

REPUBLICA DE COLOMBIA  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA

PROCESADO  
*INBCE*  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLOGICO-MINERAS



2813379  
Juan Trespalacio

RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

SEGUNDA EDICION

TOMO I

METALES PRECIOSOS  
MINERALES METALICOS

L 1, pp. 1 - 564, 1987  
Bogotá - Colombia  
ISSN 0120-078X

Pub. Geol. Esp.  
Ingeominas

151

Derechos reservados por:

INGEOMINAS: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico - Minero

Diagonal 53 No. 34-53, Apartado Aéreo No. 4865 - Bogotá 2, D.E., Colombia

PROPIEDAD

colección Documentación

y Divulgación

INSTRUMENTO DE MINAS Y PETRÓLEO

Publicación no periódica

Formato de publicación: 17 x 24 cm

La responsabilidad de los conceptos emitidos en esta publicación  
corresponden exclusivamente a sus autores

Editor

ALBERTO VILLEGAS BETANCOURT

## PROLOGO

El país, como el resto de los países de la tierra, atraviesa hoy por un momento crítico de su historia. Los problemas económicos unidos a las desigualdades sociales y al desorden contemplamos atónitos los ciudadanos colombianos, nos lleva a pensar que hay que volver a lo fundamental; hay que regresar a lo que dió origen y razón de ser a esta nación, aprovechando todos los recursos científicos y tecnológicos de la época actual, para hacer un buen uso de nuestra herencia.

En Colombia, durante todo el período colonial la base de nuestra economía fue la minería de oro en gran escala, ya que entre 1537 y 1820 produjimos entre el 18% y el 40% del total de la producción mundial del oro. Las necesidades expansionistas del Imperio Español impulsaron a la conquista y la colonización, hasta el punto que, en sólo 100 años se exploró la zona principal del país, se abrieron o mejoraron caminos, se establecieron minas, se fundaron ciudades y se desarrolló el comercio. En todo este proceso y en el inevitable choque cultural forjó el hombre americano.

Las minas y los metales preciosos de la América Hispánica financiaron durante 4 siglos la grandeza de España.

Los mineros españoles fueron los más avanzados de su tiempo y a la vez que el oro, descubrieron y explotaron minas de otros metales como hierro, cobre, plomo, mercurio, arcilla, azufre, caliza, carbón, esmeraldas y sal. No olvidemos que nuestros indígenas ya conocían y explotaban el oro, las esmeraldas, las arcillas, la sal y el carbón.

En nuestras hermanas naciones iberoamericanas, la historia de la minería de la plata, el cobre, el estaño y el hierro se aceleró con la Colonia Española, y estos metales son la base de las economías de Méjico, Chile y Bolivia. A los últimos años de las batallas de la Independencia, Colombia tímida comenzó su industrialización, sorprendentemente con la

industria pesada, en las siderúrgicas de Pacho, Samacá, A y La Pradera. Su desarrollo se truncó principalmente por continuas guerras civiles. Bavaria es la única industria g de que sobrevivió las conmociones bélicas del Siglo pasado hecho histórico es que, con la Independencia decayó la mi y durante el resto del siglo XIX el país se enrumbó por agricultura del tabaco, del café y de la caña de azúcar. •

Únicamente con la pacificación del país, a comienzo Siglo XX pudo comenzar a desarrollarse la verdadera industria nacional, con los tejidos, los cementos, las bebidas gaseosas, las cerámicas, la lojería y el vidrio. • En 1905 se inicia ntra industria del petróleo. Con el progresivo avance de ferrocarriles y el incremento de la construcción, se fundan nuevas fábricas de cemento. En la década de los 30 se logran significativos avances en las manufacturas.

— Los problemas generados por la Segunda Guerra Mundial obligaron a Colombia a impulsar las industrias básicas y fue como la década de los 40 vio el establecimiento de la industria del acero con Paz de Río y luego la industria química con la Planta de Soda Cáustica de Zipaquirá; más adelante I llantas y nuevas fábricas de cemento. • En la década de los se afianza la industria química; en los 60 se estableció automotriz y en los 70 se desarrollan la petroquímica, el pel, la maquinaria y los artículos eléctricos.

— Sin embargo, en todo este proceso la minería no ha crecido paralelamente con el resto de la economía del país. —

• Con la nueva situación económica mundial, planteada los últimos años por la crisis petrolera, y con la actual crisis financiera, se presenta para Colombia una necesidad imrativa e inaplazable de desarrollar su sector minero. El progreso de la humanidad se mide por el uso de los minerales y el desarrollo de una economía industrial moderna, los minerales son cada vez más importantes; son la base de la industria y el motor de la economía. Las edificaciones, carreteras y máquinas se construyen con minerales; la energía es en buena parte de origen mineral; la fertilidad en el campo se mantiene con abonos minerales y con agua.

— Colombia, ubicada geológicamente dentro del Cinturón Orogénico Circumpacífico y con la parte más occidental del Escudo de Guayana, es una de las áreas más importantes del mundo desde el punto de vista metalogénico. Por su posición tropical con amplias zonas selváticas, gruesos suelos y dificultades

PROPIEDAD  
Sección Documentación  
y Dirección

acceso no ha sido empresa fácil la exploración geológica del territorio y su consecuente desarrollo minero. —

Países vecinos como Venezuela y Brasil, han localizado dentro del Escudo de Guayana numerosos depósitos de importancia económica como el aluminio, hierro, manganeso, estaño, oro, diamantes, elementos de tierras raras, plomo, zinc, molibdeno y otros, por lo que es de suponer que en la región de nuestra amazonia y nuestra orinoquia también se encuentren.

— El actual gobierno ha fijado claras políticas destinadas a un verdadero desarrollo de nuestro sector minero. Se está reformando el Código de Minas, próximamente adelantaremos un Censo Minero, INGEOMINAS se ha reorganizado para cumplir lo más eficazmente su función social, el propio Ministerio rápidamente está adecuando sus estructuras para el fomento y el apoyo de esta parte del sector real de la economía, etc.

En 1960, el Servicio Geológico Nacional publicó el libro denominado Recursos Minerales de Colombia cuyo autor fue el Ingeniero de Minas Roberto Wokittel. Esta obra es el Tomo X de la Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia. En 1978 INGEOMINAS publicó con el mismo título un libro que inicia la Serie de Publicaciones Geológicas Especiales.

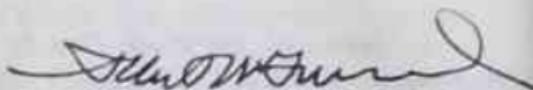
El libro que hoy entregamos con orgullo al país, considerado entonces como la 3a. Edición de los "Recursos Minerales de Colombia", es una nueva contribución del Instituto al desarrollo de nuestra patria. Esta edición está actualizada con información basada en nuevos estudios geológicos y mineros realizados por su personal durante la última década.

Hemos incluido minerales que no se presentaron en la edición anterior, tales como los de Cadmio, Niobio y Tantalio, Selenio y Telurio, Minerales Abrasivos y Petróleo. Hemos puesto especial interés en mejorar la presentación y la organización de la obra para facilitar la consulta de todos los usuarios.

No puede considerarse esta publicación como un inventario de nuestros recursos minerales, sino como una compilación de las informaciones presentadas por sus respectivos autores. Sea este el momento de agradecerles sus valiosos aportes a este esfuerzo colectivo.

Reune el conocimiento actual que tiene el INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLOGICO-MINERAS sobre los diferentes recursos no renovables de nuestro territorio.

Es nuestro deseo al presentar esta tercera edición de Recursos Minerales de Colombia que, escolares, universitarios, docentes, profesionales, mineros, políticos y demás personas interesadas en esos recursos, puedan aprovechar la información aquí presentada y que ella contribuya a generar lo más pronto posible nuevos empleos estables para nuestras gentes, para lograr un mejor nivel de vida de las mismas y que Colombia pueda proyectarse así en paz y armonía hacia el futuro.



ALBERTO LOBO-GUERRERO USATEGUI  
Director General

# CONTENIDO

Página

PROLOGO

INTRODUCCION

## TOMO I

### METALES PRECIOSOS

ORO - Hernando Lozano O. - Oscar Pulido U.....	3
PLATA - Hernando Lozano O. - Oscar Pulido U.....	26
PLATINO - Eduardo Alvarez G.....	32

### MINERALES METALICOS

MINERALES DE ALUMINIO (BAUXITA) - Humberto Rosas G.....	49
MINERALES DE ANTIMONIO - Pedro Marín R.....	63
MINERALES DE ARSENICO - José H. Caballero A.....	77
MINERALES DE BISMUTO - Pedro Marín R.....	93
MINERALES DE CADMIO - Eduardo A. Cardozo P.....	100
MINERALES DE COBALTO - Eduardo Alvarez G.....	113
MINERALES DE COBRE - Alfonso Arias I.-Luis Jaramillo C.....	123
MINERALES DE CROMO - Jairo Alvarez A.....	185
MINERALES DE ESTAÑO - Heyley Vergara S.....	200
MINERALES DE HIERRO - Carlos Ulloa M.....	220
MINERALES DE MANGANESO - Bernardo Calle Z.-Gilberto Zapata G.....	250
MINERALES DE MERCURIO - Hernando Lozano O.....	275
MINERALES DE MOLIBDENO - Oscar H. Pulido U.....	295
MINERALES DE NIOBIO Y TANTALIO - Alvaro Murillo R.....	308
MINERALES DE NIQUEL - Héctor Castro P.....	327
MINERALES DE PLOMO - Luis F. Sarmiento R.....	369
MINERALES DE RENIO - Oscar H. Pulido U.....	444
MINERALES DE SELENIO Y TELURIO - Carlos Ramirez O. Jairo Cuéllar R..	449
MINERALES DE TITANIO-Raúl H. Muñoz A.-Eduardo Parra P.....	456
MINERALES DE TUNGSTENO - Joaquín Buenaventura A.....	471
MINERALES DE ZINC - Luis F. Sarmiento R.....	490

## PIEDRAS PRECIOSAS

ESMERALDAS - Hugo Forero O.....	567
---------------------------------	-----

## ROCAS Y MINERALES NO METALICOS

ARRASIVOS - Alberto Núñez T.....	609
ARCILLA - Alberto Núñez T.....	637
ARENAS Y GRAVAS SILICEAS - Alberto Núñez T.....	660
ASBESTO - Humberto González T.....	675
AZUFRE - Armando Murcia L.....	697
BARITA - César A. Carvajal M.....	725
CALCITA (ver caliza, dolomita).	
CALIZA, DOLOMITA - Erasmo Rodríguez M.....	738
DIATOMITAS - Héctor Cepeda.....	771
EVAPORITAS - José N. Galvia G.....	780
FELDSPATOS - Jaime A. Fumquen.....	827
FLUORITA - Jairo Clavijo T.-César I. Balleteros T.....	839
FOSFATOS - Pedro E. Mejía G.....	856
GRAFITO - Abigail Orrego L.....	894
MAGNESITA - Armando Espinosa R.....	907
MATERIALES DE CONSTRUCCION - Antonio Rodríguez P.....	919
MICA - Martha Suárez N.....	943
RECURSOS HIDRICOS - Alcides Huguett G. - Francisco Mosquera T.- Carlos Molano C.....	963
SAL (ver evaporitas)	
TALCO - Bernardo Calle Z. Isabel Mejía P.....	993
TIERRAS RARAS - Héctor Cepeda.....	1010
YESO (ver evaporitas)	

## RECURSOS ENERGETICOS

CARBON- Carlos Arboleda O. ....	1023
PETROLEO - Alberto Villedas B.....	1061
RECURSOS GEOTERMICOS - Arturo Bermúdez G.....	1077
URANIO - Hernando Lozano O.....	1096

## APENDICES

I. Producción mundial de la mayoría de los minerales más comercia- les (1977 - 1984) .....	1117
II. Importaciones de materias primas minerales (1980-1985).....	1118
III. Exportaciones de materias primas minerales (1980-1985).....	1119

## INTRODUCCION

ALBERTO VILLEGAS BETACOURT

Geólogo-Editor

La civilización y el desarrollo económico y social de los pueblos, dependen en gran medida del conocimiento que tengan de sus recursos minerales y del aprovechamiento adecuado y racional que hagan de ellos.

Los recursos minerales se conocen también como recursos naturales no renovables, porque una vez explotados no se regeneran; se necesitarían millones de años para que la naturaleza volviera a generar lo que ya se ha extraído.

Es por ello que, para contribuir al mejor conocimiento de nuestros recursos, presentamos en esta publicación un compendio de la información que actualmente tiene INGEOMINAS sobre los minerales que se encuentran en nuestro territorio, sin que ello signifique un inventario de los mismos.

Esta obra presenta en dos tomos, los minerales reunidos en cinco grupos principales, que se adaptan a la clasificación utilizada en la legislación minera colombiana. El Tomo I comprende los METALES PRECIOSOS y los MINERALES METALICOS; el Tomo II incluye las PIEDRAS SEMIPRECIOSAS, los MINERALES NO METALICOS y los RECURSOS ENERGETICOS. Al final del Tomo II se incluyen tres anexos que presentan las importaciones y exportaciones de materias primas minerales, que ha realizado Colombia entre 1980 y 1985 y la producción mundial de la mayoría de los minerales más comerciales, entre 1977 y 1984, anexos que consideramos útiles para muchos lectores.

Los artículos referentes a cada mineral han sido preparados por su autores siguiendo una guía general que les fue entregada antes de su preparación; sin embargo ella no constituyó un patrón inflexible por lo cual, como se observará, los contenidos de cada artículo no presentan idénticos temas. En el proceso de edición se respetaron esas diferencias lo mismo que el estilo de cada autor. Se hizo necesario reducir en algunos casos la extensión original de algunos artículos, suprimiendo descripciones detalladas o muy técnicas; sin embargo, si el lector lo requiere, puede consultar los informes y publicaciones citadas en las bibliografías que se presentan al final de cada artículo, que fueron preparadas por los mismos autores.

A continuación presentamos unas consideraciones breves sobre algunos términos y conceptos que, por aparecer en diferentes partes del libro, requieren que se consideren en esta introducción.

En los mapas de localización que se incluyen en cada uno de los minerales, se incluyen tres categorías para indicar la presencia del mineral, que corresponden a tres niveles de importancia según el grado de conocimiento que se tenga hoy sobre el mineral. Ellos se definen en forma general a continuación:

**Yacimiento.**- Es una acumulación de mineral que, por su extensión y concentración, merece ser explotada o está explotada. Tiene el primer grado de importancia.

