetita o se forman diseminados entre la dunita.

Es necesario señalar, que la masa principal de los minerales del grupo del Pt cristaliza después de las espinelas cromíferas e inclusive parcialmente en la etapa neumatolítica del proceso magmático.

Además de los yacimientos de los Urales, pertenecen al tipo descrito, yacimientos en Colombia, Alaska, Canadá, Nueva Zelanda y algunos yacimientos de África del Sur. Los yacimientos madres tipo Ural, generalmente no son grandes, y se explotan, fundamentalmente, los placeres importantes que se asocian con ellos.

#### *Yacimientos de licuación*

Los yacimientos de este tipo, coinciden con los macizos gabro-diabásicos, y están genéticamente relacionados con las segregaciones de las menas sulfurosas cupro-niquelíferas, que surgieron en el proceso de licuación del magma sulfuroso-menífero.

Los cuerpos minerales tienen la forma de lentes y aparecen, a veces, en forma de menas compactas y de incrustaciones distribuidas en la mayoría de los casos hacia el lecho de los macizos lacolíticos.

El Pt y el Pd se presentan en forma de platino paládico, espirillita, cooperita y otros minerales.

El contenido de Pt y Pd, es, generalmente, bajo, pero en algunos yacimientos como Frood, en Canadá; Rustenburg, en África del Sur; Norilsk, en la URSS, se obtienen entre 50 y 300 g/t.

A este tipo pertenecen los yacimientos de Sudbury en Canadá; Bushveld en África del Sur, y otros en Noruega y URSS.

## **2. YACIMIENTOS DE PLACERES**

Los minerales de platino se concentran en placeres de valles y dolinas, con otros minerales químicamente estables, entre los cuales se encuentran la magnetita, espinelas cromíferas, cuarzo y otros. Los yacimientos de este tipo tienen un gran significado industrial.

## **PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS**

Con las intrusiones Precámbricas de composición básica se asocian los yacimientos de Canadá y África del Sur, y con las intrusiones del

Paleozoico inferior de la misma composición, los yacimientos de los países escandinavos y de la península de Kola. Todos estos yacimientos coinciden con zonas de plataformas.

Algunos yacimientos del mismo tipo, y de edad Mesozoico inferior se conocen en la URSS (Norilsk) y en África del Sur (Insizwa).

En el Paleozoico medio se encuentran yacimientos en los Urales, URSS, y en la época Kimeridgiense los yacimientos de Columbia y Alaska.

## **DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES**

Describiremos las principales características geológicas de uno de los yacimientos importantes de platino, en el mundo.

### **YACIMIENTOS DE LOS URALES, URSS**

Los yacimientos del complejo platinífero de rocas gabroperidotíticas de edad Cretácico medio, se ubican en la ladera oriental de los montes Urales, en dirección meridional entre los 63° y 57° de latitud norte, en una extensión superior a 600 km.

En la región Nishni-Taguil, se emplaza un lacolito de rocas diferenciadas; en su composición participan dunitas en el fondo, y hacia arriba se reconocen peridotitas, piroxenitas, gabros, dioritas y granitos.

El afloramiento de las dunitas a la superficie, tiene la forma de cúpula y se sitúa al W de este complejo rocoso y por debajo de los esquistos. Entre las dunitas yacen algunos cientos de cuerpos minerales en forma de nidos, lentes, vetas y cuerpos tubulares de cromita y minerales de platino. La dunita propiamente dicha, generalmente es pobre en platino y sólo en algunas partes la mineralización platinífera está fuera de relación con la cromita diseminada.

Las dimensiones de los cuerpos minerales fluctúan desde los pequeños nidos (de algunos centímetros) hasta los cuerpos tubulares y filones que se extienden por decenas de kilómetros hasta 150 m en profundidad, y tienen una potencia media de 6 a 7 m.

Generalmente los cuerpos minerales tienen dirección meridional y buzamiento brusco hacia el este. La composición de los cuerpos meníferos es cromita, uvarovita, clorita y micas cromíferas, polixeno, platino irídico; y raramente sulfuros de níquel y cobre.

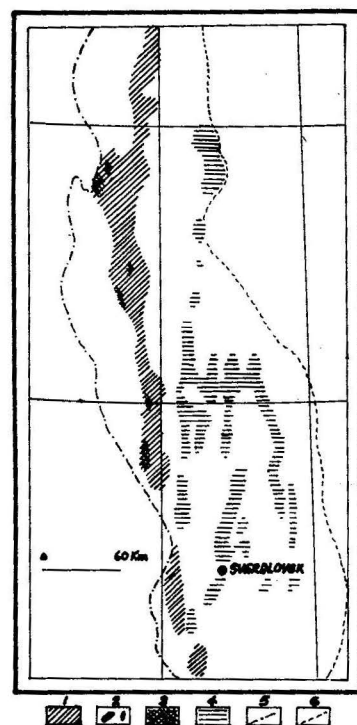


Figura 82

Mapa de los depósitos duníticos platiníferos de los Urales septentrionales y centrales (A.N. Zavaritskii)

1. Gabro (y otras rocas feldespáticas) del complejo platinífero
2. Dunitas
3. Piroxenitas
4. Rocas ígneas básicas profundas que no se relacionan con los depósitos de platino
5. Límite occidental de desarrollo de las rocas cristalinas en los Urales
6. Límite occidental de los depósitos Terciarios.

Los minerales de platino se formaron después de los de cromo y sirven de cemento a éstos; el tamaño de los granos minerales de platino oscila desde algunos milímetros hasta 1,2 cm. El contenido de Pt y metales del Pt en la mena, es de cientos de gramos por tonelada de mena; asociados con estos yacimientos primarios se reconocen importantes placeres eluviales deluviales, aluviales, los cuales se extienden a lo largo de algunos kilómetros y a veces decenas de kilómetros, con un ancho hasta de centenares de metros.

El tamaño de los granos minerales en los placeres es de 0,5-1 mm, hasta 18 mm. El contenido de Pt en los placeres es superior a 5-20 g/t de mena.

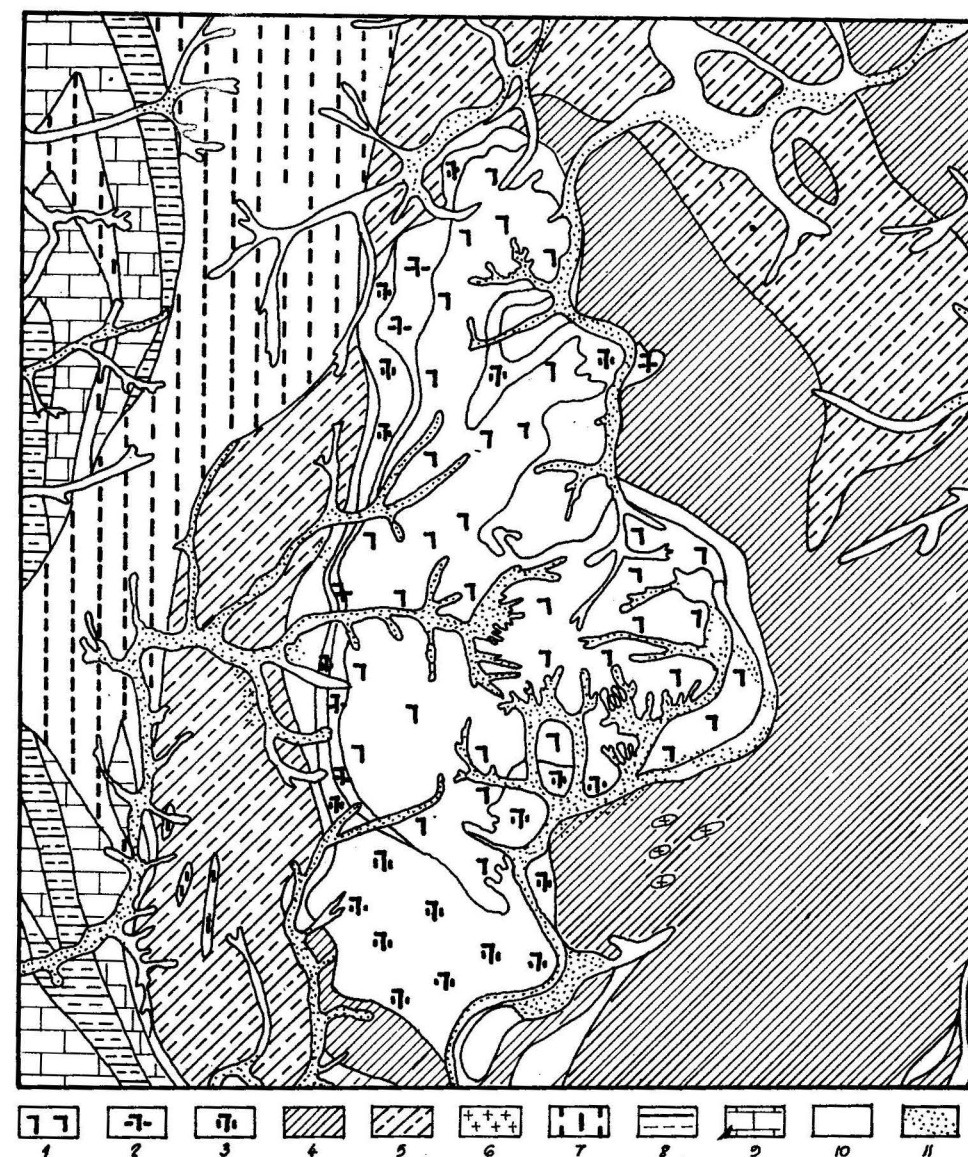


Figura 83

Mapa geológico esquemático del macizo platinífero de Nizhni Taguil, URSS (N. Bisotski)

1. Dunitas
2. Rocas apoduníticas
3. Serpentinitas
4. Piroxenitas
5. Gabrodioritas
6. Anfibolitas apogábricas y apodioríticas
7. Gabro uralitizado
8. Esquistos micáceos
9. Esquistos cristalinos
10. Calizas
11. Depósitos cuaternarios y placeres platino-auríferos.

## ORO

### GENERALIDADES

Desde la antigüedad, el oro fue utilizado por el hombre en la confección de joyas y objetos de arte, como metal monetario y expresión de riqueza. Hoy en día estos usos no han variado, pero con el desarrollo de la ciencia y de la técnica, el oro comenzó a ser utilizado en otras ramas de la producción y en la industria; también se ha introducido su uso en la medicina, el que se ha incrementado en la actualidad.

Por ser este metal uno de los más estratégicos, las cifras de producción no son realmente conocidas; sin embargo, en 1972, se extrajeron 28 millones de onzas, sin incluir la producción de los países socialistas. Las mayores producciones se obtuvieron en África del Sur, Canadá y EUA.

En los países socialistas, grandes producciones se reportan en URSS y Rumania. Desde el punto de vista de las reservas, la República de África del Sur, URSS, y Canadá son los países que presentan mayores volúmenes.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El oro está situado en el primer grupo y sexto período de la tabla periódica de Mendeleiev; su número atómico es 79 y su peso atómico es 196,97, se le conoce un solo isótopo:  $\text{Au}^{197}$ . Su Clarke es del orden de  $10^{-7}$ .

El Au se presenta en la litosfera superior, parecido al Cu; es un elemento sulfófilo y se combina fácilmente con el telurio y el selenio. A pesar de ser también siderófilo acompaña al Cu y a la Ag en la litosfera superior. Sin embargo la mayor parte del Au se encuentra en la naturaleza en forma nativa, aleado con la Ag y los metales del grupo del Pt.

Gracias a su semejanza con el Cu y la Ag, el Au forma parte de los primeros sulfuros magmáticos; no obstante las soluciones neumatolíticas e hidrotermales, son los vehículos más idóneos y favorables para el oro. El Au nativo siempre contiene impurezas tales como la Ag, Cu, Fe y sales de Pt.

En razón a su inercia química y a su elevado peso específico el Au forma acumulaciones durante el ciclo exógeno, en los residuos de la meteorización, para dar lugar a la formación de placeres.

### MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

La mineralogía del oro es bastante simple; este elemento está estrechamente relacionado con granitoides ácidos y moderadamente ácidos, por excepción con rocas alcalinas, básicas y ultrabásicas.

El mayor significado industrial lo tiene el oro nativo, el cual contiene, Ag y en menor cantidad Cu, Fe; muy pocas veces contiene además, Bi, Pd, y Rh. Otro mineral, el llamado electrum (Au, Ag), puede contener entre 30 y 50% de Ag, su presencia es relativamente rara, y se localiza en yacimientos hidrotermales de temperaturas bajas. Es característico de paragénesis con sulfuros ricos en plata, tales como la argentita, menas grises, proustita, pirargirita, etcétera.

Entre los telururos de oro conocemos los siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Calaverita	$\text{Te}_2\text{Au}$	hasta 39% Au.; 3% Ag.
Silvanita	$\text{Ag}_9\text{AuTe}_4$	hasta 24% Au.; 13,5 Ag.
Nagiaguita	$\text{Au}(\text{Pb}, \text{Sb}, \text{Fe})_8 (\text{S}, \text{Te})_{11}$	hasta 6-13% Au.

Los telururos de Au, generalmente se encuentran asociados con el electrum y otros minerales hidrotermales de bajas temperaturas.

### TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Algunas concentraciones de Au tienen lugar en los yacimientos de licuación de Cu-Ni, así como en yacimientos de pegmatitas, y skarn (en arsenopirita y pirrotina); también en muchos tipos de yacimientos hidrotermales de Cu, Cu-Mo, polimetálicos, arsénico, antimonio, en los cuales el Au, se obtiene como subproducto. Todos estos tipos desempeñan un papel subordinado, en sentido general.



## 1. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Los principales tipos industriales de yacimientos son los siguientes:

### *Yacimientos de temperaturas altas*

Estos yacimientos están representados por la formación mineral oro-arsenopirita, los cuales yacen entre macizos de granitoides y rocas metamórficas del Precámbrico y el Paleozoico. Los más típicos son los filones de cuarzo aurífero, y también los esquistos cuarcificados y piritizados. Los cuerpos minerales tienen una forma irregular —vetas en rosario— que se mantienen regularmente en extensión y profundidad, durante unos cuantos kilómetros, con una potencia media significativa. Por su tamaño no son muy grandes pero poseen cantidades industriales de oro.