**Prospecto.**- Es una acumulación de mineral que, además de presentarse geológicamente como anómala, ha merecido una prospección o estudio geológico detallados, con el fin de determinar su verdadero valor económico y que sigue teniendo interés para posibles estudios en el futuro. Tiene el segundo grado de importancia.

**Manifestación.**- Es una pequeña acumulación de mineral que, por el conocimiento o información que se tiene de ella, reviste poca importancia geológico-económica. Tiene tercer grado de importancia. A pesar de ello, una manifestación no necesariamente debe llevar a descartar en forma definitiva la zona donde se encuentra porque a pesar de la escasa información que a veces se tiene, no permite asegurar que la acumulación sea pequeña.

Uno de los problemas que se nos presentan en el manejo de los recursos minerales es el de la utilización de los términos "recursos" y "reservas" para la evaluación del potencial de un depósito o yacimiento mineral. A esos términos no siempre se les da el mismo significado.

Con el fin de ilustrar a los usuarios de esta obra, sobre el uso de los términos "recursos" y "reservas", presentamos las principales definiciones tomadas de dos clasificaciones diferentes: la adoptada por la Oficina de Minas y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, que en general es utilizada en Colombia, y la Clasificación Internacional de Recursos Minerales propuesta por la Organización de las Naciones Unidas, que en un futuro puede alcanzar una mayor importancia. Nos limitaremos a presentar solamente las principales definiciones, sin comentarios personales; quien desee conocer más detalles al respecto, puede consultar las siguientes fuentes: U.S. Geological Survey, Circular 831, 1980 y la Publicación De Re Metallica (Lima, Perú) de mayo - junio 1985.

## CLASIFICACION DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES SEGUN EL U. S. GEOLOGICAL SURVEY

De acuerdo con la Circular 831 del Servicio Geológico de los Estados Unidos, la clasificación de recursos se basa en dos aspectos: (1) las características geológicas, y las físicas y químicas, (2) análisis de rentabilidad. A continuación presentamos las definiciones de los términos de uso general en Colombia, tomadas de la citada circular.

### DEFINICIONES

**Recurso.**- En una concentración de material sólido, líquido o gaseoso, que se presenta en forma natural en la corteza terrestre, en tal forma y cantidad que la extracción económica de un producto de dicha concentración es real o potencialmente factible.

**Recursos identificados.**- Son recursos cuya localización, grado, calidad y cantidad son conocidos o se han estimado a partir de evidencia geológica específica. Los recursos identificados incluyen los componentes económico y sub-económico. Para reflejar los diferentes grados de certeza geológica, se-

tas divisiones económicas se pueden subdividir en recursos medidos, indicados e inferidos.

**Recursos demostrados.**- Es un término utilizado para la suma de los recursos medidos y los indicados.

**Recursos medidos.**- Son aquellos en que la cantidad está calculada a partir de dimensiones manifestadas en afloramientos, trincheras, explotaciones o perforaciones; el grado y (o) la calidad se calculan de los resultados de muestreo detallado. Los sitios para la inspección, muestreo y medición están espaciados tan estrechamente y el carácter geológico está tan bien definido que el tamaño, forma profundidad y contenido de mineral del recurso están bien establecidos.

**Recursos indicados.**- Son aquellos en que la cantidad, grado y (o) la calidad, se han calculado a partir de información similar a la utilizada para los recursos medidos, pero los sitios para inspección, muestreo y medición, están más separados o menos adecuadamente espaciados. El grado de certeza aunque inferior al de los recursos medidos, es suficientemente alto para asumir la continuidad entre los puntos de observación.

**Recursos inferidos.**- Son aquellos en que los estimativos están basados en una continuidad asumida más allá de los recursos medidos y (o) indicados para los cuales hay evidencia geológica. Los recursos inferidos pueden estar o no, sustentados por muestras o mediciones.

**Reserva base.**- Es la parte de un recurso identificado que satisface criterios físicos y químicos mínimos especificados, relacionados con prácticas corrientes de minería y producción incluyendo aquellos de grado, calidad, espesor y profundidad. La reserva base es el recurso demostrado (recursos medidos más indicados) in situ, a partir del cual se estiman las reservas.

La reserva base incluye aquellos recursos que generalmente son económicos (reservas), marginalmente económicos (reservas marginales) y algunos de aquellos que generalmente son sub-económicos (recursos sub-económicos).

El término "reserva geológica" ha sido aplicado por otros generalmente para la categoría de reserva base, pero pueden incluir también la categoría de reserva base, inferida; el término no es parte de esta clasificación.

**Reservas\*.**- Son aquella parte de la reserva base que podrían ser extraídas económicamente o ser rentables en el momento de la determinación. El término reservas no significa necesariamente que los medios de extracción estén en el lugar y en operación. Las reservas incluyen solamente materiales recuperables; por lo tanto términos tales como "Reservas extraíbles" y "Reservas recuperables" son redundantes y no son parte de este sistema de clasificación.

**Reservas marginales.**- Son aquella parte de la reserva base que, en el momento de la determinación, está en el límite

---

\* Nota de Editor: Comprenden los recursos demostrados es decir medidos e indicados).

de ser económicamente rentable. Su característica esencial es la incertidumbre económica. Incluye los recursos que podrían ser rentables dados supuestos cambios en factores económicos o tecnológicos.

**Recursos Sub-económicos.**— Son la parte de recursos identificados que no satisfacen los criterios económicos de reservas y reservas marginales.

## CLASIFICACION INTERNACIONAL DE RECURSOS MINERALES (propuesta por la ONU)

A continuación incluimos en forma resumida los aspectos de interés presentados por Francisco Esteban Santisteban en la Revista De Metallica citada anteriormente, en relación con la clasificación de recursos.

En la propuesta se aclara que "Naciones Unidas solo recomienda la adopción de estas directrices, pero no las impone de ninguna manera". El punto principal de la propuesta está en descartar la utilización del término RESERVA por las siguientes razones:

- En algunos idiomas tales como el inglés, francés y español se produce cierta confusión, porque las palabras recursos y reserva tiene un mismo significado general, pero diferente del técnico.
- En otros idiomas solo se dispone de un solo término.
- En ruso las dos palabras significan exactamente igual.

Por lo tanto se adoptó la recomendación de utilizar solo la palabra RECURSO.

## \*CATEGORIAS DE RECURSOS

Se propusieron tres categorías fundamentales de RECURSOS, designadas de la siguiente manera: R-1, R-2 y R-3. Estas categorías se distinguen entre sí por el nivel de certeza que puede atribuirse a cada una de ellas desde el punto de vista geológico. Comprenden todos los recursos minerales in situ que podrían presentar interés económico durante el período previsible de los próximos dos o tres decenios.

**La categoría R-1.**— Comprende los recursos in situ en yacimientos que se han estudiado en detalle suficiente para determinar su tipo de formación, sus dimensiones y sus características fundamentales en cada acumulación de mineral. Las principales características pertinentes para la extracción y la elaboración de minerales —como la distribución o la ley del mineral, las propiedades físicas que afectan a la extracción, la mineralogía y los componentes perjudiciales— se determinan principalmente mediante la penetración física directa y la medición del crecimiento, junto con una extrapolación limitada de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos.

Las cantidades se han calculado con un nivel relativamente elevado de certeza, pero respecto de algunos yacimientos, el error de estimación puede llegar al 50%. Tales estimaciones son principalmente pertinentes para la planificación de las actividades de explotación.

**La categoría R-2.**— Corresponde a estimaciones de recursos in situ que están directamente relacionadas con yacimientos minerales descubiertos, pero a diferencia de los recursos incluidos en la Categoría R-1, las estimaciones son preliminares y se basan fundamentalmente en información geológica general corroboradas con mediciones en algunos puntos. El tipo de formación, las dimensiones y la forma se infieren por analogía con depósitos vecinos incluidos en la categoría R-1, de consideraciones geológicas y estructurales generales, y mediante un análisis de las indicaciones directas o indirectas de deposición de minerales. Los valores estimados en esta categoría son más inciertos que los de la categoría R-1; los errores de estimación pueden ser mayores del 50%. Las estimaciones de la categoría R-2 son principalmente pertinentes para la planificación de nuevas actividades de exploración, con miras a una futura reclasificación a la categoría R-1.

**La categoría R-3.**— Se refiere a recursos que aun no se han descubierto, pero de los cuales se piensa que existen en yacimientos de tipos comunes que es posible descubrir. Las estimaciones de las cantidades in situ se realizan principalmente sobre la base de extrapolaciones geológicas o de indicios geofísicos, o por analogía estadística. Las ideas sobre la existencia y el tamaño de todo yacimiento de esta categoría son necesariamente opinables.

Estos depósitos podrán o no descubrirse efectivamente en los próximos decenios. Las estimaciones correspondientes a la categoría R-3 indican la medida de las oportunidades en materia de exploración y las perspectivas a un plazo algo más largo en materia de abastecimientos de materias primas. La información sobre los recursos de la categoría R-3 debería proporcionarse en forma de gamas de valores, para reflejar su escaso grado de certeza".

"Cada una de las categorías puede subdividirse de la siguiente manera:

- E. Los recursos in situ que se consideran explotables en un país o región determinados en las condiciones socio-económicas imperantes y con la tecnología disponible.
- S. Los recursos in situ restantes que no se consideran actualmente de interés, pero que pueden llegar a serlo en virtud de cambios económicos o tecnológicos previsibles.

Todas las categorías y subcategorías descritas se refieren a estimaciones de las cantidades in situ de metales o minerales. En consecuencia el grupo recomienda que se establezca un conjunto paralelo de categorías y definiciones para cantidades recuperables, además de las categorías y subclasificaciones ya señaladas. Ello permitiría utilizar un conjunto o ambos conjuntos, según fuese apropiado. Para distinguir entre ambos conjuntos, de datos paralelos, se propone que se utilicen los símbolos R-1, R-2 y R-3 para las categorías in situ, y que las cantidades recuperables se indiquen con los símbolos r-1, r-2 y r-3. Para las subclasificaciones, podrían usarse en ambos casos las notaciones E y S. Sin embargo, no puede haber una definición general de "recuperabilidad" ni del punto del proceso de extracción y elaboración en que ésta debería medirse. Tales cuestiones deben determinarse para cada producto".

Los términos internacionales más comunes que han venido utilizándose para las categorías propuestas son los siguientes:

R-1 Determinados, demostrados, razonablemente seguros

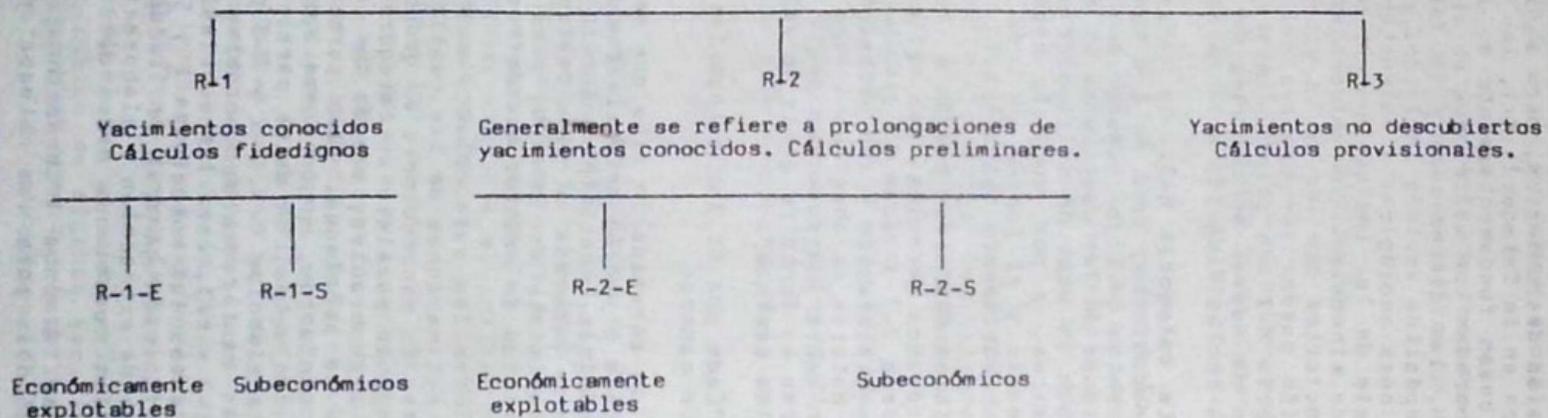
R-2 Inferidos, estimados, posibles

R-3 Potenciales, hipotéticos, pronosticados

E. Económicos.

S. Subeconómicos

R. Recursos in situ de interés económico para los próximos decenios



Hasta aquí las transcripciones del artículo de Esteban Santisteban.

Uno de los problemas de vital importancia en el manejo de los recursos minerales es el impacto ambiental, que se produce en la naturaleza por los procesos de explotación y beneficio. Es por ello que muchos artículos en esta edición hacen alusión a ese problema, que generalmente afecta a mediano y largo plazo a las comunidades de las zonas minerales y no pocas veces a otras comunidades más distantes, cuando se ve involucrada la contaminación de ríos y aguas subterráneas. La contaminación ambiental y el impacto causado en la naturaleza por desequilibrios causados en los sistemas ecológicos, geológicos, bioquímicos y biológicos se convierten en delitos sociales, porque atentan contra el mejoramiento de los niveles de vida de los seres humanos. Es por ellos que debe ponerse especial atención a los procesos mineros, buscando aplicar correctivos adecuados para minimizar al máximo esos impactos ambientales, cumpliendo así con obligaciones morales y legales que no debemos transgredir.

Finalmente, es necesario aclarar que durante la edición de esta obra, compleja por su terminología y variada por el número de artículos y de autores, se han podido escapar algunos errores mecanográficos y defectos de diagramación, que en ninguna forma afectan sustancialmente el contenido técnico de la información, en cuyo caso, ellos no son imputables al equipo que participó en la edición e impresión. A pesar de esta aclaración, ofrecemos de antemano disculpas a autores y lectores por esas pocas deficiencias que escaparon a nuestros esfuerzos.

#### AGRADECIMIENTOS

Es necesario dejar constancia de reconocimiento a las personas que durante el proceso de edición dedicaron gran esfuerzo y empeño para que esta obra resultara de la mejor calidad posible dentro de las limitaciones económicas y materiales del Instituto.