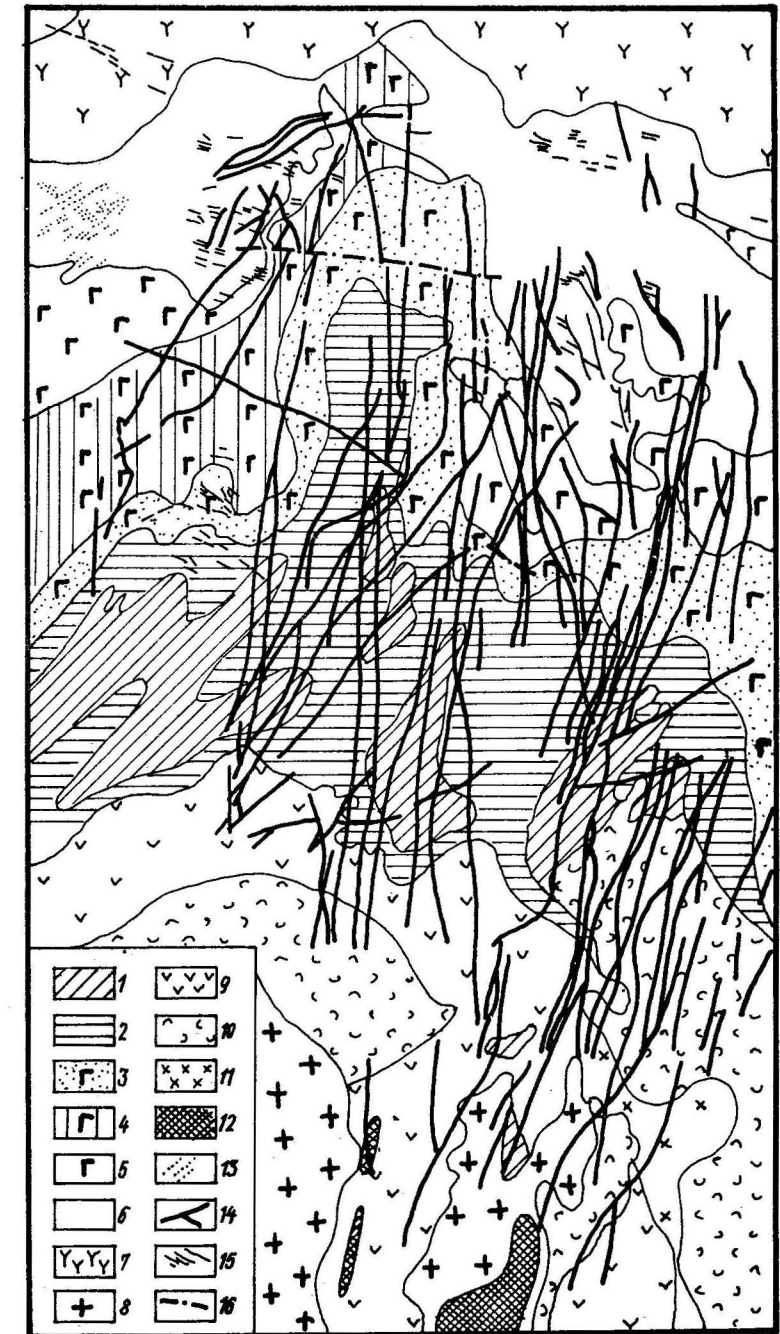
La composición de la mena es: cuarzo, arsenopirita, pirita, pirrotina, oro nativo, turmalina, albita, actinolita, biotita y a veces minerales de bismuto (tetradimita  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ ), calcopirita, molibdenita, esfalerita y otros. El oro se encuentra a menudo en forma nativa, frecuentemente relacionado con arsenopirita y pirita.

Ejemplos de yacimientos se encuentran en la taigá soviética (en la región de Yenisei), el yacimiento Kochkarsk, en los Urales del sur; Morro Velho, en Brasil; Kolar Goldfield, en India; Porcupine, en Canadá; etc. Este tipo de yacimiento tiene una gran significación industrial para la extracción del oro y se explotan directamente como yacimientos primarios o sus placeres.

Figura 84

Mapa geológico esquemático del campo menífero Berezovsk, URSS  
(M. Borodaevskaia y N. Borodaevsky)

1. Rocas tufógeno-sedimentarias 2. Tobas compactas con intercalaciones de esquistos tufógeno-sedimentarios y filitas, tufoareniscas y tufoconglomerados 3. Tobas granulares de diabasas y porfiritas intercaladas con diabasas transformadas en esquistos de composición albita-clorita-actinolita, clorítica, clorítico-epidótica 4. Diabasas granulosas 6. Hiperbasitas serpentinizadas, serpentinitas y productos de su metamorfismo aloquímico-rocas talcosas carbonatadas 7. Gabro 8. Granitos 9. Serpentinitas actinolitizadas, cuarcificadas de la aureola de los granitos 10. Esquistos micáceo-cuarcíferos, cuarcitas y esquistos cuarcíticos 11. Esquistos albiticos-actinolítico-biotíticos y epidótico-clorítico-biotíticos y hornblenda 12. Anfibolitas 13. Rocas filoneas de gabro, piroxenita, microgabro, gabro diabasa transformadas en gabro-anfibolitas y rocas clorítico-piroxénico-gránaticas 14. Diques: pórfidos de plagioclasitas, lamprófidos, pórfido de granito, pórfido de plagiogranito 15. Filones meníferos 16. Dislocaciones tectónicas.



#### *Yacimientos de temperaturas medias*

Representan vetas regulares que yacen en las rocas del techo de granitoides Mesocenoico y Paleozoico, o dentro de los propios macizos. La composición de la mena es cuarzo, carbonatos, barita, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, menas grises, y sulfosales de plomo antimonio. El Au, se encuentra como impureza en los sulfuros o en forma de metal nativo.

Este tipo de yacimiento se encuentra en muchos países y tiene gran importancia económica; por ejemplo: Bere-zovsk, en los Urales centrales; Berikulski y Salarinsk, en Kuznetski Alatau; Stepniak, en Kazajia, todos en URSS; Mother Lode y Grass Valley, en EUA; Bendigo y Ballarat en Australia; Yellow Knife, en Canadá, etcétera.

#### *Yacimientos de temperaturas bajas*

Formados a pequeñas profundidades y en estrecha relación con la actividad volcánica, principalmente la de edad Terciaria.

Los yacimientos están representados por vetas y *stock-works*, con meniferación irregular en forma de bonanzas de minerales de Au-Ag. La mena se compone de calcedonia, calcita, rodocrosita, barita, adularia, generalmente sulfuros, minerales de plata, oro argentífero, y ocasionalmente telururos de oro.

Este tipo de yacimiento tiene un amplio desarrollo en los límites del cinturón volcánico del océano Pacífico y también en los Cárpatos y en el Cáucaso. A este tipo de yacimiento pertenecen: Comstock Lode, Goldfield, Cripple Creek, en EUA; El Oro, en México; Antioquia, en Colombia; Redshang-Levong, en Sumatra; Jaupacu, en Nueva Zelanda; Cerro de Pasco, en Perú; Kitami, en Japón; Monts Apuseni en Transilvania, Rumania; así como yacimientos en Chile y Filipinas.

## **2. ZONAS DE OXIDACIÓN Y ENRIQUECIMIENTO SECUNDARIO**

El Au se queda en los residuos limoníticos y cerusíticos de los "sombrosos", así como en zonas de enriquecimiento secundario en las zonas de oxidación de yacimientos sulfurosos y polimetálicos.

La importancia de estos yacimientos no es grande y se conocen en los "sombrosos de hierro" de los Urales, Balcanes y Japón y también en las zonas de oxidación de los yacimientos polimetálicos del Altai, URSS.

## **3. YACIMIENTOS DE PLACERES**

Los yacimientos de placeres se pueden subdividir en tres subgrupos:

### *Eluviales*

Se encuentran en grandes cantidades en Kalgoorlie, en Australia. Formados en condiciones de clima caliente y húmedo donde se desarrolla el proceso de meteorización laterítica de rocas ígneas primarias y esquistos cristalinos, los cuales tienen filones de cuarzo-oro. El contenido de Au alcanza 30 g/t.

### *Aluviales*

De acuerdo con las condiciones de formación y yacencia,, pueden subdividirse en dos tipos: de dolina y de lecho, los cuales se localizan en casi todas las regiones con yacimientos de oro.

### *Marinos*

Se encuentran a lo largo de la costa y que se forman como resultado de la meteorización de yacimientos primarios, placeres antiguos y costeros, pobres en Au. Un ejemplo de este tipo se localiza en Alaska, con campo extendido a lo largo de la costa en una extensión de 5 km con una franja de 80 a 100 m. A pesar de poseer un contenido irregular se obtienen más de 200 g/t y estos placeres aportan cientos de toneladas de Au.

## **4. YACIMIENTOS METAMORFOGÉNICOS**

Estos son conglomerados auríferos metamorfizados. A este tipo pertenece el famoso yacimiento Witwatersrand en Transvaal, África del Sur, el más grande del mundo, y también yacimientos en Ghana y en Ontario, Canadá.

Sobre la génesis de este tipo de yacimientos, existen opiniones divididas, en relación con el origen del oro primario. Un grupo lo consideran del tipo sedimentario, al erosionarse

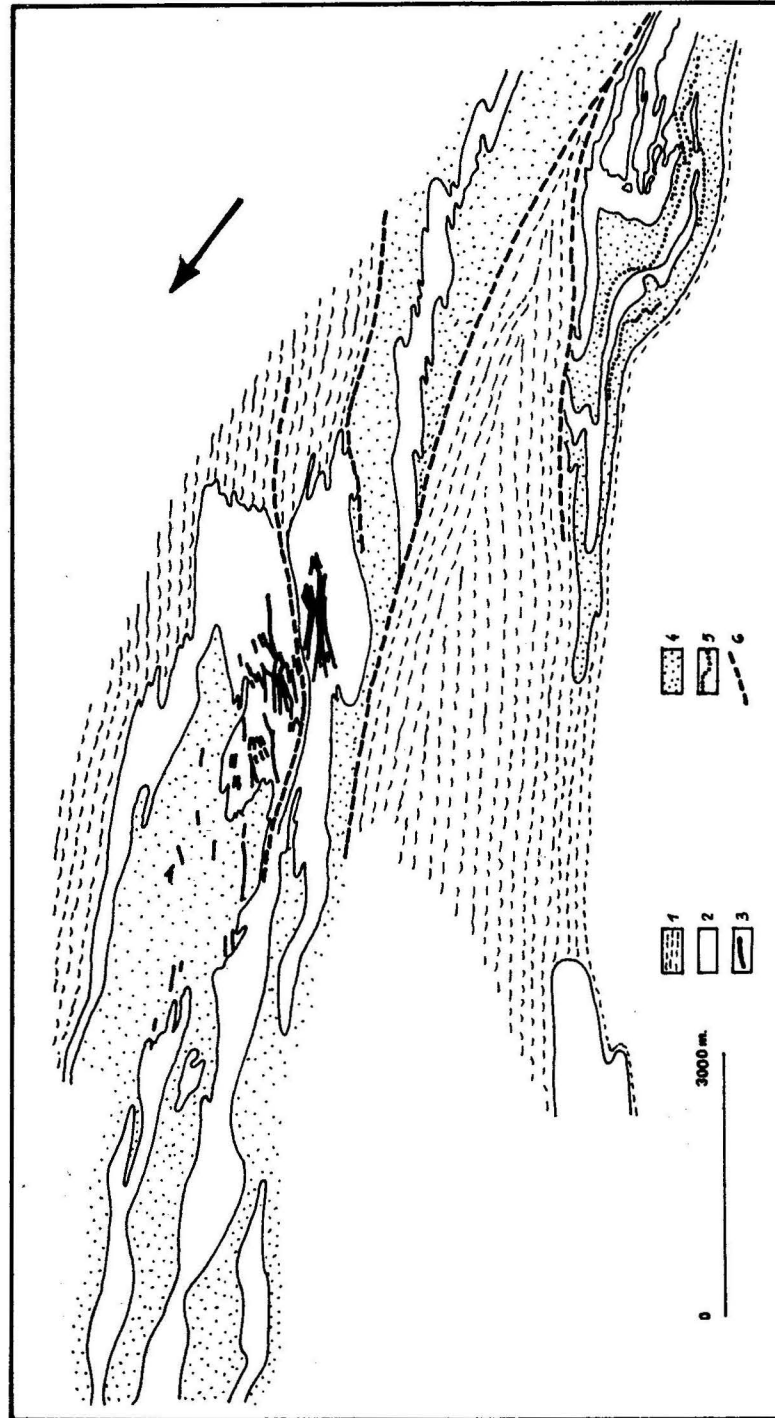


Figura 85

Campo aurífero de Kalgoorlie en Australia occidental (J.D. Campbell). 1. Sedimentos de "Black Flag" 2. Dolerita cuarcítica 3. Filones 4. Rocas verdes de grano fino 5. Formación ferruginosa 6. Fallas

rocas del Arqueozoico que contenían filones de cuarzo aurífero. Otros opinan que la génesis del oro sucedió a través de procesos hidrotermales, y que la meniferación de los conglomerados se debe a soluciones hipogérficas.

Es necesario señalar que, tanto los conglomerados auríferos de Witwatersrand como los de Ontario, presentan meniferación de uranio con contenido industrial.

## PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

La edad Precámbrico es la más rica de todas; se caracteriza por el desarrollo de yacimientos hidrotermales de alta temperatura, y parcialmente de temperatura media así como grandes yacimientos metamorfogénicos de conglomerados auríferos, situados en los límites de los escudos antiguos.

Las provincias auríferas precámbricas se desarrollan en los escudos africano, canadiense, brasileño, indostano, manchurocoreano, siberiano, y proporcionan, sin incluir URSS, cerca de las 3/4 partes de la producción mundial de Au.

La época Caledoniana presenta yacimientos en URSS; la época Herciniana tiene representantes en URSS, en Urales y Altai; así como en Australia, en Bendigo y Ballarat. Los yacimientos del Paleozoico no tienen gran importancia.

Los yacimientos Kimeridgiense de Au juegan un papel muy importante en URSS: Kolima, Aldán, Transbaikál; en EUA: California y Alaska y en Canadá: Columbia Británica.

Los yacimientos Alpinos se encuentran en Transbaikál, en los estados occidentales de EUA: Cosmstock, Goldfield, Cripple Creek y otros; en México: El Oro; en Perú: Cerro de Pasco; en Chile, Nueva Zelanda, Indonesia, Filipinas, Japón, Taiwán, y también en Rumania. A partir de estos yacimientos jóvenes se obtiene el 15% de la producción mundial.

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

A continuación describiremos las características geológicas de los principales yacimientos en el mundo.

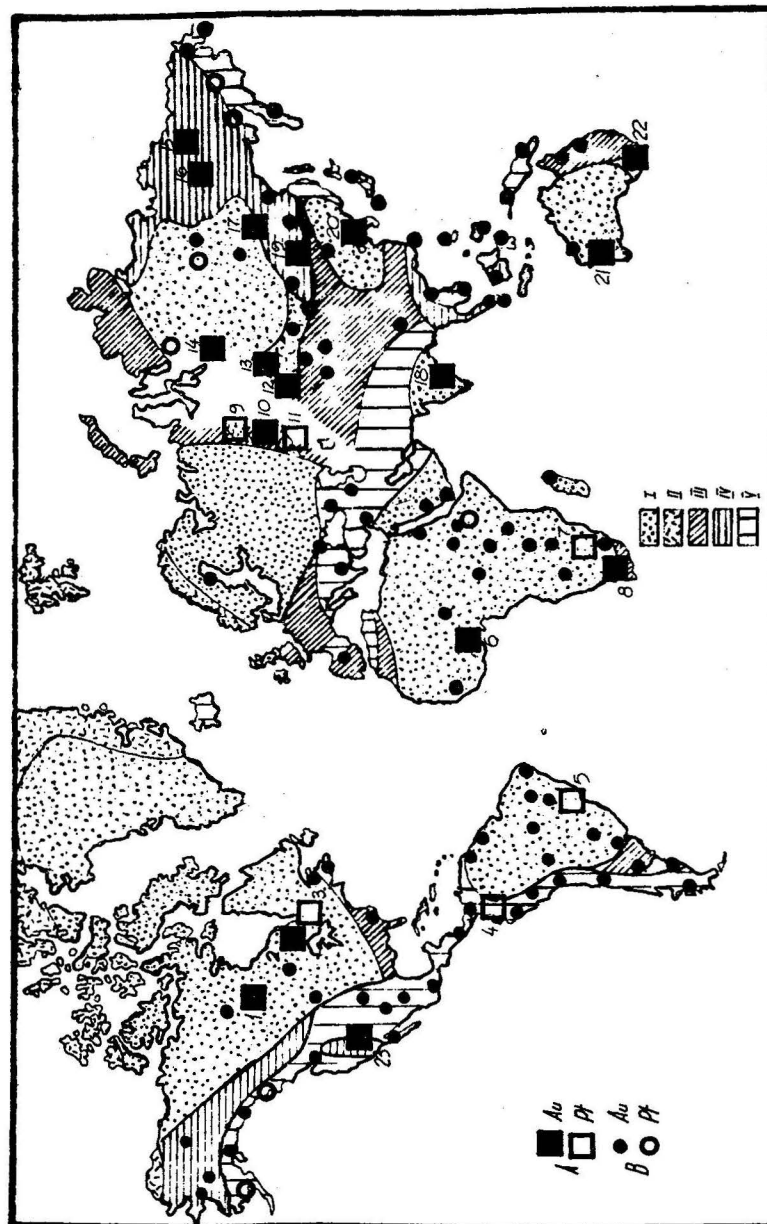


Figura 86

Principales yacimientos de oro y platino del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimeridgienses V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Yellow Knife (Canadá) 2. Porcupine (Canadá) 3. Sudbury (Canadá) 4. Choco (Colombia) 5. Morro Velho (Brasil) 6. Ghana (África) 7. Rustenburg (África del Sur) 8. Witwatersrand (África del Sur) 9. Nizhni Taguil (URSS) 10. Berezovsk (URSS) 11. Kochkarsk (URSS) 12. Stenjak (URSS) 13. Alatau (URSS) 14. Sovietski (URSS) 15. Kolima (URSS) 16. Indigirka (URSS) 17. Aldán (URSS) 18. Kolar (India) 19. Darasun-Balei (URSS) 20. R. D. de Corea 21. Kalgoorlie (Australia) 22. Bendigo (Australia) 23. California (EUA). B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

## YACIMIENTO KOCHKARSK, URALES, URSS

El macizo de plagiogranitos Hercinianos con el cual coincide el campo menífero Kochkarsk, tiene en el plano un contorno elipsoidal. El área aflorada de la intrusión plagiogranítica es mayor que  $400 \text{ km}^2$ .