Al Dr. Pedro Marín R., Geólogo de Ingeominas, quien tuvo inicialmente el material para su revisión y corrección. Al equipo de Publicaciones compuesto por las señoras Gloria Cortés, Martha Capera y Myriam Lyda de Torres quienes se encargaron del levantamiento de textos; a Luz Hernández de Quimbay y Ana Teresa Ramírez de Restrepo quienes tuvieron a cargo el dibujo (elaboración y adaptaciones) de las figuras; a José Luis Botero, Jefe de Publicaciones, quien coordinó y supervisó los procesos de impresión y Libardo Rivas, Pedro Moreno, Germán Castro, Gerardo Vargas, Roberto Ceballos, Martha de Cerón, Gladys Pulido y Lola de Rodríguez quienes participaron en diferentes etapas del proceso de impresión. Ellos han tenido parte definitiva en el éxito logrado. Gracias por su valiosa colaboración.

#### BIBLIOGRAFIA

- ESTEBAN SANTISTERBAN F., 1985.- *Clasificación Internacional de Recursos Minerales.* (Propuesta por la ONU). De *Re Metallica*, Mayo-Junio 1985. p. 5-7. Lima.
- U.S. BUREAU OF MINES and U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 1980.- *Principles of a Resource / Reserve Classification for Minerals.* U.S. Geol. Surv. Circ. 831, Arlington, VA. USA.

RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

Segunda Edición

## METALES PRECIOSOS

## ORO

HERNANDO LOZANO Q. - OSCAR H. PULIDO U.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen.....	3
Introducción .....	4
Usos.....	4
Ambiente Geológico.....	4
Geoquímica .....	4
Mineralogía .....	5
Tipos de Depósitos.....	5
Prospección .....	7
Explotación y Metalurgia .....	7
El Oro en Colombia .....	7
Historia .....	7
Situación actual y producción .....	9
Minería .....	11
Reservas .....	21
Bibliografía .....	24

## RESUMEN

El presente artículo es una síntesis del informe, "Situación actual de la minería del oro y la plata en Colombia" por LOZANO y PULIDO (1986).

Colombia posee una importante tradición aurífera, que se remonta a tiempos precolombinos. En la actualidad, la producción anual nacional de oro es del orden de US\$400 millones, representando el segundo renglón en la economía nacional después del café y ocupando aproximadamente a 30.000 personas. Incentivos en el precio, decretados por el gobierno nacional, llevaron la producción de oro durante 1985 a 35 toneladas, cifra sin precedentes en la historia del país.

El oro se extrae de depósitos de placer y de filón. Aunque aún no se han explotado mineralizaciones de oro en Colombia, existen condiciones geológicas favorables para este tipo de depósito.

La mayor parte de la producción colombiana proviene de depósitos de aluvión; más del 80% es producido por la pequeña y la mediana minería, localizada en el occidente colombiano, principalmente en el Departamento de Antioquia que ocupa el primer puesto en el país.

En general, Colombia tiene grandes posibilidades para la minería del oro, pues este metal está presente en rocas de diferentes ambientes y edades geológicas.

## INTRODUCCION

La palabra oro se deriva de la voz latina "aurum", derivada a su vez de la hebrea "Aor" que significa "Luz". A través de los tiempos es brillo e inalterabilidad, y en términos más generales, la belleza del oro, han hecho que este elemento sea especialmente apreciado como artículo de joyería y como medio de expresión artística. Por varios siglos se ha convertido también en elemento de intercambio monetario internacional y símbolo de riqueza y prosperidad.

El oro es un metal de color amarillo brillante, blanco (dureza entre 2.5 y 3 en la escala de Mohs), pesado (peso específico entre 15.3 y 19.3), buen conductor del calor y de la electricidad, y con un punto de fusión relativamente alto (1.053°C). El oro es más maleable y dúctil que cualquier otro metal: de un simple grano de oro se puede estirar un hilo de 3.500 m de longitud; al mismo grano de oro se le puede reducir a una lámina en 1/10.000 mm, casi hasta la transparencia; una onza (28.3 g) de oro podría ser convertida en una enorme sábana de 30 m<sup>2</sup>. Esa misma onza puede volverse un hilo más delgado que un cabello y extenderse 90 km (GEOGRAFIA UNIVERSAL, 1980).

## USOS

Los usos del oro, según PRETORIUS (1981), se pueden agrupar en 3 categorías que, en orden de importancia son: 1) con fines monetarios; 2) en la joyería y odontología y, 3) en la industria. Con fines monetarios el oro cumple dos objetivos: sirve como respaldo del papel moneda y como protección contra la inflación, a través de la posesión de lingotes y de monedas oficiales. En joyería, el oro generalmente se alea con plata, cobre y níquel. En ortodoncia el oro se usa en la construcción y en la soldadura de piezas dentales, debido a su alta resistencia al manchado y a la corrosión.

En la industria electrónica, el oro tiene aplicación en la construcción de circuitos integrados y semiconductores; también se utiliza como lubricante sólido de contactos eléctricos friccionantes. Cantidades menores de oro se emplean en medicina, y en el revestimiento de naves espaciales.

## AMBIENTE GEOLOGICO

## GEOQUIMICA

Las principales características químicas y geoquímicas del oro son las siguientes: es miembro del Grupo 1B de la Tabla Periódica; símbolo químico Au; número atómico: 79; peso atómico: 196,97; número de isótopos: 1. El contenido promedio en ppm es en rocas ígneas: 0,0032 (ultramáficas) y 0,0023 (granodioritas); en rocas sedimentarias: 0,005 (calizas), 0,005 (areniscas) y 0,004 (shales) (ROSE et al., 1979).

Asociaciones: Se presenta como elemento siderófilo y, en menor proporción, calcófilo; en depósitos de metales preciosos se asocia principalmente con Ag, As, Sb, Hg, Se y Te. En algunos depósitos de sulfuros, con Fe, Zn y Cu.

Movilidad: En depósitos auríferos es limitada, por lo inerte del oro nativo; en ambientes diferentes a los de depósitos, el valor extremadamente alto de la relación contenido

promedio de oro en agua dulce/contenido promedio de oro en rocas, sugiere una movilidad alta (ROSE et al., 1979).

## MINERALOGIA

En la Tabla 1 se indican los principales minerales de oro; de éstos los más comunes son el oro nativo y los telururos. El oro nativo se caracteriza por cristalizar en una gran variedad de formas; las más comunes son grupos paralelos y agregados maclados. Cristales reticulados, dendríticos, arborescentes, filiformes y esponjosos, también son relativamente comunes. Las formas masivas están representadas por fragmentos redondeados (Nuggets), granos aplanados y partículas muy finas (oro en polvo).

El oro nativo generalmente contiene cantidades variables de otros elementos. Entre los mencionados en la Tabla 1 la aleación natural oro-plata es la más común. Cuando el contenido de plata es de 20% o más, esta aleación se conoce con el nombre de electrum. En la maldonita el contenido de bismuto alcanza hasta un 3%; en la porpezita u oro paladino (Au-Pd), el paladio alcanza hasta 10%.

El oro es un constituyente traza de una gran variedad de minerales en donde se presenta como elemento nativo, telururo, auroestibita y probablemente, como constituyente de la red cristalina. BOYLE (1979) presenta un excelente resumen del contenido en oro en silicatos, elementos nativos, sulfuros, sulfosales, óxidos, etc.

## TIPOS DE DEPOSITOS

Zonas de venas y filones, estovercas (atockworks), mantos y otros depósitos hipogénicos similares han sido junto con los placeres antiguos y recientes, las principales fuentes de obtención de oro en el mundo. Durante las últimas dos décadas, depósitos de oro diseminado, muchos de ellos en forma estratoconfinada, desarrollados en calizas, shales calcáreos y esquistos, se han explotado en Estados Unidos, Canadá y Australia.

Entre los depósitos de oro más productivos se encuentran los llamados conglomerados de cuarzo; algunos de ellos también contienen uranio, tierras raras y pequeñas cantidades de elementos del grupo del platino como en Sur Africa.

BOYLE (1979) presenta una clasificación de los depósitos de oro que comprende 9 categorías; como la descripción detallada de cada categoría se escapa a los propósitos de este artículo, el lector interesado encontrará en el texto de BOYLE y en LOZANO y PULIDO (1986), información y referencias suficientes. A continuación solamente se mencionan estas categorías:

- a) Stocks, diques y silos porfiríticos auríferos; cuerpos graníticos auríferos; aplitas y pegmatitas.
- b) Depósitos de metasomatismo de contacto (skarne).
- c) Venas y filones, estovercas, cuerpos irregulares silicificados y tubos (pípees) mineralizados en las zonas de fracturas, falla, cizalla y brecha, localizados esencialmente en terrenos volcánicos. Entre los numerosos ejemplos que se conocen sobresalen los distritos de Yellowknife (Canadá), Mother Lode

TAB. 1. Minerales de oro (simplificado de BOYLE, 1979).

Elementos nativos, aleaciones y compuestos metálicos	
<b>Oro:</b>	Au
Oro argentífero (electrun)	(Au, Ag)
Oro cupriano (cuprosaurido)	(Au, Cu)
Oro paladiano (porpezita)	(Au, Pd)
Oro rodiano (rodita)	(Au, Rh)
Oro irídico	(Au, Ir)
Oro platínico	(Au, Pt)
Oro bismutiano	(Au, Bi)
<b>Oro amalgamado</b>	Au <sub>2</sub> Hg <sub>3</sub> (?)
<b>Maldonita</b>	Au <sub>2</sub> Bi
<b>Sulfuro:</b>	
Uytenbogardtita	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>
<b>Teleruro:</b>	
Calaverita	Au Te <sub>2</sub>
Krennerita	(Au, Ag) Te <sub>2</sub>
Petzita	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>
Muthmanita	(Ag, Au) Te
Magyagita	Pb <sub>5</sub> Au(Te, Sb) <sub>4</sub> S <sub>5-8</sub>
Silvanita	(Au, Ag) Te <sub>4</sub>
<b>Antimoniuro:</b>	
Auroestibita	AuSb <sub>2</sub>
<b>Seleniuro:</b>	
Fischerita	Ag <sub>3</sub> AuSe <sub>2</sub>

(USA), Ionopah (USA), Kalgoorlie (Australia) y Lebond (Indonesia).

d) Venas y filones auríferos en zonas de falla, planos de discontinuidad y pliegues de arrastre, localizados esencialmente en terrenos sedimentarios. Los depósitos de Cariboo (Canadá), Salsigne (Francia) y varios del Slate Belt, en los Apalaches (USA) son ejemplos de esta categoría.

e) Venas y filones, estovercas y zonas silicificadas con oro y plata, en ambientes geológicos complejos que incluyen rocas sedimentarias e ígneas intrusivas y estrusivas. BOYLE (1979) los subdivide en 3 categorías según se relacionen con 1) cuerpos intrusivos, 2) flujos volcánicos y 3) rocas sedimentarias específicas.

f) Depósitos de oro diseminado en estovercas, en rocas sedimentarias e ígneas.

g) Depósitos de oro en conglomerados de cuarzo y ortocuarzitas. En los últimos años han producido algo más del 60% del oro en el mundo; los más conocidos están en Sur Africa, Canadá y Brasil.

h) Depósitos de placer. Estos depósitos son muy comunes; una clasificación genética sencilla, la presenta EVANS (1980).

i) Otras fuentes de oro. Existen otras depósitos minerales donde el oro puede obtenerse como subproducto. Según BOYLE (1979), los principales son: 1) depósitos de níquel y cobre

asociados con rocas básicas (tipo Súdbury); 2) depósitos de sulfuros masivos, en terrenos volcánicos y sedimentarios (tipo Noranda-Bathurst y tipo Kuroko); 3) venas y filones que contienen esencialmente sulfuros polimetálicos, en terrenos volcánicos y sedimentarios; 4) depósitos de sulfuros diseminados (tipo pórfidos de cobre); 5) shales y esquistos piritosos y cupríferos (tipo Kupferschiefer); 6) arenas cupríferas y argentíferas (tipo capas rojas); 7) depósitos de platino y 8) arenas negras.

## PROSPECCION

En el reconocimiento, en la búsqueda de depósitos de oro, generalmente se toman muestras de sedimentos activos finos y concentrados; en una fase de detalle se toman muestras de esquirlas de roca y de suelos. Muestras de plantas, aguas y gases también han sido utilizadas en prospección geoquímica.

Los elementos químicos, generalmente enriquecidos en la mayoría de los depósitos epigenéticos de oro son, en orden de importancia, Si ( $\text{SiO}_2$ , cuarzo), S ( $\text{FeS}_2$ , pirita), Ag, As, Sb, Te, B, Bi, Hg, Mo, W, Cu, Zn, Pb, Cd, I, Ba, Sr, Mn, Se, F, Cl, U y Th. La mayoría de estos elementos pueden ser, en determinados casos, elementos guías (pathfinders) importantes. Plata, arsénico y antimonio están presentes prácticamente en todo tipo de depósito epigenético de oro.

## EXPLORACION Y METALURGIA

Los métodos de explotación, en depósitos de oro, varían considerablemente dependiendo del tamaño, forma, profundidad y características físicas del depósito mismo y de las rocas que lo contienen.

En términos generales, los principales métodos de explotación utilizados son: dragado, en depósitos de placer localizados en un medio acuoso; tajo abierto (open pit), en depósitos de oro diseminado (bajo tenor - gran tonelaje) localizados cerca a superficie; método subterráneo de tóneles; en depósitos de venas y filones.

Concentración por gravedad, flotación, fundición, amalgamación y cianuración son los principales procesos de beneficio y metalurgia, utilizados en la recuperación del oro. Por lo general se requiere de la combinación de varios de estos métodos para lograr buenos resultados.

## EL ORO EN COLOMBIA

### HISTORIA

Antes de la conquista, la minería del oro era un factor importante en la economía de los indígenas. Con la llegada de los españoles se intensificó la exploración a tal punto que la mayor parte de las regiones auríferas actuales se conocieron en esa época. En un comienzo los trabajos mineros se realizaron con la ayuda de los indígenas y posteriormente con esclavos.