Hacia el este, los plagiogranitos hacen contacto con capas de rocas sedimentario-efusivas del  $D_1-C_1$ ; hacia el oeste, se contacta con esquistos formados como resultado del metamorfismo de rocas del  $C_1$ . Los contactos este y oeste del macizo plagiogranítico buzan hacia el oeste abruptamente, bajo ángulos entre  $75^\circ$  y  $80^\circ$ . En este macizo se desarrollan, claramente, dos sistemas de grietas tectónicas con direcciones NE y NW; las de dirección NE se desarrollan más intensamente.

En estas grietas tectónicas se encuentran grandes cantidades de diques de diabasa, pórfido diabásico, grabo-diabasa, dioritas y porfiritas dioríticas. Bajo la acción de soluciones hidrotermales, estas rocas están alteradas en otras que contienen biotita, hornblenda, zoisita, actinolita, clorita, granate, turmalina, cuarzo, microclina, y otros minerales.

En el territorio del campo menífero Kochkarsk se conocen más de 1 000 filones meníferos. Por su dirección, los cuerpos miden desde decenas y centenas de metros, hasta 1 y 2 km con buzamiento brusco y potencia que fluctúa desde algunos centímetros hasta 2 y 5 m.

Debemos señalar que los diques y los filones auríferos se formaron en diferentes etapas de desarrollo del campo menífero (los diques atraviesan los filones). Los diques y los filones meníferos pueden agruparse en tres zonas: norte, central y sur. Cada una de estas zonas representa un sistema de acercamiento de los diques y los filones meníferos. Las zonas de filones son paralelas unas a las otras y tienen rumbo NE ( $65^\circ$  a  $70^\circ$ ) y el buzamiento de la mayoría de ellos es SE.

De acuerdo a la composición mineralógica se observan tres grupos de filones auríferos: cuarcíferos, sulfuro-silicatados y carbonatados. En los filones auríferos se encuentran generalmente los siguientes minerales meníferos: arsenopirita, pirita, pirrotina, calcopirita, esfalerita, galena y oro; pocas veces se encuentra cobaltina, scheelita, tetraedrita, bournonita, boulangerita, jamesonita, bismutina, bismuto y plata nativos. Entre los minerales no metálicos, se encuentra el cuarzo; un papel secundario lo desempeñan la biotita, anfíbol-hornblenda, clorita, turmalina, epidota, granate, actinolita, calcita, ankerita, etc. El oro en los filones meníferos se relaciona a menudo con sulfuros, y en parte con arsenopirita. La ley del oro es 700 a 900 (o sea, de cada 1 000 partes 700-900 son de oro).





Figura 87

Esquema de la tectónica de ruptura de los alrededores del yacimiento Kochkarsk, URSS (N. Borodaevsky y otros)

1. Capa de neis y esquistos 2. Efusiones de composición basáltica 4. Capas efusivas, esquistoso-conglomeráticas, tobáceo-esquistosas y carbonatadas 5. Piroxenitas y serpentinitas 6. Plagiogranitos 7. Granitos microclínicos 8. Diques de granitos microclínicos 9. Diques de pórfidos de plagiogranito y lampróidos transformados 10. Sistema de rupturas nor-occidentales 11. Fracturas longitudinales de emplazamiento antiguo 12. Fracturas

## YACIMIENTO MOTHER LODE, CALIFORNIA, EUA

La región de Mother Lode, en California, es un distrito minero con más de ciento cincuenta minas, en una zona de 190 km de largo por 1,5 km de ancho, situada en la vertiente occidental de la Sierra Nevada.

La zona aurífera tiene dirección NW con fuerte buzamiento, y geológicamente está compuesta por pizarras, esquistos, y rocas verdes del Jurásico y Carbonífero; también se desarrollan los esquistos verdes que son rocas muy favorables para la mayoría de los filones.

Estas rocas fueron invadidas por rocas plutónicas, desde peridotitas hasta granodioritas; precisamente esta época de actividad ígnea terminó con la formación de depósitos auríferos. Los depósitos consisten en filones de cuarzo que llegan a tener centenares de metros de longitud, generalmente paralelos, ramificados o dispuestos en escalones a lo largo de su hundimiento o masas mineralizadas.

Los filones son rellenos de fallas inversas las cuales tienen desplazamientos que llegan hasta 115 m; estos filones sufren engrosamientos y adelgazamientos. Las rocas encajantes han sido intensamente alteradas; las pizarras, esquistos y serpentina han sido alterados en ankerita, junto con sericita, albita, pirita, arsenopirita, y algo de oro. Los filones son rellenos hidrotermales de fisuras con sucesiva ampliación por la reapertura por renovación del movimiento de las fallas.

## YACIMIENTO BENDIGO, AUSTRALIA

El yacimiento Bendigo es conocido en todo el mundo por sus filones en crestas de repliegues o *saddle*.

En Bendigo las pizarras y areniscas del Ordovícico fueron intensamente comprimidas, hasta formar agudos anticlinales y sinclinales con intrusiones de batolitos graníticos que fueron, posteriormente, profundamente erosionadas. Los ejes de los pliegues están suavemente ondulados y los planos axiales son muy inclinados y llegan a ser verticales. Han sido reconocidas 15 líneas anticlinales paralelas, separadas entre sí de 200 a 350 m.

Los depósitos minerales son filones en crestas de repliegue, localizados principalmente en las crestas de los anticlinales, entre capas de pizarras o de arenisca. Las crestas se hallan mayormente dentro de los 30 m del campo central (zona de los planos axiales) y pocas veces tienen más de 6 m de diámetro. Están superpuestas una sobre otra, de forma tal, que han llegado a alcanzar una profundidad de 1 400 m.



Figura 88  
Yacimiento Bendigo, Australia.  
Filones tipo "Cresta de repliegue" o saddle en el pozo Great Extended Hustlers,  
Australia.

El mineral está formado, fundamentalmente, por cuarzo-aurífero con pequeñas cantidades de pirrotina, pirita, y arsenopirita. Están presentes cantidades pequeñas de galena, blenda, estibina, molibdenita y bournonita. La dolomita y ankerita generalmente están presentes.

Se hace evidente que las pequeñas aberturas en forma de cresta de repliegue, creadas por el plegamiento, fueron los principales puntos de deposición a donde llegaron las soluciones metalizadoras por los conductos de falla. Las costras de cuarzo y ankerita señalan que hubo alguna deposición de espacio abierto; sin embargo, Stillwell opina que, el principal proceso de deposición fue el reemplazamiento a partir de soluciones hidrotermales que, probablemente, precedieron a los depósitos magmáticos que dieron origen a las rocas intrusivas.

#### YACIMIENTO WITWATERSRAND, TRANSVAAL, ÁFRICA DEL SUR

Este yacimiento aurífero, el más grande del mundo, fue descubierto en 1886 por los colonizadores de esta región. El campo menífero del Rand, está situado al sur del Transvaal, y la región es una meseta que está a 1 500 y 1 800 m sobre el nivel del mar, compuesta por series esquistosas, arenosas-carbonosas del sistema Karroo, casi horizontales, las cuales se alternan con doleritas. Por su edad y composición las rocas de Karroo pertenecen al sistema Permo-Carbonífero.

Donde la erosión ha sido muy intensa se desarrollan las crestas (*reefs*), compuestas de rocas auríferas más viejas, de los sistemas de Swazilandia, Witwatersrand y Transvaal.

El sistema Swazilandia está representado por rocas metamórficas y esquistos con grandes intrusiones de granito y múltiples *stocks* pequeños, de rocas de composición ácida y básica. Estas rocas son muy parecidas a las del Arqueozoico aurífero de India y Australia occidental. Con los granitos del sistema Swazilandia se asocian muchos filones cuarzo-auríferos de África del Sur.

El sistema Witwatersrand descansa en discordancia sobre los granitos y esquistos del sistema anterior, y en su perfil se representan esquistos y cuarcitas, a veces ferruginosas.

Contiene también algunas capas de conglomerados, con contenidos industriales de oro. En la parte superior de las capas se forman cuarcitas, areniscas de grano grueso y conglomerados, entre los cuales se localizan grandes capas de conglomerados auríferos. La potencia total de todas las capas es de 7,5 km y en su parte superior, 3 km.

El sistema Transvaal yace en discordancia con los dos sistemas anteriores y está representado por cuarcitas, conglomerados, dolomitas, los cuales son cubiertos por cuarcitas ferruginosas y diabasas de la serie de Pretoria.

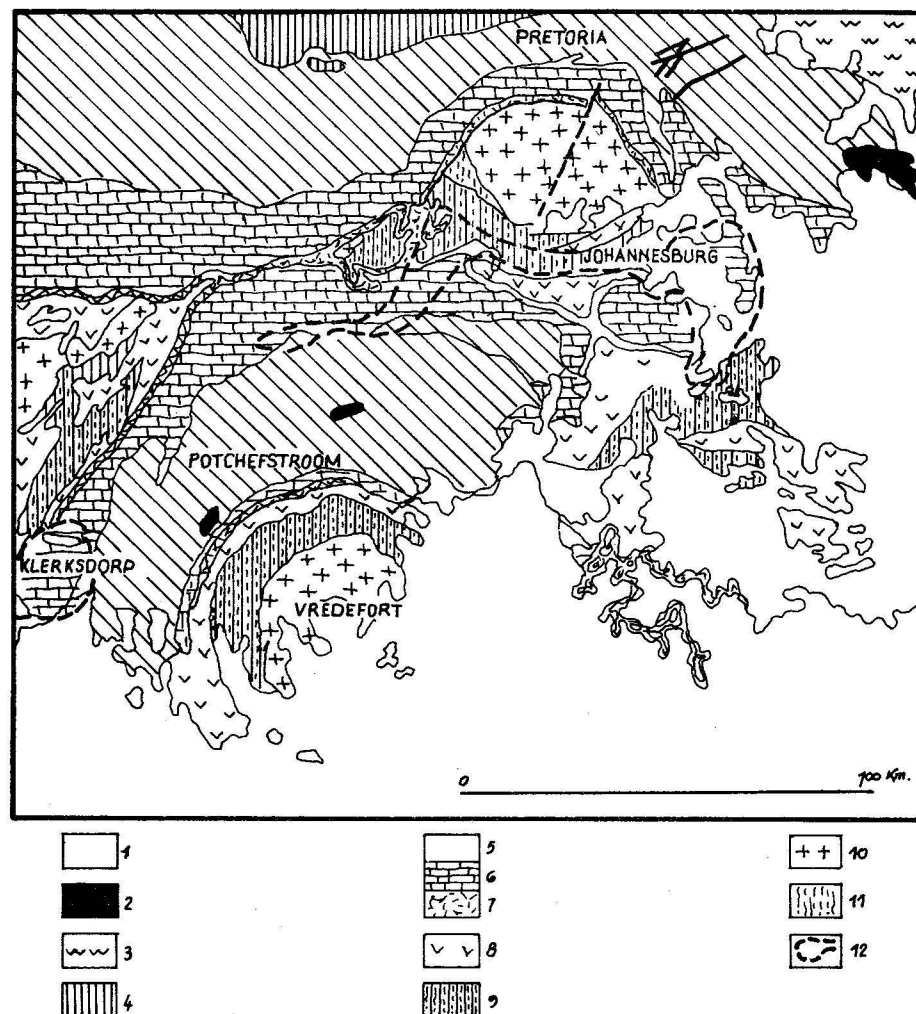


Figura 89

Mapa geológico del sinclinal Witwatersrand en África del Sur

- 1. Sistema Karroo 2. Intrusiones alcalinas y básicas 3. Sistema Waterberg 4. Complejo Bushveld (borde sur) 5-7. Sistema de Transvaal: 5. Serie de Pretoria 6. Serie dolomítica 7. Serie de Black Reef 8. Sistema Ventersdorp 9. Sistema de Witwatersrand 10. Sistema de Dominion Reef 11. Granitos del Arqueozoico 12. Campos auríferos y uraníferos.

Las más importantes, desde el punto de vista industrial, son las capas de conglomerados auríferos que coinciden con la parte superior del sistema Witwatersrand y forman el *Main Reef* con una potencia de 7 a 10 m.

El *Main Reef*, *Main Reef Leader* y *South Reef*, se extienden en una longitud hasta de 80 km. Estos son los niveles de mayor productividad en el yacimiento.

En la composición de los conglomerados auríferos es necesario distinguir los minerales primarios, los cuales se sedimentaron con los conglomerados, y los secundarios, relacionados con el metamorfismo de los conglomerados y la circulación de soluciones hidrotermales. Los minerales primarios son cuarzo, cromita, diamante, zircón, ilmenita, corindón, granate, iridio ósmico (en conglomerados alcanzan hasta 25 a 30 g por cada 1 000 t); los minerales secundarios son calcopirita, esfalerita, galena, cerusita, clorita, desarrollados a lo largo de diques y fallas y relacionados con la actividad hidrotermal. Se encuentra pirita muy frecuentemente (0,5 a 50%, generalmente 3%); también, en pequeñas cantidades turmalina, rutilo, calcita, grafito, minerales de uranio, tujolita, y arseniuros de níquel y cobalto.

La parte principal del oro (45 a 60%) se presenta en granos de 0,01 a 0,07 mm. En el oro hay de 5 a 43% de Ag y, como promedio, 9 a 10%, y hasta 3% de Cu. En el yacimiento son características las enormes reservas de menas, y la gran escala de la meniferación, comparativamente baja en Au (promedio 6,4 g/t) pero este contenido se mantiene regularmente hasta profundidades superiores a los 2,7 km.

Con relación a la génesis de este yacimiento, existen dos opiniones básicas: la mayoría de los investigadores, entre ellos Mellor y Du Toit, consideran el yacimiento, como del tipo de conglomerados auríferos metamorfizados. El oro se sedimentó al mismo tiempo en que se formaron los conglomerados, como generalmente sucede en los yacimientos de placeres. Esta **teoría modificada del placer**, de la cual son partidarios la mayor parte de los geólogos del Rand, supone que el oro fue depositado con las gravas, junto con el mineral de hierro, otros detritos, etc.; posteriormente, las soluciones introdujeron azufre y disolvieron y redistribuyeron ligeramente el oro. Los principales argumentos que fundamentan esta teoría son: la presencia general del oro en gravas que contienen algunos detritos indudables, combinada con su presencia en depósitos ocultos correspondientes a la distribución de gravas fluviales, y una tendencia a concentrarse en las partes inferiores de las crestas (*reefs*), como ocurre en los yacimientos de placeres. Muchos argumentos contrarios a la teoría, como la falta de una fuente conocida de soluciones hidrotermales, y la dificultad de explicar la

amplia distribución del oro por infiltración, han merecido más crédito que la hipótesis del placer modificado.