Restrepo (1979) calcula que hasta 1890 se habían producido en Colombia 653 millones de pesos en oro (peso español), de los cuales el 77% correspondía a minas de aluvión. Singewald (1949) estima que esta producción represente cerca de 1.000

millones de dólares y Poveda (1981) asegura que fueron extrajeros de las diferentes minas de Colombia incluyendo Panamá, 1640 toneladas de oro hasta finales del siglo XIX.

La mayor parte de la fundación de ciudades localizadas en el Occidente colombiano, como Cali, Popayán, Ibagué, Mariquita, Cartago y Santa Fe de Antioquia se realizó con el específico propósito de servir como centros de producción de oro, puesto que esta industria representó para los españoles la mayor fuente de ingresos.

Con anterioridad a 1860 la principal técnica de explotación de aluviones era el mazamorreo y en algunos casos la utilización de corrientes de aguas para el barrido de los estériles; estos métodos de explotación se observan todavía en la actualidad. Para las minas de filón, luego de la apertura de los túneles que se realizaba a pica y pala, el material era triturado en forma manual.

La primera compañía extranjera que se formó en el país fue la Frontino Gold Mines en 1852, que en 1864 comenzó a explotar las minas de filón de Remedios y Segovia, lo cual representó el inicio de la renovación de algunas técnicas de explotación. Se empezaron a utilizar la dinamita y los molinos hidráulicos; esto trajo como consecuencia el incremento en la producción de oro. En la década de 1890, los franceses trajeron al país los primeros molinos californianos para las minas de Sonsón y Zaragoza. En 1901 el ingeniero D'O'Brien instaló el primer elevador hidráulico en el río Porce para la Pato Gold Mines.

En 1911 existían aproximadamente 35 compañías extranjeras en el país, en su mayoría con capital británico que después fue reemplazado por capital norteamericano y Francés. En 1913 la Pato Gold Mines comenzó a operar la primera draga eléctrica flotante en el río Nechí. Por esta época se instaló otra draga en el río Condoto en el Chocó por Anglo Colombian Company. Posteriormente la South American Gold adquirió los derechos de la Anglo Colombian e intensificó sus explotaciones por el método de dragado en los ricos yacimientos del río San Juan en el Chocó y el Telembí en Barbacoas, Mariño. También han sido explotados con dragas los aluviones del río Cauca cerca a Buenos Aires, Cauca y del río Supía en Caldas; estos trabajos comenzaron en 1940. Algunos intentos de dragado se realizaron en el río Patía en 1937 por la Aznaró Gold Dredging Company pero sin resultados favorables. En 1942 estaban instaladas 17 dragas en todo el país principalmente en los ríos Nechí, San Juan, Cauca, Telembí y Supía.

En 1940, el 55% de la producción de oro correspondía a compañías extranjeras, el 15% a compañías colombianas y el 30% restante era extraído por barequeros. Del total de producción, el 60% provenía de aluviones.

En 1974 la compañía Mineros de Colombia S.A. compró los derechos de la Frontino, de la Pato y de la Chocó Pacífico; posteriormente esta compañía dividió sus operaciones en dos filiales; Mineros de Antioquia que asumió las operaciones de Zaragoza, Segovia, Remedios y la explotación por medio de dra-

gas en el río Nechí que antes pertenecía a la Pato, y la otra filial, Mineros del Chocó, que siguió laborando los aluviones de la cuenca del río San Juan antes explotada por la Chocó Pacífico.

Recientemente se ha incrementado en forma notoria la participación de la pequeña y mediana minería en la producción de Oro de Colombia.

### SITUACION ACTUAL Y PRODUCCION

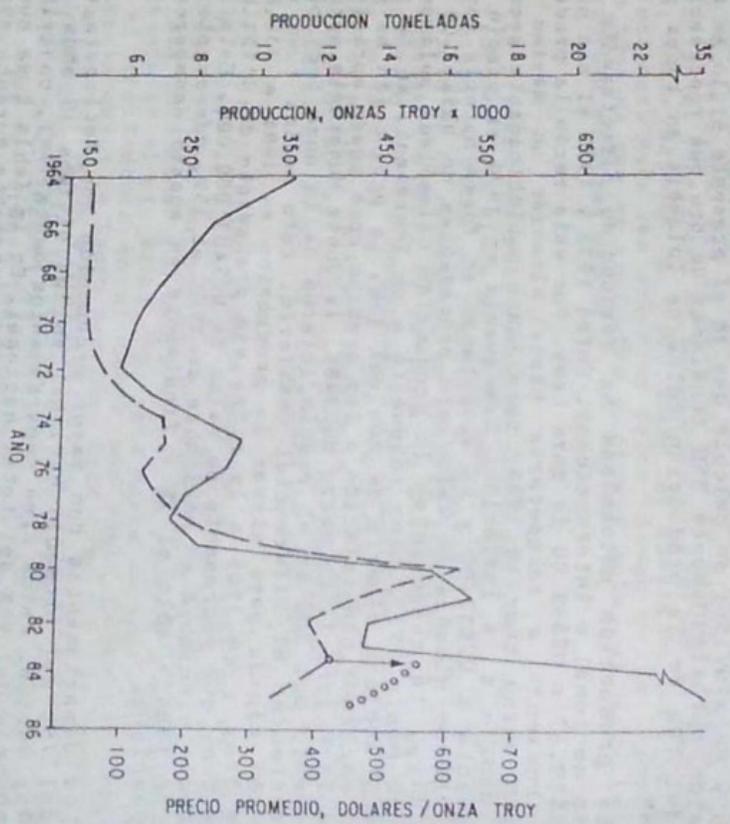
En Colombia el oro se extrae exclusivamente de minas de filón y de aluvión; se calcula que en el presente siglo se han extraído aproximadamente 850 toneladas de oro que representan más del 50% de la producción total de Colombia en todas sus épocas.

La producción colombiana ha respondido directamente al precio nacional e internacional. Entre 1932 y 1935 el oro pasó de US\$20.67 a US\$35.00 la onza troy. Por esta razón la producción comienza a recuperarse hasta alcanzar un máximo de 656.000 onzas troy en 1941, para luego paulatinamente decrecer, debido a la inflación. Nuevamente en 1970 el precio se incrementa a US\$37.00 y va aumentando en forma notoria hasta 1980 cuando alcanza un valor sin precedentes de US\$613.00 la onza troy. La reacción en la producción colombiana solamente comenzó hasta 1973, como respuesta a un incremento en la pequeña y mediana minería de más del 15%. La producción ha seguido variando con relación a los precios como puede apreciarse en la figura 1. En marzo de 1984, la Junta Monetaria aprobó un aumento del 30% en el precio interno de la onza troy para contrarrestar el diferencial cambiario. Esta medida tuvo una reacción rápida para elevar la producción en 1984 a 730.000 onzas troy y en 1985 a la cifra sin precedente de 1'151.000 onzas troy que representa un valor de US\$403'000.000. Este sobreprecio disminuyó en noviembre de 1985 al 15%, nuevamente en mayo de 1986 a sólo el 9% y finalmente en agosto desapareció por completo.

Los departamentos con mayor producción son Antioquia con más del 75% del promedio nacional en los últimos 10 años, el Chocó y Nariño. Estos tres departamentos hasta 1983, contribuyen con más del 90% del total nacional. En la tabla 2 se suministran los datos de producción por departamento durante 1985. En la tabla 3 se encuentra la producción mensual de 1986 hasta septiembre.

Más del 80% del oro que se explota actualmente en Colombia proviene de la minería de aluvión. En los últimos 15 años ha sucedido un importante fenómeno en la minería del país: en 1970, aproximadamente el 75% del oro era producido por la gran minería, mientras que en la actualidad, cerca del 90% es producido por la pequeña y mediana minería que en los últimos años se ha incrementado notoriamente.

La minería del oro, representa la segunda fuente de generación de divisas después del café y emplea alrededor de 30.000 personas. Se estima que en Colombia el 96% de la producción se utiliza como reservas institucionales y el 4% restante para usos industriales como joyería, ornamentación y odontología (CACERES y RAMIREZ, 1985).



— Producción de Oro en Colombia  
 - - - Precio Internacional  
 o o o o o Precio Nacional  
 Fuente: Mining Annual Review, 1985 y Banco de la República 1984

FIG. 1: Producción y precio de oro en Colombia entre 1964 y 1985.

TAB. 2: Producción de oro por departamentos en 1985\* (onza troy).

Departamento	1985
1. Antioquia	892.938
2. Chocó	60.606
3. Santander	43.952
4. Bolívar	39.864
5. Nariño	29.578
6. Caldas	22.320
7. Cauca	15.363
8. Valle	12.900
9. Tolima	10.200
10. Córdoba	6.954
11. Huila	2.089
12. Putumayo	2.041
13. Guainía	1.987
Otros	1.594
TOTAL	1'142.386

\*Fuente: Banco de la República.

TAB. 3: Producción mensual de oro en Colombia, 1986\*

	Onzas troy
Enero	130.334
Febrero	114.042
Marzo	108.279
Abril	135.855
Mayo	125.729
Junio	113.816
Julio	144.912
Agosto	129.969
Septiembre	72.023
Acumulado	
enero-junio de 1985	512.425
Acumulado	
enero-junio de 1986	728.055

\* Datos proporcionados por el Banco de la República.

## MINERIA

El oro se extrae principalmente de las cordilleras Central y Occidental y de los valles interandinos; en la Cordillera Oriental solamente se conocen los yacimientos de Vetás y California en Santander. Últimamente se han realizado los descubrimientos de la Comisaría del Guainía. Brevemente se describen las zonas de minas de filón y de aluvión.

### MINAS DE ORO DE FILON

Debido a las características geológicas de las mineralizaciones de oro de filón, su posible origen y relación con diferentes eventos magmáticos que ocurrieron en los Andes Colombianos desde el Jurásico al Terciario, se han dividido en diferentes zonas y distritos mineros.

*Zona Oriental de Antioquia.*— Se relacionan en este estudio como Zona Oriental de Antioquia (Fig. 2), el sector correspondiente al distrito de Zaragoza, Segovia, Remedios y al Distrito de Puerto Berrío (RODRIGUEZ y PERNET, 1983). Las minas están asociadas a rocas intrusivas del Batolito de Segovia de edad Jurásica.

*Distrito de Zaragoza, Segovia, Remedios.*— Este Distrito es el más importante de Colombia; algunas de las minas se trabajan desde el siglo pasado y aún continúan en explotación. Sin lugar a dudas la mineralización más importante de este distrito es la mina del Silencio, la cual tiene en la actualidad 44 niveles sobre un filón con dirección N20°E e inclinación 30° al SE. El filón del Silencio se conoce por una distancia de 2 km; en el sur limita con las mineralizaciones de Tres y Media y La Cecilia. Esta mina fue trabajada por la Compañía Frontino Gold Mines y desde hace aproximadamente 10 años por compañías colombianas. Para el beneficio del mineral se cuenta con una planta de molienda para 600 toneladas/día, complementada con tanques de cianuración.

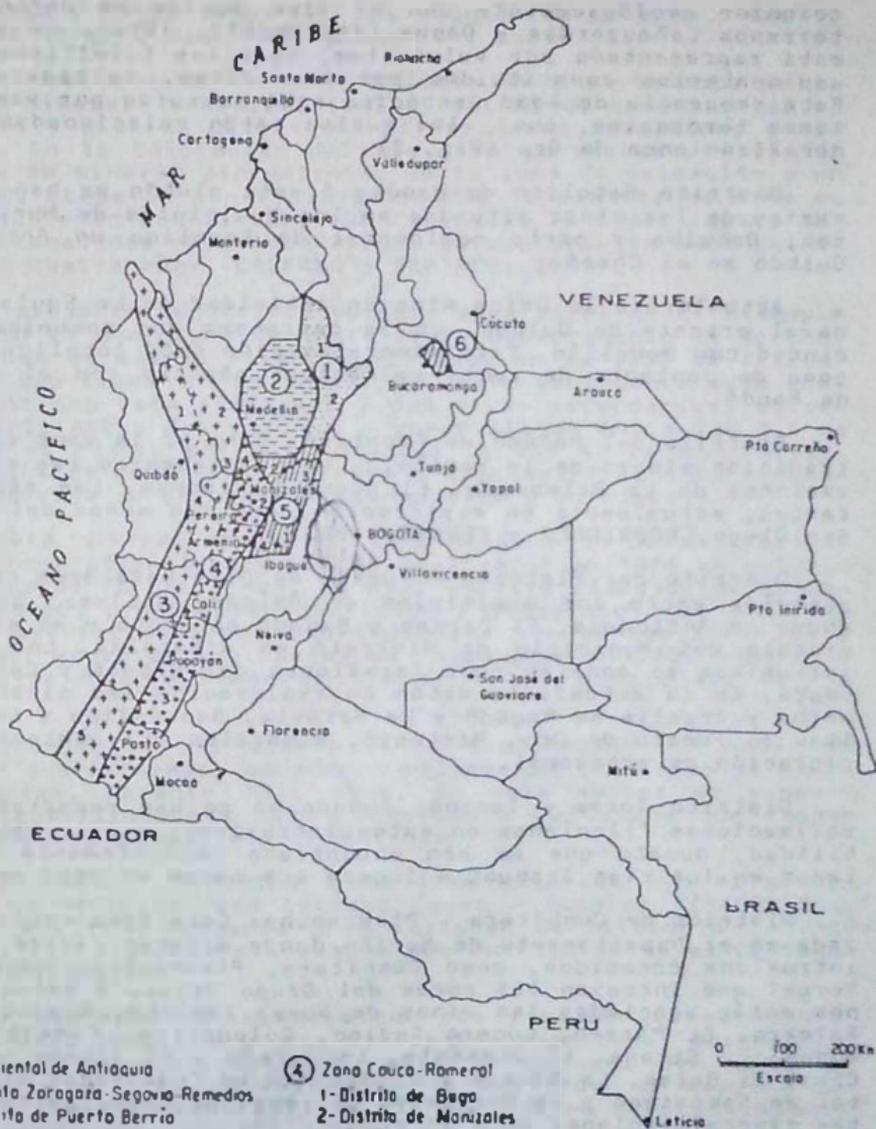
Se encuentran en esta mina importantes concentraciones de galena y esfalerita con valores altos en oro, las cuales han sido exportadas en cantidades que alcanzan las 1.000 toneladas/año. Se estiman reservas de 3 millones de toneladas (RODRIGUEZ y PERNET, 1983). Además de las explotaciones del Silencio existen otras que operan con métodos rudimentarios de extracción y beneficio, que generalmente fueron trabajadas por la Frontino Gold Mines; este es el caso de La Bartola, Palmichala, San Nicolás, Marmajita, La María, Montezuma y Cogote. Hacia la parte norte, cerca a Zaragoza, la mina de mayor importancia ha sido la de Limón; aunque últimamente su producción se ha visto muy disminuida, tiene reservas probadas de 50.000 toneladas y probables de 160.000 toneladas, con un tenor promedio de 40 g por tonelada.