La otra hipótesis según Creighton, plantea el origen hidrotermal de temperatura media, sobre la base de que el oro está mellado; sustituye a los guijarros; las relaciones del oro con la pirita y otros minerales típicos del proceso hidrotermal, así como las variaciones laterales de las rocas que son típicas para este tipo genético, en todo el mundo.

## EL ORO EN CUBA

Cuba no posee grandes yacimientos de oro; la meniferación aurífera está reducida en nuestro país a pequeñas manifestaciones o yacimientos pequeños. No obstante, algunos de los yacimientos de cobre y polimetálicos contienen en sus menas determinadas cantidades, casi siempre pequeñas, de este metal.

La región de mayores perspectivas está localizada en los límites del campo aurífero de Guáimaro en la provincia de Camagüey, así como en el campo aurífero de Aguas Claras, cerca de la ciudad de Holguín, provincia de Oriente, actualmente la primera es objeto de estudios geológicos de exploración. ✓

En la parte occidental de la isla de Cuba hay determinadas manifestaciones de oro: el pequeño yacimiento Delita, en Isla de Pinos, situado hacia el oeste, cerca de la costa, a 40 km de Nueva Gerona. Está compuesto por minerales de Au, Ag y As (arsenopirita) y Sb (antimonita) y yace entre los esquistos del Jurásico inferior. Los valores promedio de oro oscilan entre 4,5 a 5,5 g/t.

Otra región aurífera se encuentra en la provincia de Las Villas cerca de las ciudades de Santa Clara y Placetas. En los límites de la zona menífera San José-La Buena, se forman pequeños yacimientos de menas cupríferas cuarzo-sulfurosas con oro, que llegan a tener hasta 100 g/t. Generalmente son yacimientos de vetas yacentes en rocas ultrabásicas serpentinizadas, básicas y dioríticas. Entre otros, pueden citarse Loma Cerca, La Mascota, San Roque, etcétera.

Con relación al campo aurífero de Guáimaro, Maslov, Chezestakova y Miralles, publicaron, en 1969, un trabajo denominado *Constitución Geológica y Génesis de los Minerales del Campo Mineral Aurífero*

*Guáimaro, Provincia de Camagüey* donde se describen los siguientes aspectos:

Esta región está situada a 70 km al este de la ciudad de Camagüey, y tiene un área aproximada de 6 km<sup>2</sup>, compuesta preferentemente por rocas efusivas del Cretácico superior, representadas por horizontes interstratificados de porfiritas andesíticas, andesito-basálticas y sus tobas. En los límites del campo mineral, estas rocas han sido sometidas a los procesos de propilitización manifestándose en el desarrollo de clorita, epidota, calcita, cuarzo, sericita y pirita.

Entre las rocas efusivas se presentan, muy raras veces, calizas y margas con potencia variable no mayor de 1 a 2 m. Todo el complejo de rocas efusivas tiene buzamiento monoclinal, en dirección E y SE bajo ángulos de 35° a 40° hasta 30° a 60°.

Estas rocas efusivas son atravesadas por un stock de granitoides de composición media de cerca de 20 km<sup>2</sup> de edad supuesta Cretácico superior. En los límites del campo mineral han sido localizados tres diques de la misma composición.

Las particularidades tectónico-estructurales están determinadas por una zona principal de fracturas, que en la parte central del campo menífero recibe el nombre de Cuadrado-Queso. Además de esta falla, que por su extensión es de tercer orden (algunos km de longitud), se localizan otras de cuarto orden, tanto al norte del campo como hacia el sur. Estas dislocaciones (tanto las de tercero como las de cuarto órdenes) encajaron al mismo tiempo, y controlaron la mineralización.

Los cuerpos minerales son lentes de distintas formas. ✕

La mineralización está asociada, por una parte, a la zona de fractura central (tercer orden) y por otra parte a las de fracturas subordinadas (cuarto orden); las variaciones están dadas en la morfología de los cuerpos, la potencia, dimensiones y lógicamente en la orientación espacial, puesto que, según su composición sustancial, ambas zonas tienen un mismo complejo de minerales, tanto meníferos como de vetas.

✕ Entre los complejos meníferos se reconocen pirita, calcopirita, oro, plata, bornita, galena, esfalerita y blenda; entre los de veta, se ven la clorita, calcita, albita, cuarzo, epidota, zeolitas, actinolita. Además se reconocen algunos minerales hipogénicos tales como covelina, göethita, hidrogöethita, hidrohematita, y minerales arcillosos. ✕✕

Las rocas encajantes cerca de la mena, han sido sometidas a la alteración hidrotermal que produce una variación zonal característica; de ellas merecen particular atención las zonas cloro-cuarzosa-calcítica y epidota-calcítica, porque exactamente se relaciona con ellas la mineralización aurífera más intensa.



Según el rumbo, la mineralización se observa entre 300 a 800 m, y según el buzamiento hasta una profundidad de 150 a 250 m y esta se desarrolló en tres etapas sucesivas:

- etapa de propilitización,
- etapa cuarzo-sulfurosa,
- etapa polimetálica.

El yacimiento es de origen hidrotermal de temperaturas medias; actualmente se realizan trabajos de exploración detallada en todo este campo aurífero a cargo del Ministerio de Minas y Geología.

La otra zona de interés aurífero en Cuba, está situada en las cercanías de la ciudad de Holguín, y el oro fue explotado desde la pasada época colonial.

Los yacimientos se localizan en la zona del anticlinorio de Holguín, que está compuesto por rocas ultrabásicas serpentizadas y formaciones sedimentarias del Cretácico superior. La región se encuentra atravesada por una gran dislocación tectónica, de dirección NW, a la cual está asociada una serie de diques de gabroides y diabasas, porfiritas dioríticas y diferentes cuerpos de porfiritas dacito-andesíticas.

La mineralización aurífera parece relacionarse genética y espacialmente con las porfiritas dioríticas. La parte oriental de la zona que recibe el nombre de Coto Aguas Claras (yacimientos Nuevo Potosí, Agrupada y otros) tiene una extensión de 2,5 km y un ancho entre 200 y 800 m. La parte occidental que se denomina Coto Guayabales, tiene 4 km de largo y de 300 a 350 m de ancho (yacimientos Reina Victoria y otros).

Los yacimientos son del tipo hidrotermal, en forma de vetas mineralizadas por cuarzo, con algo de carbonatos y sulfuro. Lisitsin los considera relacionados con la formación mineral oro sulfurosa. El oro está distribuido muy irregularmente en las vetas; la ley del mineral es baja.

De los sulfuros, la pirita tiene predominio sobre otros como esferiterita, galena, calcopirita, etc. El oro se encuentra en forma nativa; así como dentro del cuarzo como diseminado en los sulfuros.

Las serpentinitas de la zona han sido sometidas al proceso de listvenitización con formación de talco, carbonatización, alguna cuarficación y piritización. Las listvenitas mineralizadas contienen poco oro.

En los últimos tiempos se realizaron investigaciones geológicas en la región para precisar las perspectivas de la mineralización aurífera, las cuales fueron ejecutadas por la Dirección General de Geología y Geofísica (actualmente Empresa de Geología).

## METALES RADIATIVOS (URANIO-RADIO-TORIO)

### GENERALIDADES

En 1896, A. Berkeley descubrió en las sales de uranio, las principales radiaciones; dos años más tarde, en 1898, los esposos Curie, utilizando minerales checoslovacos de la zona de Joachimstal, descubrieron el radio y el polonio, que habían sido previstos por el sabio ruso Mendeleiev.

Estos descubrimientos sirvieron de base a posteriores investigaciones sobre los llamados elementos radiactivos, lo que inició una nueva época en la historia del desarrollo de la química y de la ciencia en general.

Los elementos radiactivos más importantes en la corteza terrestre son radón, radio, torio y uranio. Además, en los últimos años, han sido descubiertos otros elementos llamados *transuránicos* como:

Neptunio	Np <sup>237</sup> <sub>93</sub>
Plutonio	Pu <sup>242</sup> <sub>94</sub>
Americio	Am <sup>243</sup> <sub>95</sub>
Curio	Cm <sup>247</sup> <sub>96</sub>
Berkelio	Bk <sup>249</sup> <sub>97</sub>
Californio	Cf <sup>251</sup> <sub>98</sub>
Einsteinio	Es <sup>254</sup> <sub>99</sub>
Fermio	Fm <sup>253</sup> <sub>100</sub>
Mendelevio	Md <sup>256</sup> <sub>101</sub>
Nobelio	No <sup>254</sup> <sub>102</sub>
Laurencio	Lw <sup>257</sup> <sub>103</sub>

Recientemente en uno de los institutos científicos de la URSS se obtuvo el elemento de número atómico 105, y también, el elemento de número atómico 104.

La utilización de los elementos radiactivos es muy amplia en la vida moderna; en medicina es un valioso medio terapéutico para el tratamiento de determinadas enfermedades, como el cáncer. Asimismo, la utilización de la energía atómica con fines pacíficos es uno de los problemas principales planteados en el mundo contemporáneo.

En 1954 fue construida en la URSS la primera central atómica eléctrica, y en 1959 fue botado al agua el rompehielos atómico Lenin.

En la actualidad la URSS está a la vanguardia en la utilización pacífica de la energía atómica, se construyen nuevas centrales atómicas eléctricas, y se utilizan con mayor intensidad los metales radiactivos en la tecnología moderna.

Por el carácter eminentemente estratégico de los minerales y metales radiactivos, las cifras de producción, generalmente se desconocen aunque se conoce que se obtienen grandes producciones en Canadá, URSS, África del Sur, India, Francia, Australia, EUA. Yacimientos prospectivos se localizan en España, México, Brasil, Nueva Zelanda, Turquía, Irán, Bolivia, Argentina, Nigeria, Groenlandia, Suecia, Italia, RFA, Madagascar y algunos otros países.

La producción, sin considerar a los países socialistas, fue en 1972 aproximadamente de 26 mil toneladas de  $U_3O_8$ .

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El U es un elemento radiactivo cuyo número atómico es 92 y su peso atómico 238,07. Se conocen tres isótopos de naturaleza radiactiva los cuales se caracterizan por el grado de propagación y el periodo de semidesintegración:

Isótopo	%	Período de desintegración
$U^{238}$	99,2739	$4,51 \times 10^9$ años
$U^{235}$	0,7205	$7,13 \times 10^8$ años
$U^{234}$	0,0056	$2,475 \times 10^5$ años

Como resultado de la desintegración radiactiva se libera una enorme cantidad de energía, la cual desempeña cierto papel en el balance calórico de nuestro planeta. Los productos intermedios de la desinte-

gración radiactiva del uranio son el torio, el radio y el radón, los cuales son, por tanto, sus acompañantes geoquímicos permanentes. Además de los productos intermedios, otros acompañantes permanentes del uranio son: el helio (He) y el plomo radiogénico.

El uranio se presenta en la naturaleza, en dos estados de valencia: tetra y exavalente, con tamaños de radios iónicos de 0,93 Å y 0,83 Å, respectivamente. Las propiedades litófilas del uranio se manifiestan en la afinidad bien marcada con el oxígeno, en la ausencia de combinaciones con el azufre y el arsénico, así como de uranio metálico.

La naturaleza química del U es ambigua; ello se debe a que el uranio tetravalente es similar a los lantánidos en su conjunto, mientras que el uranio exavalente tiene semejanzas con el Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo y W. Por ello el uranio presenta un gran isomorfismo con los elementos de los grupos III, IV, V y VI.

El Clarke de U en la corteza es del orden de  $10^{-4}$ ; las concentraciones mayores se obtienen en las rocas ácidas ( $3,5 \times 10^{-4}$ ) mientras que en las rocas ultrabásicas el contenido es mínimo ( $3 \times 10^{-7}$ ).

Los minerales de uranio son extremadamente escasos en las rocas magmáticas; habitualmente las pegmatitas uránicas no son fuentes habituales prácticas y valiosas de este metal. En algunas pegmatitas el contenido de  $U_3O_8$  oscila entre 0,05 a 0,1% y llega hasta 2%. Concentraciones apreciables de uranio se registran (hasta 0,1%) en algunas formaciones metasomáticas, producto de la alteración de rocas de diversa composición y de una sedimentación simultánea de los minerales uránicos.

Las formaciones hidrotermales tienen mayor interés pues en ellas el uranio forma minerales independientes (óxidos) o está oculto en otros minerales de este proceso geoquímico. El uranio es fundamentalmente tetravalente y muy escasos minerales del uranio exavalente se forman en estas condiciones.

El uranio se transporta y se deposita, junto con una serie de otros elementos corrientes en el proceso hidrotermal. Las variaciones en la composición y relaciones cuantitativas de los elementos que acompañan al uranio, origina una gran variedad de las paragénesis en los minerales de los yacimientos hidrotermales donde se encuentra este metal.

Los elementos más importantes que acompañan al U en las formaciones hidrotermales son: Bi, Co, Ni, Ag, Pb, Zn, Cu, Fe, As, Mo y Ba. La fuente de uranio en la zona de oxidación son los yacimientos meta-líferos, así como el uranio de las rocas de todo tipo.

En condiciones de clima árido el uranio forma carbonatos y silicatos; mientras que, en clima húmedo no se forman los minerales de uranio, sino que este es arrastrado a los depósitos de agua donde es

absorbido por el mineral coloidal. Aquí el uranio tetravalente pasa a exavalente; las soluciones cargadas de iones exavalentes de uranio pueden formar carbonatos y sulfatos los cuales desempeñan un importante papel en la formación de yacimientos de infiltración.

## MINERALES Y MENAS PRINCIPALES

Los minerales de uranio y torio son numerosos; se conocen más de cien minerales que contienen cantidades significativas de uranio. Los más importantes de ellos son:

Mineral	Composición química	Contenido %
Uraninita	$\text{UO}_2$	50-65
Torianita	$\text{ThO}_2$	74-93
Torita	$\text{ThSiO}_4$	71-82
Coffinita	$\text{USiO}_4$	
Nasturano	$\text{U}_3\text{O}_8$ ó $p\text{UO}_2 \cdot q\text{UO}_3 \cdot r\text{PbO}$ con impurezas de PbO y generalmente sin $\text{ThO}_2$ .	45-65
Negro de uranio	Contiene parte del U en forma exavalente (residual: en lugares de oxidación de la uraninita; de nueva formación: en las zonas de cementación de los yacimientos de U.)	
Pirocloro	$(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Th}, \text{U} \dots)_2$ $(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti} \dots)_2\text{O}_6 (\text{F}, \text{OH})$	11,4 de $\text{UO}_2$ , 15,5 de $\text{UO}_3$ y 5 de $\text{ThO}_2$ .
Brannerita	$(\text{U}, \text{Ca}, \text{Y}, \text{Th} \dots)_3 \text{Ti}_5\text{O}_{16} (?)$ ,	hasta 10,3 de $\text{UO}_2$ , 33,5 de $\text{UO}_3$ 4,1 $\text{ThO}_2$ )
Monacita	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th}) \text{PO}_4$	hasta 4,1 de $\text{UO}_2$ 2,8% de $\text{ThO}_2$
Torbernita	$\text{Cu}(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	hasta 52 $\text{UO}_3$
Tuyamunita	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	60 $\text{UO}_3$
Carnotita	$\text{K}(\text{UO}_2)(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	hasta 63 $\text{UO}_3$

Se conocen transiciones entre la uraninita y la torianita, como ejemplo la bröggerita, frecuentemente con mezcla de TR (tierras raras), itrio y otros elementos.

De acuerdo con los datos roentgenográficos, el nasturiano representa a la uraninita con superficie "arriñonada".

La importancia del U y los metales radiactivos, ha hecho que la tecnología para el enriquecimiento y tratamiento de las menas haya variado mucho. Por ejemplo, en la segunda mitad de la década de 1940, se explotaban yacimientos con leyes de 2 a 3%; en la primera mitad de la década de 1960 se explotaban los yacimientos con leyes entre 0,05 a 0,1%.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Los principales tipos genéticos de yacimientos para el uranio y los metales radiactivos se describen a continuación.

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS

Estos se relacionan con granitos y sienitas, frecuentemente alcalinas, con disseminados y pequeños *schlieren* de brannerita, pirocloro, monacita, sheralita, xenotima, circón, etc; entre rocas intrusivas u ortoneis, fundamentalmente en la edad Pre-cámbrico.

Las menas contienen  $\text{U}_3\text{O}_8$  hasta 0,01%, muy pocas veces cantidades mayores pero las reservas de esos yacimientos son grandes. Los yacimientos de este tipo se explotan sólo en el sur de Australia; en Nigeria fue descubierto un gran yacimiento de pirocloro disseminado entre granitos alcalinos con un contenido medio de 0,012% de  $\text{U}_3\text{O}_8$ , 0,03% de  $\text{ThO}_2$  y 0,033% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ; a partir de estos yacimientos magmáticos se formaron ricos placeres marinos costeros de monacita y sheralita en India, Brasil, Sri-Lanka, etc. y también, probablemente, los conglomerados uraníferos de Witwatersrand, en África del Sur y Blind River, en Canadá.

### 2. YACIMIENTOS DE PEGMATITAS

Son pegmatitas graníticas uraníferas con uraninita, torianita, torita, tántalo-titano-niobatos de uranio (samarskita, betafita y otros), monacita, circón y ortita.

Los minerales de uranio son negros y marrones; la mineralización de uranio es más frecuente en las pegmatitas diferencia-

das zonadas que coinciden con los núcleos cuarcíferos asociados con mica, espodumena y perfitas. Las pegmatitas uraníferas del magma granítico son ricas en potasio, principalmente en los complejos rocosos antiguos y profundos, muy erosionados, de los escudos canadiense, surafricano, brasilero, indostano, fenoscandio y australiano, donde las pegmatitas tienen un amplio desarrollo. En las pegmatitas es característica la asociación del U con Th, Ta, Nb, Ti, Zr, Hf, TR, Be, Li F y P. En muchos países donde se explotan estas pegmatitas el uranio se obtiene junto con estos metales, por ejemplo en Madagascar, EUA, Canadá, Noruega, Suecia, India, etcétera.

El contenido de  $U_3O_8$  en las pegmatitas no supera el 0,01%; merece destacarse dentro de este tipo el yacimiento canadiense de Wilberforst, donde el contenido de  $U_3O_8$  se eleva a 0,2%. En la zona de oxidación los minerales primarios de uranio y torio en las pegmatitas se transforman en diferentes silicatos de uranio y torio.

### 3. YACIMIENTOS DE SKARN

Aunque este no es un tipo de yacimiento característico del uranio, se conocen dos yacimientos: Azegour, en Marruecos y Shmideberg, en Silesia. En el primer caso la mineralización se asocia con scheelita, en tanto que, en el segundo caso se asocia a la magnetita. La mineralización se desarrolló en condiciones hidrotermales.

### 4. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Este tipo de yacimiento endógeno es el más importante desde el punto de vista industrial; se forma en gradación variada de temperaturas (desde las altas hasta las bajas) y frecuentemente a pequeñas profundidades.

Genéticamente los yacimientos están relacionados con rocas ígneas ácidas y moderadamente ácidas. De acuerdo con sus condiciones geológicas de formación, así como las características de sus asociaciones mineralógicas y de elementos químicos, podremos reconocer los siguientes subtipos o formaciones:

#### *Yacimientos neumatolíticos-hidrotermales*

Son de altas temperaturas, de la formación davidítica, relacionada con aplitas ricas en sodio en Radium Hill, en Australia del sur, y con gabros en Tete, en Mozambique.

El yacimiento Radium Hill representa un sistema de depósitos minerales que yacen entre sedimentos metamorfizados del Precámbrico; la composición de la mena es cuarzo y davidita, magnetita, hematita, ilmenita, rutilo, biotita. El contenido de U no es alto y la escala del yacimiento no es grande.

#### *Filonos de temperatura alta-media*

Formación estaño-wolframita-uranio, relacionados con granitos ácidos Hercinianos, en Cornualles, Inglaterra. El nasturanio se asocia estrechamente con calcopirita y se formó en su mayoría después de la deposición de la casiterita y la wolframita. A este tipo de yacimiento pertenecen algunos de los montes Metálicos.

#### *Yacimientos de stockworks*

Son de temperaturas altas a medias, de la formación Ni-Co-Cu-U muy bien representados en Shinkolobwe, en Zaire. Las menas yacen entre esquistos y dolomitas del Precámbrico sin relación por lo visto, con intrusiones y por eso algunos geólogos los consideran sedimentarios metamorfizados. Las menas se componen de uraninita, nasturanio, sulfuros y seleniuros de níquel y cobalto, sulfuros de cobre, cinc y molibdeno; minerales de oro, paladio y otros. Las menas son ricas ( $U_3O_8$  1 a 2% y más) y tanto por las reservas como por su tamaño, los yacimientos son muy grandes, siendo este uno de los tipos genéticos más productivos de todos.

#### *Yacimientos de vetas y vetillas incrustadas*

Son de temperaturas medias de la formación Cu-U, representados por los yacimientos del norte de Australia.

Los yacimientos se encuentran entre sedimentos Precámbricos metamorfizados, raramente entre granitos. La asociación mineral típica es calcopirita, bornita, calcosina y nasturanio; a veces se localizan pequeñas cantidades de galena y hematita. El tamaño de los yacimientos de este tipo es grande, aunque los contenidos son bajos en  $U_3O_8$  (0,1 a 0,5%). Este tipo tiene un gran significado económico.

#### *Yacimientos de oro-uranio, polimetálicos*

Son de temperaturas medias, con nasturanio asociado (o uraninita) y piritita, calcopirita, esfalerita, galena, siderita,



y oro nativo. Representan a este tipo pequeños yacimientos de filones en el estado de Colorado, en EUA, y en Chihuahua, en México.

#### *Yacimientos de la formación mineral de uranio*

De temperaturas medias con poca cantidad de sulfuros, seleniuros, y con abundancia de carbonatos, clorita y hematita.

Los yacimientos son de vetas incrustadas y tienen un gran tamaño, pero en comparación sus menas son pobres (0,1 a 0,2% de  $U_3O_8$ ). Este tipo se explota intensamente en Canadá, al norte del lago Athabasca.

#### *Yacimientos de la formación "5 elementos" (Co, Ni, Bi, Ag, U).*

Son de temperaturas medias-bajas, yacen entre rocas sedimentarias metamorfizadas, y raramente entre granitos del Precámbrico. El nasturanio se asocia con arseniuros de Co y Ni, plata y bismuto nativos, argentita, bismutina, carbonatos, cuarzo, calcedonia y pedernal, barita y fluorita.

La relación genética de la "formación de 5 elementos" con las rocas ígneas, a menudo no es clara; generalmente se relacionan con granitos muy jóvenes y frecuentemente tienen estrecha relación espacial con diques de diabasa muy tardíos. Es necesario señalar que la meniferación se desarrolla en muchos estadios, en los que son frecuentes los procesos de telescopización y el desarrollo de menas colomórficas.

Se cree que los yacimientos de este tipo están relacionados genéticamente con el magma de composición moderadamente ácido. Los yacimientos del tipo descrito son muy grandes y sus menas ricas ( $U_3O_8$ ) hasta 1 a 2%. Son muy productivos.

Yacimientos típicos son los de la región del lago del Gran Oso y del lago Contact, en Canadá así como los de los montes Metálicos: Joachimsthal, en Checoslovaquia; Shneeberg y otros en Sajonia.

#### *Yacimientos de la formación uranio-sulfuros-fluorita*

Son de bajas temperaturas, relacionados con intrusiones felsíticas como los de Urgerika, en Portugal o con riolitas, como Marysvale, en EUA. La composición de los filones meníferos es calcedonia, nasturanio, fluorita, pirita, galena,

molibdenita. La escala de estos yacimientos es industrial pero no es grande.

#### *Yacimientos de la formación fluorítica con uranio*

Yacimiento de bajas temperaturas es típico el de Columbia Británica en Canadá.

Los filones de fluorita yacen en traquitas y sus tufas con celestina, e impurezas de mica, pirita, nasturanio y torita uranínfera. El contenido medio de la mena es  $U_3O_8$  equivalente a 0,11%; además la mena contiene TR (cerio, itrio y lantano) hasta 0,75%.

### 5. YACIMIENTOS DE INTEMPERISMO

Yacimientos de la formación carnotítica de génesis de infiltración representados por lentes e incrustaciones de carnotita con roscoelita, óxidos hidratados de U, yeso, minerales secundarios de cobre y vanadio, a veces barita, entre rocas sedimentarias (areniscas y conglomerados, raramente entre calizas y esquistos).

Los horizontes inferiores de una serie de yacimientos contienen nasturanio, coffinita, minerales de vanadio y sulfuros de metales coloreados. Estas menas primarias, con excepción de las oxidadas, son consideradas por algunos geólogos como sin-genéticas con los sedimentos; otros las consideran epigenéticas. Ejemplos típicos son los yacimientos del estado Utah y Colorado, en EUA; otros yacimientos se conocen en Australia, Brasil y algunos otros países.

Este tipo es de una gran importancia para el uranio y también para el vanadio.

### 6. YACIMIENTOS DE PLACERES

Representados por placeres aluviales y costeros contemporáneos que contienen monacita, sheralita, circón, pirocloro y una serie de minerales con contenidos de uranio y torio. Los yacimientos de la India son los más significativos; también se explotan en Brasil, Sri Lanka, Nigeria y en el suroeste de África.

### 7. YACIMIENTOS METAMORFOGÉNICOS

Son conglomerados Precámbricos; frecuentemente no sólo contienen U sino además Au. La mineralización de U está

representada por brannerita, uraninita, nasturanio, tijolita en asociación con oro y con arseniuros de níquel y cobalto. El yacimiento mayor es el de Blind River, en Canadá; con reservas de cerca de 2 millones de toneladas de mineral que contienen como promedio 0,14% de  $U_3O_8$ . A este tipo pertenece Witwatersrand, en África del Sur; con contenido de 0,01% de  $U_3O_8$ .

#### OTRAS FORMACIONES

Existen otros tipos y formaciones más, como:

- calizas silicificadas uraníferas, yacientes entre series lagunales-continuales,
- esquistos negros marinos, bituminosos con contenidos de uranio de 0,01% de  $U_3O_8$ ,
- carbones uraníferos, presentan interés en RFA ( $U_3O_8$  en carbones equivalente a 0,12%), así como en una serie de yacimientos de lignito y asphaltita de los EUA (0,2-2% de  $U_3O_8$ ).
- fosforitas uraníferas, las cuales se distribuyen ampliamente en muchos países (EUA, Marruecos, Túnez, República Árabe de Egipto, y otros más). El contenido de  $U_3O_8$  es de 0,005 a 0,01%. Particular interés presentan las fosforitas de las menas en los estados de Idaho y Wyoming con contenidos de 0,01 a 0,02% de  $U_3O_8$ .
- yacimientos de circón uranífero, relacionados con sienitas nefelínicas en el estado de Minas Geraes en Brasil. En los concentrados se obtiene 65 a 75% de  $ZrO_2$  y 0,5% (y más) de  $U_3O_8$ .

#### PROVINCIAS Y ÉPOCAS METALOGÉNICAS

La época más rica para la formación del uranio fue el Precámbrico, cuyos yacimientos más ricos se encuentran en el Congo, Canadá, Brasil, India, África del Sur y probablemente también en Australia.

Grandes yacimientos se formaron también en la época Herciniana, en los montes Metálicos, Francia, Gran Bretaña y probablemente, en España y Portugal. En la época Alpina están los yacimientos de EUA y México.

Es necesario señalar que las concentraciones mayores, así como los yacimientos más notables, se encuentran en las áreas de plataformas y escudos.

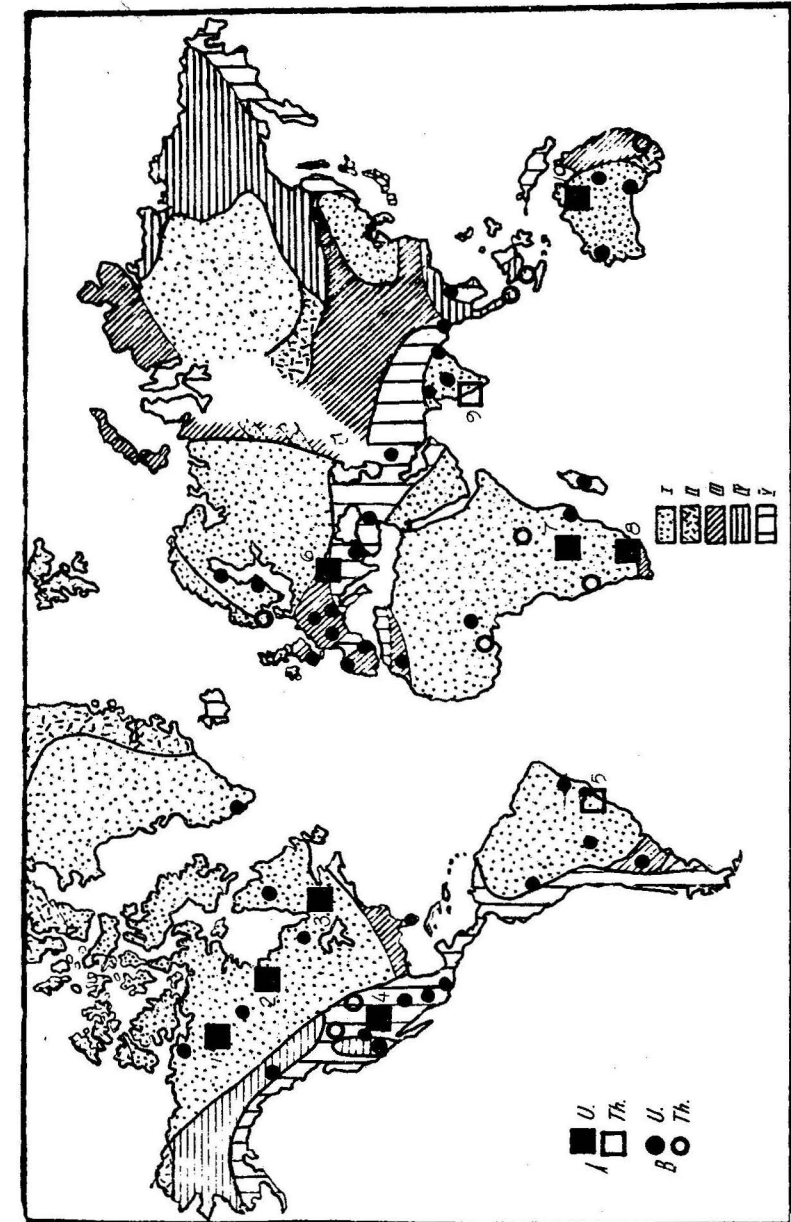


Figura 90

Principales yacimientos de uranio-torio del mundo I. Plataformas II. Zonas plegadas caledonianas III. Zonas plegadas hercínicas IV. Zonas plegadas kimberlíticas V. Zonas plegadas alpinas A. Regiones meníferas y yacimientos de significado mundial 1. Gran Lago del Oso (Canadá) 2. Gunnar Eis (Canadá) 3. Blind River (Canadá) 4. Utah, Colorado (EUA) 5. Bahía (Brasil) 6. Montes Metálicos (Checoslovaquia) 7. Witwatersrand (África del Sur) 8. Trávankor (India) 9. Ram-Dzhangl (India) B. Yacimientos importantes pero de significado regional o local

## DESCRIPCIÓN DE YACIMIENTOS IMPORTANTES

Describiremos las principales características geológicas de algunos yacimientos importantes en el mundo.