*Distrito de Puerto Berrío:* En este distrito aunque tiene condiciones geológicas semejantes a las anteriores, la minería ha sido esporádica puesto que los filones son pobres en sulfuro y en metales preciosos.

*Zona Central de Antioquia.*— Las minas de filón están asociadas al Batolito de Antioquia de edad Cretácica y se encuentran localizadas dentro del plutón o en la roca encajante cerca a la zona de contacto.

En la actualidad solamente están en actividad las minas de San Juan Nepomuceno en Guadalupe, La Trinidad, La Italia, El Violín y La Bramadora en Anorí, la Vetilla y la Leona en Amalfi; de estas minas la más importante es La Bramadora, la cual está situada cerca a la carretera de Anorí en la margen izquierda del río Porce.

La minería que se adelanta en la Zona Central de Antioquia es de pequeña escala, utilizando molino de picones y sistemas de cianuración para el beneficio del oro.



- ① Zona Oriental de Antioquia
  - 1- Distrito Zaragoza - Segovia - Remedios
  - 2- Distrito de Puerto Berrio
- ② Zona Central de Antioquia
- ③ Zona Cordillera Occidental
  - 1- Distrito Batallón Mandé
  - 2- Distrito del Paramo Frontino
  - 3- Distrito del Plateado
  - 4- Distrito Torra - Tamandá
  - 5- Distrito de Cumbitara - Piedrancho

- ④ Zona Cauca - Romeril
  - 1- Distrito de Buga
  - 2- Distrito de Marzales
  - 3- Distrito de Almaguer
  - 4- Distrito de Marmato - Coramanta
- ⑤ Zona Ibaqué - Sonsón
  - 1- Distrito de Ibaqué
  - 2- Distrito de Sonsón
  - 3- Distrito El Hatillo - Florencia
  - 4- Distrito Cajamarca - Salento
- ⑥ Zona Vetas - California

FIG. 2: Localización de zonas de oro de filón y de los principales distritos.

**Zona Cordillera Occidental.**— La Cordillera Occidental coincide geológicamente con el área que se ha definido como terrenos Cañasgordas y Dagua (INGEOMINAS, 1986). La secuencia está representada por vulcanitas, basaltos toleíticos y rocas sedimentarias constituidas por turbiditas, calizas y tabas. Esta secuencia de edad Cretácica está intruida por varios plutones terciarios, con los cuales están relacionadas las mineralizaciones de Oro (Fig. 2).

**Distrito Batolito de Mandé:** A este plutón se han asociado varias de las minas situadas en los Municipios de Murindó, Urao, Dabeiba y parte occidental de Frontino en Antioquia y Quibdó en el Chocó.

Actualmente la única mina en actividad es La Equis, situada al oriente de Quibdó, en la carretera que comunica a esta ciudad con Medellín. Esta mineralización está localizada en la zona de contacto de rocas volcánicas básicas con el Batolito de Mandé.

**Distrito del Páramo de Frontino:** Esta es la zona con mayor tradición minera de la región, y están presentes las mineralizaciones de La Primavera, El Cuamo y Piedras. Las más importantes, actualmente en exploración, son las minas del Cerro y San Diego (RODRIGUEZ y PERNET, 1983).

**Distrito del Plateado - Puerto de Oro:** Esta área está comprendida entre los municipios de Salgar, Bolívar, Betania y Andes en Antioquia, El Carmen y Bagadó en Chocó y en el noroccidente del Municipio de Mistrató en Risaralda. Los cuerpos intrusivos se conocen como farallones del Citará y Cerro Plateado. En la actualidad están en exploración las minas de Dabeiba y Argelia en Bagadó y La Moravia, San Felipe y Las Canelas en Puerto de Oro, Mistrató, Risaralda. El sistema de explotación es artesanal.

**Distrito Iorra - Tamañá:** Aunque no se han reportado mineralizaciones filonianas en estos intrusivos, existe gran posibilidad, puesto que se han encontrado recientemente de alto tenor en los ríos Irabubú e Ingará que nacen en este sector.

**Distrito de Cumbitara - Piedrancha:** Esta área está localizada en el Departamento de Nariño donde afloran varios cuerpos intrusivos conocidos, como Cumbitara, Piedrancha, Nambí y El Vergel que intruyen las rocas del Grupo Dagua. A estos plutones están asociadas las minas de Nueva Esparta, Risaralda, La Palmera, El Páramo, Lucero Andino, Colondrina, Canadá en Los Andes; La Gitana, El Diamante, La Dorada y El Tábaro en Santa Cruz; El Balao, La Morena y El Granito en Cumbitara; Río Cristal en Sawanlego y La Dorada en Mallama. La mayor parte de estas mineralizaciones está en producción.

La minería está organizada por medio de pequeñas cooperativas que poseen algunos molinos para el beneficio comunitario. Algunas empresas medianas cuentan con campamentos, molino californiano, martillo neumático, etc. Este tipo de minería emplea entre 20 y 30 obreros y explota minas con tenores entre 5 y 10 g por tonelada. Se muelen de 60 a 100 toneladas de material al mes, lo cual produce de 800 a 1.000 g de oro.

En toda la zona de la Cordillera Occidental el proyecto más importante es el de La Equis situado al este del Municipio de Quibdó en el Chocó. Está constituido por un filón de 2 m de espesor, con oro y plata acompañados por sulfuros como esfele-

rite, galena y calcopirita con los siguientes tenores : oro 12 g/t, plata 19 g/t, zinc 11%, plomo 2% y cobre 1%.

La empresa que actualmente explota este yacimiento es la Colombian Minerals Resources Inc. El método de beneficio es el de cámaras y pilares utilizando perforadoras neumáticas y explosivos. En la iniciación del proyecto se procesarán 15.000 toneladas de mineral provenientes de la zona de oxidación y en la segunda etapa se beneficiarán 96.000 toneladas. La mina en plena producción beneficiará 100 toneladas al día y espera obtener 20 toneladas de concentrados. La explotación está calculada para cuatro años (CACERES y RAMIREZ, 1985).

Otro proyecto importante en esta zona es el de El Diamante situado en el Municipio de Santa Cruz, Departamento de Nariño. Los filones de cuarzo están localizados en la zona de fracturamiento que tiene una dirección NE. Este yacimiento está compuesto por una veta principal y dos vetas secundarias; el espesor varía entre 0.7 y 1.5 m y puede llegar hasta los 5.6 m. El filón se conoce por una longitud de 800 m. La mineralización consta de oro, plata, pirita y arsenopirita; como minerales accesorios se encuentran calcopirita y esfalerita.

En esta mineralización el INGEOMINAS y la Japan International Cooperation Agency (JICA) realizaron en 1984 un estudio preliminar de factibilidad, el cual incluyó trabajos de geología de campo, prospección geofísica y geoquímica. Se realizaron 15 perforaciones con profundidades que varían entre 80 y 200 m, por medio de las cuales se calcularon 451.200 toneladas de reservas con un tenor de oro de 7 g/t y de plata de 110 g/t.

De acuerdo con el diseño de la explotación por medio de trabajos subterráneos, se pueden extraer 50 toneladas de mineral diarios, durante 10.6 años. En este sector se conocen otras mineralizaciones como La Marina y La Gitana que tienen explotación artesanal e intermitente.

*Zona Cauca - Romeral.* - Esta Área coincide con el sector que se ha definido como terreno Cauca - Romeral (INGEOMINAS, 1986). Esta zona presenta gran variedad de litología y está intruida por plutones con edades que oscilan entre el Cretáceo y el Neoterciario.

Los filones hidrotermales con oro y plata que se encuentran en esta zona tienen muy diferentes espesores, direcciones y tipos de mineralizaciones, pero en general son venas de cuarzo con cantidades variables de sulfuros no mayores del 15%, preferencialmente pirita, blenda, galena y ocasionalmente calcopirita.

**Distrito de Buga:** Las mineralizaciones están asociadas al Batolito de Buga que intruye rocas volcánicas básicas. Venas de cuarzo de poco espesor con oro y plata, están siendo explotadas muy rudimentariamente en los municipios de Ginebra y Guacarí, en el Departamento del Valle.

**Distrito de Manizales:** Estas mineralizaciones están relacionadas al Stock de Manizales. En la actualidad todas las minas están abandonadas, pero tuvieron importancia las de Farallones, La Coqueta, Morisca, El Diamante y La Cascada. El sistema de minería era subterráneo y se utilizaban molinos de piones y tanques de cianuración. Promediando el valor de 3

muestras tomadas por LOPEZ (1971) en la mina Farallones. Los resultados fueron los siguientes: oro 3g/t y plata 301 g/t.

Distrito de Almaguer: Este sector tuvo gran importancia en los siglos XVIII y XIX, pero en la actualidad las minas están explotadas solamente por pequeñas cooperativas mineras que operan en los municipios de Almaguer, Bolívar, La Vega, La Sierra en el Cauca y San Pablo, La Unión y Buesaco en Nariño.

Las diferentes minas utilizan de 2 a 8 trabajadores. Se extraen aproximadamente 10 toneladas al mes, las cuales son trituradas en molinos antioqueños de 4 pisonos. El oro se extrae por amalgamación y ocasionalmente por cianuración. Las minas activas son Cerro Gordo en Bolívar, La Concepción en Almaguer, El Esfuerzo, en San Pablo, La Amelia y El Albión en Buesaco; esta última es la mejor organizada del sector.

Distrito de Marmato - Caramanta: Este distrito está localizado al sur del Departamento de Antioquia y al noroeste de Caldas. Las características de fracturamiento, grado de tectonismo y mezcla de unidades litológicas son más intensas en este sector.

Esta área ha sido importante en la explotación de minas de oro desde la Colonia. Las minas en actividad son Marmato y Echandía. En la primera se explota preferencialmente la zona alta; en la zona baja se han realizado varios trabajos de exploración.

Las minas de Marmato se explotan con anterioridad a la llegada de los españoles. Entre 1825 y 1925 fueron trabajadas por compañías extranjeras; después de esta época pasaron a propiedad de la nación. Hasta 1940 fueron arrendadas a empresas colombianas y en 1981 el Ministerio de Minas y Energía las otorgó a la Empresa Colombiana de Minas -ECOMINAS-.

En Marmato se han identificado 10 filones con espesores que varían entre pocos centímetros y 2.5 m. La mayor parte del oro (70%) se encuentra en estado libre. En la zona alta están trabajando aproximadamente 50 mineros. Los mineros pagan cerca del 12% del producto bruto a Ecominas.

El tenor de la zona alta es de aproximadamente 10.2 g de oro por tonelada. La producción ha sido la siguiente:

Año	Gramos oro
1979	43.291
1980	45.520
1981	61.313
1982	74.733
1983	70.941

Zona Ibaqué - Sonsón.- De acuerdo con la distribución y relaciones geológicas de las mineralizaciones, es posible diferenciar 4 distritos.

Distrito de Ibaqué: Los filones de oro y plata están localizados en el Batolito de Ibaqué de edad Jurásica y en la zona de contacto.

Aunque se conoce gran cantidad de mineralizaciones que han sido explotadas en varias épocas, en la actualidad solamente se encuentran activas las minas de La Sonrisa y Las Animas, en Santa Isabel y las minas de Cirpes y El Payaso, en el Líbano. Todas estas minas tienen molino de pisones, bagonetas para el transporte de material y tanques de cianuración.

**Distrito de Sonsón:** Se presentan mineralizaciones de oro y plata en la zona de contacto del Batolito de Sonsón de edad Jurásico que intruye rocas metamórficas del Paleozoico; hay además unos pequeños cuerpos intrusivos terciarios. Los filones se presentan de poco espesor, generalmente en enjambres sin orientación definida. En la actualidad todos los trabajos de minería de filón de este distrito se encuentran totalmente abandonados.

**Distrito El Hatillo - Florencia:** Las mineralizaciones están asociadas con un cuerpo intrusivo de edad terciaria elongado en dirección norte-sur y dislocado en el extremo norte.

Toda la minería del sector está abandonada pero han tenido gran importancia las minas de Guayaquil, La Morena y Vizcaya en Caldas y La Platilla, Obdulia y El Dorado en el Tolima. El distrito se caracteriza por tener filones de cuarzo con espesores hasta de 1 m, con abundante concentración de sulfuros que pueden llegar hasta 30%. El contenido de oro es bajo, inferior a 10 g/t pero la plata es abundante; algunos análisis varían entre 100 y 1.000 ppm.

**Distrito de Cajamarca - Salento:** Los filones están asociados con varios apófisis de pórfidos dacíticos emplazados en el Terciario superior. En la actualidad todas las minas están abandonadas pero el sector es importante por la posibilidad de encontrar mineralizaciones de oro diseminado. En reciente estudio realizado por PULIDO (1985), se encontró que en la región de San Antonio, Cajamarca, Tolima existen valores anómalos para oro de 0.6 ppm en rocas y 0.51 ppm en suelos asociados con cuerpos de brechas hidrotermales localizadas dentro de rocas metamórficas del Grupo Cajamarca. También se observaron concentraciones anómalas de plata, arsénico, antimonio, cobre, molibdeno, wolframio y bario, las cuales presentan patrones de distribución similares al oro. Aparentemente las mineralizaciones de oro diseminado están relacionadas con brechas hidrotermales pero el verdadero potencial debe ser estudiado por medio de perforaciones.

**Zona de Vetas - California (Santander).** - Esta zona una de las más importantes del país, se conoce desde la Colonia y su explotación ha sido relativamente permanente. Es la única mineralización conocida y explotada en la Cordillera Oriental; por sus características geológicas se considera como un distrito minero.

Las mineralizaciones en general tienen dirección NE y constan de cuarzo, pirita, calcopirita, arsenopirita, galena, esfalerita, tetrahedrita con oro y plata; en algunas minas se observa además uraninita. En este distrito se encuentran las minas de San Celestino, El Cuatro, La Mascota, Asturias, El Diamante, Trompeteros, La Colombo, El Volcán, La Araña y La Toaca. La explotación se realiza por medio de túneles y el material se tritura en molinos de pisones o de bolas; luego los concentrados son tratados en tanques de cianuración (DIERO y ANGARITA, 1975).

## MINAS DE ORO DE ALUVION

En Colombia este tipo de acumulaciones se ha producido en varias épocas geológicas: En el Precámbrico en las Formaciones Tunué y Roraima pertenecientes al Escudo de Guayana y que afloran en el Vaupés y el Guainía; en sedimentos terciarios de la Formación Gualanday; en sedimentos neoterciarios localizados en el bajo Cauca al NE de Antioquia y en materiales no consolidados del Plió-Pleistoceno y del Cuaternario, situados en los valles interandinos de las Cordilleras Central y Occidental.

La explotación de los aluviones se realiza por diferentes tipos de minería como por barequeros, pequeña minería representada por grupos de trabajadores que utilizan motobombas y elevadores, mediana minería con inversiones en maquinaria con volquetas, retroexcavadoras, bulldozers y la gran minería que realiza la extracción del oro por medio de dragas de cucharas. A continuación describiremos brevemente las más importantes zonas donde se explota oro de aluvión en el país.

*Zona Caucasia - El Bagre.* - Esta área está situada al NE de Antioquia e incluye la desembocadura del río Nechí en el río Cauca (Fig. 3).

A comienzos del siglo, ingenieros ingleses y canadienses exploraron la región con resultados positivos, lo cual condujo a la constitución de la compañía Pato Gold Mines, que estuvo trabajando inicialmente con monitores en el sector de Dos Bocas y posteriormente con dragas en la zona del río Pato perteneciente a Zaragoza. En 1951 esta compañía se trasladó al Bagre y en 1974 fue vendida a Mineros de Colombia S.A. En noviembre de este mismo año se constituyó la Compañía Mineros de Antioquia S.A. que en la actualidad opera con seis dragas en la cuenca del río Nechí en jurisdicción de los municipios de Zaragoza, Caucasia, Nechí y Bagre.

Actualmente esta zona es la más importante en explotación de oro en Colombia. En 1983 aportó el 53% de la producción nacional. En 1984 el 56% y este porcentaje ha ido en aumento en los últimos años. De esta producción la compañía Mineros de Antioquia extrajo en 1983 el 33%, en 1984 el 25% y en 1985 aproximadamente el 18% con un aumento en general en su producción; pero últimamente ha sido más importante el aporte de la pequeña y de la mediana minería.

En este sector están operando permanentemente barequeros, pequeña, mediana y gran minería. Además del sector mencionado existen otras explotaciones cercanas en nacimientos y parte del río Cáceri y en las márgenes del río Cauca entre Cáceres y Caucasia; recientemente se están explotando algunos aluviones en la cuenca del río Man.

*Zona del Chocó.* - En el Departamento del Chocó se presentan dos cuencas importantes para oro y platino de aluvión. Hacia la parte central y norte se encuentra la cuenca del río Atrato que va a desembocar al Golfo de Urabá; la minería está concentrada principalmente en los municipios de Quibdó, Acandí y Unguía. Hacia el sur se localiza la cuenca del río San Juan que desemboca en el Pacífico; la minería está concentrada en los municipios de Bagadó, Tadó, Condoto, Istmina, Andagoya y Nóvita.



FIG 3: Localización de las principales zonas de oro de aluvión en Colombia.

En el Chocó la práctica del barequeo es intensiva; aún no se ha desarrollado la mediana minería. El asentamiento de la gran minería se presenta en la cuenca del río San Juan donde se creó en septiembre de 1926 la Compañía Chocó Pacífico S.A. Después de varias transferencias esta compañía se convirtió en Mineros del Chocó S.A., la cual recientemente entró en liquidación. Actualmente se está creando una nueva compañía con el nombre de Metales Preciosos del Chocó. En la actualidad están trabajando cuatro dragas en el río San Juan y sus tributarios en regulares condiciones de mantenimiento.

Aunque los mejores aluviones de la cuenca del San Juan han sido trabajados, existen varios sectores evaluados y apropiados para el trabajo con draga, como Bassin Flat (Bloque 6) Murriñita y Toro Bravo en el río Condoto, Santa Rosa en el río Timaná, Suruco y Primavera sobre el río San Juan, además de los bloques 7 y 8 sobre el mismo río, en cercanías a Puerto Santos. La compañía está interesada en evaluar los sectores de Suruco, Opagadó, Palmadó - Bebedó, Chambo Caliente y Tamaná Sur.

*Zona de Barbacoas.*— Se asigna este nombre a una extensa región que comprende la Costa del Pacífico perteneciente al Departamento de Mariño. En la zona se conocen tres tipos de aluviones: 1) Terrazas altas bien consolidadas de poca extensión con valores altos en oro, 2) Aluviones de piedemonte poco consolidados, los cuales abarcan extensiones mayores a las anteriores y presentan también contenidos altos de oro y 3) aluviones más recientes, poco consolidados, depositados en los antiguos canales de los ríos Telembí, Patía, Guelmambí, Maguí, Tacuandó y Tapaje.

Los aluviones de Barbacoas han sido objeto de explotación a todos los niveles. Hasta 1971 se explotaron a gran escala con dragas los aluviones del bajo Telembí y el Guelmambí (CACERES y RAMIREZ, 1985). De esta área se obtiene aproximadamente el 2% de la producción nacional.

*Zona de Saldaña.*— La minería de aluvión en el Departamento del Tolima está localizada en la parte sur, más exactamente en el sector que drena el río Saldaña en los municipios de Ataco, Chaparral y Coyaima.

El espesor de estos aluviones varía entre 5 y 20 m. Comúnmente la zona aurífera está localizada en la parte inferior, inmediatamente encima de la roca basal. El espesor de la cinta tiene un promedio de 0.70 m.

La explotación la realizan grupos de tres a cinco personas que excavan apiques verticales de 1 m de diámetro y en algunos casos alcanzan 20 m de profundidad; una vez encontrada la cinta se construyen pequeños túneles radiales. El material aurífero es extraído en baldes y melacates y luego lavado en superficie. Este tipo de trabajo se lleva a cabo principalmente en las minas de Santa Rosa y Mesa de Pole en Ataco. En esta zona no se han realizado sistemas más avanzados de minería, aunque existe un proyecto importante de Mineros El Dorado para trabajar con dragas de cucharas los aluviones de Ataco. El aporte del área es del orden del 1% de la producción nacional.

*Zona San Miguel - La Sierra.*— Se describe con este nombre a un sector de la margen occidental del río Magdalena bañada por los ríos La Miel, Samaná y Nare, localizada en los Departamentos de Antioquia y Caldas.

La pequeña minería con motobombas trabaja principalmente en bancos de gravas de la parte basal de la Formación Honda en el sector de La Palmera, parte alta del río La Miel y el área de La Ceiba, parte alta del río Samaná al occidente del corregimiento de San Miguel. La mediana minería está localizada en terrazas y aluviones recientes del río Nus en el sector de La Sierra. No se tienen datos sobre producción, pero esta zona empieza a involucrarse en la economía del país.

**Zona Amalfi - Anorí.** - Esta área está localizada en los municipios de Amalfi y Anorí en el Departamento de Antioquia. Los materiales aluviales aparentemente fueron depositados en una antigua penillanura inclinada hacia el norte.

Las minas más importantes son La Viborita, San Antonio, las Animas, San Benigno, Chamuscados, Vallecitos y Madre Seca. Con excepción de la mina La Viborita la explotación de las otras minas mencionadas se realiza por métodos artesanales. No se tienen datos sobre producción.

**Zona del Guainía.** - Tiene una extensión aproximada de 30.000 km<sup>2</sup> y está localizada cerca a la frontera con el Brasil. La geología del depósito es muy semejante a los yacimientos de Sur Africa y a los depósitos Blind River en Canadá y Cerro Jacobina en el Brasil. El oro observado en algunas muestras tiene carácter detrítico y se presenta en forma de láminas dobladas y deformadas que cementan los granos de arenisca que en algunos sectores son piritosos.

Las zonas que actualmente están en explotación en forma artesanal se encuentran en el río Cuiari, situado en la parte sur de la Serranía de Caranacoa, en Caño Tigre y San Nicolás, afluentes del río Guainía, localizados hacia el norte de la Serranía de Naquen. El material aurífero se presenta en coluviones en las laderas de estas serranías y en aluviones situados en los caños y ríos que drenan este sector.

## RESERVAS

Los estudios de reservas y su evaluación en el país son muy escasos. Se han adelantado algunas investigaciones por INGEOMINAS junto con Naciones Unidas y algunas entidades extranjeras; otros estudios han sido realizados por algunas compañías particulares.

A continuación resumiremos los datos compilados por CALERES y RAMÍREZ (1985) en los Estudios para la formulación del Plan Nacional para el Desarrollo Minero.

## FILÓN

**Segovia - Compañía Frontino Gold Mines.** - Minas de filón de El Silencio y Vera localizadas en el municipio de Segovia.

Categoría de reservas	Reservas (Ton.)	Tenor de Oro (g/ton.)	Espesor Vetas en m
Probadas	218.000	19.7	1.58
Probables	155.000	19.7	1.58
Posibles	1'725.000	15.9	0.9

**Guachavés - Prospecto El Diamante.** - Estudio preliminar desarrollado en el área de El Diamante, Paraíso, Bomboná, municipio de La Cruz (Guachavés) Departamento de Nariño, elaborado por INGEOMINAS y la Japan International Cooperation Agency (1984). Se trata de un sector de Minas de filón explotado a pequeña escala desde hace 40 años. La investigación se llevó a cabo por medio de estudios de campo, geofísica, geoquímica y quince perforaciones que alcanzaron profundidades entre los 80 y 200 m, que en total sumaron 2.093 m. Con base en estos datos se determinaron las siguientes reservas clasificadas como probables:

	Toneladas	Au ( g/t)	Ag (g/t)
Veta V-1	39.310	4.7	44
Veta V-2	48.270	5.4	25
Veta V-3	363.620	7.5	129
total	451.200	7.0	110

**Quibdó - Prospecto La Equis.** - Mina de filón localizada en el municipio de Quibdó, Departamento del Chocó. La información fue suministrada por Colombian Mineral Resources Inc. Las reservas se calcularon por medio de 1.200 m de perforaciones, las cuales dieron como resultado la determinación de 111.000 toneladas probadas de mineral y 12.000 toneladas probables. Los tenores son: oro 12 g/t, plata 19 g/t; zinc 11%, plomo 2% y cobre 1%.

**Marmato - Minas Nacionales de Marmato.** - Esta mineralización de filón está localizada en la zona baja de Marmato en el Departamento de Caldas. Estas minas están otorgadas a la Empresa Colombiana de Minas ECOMINAS. Se calculan 475.200 toneladas de reservas probadas y probables, de las cuales son recuperables el 70%. Con un ritmo de explotación de 100 toneladas/día, se estima la vida de la mina en cerca de 10 años (Tabla 4).

TAB. 4: Minas de Marmato. Reservas zona baja (en toneladas).

Vetas Rango	Porvenir Norte	Porvenir Sur	Santa Inés	Múcura	Mellizos	Grupo Sur	Total
Probadas	37.352	37.544	43.459	32.355			150.710
Probables Grado 1	27.720						27.720
Probables Grado 2	112.210	83.300	62.785	38.569			296.864
Posibles					425.880	656.880	1.082.760
Total reservas por veta	177.282	120.844	106.244	70.924	425.880	656.880	1.558.054
Tenor de oro por veta g/t	11.54	13.37	7.62	5.27			10.19

## ALUVION

*Nechí - Mineros de Antioquia.*- Aunque no fue posible contar con datos sobre la magnitud de las reservas, el Departamento Técnico de la Empresa estima que éstas son aproximadamente de 10.000 kg de oro, de los cuales el 30% se considera como marginales, es decir, que el contenido es menor de 70 mg/m<sup>3</sup> de oro.

*Saldaña - Mineros El Dorado.*- Las reservas probadas por esta compañía en los aluviones del río Saldaña, en Ataco, Departamento del Tolima, investigadas mediante perforaciones y trabajos de geofísica son de aproximadamente 51.5 millones de m<sup>3</sup> de material, con un contenido promedio de 163 mg/m<sup>3</sup>. Este depósito se encuentra en un área de 200 ha.

*Magüí - Compañía Minera Colombiana Texas.*- Aluviones de la región de Payán, municipio de Magüí, Departamento de Nariño (Tabla 5).

TAB. 5: Reservas de los aluviones de la región de Payán (Nariño).

Licencia No.	Vol. Estéril m <sup>3</sup>	Vol. Aluvión m <sup>3</sup>	Reservas en Metal (g)	Tenor Oro mg/m <sup>3</sup>
8704	3'888.607	3'087.437	1'011.466	330
8705	3'265.150	4'875.750	1'935.722	397
8706	800.375	2'557.500	1'121.378	438
Total	7.954.132	10'520.687	4.068.566	388

*Atrato - San Juan.*- Entre 1974 y 1976, el INGEOMINAS en colaboración con Naciones Unidas adelantó un programa de investigación en las cuencas de los ríos Atrato y San Juan, con el propósito de evaluar los aluviones auroplatiníferos de este sector. Se escogieron cuatro áreas cuyos resultados son los siguientes:

*Área de Acandí - Unguía:* Esta zona está situada en la parte norte del Chocó, en los límites con Panamá; se estima que el río Tolo tiene entre 60 y 90 millones de m<sup>3</sup> de gravas auríferas con un tenor aproximado de 98 mg/m<sup>3</sup>.

*Área de Murri - Penderisco:* Está localizada en el municipio de Urao al suroeste del Departamento de Antioquia. Los mejores valores fueron encontrados en pequeños depósitos de aluvión, localizados en los ríos Pabón y Penderisco, donde se analizaron muestras hasta con 607 mg/m<sup>3</sup>.

*Área de los ríos del Bajo San Juan:* En el río Brea, tributario del río Calima que desemboca unos 2 km antes de Puerto Patiño, se encontraron terrazas con espesores hasta de 6 m y con un tenor promedio de 152 mg/m<sup>3</sup>. La subárea de Domínó está situada 2 km al oriente de Puerto Patiño. Se excavaron 32 apiques que dieron tenores bajos con excepción de un pequeño sector. Se determinaron 100.000 m<sup>3</sup> con tenor promedio de 140 mg/m<sup>3</sup> de oro.