### YACIMIENTO SHINKOLOBWE, KATANGA, ZAIRE

Este yacimiento fue descubierto en 1915 y es uno de los más grandes de todo el mundo y el yacimiento más productivo de menas ricas de uranio.

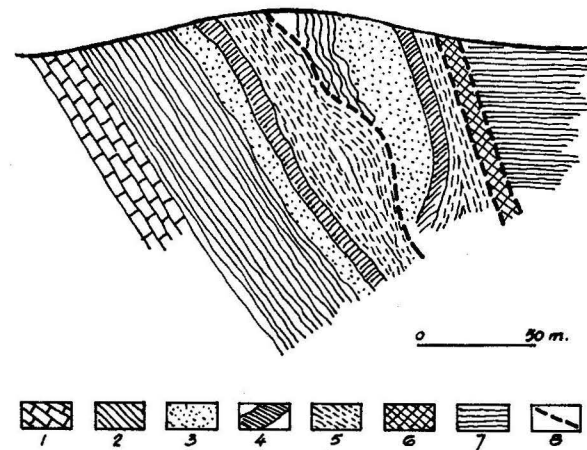


Figura 91

Perfil del yacimiento Shinkolobwe en Katanga Zaire

(G. Butgenbach.)

1. Galizas dolomitizadas 2. Esquistos dolomíticos 3. Rocas porosas 4. Rocas silíceas  
5. Esquistos talcosos 6. Formación silíceo-talcosa 7. Serie Kundelung 8. Fallas

Está situado hacia el extremo occidental de una enorme pradera de dirección NW conocida como el sinclinorio de Katanga, y está compuesta por rocas sedimentarias del Precámbrico, arrugadas en pliegues y cortado por dislocaciones disyuntivas.

Además de los yacimientos de uranio, en los límites del referido sinclinorio yacen enormes yacimientos de cobre con cobalto, cinc y otros metales.

La región del yacimiento uranífero se compone de dos complejos rocosos del Precámbrico; el sistema Kundelungu (argilitas, esquistos

cuarcíferos, micáceos, conglomerados) y las más antiguas de la serie Menífera (rocas carbonatadas recrystalizadas) que como su nombre lo indica está mezclada con las menas. El contacto de estas series es tectónico y ambas están partidas por innumerables fallas y grietas, las cuales fueron un medio ampliamente favorable para la circulación de las soluciones mineralizantes y el control de la mineralización.

La meniferación se expresa a través de filones y *stockworks* y, también, minerales meníferos diseminados en dolomitas silicificadas. Cuerpos minerales aislados se extienden por su rumbo a lo largo de decenas de metros, con potencias de algunos *cm* hasta 1 *m* que alcanzan hasta 350 *m* y más, según la profundidad. En la zona de oxidación se desarrollan minerales secundarios de U; hacia los horizontes inferiores se encuentran las menas primarias ricas, representadas por la uraninita (en cristales cúbicos, muy bien formados) así como nasturano en asociación con grandes cantidades de sulfuros de cobalto y níquel-casiterita, varsita,  $\text{NiS}_2$ , zigenita  $(\text{Co}, \text{Ni})_3\text{S}_4$ . En menores cantidades se encuentra la pirita, calcopirita, digenita, covelina, bornita, molibdenita, carrolita y también cantidades apreciables de magnesita, cuarzo, monacita y clorita. La mena contiene Pd, Pt y algo de Au, Cd, Ge, Te; el contenido de  $\text{U}_3\text{O}_8$  es de 2 a 3%.

Sobre la génesis del yacimiento se opina que es de tipo magmático, formado por soluciones ascendentes probablemente relacionado con granitoides de edad Proterozoico lo cual coincide con la edad de la uraninita (610 millones de años) y coincide con el período de granitización en la región vecina de Tanzania.

### YACIMIENTO BLIND RIVER, ONTARIO, CANADÁ

La región está compuesta de rocas Precámbricas:

- capas del Pre-Huroniano formadas de rocas sedimentarias metamorfolizadas y granito-neis,
- capas sedimentarias del Huroniano que yacen discordantemente sobre las primeras,
- intrusivos Post-Huronianos de diabasas cuarcíferas, las cuales atraviesan en innumerables ocasiones a los macizos graníticos y después a los diques de diabasas olivinicas.

Son uraníferos, diferentes tipos de conglomerados metamorfolizados que yacen en la base de las capas del Huroniano. Los conglomerados son cantos semiaplastados de cuarzo. El cemento está compuesto de una masa piritizada de granos finos de cuarzo, moscovita y biotita.

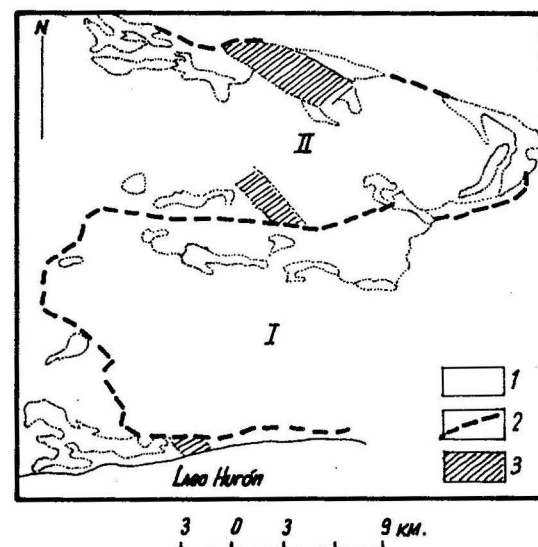


Figura 92

Esquema de los afloramientos de los conglomerados uraníferos del yacimiento Blind River, Canadá

1. Rocas Precámbricas 2. Zona menífera 3. Zonas exploradas

I. Basamento Prehurónico II. Series sedimentarias huronianas.

Los minerales radiactivos son: branerita, monacita, uraninita en forma de granos finos (hasta 0,1 mm) que contienen cerca de 1% de torio, TR, etcétera. Además en el cemento se encuentra circón, rutilo, magnetita, hematita y más raramente oro nativo, en cantidades insignificantes. El contenido medio de uranio es de 0,085%; las reservas de este yacimiento son gigantescas.

## METALES RAROS Y DISPERSOS

En las últimas dos o tres décadas, se han comenzado a utilizar en la industria y la tecnología modernas —automatización, electrónica, radiotécnica, cosmonáutica, atómica—, algunos metales que se catalogan como raros, dispersos, y de tierras raras (TR). Si tenemos en cuenta, entre otras cosas, la forma en que se encuentran en la naturaleza, desde el punto de vista geológico-geoquímico los podemos agrupar en:

- metales relacionados con las pegmatitas, *skarn*, greisen o diseminados en las rocas (fundamentalmente en forma de minerales accesorios). Frecuentemente forman importantes concentraciones en placeres. A este grupo de metales pertenecen: Tántalo (Ta), Niobio (Nb), Berilio (Be), Circonio (Zr), Hafnio (Hf), Litio (Li), Cesio (Cs), Rubidio (Rb), elementos del grupo de las tierras raras (TR) y cercanos a ellos el Escandio (Sc) y también el Boro (B).
- metales diseminados fundamentalmente en formaciones de menas sulfurosas de yacimientos minerales de metales coloreados, y algunos metales raros. A este grupo pertenecen: Cadmio (Cd), Galio (Ga), Germanio (Ge), Indio (In), Renio (Re), Talio (Tl), Teluro (Te) y Selenio (Se).

## TÁNTALO Y NIOBIO

### GENERALIDADES

Descubiertos en los años 1801 y 1802, no fue hasta 1903 (Ta) y 1929 (Nb), que pudieron obtenerse en forma metálica.



La producción de concentrados de niobio (coulombio) en 1971 fue estimada en 9 723 toneladas y para el tántalo el estimado fue de unas 820 toneladas. Estas cifras no consideran la producción de los países socialistas. Los principales países productores de minerales de Ta y Nb son la región del Congo, Nigeria, Canadá y Brasil.

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $Ta_{41}^{92,91}$  y el  $Nb_{73}^{180,95}$  se caracterizan por parecerse mucho en sus propiedades físicas, químicas y cristaloquímicas, por lo que es difícil encontrarlos separados en la naturaleza. Son elementos típicamente litófilos y el Clarke del Ta es  $2,5 \times 10^{-4}$  mientras que el del Nb llega a  $2 \times 10^{-3}$ .

Es característica la asociación del Ta y el Nb con el Be, Li, Sn y W; también con el U, Ti, Zr, Rb y Cs en las pegmatitas graníticas; el Nb (con pequeñas cantidades subordinadas de Ta), con Zr, TR, Ti y Ga se relaciona estrechamente con intrusivos alcalinos (sienitas nefelínicas y otras).

La cantidad de minerales de Nb y Ta, o aquellos que tienen determinados contenidos de estos metales, es bastante grande. Sin embargo, sólo tienen importancia industrial los siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Columbita	(Fe, Mn) Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	hasta 82% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Tantalita	(Fe, Mn) Ta <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	hasta 86% Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Loparita	(Na, Ce, Ca) (Nb, Ti) O <sub>3</sub>	hasta 11% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> y 1% de Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Pirocloro	(Na, Ca...) (Nb, Ti) O <sub>6</sub> (F, OH)	hasta 63% de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ó 77% de Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Perovskita	CaTiO <sub>3</sub>	hasta 1,5% Nb. y 2% TR

Además, algunas casiteritas de pegmatitas y greisen, contienen frecuentemente hasta 4% de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> más Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; la wolframita y la eudialita contienen hasta 0,5% de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, circón hasta 2% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 0,3% de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Entre los tipos genéticos de yacimientos de Ta y Nb tenemos:

### 1. YACIMIENTOS MAGMÁTICOS DE LOPARITAS

Relacionados con rocas alcalinas (sienitas nefelínicas melano-cráticas y urtitas). Estas rocas se localizan en horizontes estratificados y se extienden según su longitud, por decenas de km con potencia entre 0,1 a 1 m con contenido de loparita de 2,5 a 20%. Este tipo tiene una importancia significativa para la URSS.

### 2. YACIMIENTOS DE PEGMATITAS

Se conocen dos tipos: pegmatitas de rocas alcalinas con loparitas, ilmenorutilo y pirocloro, cuyos yacimientos se conocen en los Urales. El otro tipo es más importante; son las pegmatitas del magma granítico con tantalita, columbita, berilo, espodumena y casiterita, en las partes albitizadas de las pegmatitas donde el contenido de la columbita y la tantalita oscila entre 0,03 a 0,1% y más.

Yacimientos de este tipo se localizan al NE de Brasil, Congo, Nigeria y también el gran yacimiento Bodshin, en Australia occidental (rico en tantalita, contiene berilio y hasta 1% de Cs<sub>2</sub>O en forma de pollucita), así como yacimientos en URSS, EUA, Argentina, India, etc. Los ricos placeres que se asocian con estos yacimientos tienen una enorme importancia económica e industrial. Son placeres del tipo aluvial fundamentalmente.

### 3. YACIMIENTO DE SKARN

Yacen entre rocas carbonatadas (calizas y dolomitas).

### 4. YACIMIENTOS DE CARBONATITAS

Genéticamente relacionados con intrusiones alcalinas. Los yacimientos de este tipo se desarrollan ampliamente y se conocen en una serie de regiones de URSS, en Uganda, Tanzania, Kenia, Zambia, Mozambique, África del Sur, Namibia, Brasil, EUA, Canadá, Noruega, RFA.

La composición de la mena es perovskita, carbonatos de las TR, apatito, a veces también circón, baddeleita, monacita, torianita (uraninífera), magnetita y otros minerales.

La escala de los yacimientos de este tipo frecuentemente es grande, y contiene  $Nb_2O_5$  en la mena en cantidades de 0,3 a 0,5% y más. La asociación típica es Nb-Ta-Ti-TR-Zr-Th-U.

#### 5. YACIMIENTOS HIDROTERMALES Y NEUMATOLÍTICOS

Constituidos por filones de cuarzo y greisen, generalmente estanníferos y wolframíticos con impurezas de Ta-Nb. Se conocen algunos yacimientos en Transbaikal, la RSS de Kazajstán, Nigeria y Namibia.

#### 6. YACIMIENTOS DE PLACERES ELUVIALES-DELUVIALES Y ALUVIALES CONTEMPORÁNEOS

De columbita (en Nigeria); tantalita (en Brasil y Congo) y pirocloro con contenido de Nb, Ta, y U (en Kaffo-Balei) en Uganda.

### BERILIO

#### GENERALIDADES

El Be es un metal que tiene un peso específico bastante bajo y se utiliza en aleaciones especiales con el Cu y el Al, en la industria moderna. También tiene una gran utilización el bronce berílico, Cu-Be (Be: 2,5-3%).

#### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $Be^{9,013}$  presenta 5 isótopos en la naturaleza, pero sólo el  $Be^9$  es estable; el Be en los procesos geoquímicos ocurridos en la corteza terrestre se comporta como elemento litófilo típico. El Clarke de Be es de  $3,8 \times 10^{-4}$  y se aprecia un aumento en el contenido de metal, a partir de las rocas ultrabásicas hacia las ácidas.

El Be se relaciona con granitos, y ocasionalmente con el magma alcalino; se concentra en las pegmatitas, en los yacimientos hidrotermales de alta temperatura, pocas veces en *skarn* y menas hidrotermales de temperaturas medias y bajas.

Los principales minerales de Be son:

Mineral	Composición química	Contenido %
Berilo	$Be_3Al_2(Si_6O_{18})$	Be: 5,1% (BeO: 14,1%)
Helvina	$Mn_8(BeSiO_4)_6S_2$	Be: 4,9% (BeO: 13,6%)

Menor importancia tiene el crisoberilo  $BeAl_2O_4$  (Be cerca de 7%) y la fenaquita  $Be_2SiO_4$  (Be, 16%).

### TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Entre los principales tipos de yacimientos genéticos encontramos los siguientes.

#### 1. YACIMIENTOS DE PEGMATITAS

Proceden del magma granítico totalmente diferenciadas con berilo, minerales de Li (espodumena y lepidolita) y turmalina (frecuentemente rubelita), tántaloniobatos, casiterita.

Yacimientos de este tipo se conocen en Kazajstán, en la URSS; en los estados del NE de Brasil; Argentina; Australia occidental; Canadá, Black Hills, en Dakota del Sur, en EUA; en Radjastán, India; Transvaal en África del Sur; Mozambique; Rhodesia; Marruecos y Madagascar. Este es el principal tipo genético para la formación del berilio.

Se conocen también pegmatitas desilicatadas, las que yacen en serpentinitas con flogopita, biotita, enriquecidas con berilio. Con las pegmatitas se asocian frecuentemente filones hidrotermales tardíos ricos en fluorita, apatito, sulfuros y berilo. Ejemplos son los yacimientos de Namibia.

#### 2. YACIMIENTOS DE SKARN

Entre los cuales se pueden reconocer dos subtipos; *skarn* de helvina (como el yacimiento Iron Hill en EUA, y Gortekolen, en Noruega) y *skarn* de fenaquita-crisoberilo con fluorita, desarrollados en el extremo oriente de URSS y en la República Popular China.

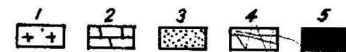
### 3. YACIMIENTOS HIDROTERMALES

Estos yacimientos son filones de cuarzo y greisen de génesis hidrotermal de altas temperaturas y pneumatolíticos con casiterita, wolframita, molibdenita y berilo. A este tipo pertenecen los yacimientos de Kazajstán y Colombia.