Area de Río Sucio: Los trabajos detallados se concentraron en el río Uraudó afluente del río Sucio, en un sitio localizado al occidente de la población de Mutatá, Departamento de Antioquia. Con base en 68 pozos en un área de 50 ha., se calcularon las siguientes reservas que se enuncian en la Tabla 6.

TAB. 6: Aluviones de Uraudó.

	Ley de corte (Au+Pt mg/m <sup>3</sup> )	
	No. 1 (250-100)	No.2 (300-150)
Volumen descapote (m <sup>3</sup> )	537.100	547.600
Profundidad promedio de aluvión (m)	2.79	2.45
Volumen aluvión (m <sup>3</sup> )	864.300	690.900
Tenor promedio Au, Pt (mg/m <sup>3</sup> )	693	787
Contenido de Au (kg)	539.07	489.37
Contenido de Pt (kg)	59.89	54.37
Relación Descapote Aluvión	0.62	0.79

*Margento.*— Estos aluviones están localizados en la margen izquierda del río Cauca, entre los municipios de Caucaasia y Necolí, en el Departamento de Antioquia. En 1977 la Compañía Canadiense Bijou Mines Limited, realizó un programa de excavación de apiques en estos aluviones. Los resultados se compilan en Tabla 7.

TAB. 7: Aluviones de Margento.

Localización	Area (Ha)	Espesor Promed. (pies)	Volum. Explotable (yd <sup>3</sup> )	Tenor (g/yd <sup>3</sup> )	Cont. (kilos Au)
Terraza Alta Sta. Catalina	38.93	11.5	1'534.000	0.466	715
Terraza Alta Buenos Aires	54.38	11.0	936.000	0.824	772
Terraza Baja Los Medios	3.17	11.0	98.000	0.523	51
Totales	96.48	11.1	2'568.000	0.602	1.538

## BIBLIOGRAFIA

- BERGER, B.R. and EIMON, P.L., 1982.- Comparative models of epithermal silver-gold deposits. AIME Preprint 82 -13 SME-AIME. Dallas, Texas.
- BONHAM, H. F., Jr. and GILES, D. L., 1983.- Epithermal gold-silver deposits: the geothermal connection. Nevada Bureau of Mines. 15 p. Washington.
- BOYLE, R.W., 1979.- The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey Canadian Bulletin 280, 584 p.

- CACERES, I. y RAMIREZ, Y., 1985.- Estudio para la Formulación del Plan Nacional de Desarrollo Minero. Instituto de Estudios Colombianos, 526 p. Bogotá.
- EVANS, A.M., 1980.- An Introduction to ore geology. Geoscience Texts, V.2, 231 p. Elsevier, New York.
- GEOGRAFIA UNIVERSAL, 1980.- El oro. Edición especial No. 3, 3A Editores, S.A. 112 p. México.
- INGEOMINAS, 1986.- Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Esc. 1:1'000.000. Bogotá.
- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY, 1984.- Estudio preliminar de factibilidad del desarrollo del área El Diamante, Paraiso - Bomboná, Departamento de Nariño. Proyecto de Ingeominas, 191 p. Bogotá.
- LOPEZ, J.H., 1971.- Ocurrencias minerales del Departamento de Caldas. Inf. 1602. Ingeominas. 118 p. Bogotá.
- LOZANO, H. y PULIDO, O.H., 1986.- Situación actual de la minería del oro y la plata en Colombia. Bol. Geol. 27 (3) Ingeominas. Bogotá.
- OTERO, A.L. y ANGARITA, L., 1975.- Ocurrencias minerales en el Departamento de Santander del Sur. Inf. 1686. Ingeominas. 54 p. Bogotá.
- POVEDA, G., 1981.- Minas y Mineros de Antioquia. Banco de la Republica, 175 p. Bogotá.
- PULIDO, O.H., 1985.- Geología y geoquímica del área de San Antonio, Cajamarca - Tolima, Proyecto Oro Diseminado. Inf. 1948. Ingeominas, 84 p. Bogotá.
- PRETORIUS, D.A., 1981.- Gold Geld, Gilt: Future Supply and Demand. Econ. Geol., vol. 76: 2032-2041. Bogotá.
- RESTREPO, V., 1979.- Estudio sobre las minas de oro y plata en Colombia. FAES. 259 p. Bogotá.
- RODRIGUEZ, C.J. y PERNET, A., 1983.- Recursos Minerales de Antioquia. Bol. Geol. Ingeominas. 26 (3): 116. Bogotá.
- ROSE, A.W., HAWKES, H.E. & WEBB, J.S., 1979.- Geochemistry in mineral exploration. Academic Press, 658 p. New York, N.Y.
- SINGEWALD, Q.D., 1949.- Mineral Resources of Colombia. U.S. Geological Survey. Bull. No.964: 57-143. Washington.

## PLATA

HERNANDO LOZANO O. - OSCAR H. PULIDO U.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Introducción.....	26
Usos .....	26
Ambiente Geológico .....	26
Geoquímica .....	26
Mineralogía .....	27
Clases de yacimientos.....	27
Prospección .....	27
Metalurgia .....	28
La Plata en Colombia .....	28
Depósitos .....	28
Producción.....	28
Comercio .....	28
Bibliografía .....	30

## INTRODUCCION

La palabra se conoce en latín como "argentum", que significa "Luna o Diana". La plata se explotó durante la edad media en varios países de Europa, pero su producción fue relativamente baja. Un aumento importante en la producción siguió al descubrimiento del continente americano, donde se destacaron los grandes yacimientos de Potosí (Bolivia), Guanajuato y Pachuca (México), y Nevada (USA); en el siglo XX, Canadá, México y Estados Unidos han ocupado en diferentes épocas el primer lugar en la producción mundial. Últimamente Perú figura entre los principales productores.

La plata es un metal de color blanco y brillo metálico; funde a 960°C, tiene una dureza entre 2.5 y 3 en la escala de Mohs. Su peso específico está entre 10.1 y 11.1; es muy dúctil y maleable. En la naturaleza la plata ocurre comúnmente asociada con el oro.

## USOS

Según DRAKE (1982), los principales usos de la plata, en orden de importancia, son en: material fotográfico, productos eléctricos y electrónicos, aleaciones y equipos de soldadura, joyería, vajillas y cubiertos, como catalizador, en monedas, medallones y objetos conmemorativos, en odontología y medicina, en espejos y otros.

## AMBIENTE GEOLOGICO

## GEOQUIMICA

Las características geoquímicas de la plata, según ROSE et al. (1979) son: símbolo químico: Ag; número atómico: 47; peso atómico: 107.87. El contenido promedio, en ppm en rocas ígneas es 0.6 (ultramáficas), 0.1 (máficas) y 0.037 (graníticas); en rocas sedimentarias es 0.1 (calizas), 0.25 (areniscas), y 0.19 (shales).

Productos de meteorización: cerargirita ( $\text{AgCl}$ ); jeroalita argentífera  $\text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  sobre depósitos de plata; en suelos está probablemente asociada con materia orgánica y óxidos de Fe y Mn.

## MINERALOGIA

Los minerales principales de plata son: argentita ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), polibasita ( $\text{Ag}_9\text{SbS}_6$ ), proustita ( $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ ), estefenita ( $\text{Ag}_5\text{SbS}_4$ ), pirargirita ( $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ ), cerargirita ( $\text{AgCl}$ ), y plata nativa (Ag). Otros minerales como galena argentífera ( $\text{PbS}$ ) y tetrahedrita argentífera  $\text{Cu}_3(\text{Sb, As})\text{S}_3$  tienen parte de la red cristalina reemplazada por plata.

## CLASES DE DEPOSITOS

La clasificación propuesta por HEYL et al. (1973), para los depósitos de plata, sigue vigente. Básicamente, estos depósitos pueden agruparse en dos categorías: 1) aquellos en que la plata se obtiene como subproducto, y 2) aquellos en que la plata es el principal constituyente.

## PLATA COMO SUBPRODUCTO

La mayor parte de la plata que se produce en la actualidad, se obtiene como subproducto en depósitos de cobre, plomo, zinc y oro, entre los que sobresalen los de pórfido cuprífero, venas y filones, sulfuros masivos y reemplazamientos. Cantidades importantes de plata se obtienen también a partir de algunos placeres.

## PLATA COMO PRINCIPAL CONSTITUYENTE

En el mundo existen distritos argentíferos famosos como Tonopah (Nevada, USA), Potosí (Bolivia) y Pachuca (México) en explotación. En la actualidad se conocen depósitos de venas y reemplazamientos en rocas volcánicas (Creede, Delamar y Virginia City en USA; Chanarcillo en Chile) y en rocas sedimentarias clásticas (Taylos, Calico y Hardshell en USA; Real de Angeles en México) en los que la plata es el principal mineral recuperable. BERGER and EIMON (1982) y BONHAM Jr and GUILLES (1983) son, entre otros, autores que describen las principales características de depósitos epitermales, en los que la plata puede llegar a ser el principal mineral.

WASTON (1983) presenta una clasificación de los depósitos de plata de bajo tenor-gran tonelaje, los que divide en dos categorías: a) diseminados y b) estovercas (stockwork). Las dos categorías pueden estar, algunas veces, espacial y genéticamente relacionadas.

## PROSPECCION

En términos generales, las técnicas para prospectar depósitos de plata u oro-plata epitermales son las mismas que se utilizan para prospectar oro. En la prospección geoquímica de depósitos de plata, los elementos comúnmente analizados, en muestras de sedimentos y suelos, son Pb, Cu, Zn, Hg, Ag y As. De éstos, el plomo es el más importante, dado que el contenido de plata, regularmente está por debajo del límite de detección de la mayoría de los métodos analíticos.

## METALURGIA

Tradicionalmente la plata se ha recuperado por copelación o amalgamación. Varios procesos (Augustín, Patio, Paters, etc), han sido utilizados en diferentes épocas (AGETON, 1970), los cuales se escogen según la minería de cada depósito. En los depósitos de plomo-plata, ésta se recupera, generalmente, por el proceso Parkes, que consiste en agregar zinc al material fundido; al enfriar la mezcla, se forma una aleación casi insoluble de zinc-plata, fácilmente separable, la que sometida a copelación, libera la plata.

## LA PLATA EN COLOMBIA

## DEPOSITOS

La plata comúnmente ha sido un subproducto en la explotación de oro de filón, extraída principalmente de las minas de Vetas y California en Santander, las de Segovia y Remedios en Antioquia y las de Marmato en Caldas. En algunos sectores se estima un contenido mayor de plata como en las minas La Mariela en Caramanta, La Estera en Buriticá, La Cancana en Yombó y Amalfi, localizadas en el Departamento de Antioquia. Además se pueden mencionar la mina Echandía en Marmato, Caldas y la mina de Las Nieblas en Salento, Quindío (Fig. 1).

## PRODUCCION

La producción de plata en Colombia es muy escasa como se puede apreciar en la Figura 2.

## COMERCIO

De acuerdo con datos estadísticos del DANE, las importaciones y exportaciones de plata entre 1980 y 1985 se muestran en las Tablas 1 y 2.

TAB. 1: Importaciones de plata.

Año	Ton. metr.	US\$(CIF) (miles)	Año	Ton. metr.	US\$(CIF) (miles)
1980	21	691	1983	319	1487
1981	16	530	1984	-	-
1982	408	2105	1985	-	-

TAB. 2: Exportaciones de plata.

Año	Ton. metr.	US\$(FOB) (miles)	Año	Ton. metr.	US\$(FOB) (miles)
1980	21	2900	1983	11	1344
1981	60	1596	1984	19	947
1982	21	947	1985	51	1340

Es notoria, en el gráfico de la Figura 2, la relación entre las producciones de oro y plata donde existen máximos en 1976 y 1981.

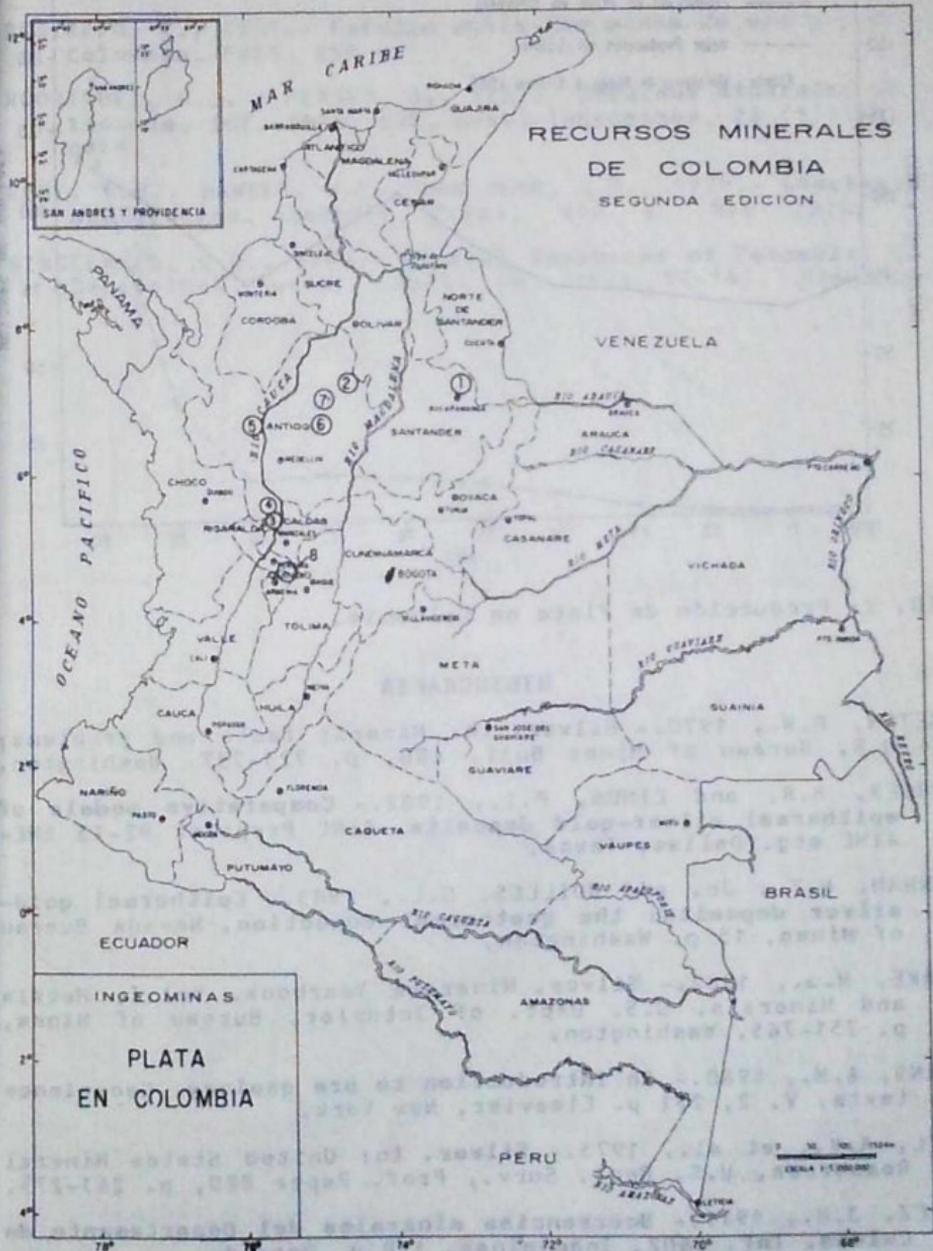


FIG. 1: Localización de plata en Colombia, asociada con oro de filón. 1. Vetas y California, 2. Segovia y Remedios, 3. Marmato, 4. Caramanta, 5. Buriticá, 6. Volombó, 7. Amalfi, 8. Salento.