Figura 93

Mapa geológico del yacimiento Iron Hill, EUA

1. Aplita y granito de grano fino 2. Caliza recristalizada de grano grueso 3. Granulita cuarzo-piroxeno-clinozoizíticas 4. Tactitas magnetito-andratíticas masivas 5. Rocas bandeadas ricas en helvina.



## LITIO

### GENERALIDADES

Este metal descubierto en 1817 fue obtenido en forma de metal puro en el año 1855. Representa el más ligero de todos los metales y su peso específico es de 0,534.

La utilización industrial del Li comenzó en la década de los años veinte de este siglo, y unos cuantos años más tarde, la industria consumía cincuenta veces más Li por su utilización en la industria atómica. Además, en forma de metal puro, el Li se alea con Mg, Al, Zn y Be para la construcción de aviones, así como también, en calidad de combustible de cohetes.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $\text{Li}^{6,94}$  pertenece a los metales alcalinos y se le conocen 2 isótopos estables:  $\text{Li}^6$  (7,5%) y  $\text{Li}^7$  (92,5%); su Clarke es 0,0032 y se encuentra en la corteza, tanto en forma dispersa como concentrada, aunque predomina la primera. Es un elemento típicamente litófilo; dada sus características cristalógicas, puede aparecer en forma de mezcla isomórfica en otros muchos minerales.

En sentido general, el Li se asocia con el magma de composición granítica, y se concentra en las pegmatitas, greisen y yacimientos hidrotermales y pneumatolíticos de altas temperaturas en asociación con el Be, Ta, Nb, Sn, W, Cs y Rb.

Las mayores producciones de concentrados de Li se obtienen en URSS y EUA; también se produce Li en Canadá, Rhodesia, Brasil y Australia.

En la actualidad se conocen veinticuatro minerales independientes de Li, de los cuales la mayoría son silicatos. Los de mayor significado económico e industrial son:

Minerales	Composición química	Contenido %
Espodumena	$\text{Li, Al}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	hasta 8% de $\text{Li}_2\text{O}$
Petalita	$(\text{Li, Na}) \text{AlSi}_4 \text{O}_{11}$	2-4,9% de $\text{Li}_2\text{O}$
Ambligonita	$\text{Li, Al}(\text{F, OH})(\text{PO}_4)$	8-10% de $\text{Li}_2\text{O}$
Lepidolita	$\text{K, Li, Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F, OH})_2$	hasta 6% de $\text{Li}_2\text{O}$

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Entre los principales tipos genéticos de yacimientos se reconocen:

### 1. YACIMIENTOS DE PEGMATITAS

Son pegmatitas del magma granítico y este tipo desempeña el papel fundamental en la extracción de litio. Entre ellos están los grandes yacimientos del Canadá, los de Rhodesia, los del NE brasileño, EUA, los de Namibia y también las pegmatitas espoduménicas de URSS. Las menas de litio son complejas y ellas se extraen junto con el Be, Ta, Nb, Cs, Rb.

### 2. FILONES PEGMATÍTICOS Y GREISEN

Con wolframita, casiterita, lepidolita, zinwaldita, topacio, ambligonita. A este tipo pertenecen algunos yacimientos del NE de URSS, montes Metálicos, Portugal, SE de la República Popular China.

### 3. SALMUERAS

En algunos lagos donde el Li se asocia con sales de K, sulfatos de Na, bórax y bromo. El contenido de ClLi se eleva hasta 0,02% (0,0035 Li). A este tipo pertenece el yacimiento del Lago Sirls, en California, EUA con enormes reservas de Li que desempeñan un papel muy importante en la producción de este metal en EUA.

## CIRCONIO Y HAFNIO

### GENERALIDADES

Los minerales de circonio fueron conocidos en la antigüedad, y el metal fue obtenido en forma pura en el año 1914. El hafnio es un metal que, se encuentra estrechamente relacionado con el circonio, y no forma minerales independientes.

La utilización del circonio es, fundamentalmente, en la producción de instrumentos de corte rápido y como metal aditivo en los aceros

y aleaciones especiales, además de los usos generales de estos metales raros y dispersos en las industrias modernas de la electrotécnica, cosmonáutica, etcétera.

## CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $Zr_{40}^{91,22}$  se encuentra en el cuarto grupo y quinto período de la tabla periódica; su acompañante el  $Hf_{72}^{178,6}$  ocupa dentro del mismo grupo, el sexto período. Al Zr se le conocen 5 isótopos estables, siendo el  $Zr^{90}$  (51,5%) el más difundido; al Hf se le conocen 6 isótopos, y los más frecuentes son:

Isótopos	%
$Hf^{180}$	35,4
$Hf^{178}$	27,1

El Clarke de Zr es de 0,017 mientras que el del Hf es de 0,0001; El Zr es un elemento litófilo; en la naturaleza se conocen sus combinaciones exclusivamente con el oxígeno, representadas estas por óxidos y silicatos. El Hf, por otra parte, presenta una semejanza geoquímica muy grande con el Zr lo cual hace que en la naturaleza estén estrechamente unidos. Según Hevesy y Goldschmidt, esto se debe al fenómeno de la "contracción lantánida"; ambos elementos poseen el mismo radio iónico: 0,82Å.

En comparación, las rocas ácidas son más ricas en Zr que las básicas y ultrabásicas, y las más altas concentraciones de este metal se localizan en las sienitas nefelínicas y rocas alcalinas. A pesar de poseer un Clarke relativamente alto, (0,017) en comparación con otros elementos más conocidos, el Zr se encuentra extremadamente disperso en la naturaleza.

Se conocen varios minerales de Zr entre los cuales los más importantes son:

Mineral	Composición química	Contenido %
Circón	$ZrSiO_4$	$ZrO_2$ 67%; hasta 2% $HfO_2$
Badeleita	$ZrO_2$	$ZrO_2$ hasta 93%; 0,5-1,2% de $HfO_2$
Eudialita	$(Na, Ca)_6 ZrSi_6O_{17} (O, OH, Cl)$	contiene $ZrO_2$ 12-14% hasta 0,4% de $HfO_2$



El Zr, por su carácter disperso, antes señalado, además de formar, pegmatitas independientes, de circonio (Fersman), sus principales depósitos minerales, lo constituyen los placeres costeros marinos, fundamentalmente en Australia. Además se localizan placeres de este tipo en la India, EUA, Brasil, en los Urales y Ucrania, en URSS.

## CESIO Y RUBIDIO

### GENERALIDADES

Estos metales fueron descubiertos en los años 1860 y 1861 respectivamente; hoy en día tienen una gran utilización industrial en la radio-técnica, procesos de automatización, etc.; también como fotoelemento en la industria cinematográfica, lámparas al vacío y en medicina.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $\text{Cs}_{55}^{132,91}$  y el  $\text{Rb}_{37}^{85,47}$  están en el primer grupo de la tabla periódica; el primero en el sexto período y el segundo en el quinto período. Al Rb se le conocen 2 isótopos:  $\text{Rb}^{85}$  (72,15%) y  $\text{Rb}^{87}$  (27,85%) mientras que al Cs se le conoce 1 isótopo estable, el  $\text{Cs}^{133}$ .

Los metales alcalinos Rb y Cs se presentan casi siempre unidos en la naturaleza; por regla general siguen al K. El Clarke de Rb en la corteza es de 0,015 y el de Cs, de 0,00037.

De acuerdo con los contenidos de estos metales en los distintos tipos de rocas, se aprecia que se incrementan a partir de las rocas ultrabásicas hacia las ácidas. Ambos elementos, por tanto, están relacionados estrechamente desde el punto de vista geoquímico con el magma granítico, y forman concentraciones en las pegmatitas junto con el Li, Be, Ta, Nb y se aíslan en pegmatitas ricas en Na (albita) y Li (espodumena y lepidolita).

Las concentraciones mayores de Cs y Rb se localizan en la pollucita  $\text{Cs}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\text{H}_2\text{O}$ , mineral con propiedades cristalópticas muy

parecidas al cuarzo, el cual contiene desde 23,5% hasta 36,5% de  $\text{Cs}_2\text{O}$  y hasta 3,73% de  $\text{Rb}_2\text{O}$ . Impurezas de Cs y Rb se encuentran en minerales de litio y berilio; en el yacimiento de berilo blanco de Australia, hay 0,72% de  $\text{Cs}_2\text{O}$  y en el berilo sulfuroso del mismo yacimiento, hasta 0,92% de  $\text{Cs}_2\text{O}$ .

Ambos elementos se encuentran en depósitos salinos junto con la carnalita, y también en las aguas de una serie de fuentes minerales. Yacimientos industriales de pollucita se conocen en EUA, Namibia, África del Sur, Suecia y la URSS.

## TIERRAS RARAS

### GENERALIDADES

Constituyen un grupo de elementos muy utilizados en la actualidad para el desarrollo de la ciencia y la técnica.

En la industria el cerio es el metal más utilizado dentro de este grupo de elementos. Se utiliza en lámparas de neón, aleaciones con el Al y Mg, y también en forma de  $\text{CeO}_2$ , para vidrios ópticos.

El lantano se utiliza en aleaciones con el Al, y en la producción de elementos transuránicos. De las restantes TR, la que más utilización industrial posee es el ltrio, de gran importancia para alea con el Al; con el praseodimio para la aviación y con el tulio, en la producción de aparatos roetgenográficos.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Los elementos de las tierras raras (TR), en su conjunto, componen el 0,005% de la corteza terrestre (1/3 de esta cantidad corresponde al cerio).

Entre los metales de las tierras raras se reconocen dos grupos:

-Grupo del cerio(Ce): Ce, Lantano ( $\text{La}_{57}^{136,92}$ )  
 Praseodimio ( $\text{Pa}_{59}^{140,92}$ )  
 Neodimio ( $\text{Nd}_{60}^{144,27}$ )  
 Promecio ( $\text{Pm}_{61}^{147}$ )  
 Samario ( $\text{Sm}_{62}^{150,35}$ )  
 Europio ( $\text{Eu}_{63}^{150}$ )

– Grupo del itrio (Y): Y, Gadolino ( $Gd_{64}^{157,26}$ )  
 Terbio ( $Tb_{65}^{158,93}$ )  
 Disprosio ( $Dy_{64}^{162,51}$ )  
 Holmio ( $Ho_{67}^{164,94}$ )  
 Erblio ( $Er_{68}^{167,27}$ )  
 Tulio ( $Tu_{69}^{168,94}$ )  
 Iterbio ( $Yb_{70}^{173,04}$ )  
 Lutecio ( $Lu_{71}^{174,99}$ )

La característica química fundamental de estos elementos es el fenómeno de la contracción lantánida, por lo cual se conoce también, al grupo, en general, como **elementos lantánidos**.

La geoquímica de las TR está determinada por la estrecha relación con intrusiones de composición ácida y alcalina y se concentran en las pegmatitas, greisen, *skarn* y en formaciones hidrotermales. Las principales fuentes minerales de TR son las siguientes:

Minerales	Composición química	Contenido %
Monacita	$(Ce, La \dots) PO_4$	( $TR_2O_3$ hasta 68%)
Xenotima	$YPO_4$	(TR hasta 63%)
Loparita	$(Na, Ce, Ca)(Nb, Ti)O_3$	(TR hasta 34%)
Gadolinita	$Y_2Be_2Si_2O_{10}$	

La ortita contiene hasta 23% de  $Ce_2O_3$  más  $La_2O_3$ ; la monacita hasta 5% de  $Y_2O_3$ , el apatito y la lovchorita hasta 1,5% de Y; la mica y el topacio hasta 1% y la casiterita y la scheelita hasta 0,5% de  $TR_2O_3$

## TIPOS GENÉTICOS DE YACIMIENTOS

Poseen significado industrial los siguientes tipos genéticos de yacimientos: pegmatitas y placeres marinos y aluviales de monacita y xenotima que se localizan en URSS, Brasil, India, Namibia, África del Sur y EUA.

## ESCANDIO

### GENERALIDADES

El escandio por una serie de características está muy cercano a las TR del grupo del Itrio. Fue previsto por Mendeleiev y descubierto en 1879.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Se localiza en las pegmatitas, donde forma compuestos isomórficos con la columbita, circón alterado e hidratado (hasta 1%); en las zonas de *skarn* de granates, pobres en Fe; (0,01-0,5%), en la ortita (0,02-0,1%); en la lepidolita y moscovita (hasta 0,4%) y también en la wolframita, casiterita (hasta 0,1-1% de  $ScO_2$ ).

El contenido medio de Sc en la corteza es de 0,0006.

En las pegmatitas de Noruega y Madagascar, se localiza el mineral Tortbeinita  $(Sc, Y)_2Si_2O_7$  con un contenido de 40% de  $Sc_2O_3$ . En las cenizas de la hulla se encuentra entre 60-400 g/t de Sc. La extracción industrial del Sc se hace de los concentrados de wolframita y casiterita.

## CADMIO

### GENERALIDADES

El Cd fue descubierto en 1817 y a inicios del siglo xx comenzó a tener una gran utilización en la industria. El Cd se usa en la producción de aleaciones especiales ligeras y en bronce cádmico (1% de Cd), así como en la producción de pinturas, de acumuladores y fotoelementos.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $Cd_{48}^{112}$  está colocado en el segundo grupo, quinto período de la tabla periódica; tiene seis isótopos de los cuales el  $Cd^{114}$  (28,8%) y el  $Cd^{112}$  (24%) son los más difundidos. Según sus cualidades cristaloquímicas, el Cd se asemeja mucho al Zn lo cual explica la relación de

ambos metales en la naturaleza. El Clarke de Cd en la corteza terrestre es de 0,000013 y el contenido del mismo en las rocas es muy bajo siendo algo superior en las básicas.

En total se conocen seis minerales del Cd, pero ninguno tiene importancia industrial. El Cd se obtiene fundamentalmente como resultado del enriquecimiento de minerales de Zr, y en menor grado de la estannina, la calcopirita, la calcosina, la bornita y la tetraedrita. Entre los minerales de Cd están:

<i>Minerales</i>	<i>Composición química</i>	<i>Contenido %</i>
Greenockita	SCd	hasta 77% de Cd.
Otavita	CO <sub>3</sub> Cd	74,5% de CdO

El Cd por tanto, no forma yacimientos propios sino que se encuentra en los del tipo hidrotermal de Zn y otros metales.

## GALIO

### GENERALIDADES

El galio es un elemento cuya propiedad fundamental es su baja temperatura de fusión (29,75°C) y su elevada temperatura de ebullición (2 000°-2 100°C). En relación con esto, el Ga se utiliza en termómetros para controlar variaciones de temperaturas altas y en el control de los procesos metalúrgicos. También se utiliza en las lámparas catódicas junto con el Cd, Al y Zn y actualmente en la producción de dispositivos electrónicos, (semiconductores, etc.).

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Ga<sub>31</sub><sup>69,72</sup> está ubicado en el tercer grupo, cuarto período de la tabla periódica; se le conocen dos isótopos: Ga<sup>69</sup> (61,2%) y Ga<sup>71</sup> (38,8%); su Clarke en la corteza se eleva a 0,0019 y es un elemento disperso típico. Pese a su Clarke relativamente grande y debido a la semejanza de sus propiedades cristaloquímicas con los principales elementos componentes de las rocas y la amplia posibilidad de isomorfismo con ellos el galio no llega a formar acumulaciones considerables. Se le conoce un solo mineral independiente: la galita (CuGaS<sub>2</sub>).

Las concentraciones más importantes de Ga se producen en el proceso hidrotermal donde manifiesta, ampliamente, sus propiedades litófilas y calcófilas. El Ga se concentra principalmente en la blenda y en menor grado calcopirita, pirita y pirrotina; por eso la fuente industrial principal de este metal está en los concentrados de estos metales.

En el yacimiento Tsumeb en Namibia se localiza el mineral germanita, Cu<sub>3</sub>(Ge, Ga, Fe, Zn)S<sub>4</sub>, a partir del cual se obtiene este metal. Se reportan producciones en EUA, RFA y Gran Bretaña y en países que son grandes productores de concentrados de Zn.

## GERMANIO

### GENERALIDADES

Al igual que el Ga, el germanio fue un elemento de los pronosticados por el genial sabio ruso Mendeleiev; y fue descubierto en 1886. El Ge comenzó a utilizarse en la industria, durante la Segunda Guerra Mundial.

El Ge ha tenido una extraordinaria utilización en la construcción de dispositivos semiconductores por lo que su demanda ha sido muy intensa; en la actualidad ésta ha decrecido pero todavía se utiliza en la industria electrónica. Además, pequeñas cantidades de Ge se utilizan en aleaciones con el Al, Mg, Cu, Ag, Au y también en la producción de vidrios.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Ge<sub>32</sub><sup>72,60</sup> está colocado en el cuarto grupo, cuarto período del sistema periódico de los elementos conociéndose 5 isótopos naturales, siendo el Ge<sup>74</sup> (36,5%), Ge<sup>72</sup> (20,5%) y el Ge<sup>70</sup> (20,5%) los más difundidos. El Clarke de Ge en la corteza es de 1,4 × 10<sup>-4</sup> y es un elemento disperso, poco difundido, que posee propiedades siderófilas, litófilas y calcófilas.

Por su bajo Clarke, y su semejanza geoquímica con ciertos elementos abundantes de la corteza terrestre, el Ge se encuentra disperso en las redes de otros minerales. Los casos de concentración máxima de Ge en condiciones endógenas se produce durante el proceso hidrotermal, fundamentalmente en los sulfuros metálicos complejos, en especial, en las menas polimetálicas y de cobre (frecuentemente en menas ricas en Ag, Sn y As).

Las mayores cantidades de Ge del mundo, se obtienen a partir de los concentrados de las menas polimetálicas (fundamentalmente de Zn) del yacimiento Tri-State, en EUA, los cuales contienen 0,01-0,1% de Ge; las menas germaníticas de Katanga y Tsumeb, así como otros en Gran Bretaña y URSS, también se explotan en la actualidad.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Es necesario señalar que además de ser un elemento disperso, el Ge puede formar minerales independientes tales como la germanita,  $\text{Cu}_3(\text{Ge, Ga, Fe, Zn})\text{S}_4$ , 6-10% de Ge y 2% Ga. Yacimientos de germanita se conocen en África y también en la India y URSS asociados en este último país con menas de Cu-Mo y piríticas en asociación con enargita, tenantita, bornita y calcopirita. Además se conocen:

Minerales	Composición química	Contenido %
Argirodita	$\text{Ag}_3\text{GeS}_6$	7%
Canfieldita	$\text{Ag}_8(\text{Sn, Ge})\text{S}_6$	hasta 2%

En Cuba se han determinado concentraciones interesantes de Ge y Ga en los yacimientos cupríferos, piríticos y polimetálicos de Pinar del Río. Así de acuerdo con los datos de Lisitsin el Ge y Ga fueron descubiertos en las formaciones sulfurosas y secundarias ferruginosas y arcillosas de Pinar del Río, Bahía Honda, Isla de Pinos, Escambray, Sierra Maestra y en las otras zonas plegadas del eugeosinclinal. Las concentraciones máximas de Ge y Ga están asociadas a las menas sulfurosas de Pinar del Río y a sus zonas de oxidación (Hierro, Matahambre, Castellanos, Mono, Dora, Unión, La Candelaria, Francisco, Cayo Alto, Río Blanco y otros). El autor antes mencionado escribió un trabajo denominado "Manifestación de los elementos raros en Cuba, en relación con los complejos graníticos" el cual puede ser consultado para ampliar estos datos.

## RENIO

### GENERALIDADES

El renio fue descubierto oficialmente en 1925; es un metal con elevado peso específico (21) y temperatura de fusión de 3 137-3 440°C.

Por la facilidad con que puede ser elaborado metalúrgicamente y sobre la base de sus propiedades físicas, el Re y sus aleaciones se utilizan en la construcción de aviones y cohetes, en soldadura, en la fabricación de elementos de precisión y otras ramas de la industria.

La producción actual de Re no sobrepasa de unas cuantas toneladas al año y fundamentalmente se producen en los EUA y en la RDA.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $\text{Re}_{75}^{186,31}$  se encuentra situado en el séptimo grupo del sexto período. Se conocen dos isótopos estables de Re en la naturaleza:  $\text{Re}^{185}$  (37,07%) y el  $\text{Re}^{187}$  (62,93%) siendo este último radiactivo y con un período de semidesintegración de  $4 \times 10^{12}$  años.

El Clarke del Re en la corteza es del orden de  $10^{-8}$ ; lo que indica su estado de escasa difusión.

Minerales independientes se le conoce sólo uno: la dtgeskasganita,  $\text{Cu}(\text{Re, Mo})\text{S}_4$  pero la fuente real de Re la constituyen los concentrados de molibdenita con cantidades entre 2 a 20 hasta 200 y 300 g/t (0,01-0,03%). Otra fuente adicional son los yacimientos de Cu y Cu-Mo (con contenidos de 1-10 g/t de Re).

## TELURO

### GENERALIDADES

Descubierto en 1782, comenzó a tener una gran utilización industrial hace sólo tres décadas; se utiliza como aleación del Zn en la producción de cables, lo que permite economizar hasta un 20% de cinc, en aleaciones especiales y en termopares y en los últimos años en calidad de material semiconductor.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El  $\text{Te}_{52}^{127,60}$  se localiza en el sexto grupo, quinto período de la tabla periódica conociéndose ocho isótopos estables.

En la corteza aparece tanto en forma dispersa, fijándose a minerales sulfúricos, como en cantidades significativas de minerales independientes. El proceso hidrotermal desempeña el papel principal en las



concentraciones máximas de este metal. El Clarke de Te es del orden de  $10^{-6}$  y se le conocen entre otros una serie de minerales ricos tales como:

<i>Minerales</i>	<i>Composición química</i>	<i>Contenido %</i>
Altaita	PbTe	38
Tetradimita	Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> S	36
Telurobismutita	Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub>	48

Estos minerales están asociados a menas hidrotermales de metales coloreados, Bi, Ag, y Au. El Te se encuentra como impureza (hasta 0,01-0,1%) en la pirita, calcopirita, enargita, esfalerita y galenita de muchos yacimientos hidrotermales de temperaturas medias y bajas de pirita, Cu-Mo y polimetales, así como también en yacimientos de licuación de Cu-Ni.

## SELENIO

### GENERALIDADES

El selenio fue descubierto en 1817; se utiliza en la fabricación de rectificadores de Se, muy importantes en la construcción de equipos de radio, televisión y de acumulación de carga. Además los fotoelementos y fotorresistencias de Se tienen una gran utilización en la automatización como elementos de regulación y control de estos procesos.

### CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

El Se<sup>78,96</sup><sub>34</sub> está ubicado en el sexto grupo, cuarto período de la tabla periódica conociéndose 6 isótopos estables en la naturaleza, siendo el Se<sup>78</sup> (23,52%) y el Se<sup>80</sup> (49,82%) los más difundidos. El Clarke de Se en la corteza es del orden de  $10^{-6}$  encontrándose en la naturaleza, tanto en forma dispersa como en forma de minerales independientes.

En la naturaleza es característico el isomorfismo del Se con el S, Te, As, lo cual se explica por la similitud de las propiedades químicas y cristalógicas de los elementos citados. Pero mayor semejanza en cuanto a sus propiedades la tiene el Se. con el S. lo que en definitiva determina su comportamiento en los procesos de formación de minerales.

Se conocen seleniuros minerales de Ag, Pb, Cu; sulfoseleniuros de Ni, Co, etc. pero ellos no forman concentraciones minerales independientes de importancia económica. El Se se concentra fundamentalmente en la pirita, calcopirita, galena, arsenopirita, molibdenita en cantidades de 0,02-0,06% y en el S nativo de los yacimientos vulcanógenos (hasta 5%).

Los mayores productores lo son EUA, Canadá, Japón, Suecia, alcanzándose una producción de aproximadamente 2,5 millones de libras en 1972.

Es necesario señalar que las regiones meníferas más ricas en metales dispersos son aquellas ricas en estaño, cobre y oro, aunque hay también territorios que son ricos específicamente en tántalos, niobio, circonio, litio o en germanio, indio, renio, telurio, selenio y otros metales más.

## BIBLIOGRAFÍA

- BETEJTIN, A.G., P.M. TATARINOV Y OTROS (REDACTORES): *Curso de yacimientos minerales sólidos*, Tercera edición, Editorial Nedra, Moscú, 1964.
- BETEJTIN, A.G.: *A Course of Mineralogy*. Editorial Paz, Moscú, s/a.
- BOGDANOV, Y.V., V.N. BOGDANOVA, Y M. MIRALLES: *Estructura geológica del área del yacimiento El Cobre y sus posibilidades*, en *Revista Tecnológica* No. 3, La Habana, 1964.
- BATEMAN, A.M.: *Yacimientos minerales de rendimiento económico*. Editorial Omega, Segunda edición, España, 1961.
- FURRAZOLA-BERMÚDEZ, G., C. JUDOLEY, M. MIJAILÓVSKAYA, ET AL: *Geología de Cuba*. Editora Universitaria, La Habana, 1964.
- GERASIMOVSKY, V.: *Curso de geoquímica de los elementos*. Impresiones ligeras, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1968.
- HAVELKA, Y.: *Yacimientos de materias primas de Cuba*. Impresiones ligeras, Universidad de la Habana, Departamento de Publicaciones La Habana, 1966.
- KENAREV, V.V.: *Características mineralógicas del yacimiento Potosí, Cuba*, en *Revista Tecnológica*, Vol. 14, No. 3, La Habana, 1966.
- KORÍN, I.Z., V.I. FINKO Y D.P. COUTÍN: *Gueologuia i guenesis nikelovij miestorozhdenii v korie vivetrivania Kubi. Gueologuia palieznij iskopaemij Kubi* en idioma ruso. Editorial Nauka, Moscú, 1973.
- KOTLIAR, V.N.: *Osnovi Teorii Rudobrazovania* (Obshii Kurs miestorozhdenii palieznij iskopaemij) Editorial Nedra, Moscú, 1970.
- LISITSIN, A.I.: "Particularidades en la distribución de los yacimientos sulfurados de Cuba", en *Revista Tecnológica* No. 1, La Habana, 1967.

- LAVEROV, N.P., E.P. MALINOVSKI, A.E. TOLKUNOV, ET AL: *Yacimientos de cobre de Cuba, su posición en los pisos y subpisos estructurales y su relación con el magmatismo*, en Serie Geológica No. 6, Instituto de Geología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, 1971.
- MAGAKIAN, I.G.: *Rodnie miestorozhdenia* (Pramishliennii tipi miestorozhdenii palieznij iskopaemij) en idioma ruso. Editorial de la Academia de Ciencias de la República Socialista Soviética de Armenia, Segunda edición, Erevan, URSS, 1961.
- MASLOV, Y.S., V.F. CHEZESTAKANOVA, M. MIRALLES: *Constitución geológica y génesis de los minerales del campo aurífero Guáimaro, provincia de Camagüey*, en *Revista Tecnológica*, La Habana, 1969.
- NININGER, R.D.: *Minerals for Atomic Energy*. D. Van Nostrand Co. Inc., EUA, 1954.
- PARK, JR, C.F. Y M.V. COX: "Manganese deposits in part of the Sierra Maestra, Cuba." in *Geological Survey Bulletin*, pp. 307-355. Washington, 1944.
- PAVLOV, N.V., I.I. GRIGORIEV, Y M. MUÑOZ-URBINO: *Gueologuia Palieznij iskopaemij Kubi* en idioma ruso, Editorial Nauka, Moscú, 1973.
- RIVERA, N.: "Geología de los yacimientos minerales operados por la Cerro de Pasco Corporation", en *Geología del distrito minero de Cerro de Pasco*, Primer Congreso latinoamericano de Geología, Lima, Perú, 1970.
- ROUTHIER, P.: *Les gisements metallifères. Geologie et principes de recherche*. Tomos I y II, Masson et Cie, editeurs, París, 1963.
- SAJAROV, I. Y E. ESCOBAR: *Particularidades geólogo-estructurales del campo metalífero El Cobre en la provincia de Oriente*. Serie Organismos, Instituto Cubano del Libro, La Habana.
- SEMENOV, Y.L.: "Yacimientos cromíticos de Cuba", en *Revista Tecnológica*, Nos. 3 y 4, La Habana, 1968.
- SIMONS, F.S., J.A. STRACZEK: *Geology of manganese deposits of Cuba*, en *Geological Survey Bulletin*, 1957.
- SMIRNOV, V.I.: *Gueologuia Palieznij iskopaemij*, en idioma ruso. Editorial Nedra, Moscú, 1965.
- — — —: *Rudnie miestorozhdenia SSSR*. V trios tomaj. Tomos 1 y 3, en idioma ruso, Editorial Nedra, Moscú, 1974.
- — — —: *Gueologuicheskie osnovi poiskov i razvedak rudnij miestorozhdenii*. Editorial de la Universidad de Moscú, 1954.

- SPOONER, JOHN, ET AL (EDITORIES): *Minning Annual Review*, 1973 y 1974.
- TATARINOV P.M., Y.G. STARITSKI (REDACTORES): *Mineraguenia Sibirskai platformi*, en idioma ruso, Editorial Nedra, Moscú, 1970.
- TOLKUNOV A.E., E.P. MALINOVSKI, R. CABRERA, ET AL.: *Srafnitelnaia jaracteristica miednij miestorozhdenii Kubi. Gueologuia palieznij iskopaemij Kubi*, en idioma ruso Editorial Nauka, Moscú, 1973.
- TOLKUNOV, A., R. CABRERA, M. MUÑOZ: *Nuevos datos sobre la geología y las regularidades de la distribución de los yacimientos de cobre y pirita que se encuentran en las rocas vulcanógeno-sedimentarias de Cuba*. Serie Geológica No. 4, Instituto de Geología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, 1969.
- VLASOV, K.A. (REDACTOR): *Gueojimia, Mineraloguia i guenejicheskie tipi miestorozhdenii riedkij elementov*, tomo III en idioma ruso. Editorial Nauka, Moscú, 1966.
- ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA Y URSS: *Atlas nacional de Cuba*, Editorial No. 2, Moscú, s/a.

## ÍNDICE

	Pág.
Prólogo	3
Introducción	5
Capítulo 1	
x Hierro	9
Capítulo 2	
x Manganeso.	38
Capítulo 3	
v Cromo	54
Capítulo 4	
Titanio	71
Capítulo 5	
Vanadio.	77
Capítulo 6	
x Níquel y cobalto	82
Capítulo 7	
Molibdeno.	113
Capítulo 8.	
Wolframio (Tungsteno)	124
Capítulo 9	
x Cobre v	136
Capítulo 10	
Plomo, cinc y plata	174
Capítulo 11	
Estaño	194
Capítulo 12	
Arsénico	206
	305

	Pág.
Capítulo 13	
Bismuto	214
Capítulo 14	
Antimonio	218
Capítulo 15	
Mercurio	224
Capítulo 16	
Aluminio	230
Capítulo 17	
Magnesio	238
Capítulo 18	
Platino y platinoides	241
Capítulo 19	
Oro	248
Capítulo 20	
Metales radioactivos	
(Uranio-radio-torio)	267
Capítulo 21	
Metales raros y dispersos	281
Bibliografía	300

Este libro ha sido impreso  
por la empresa "Osvaldo Sánchez".  
Se terminó de imprimir en el  
mes de diciembre de 1977.  
"Año de la Institucionalización"