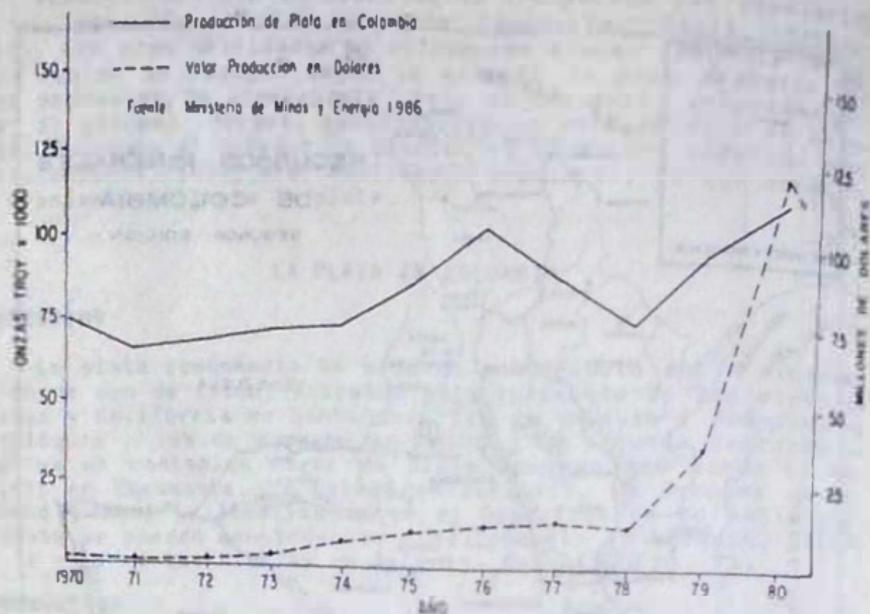


FIG. 2: Producción de Plata en Colombia.

#### BIBLIOGRAFIA

- AGETON, R.W., 1970.- *Silver*. in: Mineral facts and problems; U.S. Bureau of Mines Bull. 680, p. 723-737. Washington.
- BERGER, B.R. and EIMON, P.I., 1982.- *Comparative models of epithermal silver-gold deposits*. AIME Preprint 82-13 SME-AIME mtg. Dallas, Texas.
- BONHAM, H.F., Jr. and GUILLES, D.L., 1983.- *Epithermal gold-silver deposits: the geothermal connection*. Nevada Bureau of Mines. 15 p. Washington.
- DRAKE, H.J., 1982.- *Silver*. Minerals Yearbook, Vol. I, Metals and Minerals. U.S. Dept. of Interior, Bureau of Mines, p. 751-765. Washington.
- EVANS, A.M., 1980.- *An introduction to ore geology*. Geoscience texts. V. 2, 231 p. Elsevier, New York.
- HEYL, A.V., et al., 1973.- *Silver*. in: United States Mineral Resources, U.S. Geol. Surv., Prof. Paper 820, p. 263-275.
- LOPEZ, J.H., 1971.- *Ocurrencias minerales del Departamento de Caldas*. Inf. 1602. Ingeominas. 118 p. Bogotá.
- LOZANO, H. y PULIDO, O.H., 1986.- *Situación actual de la minería del oro y la plata en Colombia*. Bol. Geol., Ingeominas. 27 (3):56. Bogotá.
- OTERO, A.L. y ANGARITA, L., 1975.- *Ocurrencias minerales en el Departamento de Santander del Sur*. Inf. 1686. Ingeominas. Bogotá.

- POVEDA, G., 1981.- **Minas y Mineros de Antioquia**. Banco de la República, 175 p. Bogotá.
- RESTREPO, V., 1979.- **Estudio sobre las minas de oro y plata en Colombia**. FAES, 259 p.
- RODRIGUEZ, C.J. y PERNET, A., 1983.- **Recursos minerales de Antioquia**. Inf. 1885. Bol. Geol. Ingeominas, 26 (3):116. Bogotá.
- ROSE, A.W., HAWKES, H.E., and WEBB, J.S., 1979.- **Geochemistry exploration**. Academic Press, 658 p. New York, N.Y.
- SINGELWALD, Q.D., 1949.- **Mineral Resources of Colombia**. U. S. Geological Survey. Bull. No. 964: 57-143. Washington.

## PLATINO

EDUARDO ALVAREZ G.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	32
Introducción .....	33
Usos .....	33
Ambiente geológico .....	35
Geoquímica .....	35
Mineralogía .....	36
Clases de yacimientos .....	38
Situación Mundial .....	38
Reservas .....	38
Producción .....	39
El Platino en Colombia .....	40
Depósitos .....	40
Reservas .....	43
Producción .....	43
Comercio .....	43
Minería .....	44
Perspectivas .....	44
Bibliografía .....	45

## RESUMEN

El platino forma parte del grupo de metales preciosos y está íntimamente ligado con paladio, iridio, osmio, rodio y rutenio. Se descubrió por primera vez en Colombia en 1557 y se explotó desde 1778 por 34 años como única fuente del metal en el mundo.

Se usa principalmente como catalizador en la elaboración de productos químicos y farmacéuticos, en la industria del petróleo, en la oxidación de monóxido de carbono y residuos de combustiones incompletas, en moldes para la fabricación de vidrio óptico, en multitud de objetos electrónicos y eléctricos, además de sus usos en odontología, medicina, joyería, sistemas galvánicos, oleoductos y cohetes espaciales.

El platino y metales asociados están genéticamente ligados con rocas básicas y ultrabásicas de las cuales proviene el mayor porcentaje de la producción mundial.

También ocurre en aluviones o placeros depositados hacia las partes bajas de los ríos luego de la meteorización y erosión de las rocas huésped.

Geoquímicamente es un metal de naturaleza siderófila por lo cual está concentrado en el núcleo de ferroníquel. Las aleaciones naturales de metales del platino desde el punto de vista genérico son de dos tipos: platino y osmiridio. La primera incluye invariablemente cantidades de los otros cinco metales y el osmiridio consiste principalmente de iridio y osmio.

Existen numerosas designaciones mineralógicas para las aleaciones naturales que en general no tienen mucha aceptación

Las reservas mundiales están calculadas en 1.200 millones de onzas troy.

La producción mundial reportada para el año de 1983 fue de 201.619 kilogramos. Las reservas probadas en Colombia son del orden de 4.391 kg de metal crudo.

### INTRODUCCION

El platino forma parte de un grupo de metales preciosos; está estrechamente relacionado con paladio, iridio, osmio, rodio y rutenio.

Los primeros datos sobre el uso del platino se remontan a la época Precolombina, en la cual los indios del Ecuador fabricaron artículos de platino con adornos de oro (FARABEE, 1921). La primera alusión al platino fue probablemente la hecha por el italiano Julio C. Scaliger en 1557 en su libro titulado "On Subtlety". Posteriormente en 1748 el español Antonio de Ulloa al describir sus viajes a Sur América menciona la ocurrencia de "Platina" en el distrito del Chocó. En 1784 los primeros trabajos de investigación con respecto al platino fueron hechos por Charles Wood, un metalurgista inglés, quien obtuvo una muestra enviada de Cartagena (Colombia), a Jamaica. El doctor William Brownrigg familiar del anterior, investigó las propiedades del nuevo metal presentándolo en 1750 a la Real Sociedad de Londres. El mismo año, Sir William Waston y el doctor Brownrigg realizaron cuidadosamente descripciones del platino.

En 1805 William H. Wollaston, mediante un cuidadoso estudio de los residuos del platino, descubrió el paladio y el rodio. El iridio y el osmio fueron descubiertos por Smithson Tennant el mismo año, mientras que el rutenio fue separado en impurezas por G. W. Osann en 1827 y purificado y descrito posteriormente por Karl K. Klaus en 1847.

La minería en Colombia, en placeres platiníferos del Chocó, se inició en 1778 y fue durante 34 años la única fuente de este metal en el mundo, hasta el descubrimiento de los depósitos aluviales rusos en los montes Urales (1822); el descubrimiento de ricos placeres platiníferos hicieron de esa nación el primer productor mundial con Colombia en segundo lugar. Desde 1936, Canadá ha sido un productor de primera línea. En Suráfrica fue reportado el hallazgo de Osmiridio desde 1892 y en 1923 se hizo el primer descubrimiento de platino en la región del Trasvaal Central. La producción de platino y asociados a partir de minerales del níquel y cobre en los complejos ígneos de Bushveld se inició en 1925 y en 1956-57, la República de Suráfrica fue el mayor productor de los metales de platino.

### USOS

Los usos del platino han venido cambiando a través del tiempo a medida que nuevas aplicaciones industriales han sido descubiertas, y tienen relación principalmente con su extraordinaria actividad catalizadora, su inercia química a altas temperaturas y su alto punto de fusión. En algunas aplicaciones la combinación de dos o más características hace que el grupo del platino sea insustituible en la industria. (Mineral Facts and Problems, 1975).

En la industria química, el platino y sus asociados se

usan como catalizadores en la producción de un amplio número de químicos y farmacéuticos, entre los cuales el principal es el ácido nítrico. La resistencia de los equipos de laboratorio fabricados a base de platino y usados en ambientes altamente corrosivos, ha incrementado su aplicación en utensilios para tal fin.

En la industria del petróleo, catalizadores de platino, platino-iridio y platino-renio son usados "procesos de reformación", para incrementar el octanaje de las gasolinas y para producir benceno, tolueno y xileno para usos químicos. Además, los catalizadores de platino también son usados en procesos de isomerización y producción de derivados del petróleo.

Desde 1974 los catalizadores de platino-paladio se utilizaron en la oxidación de monóxido de carbono y de residuos de petróleo de combustiones incompletas producidas principalmente por automotores. En este año la industria automotriz llegó a ser la mayor consumidora de platino y paladio en los Estados Unidos.

Las aleaciones de paladio-rodio se usan en algunas partes de los hornos para fundición de vidrio y como protectores de los moldes para fabricar vidrio óptico, debido a su habilidad en permitir altas temperaturas en condiciones corrosivas, con poco desgaste y sin contaminar el vidrio. En la fabricación de fibra de vidrio se usan bujes y platos perforados de platino-rodio para forzar a través de ellos el material fundido produciendo la fibra de vidrio.

Una amplia variedad de objetos electrónicos y eléctricos, termostatos, termopares, colectores de motores eléctricos, bujías, magnetos super resistentes, tubos electrónicos, circuitos impresos y resistencias, son fabricados con la ayuda de metales del grupo del platino. Usualmente la inercia química y la estabilidad térmica justifican su uso en la fabricación de objetos eléctricos tales como reguladores de bajo voltaje en telefonía, o de alto voltaje en donde las aleaciones de platino-iridio y platino-rutenio minimizan la producción de puntos quemados en los metales por la transmisión del arco eléctrico.

Los metales del grupo del platino también son ampliamente usados en odontología y medicina. En ortodoncia y prótesis dental su resistencia a la corrosión y al esfuerzo permite la reducción en el tamaño de algunas piezas y además sirve como base de montaje a piezas de porcelana sin decolorarla durante la fundición. En medicina se emplea como pares de cauterización, en agujas hipodérmicas y en marcapasos.

El platino y el paladio en virtud de su escasez, valor, resistencia y facilidad para trabajarlo ha sido por mucho tiempo usado en joyería. Endurecido con iridio o rutenio el platino se usa como montaje seguro de joyas, además de que su color lo hace atractivo en el montaje de diamantes.

Los metales del grupo del platino juegan un importante papel en muchas otras industrias, tales como en producción de fibras sintéticas, aleaciones para motores de Jet, en sistemas galvánicos, para protección de barcos, en oleoductos y en cohetes espaciales.

## AMBIENTE GEOLOGICO

Los metales del grupo del platino están genéticamente asociados con rocas básicas y ultrabásicas, de las cuales actualmente se extrae el mayor porcentaje de la producción mundial de estos metales, a partir de vetas donde tales elementos están asociados principalmente con sulfuros de cobre y níquel (MINERAL FACIS AND PROBLEMS, 1975). En rocas básicas el platino y sus asociados ocurren en diseminaciones de uno o más elementos del grupo en unión con otros minerales entre los cuales se reportan como principales los de azufre, antimonio, arsénico, bismuto y telurio. La ocurrencia de los metales de este grupo se puede dar como aleaciones naturales, o como solución sólida en las rejillas atómicas de otros minerales tales como fosforita y espinela.

Las relativas proporciones de los seis metales del grupo del platino y especialmente la proporción relativa del platino y paladio varía de un depósito a otro de acuerdo con la composición de los magmas relacionados y con las diferencias en los procesos de formación mineral.

Las aleaciones naturales de metales del platino contienen en general un 90% por peso de platino, seguidos por rutenio, rodio, iridio y osmio.

Los granos de aleaciones nativas en rocas ultrabásicas son densos, físicamente resistentes y químicamente inertes. Debido a estas propiedades se encuentran comúnmente en placeres luego de la desintegración de la roca huésped. Los placeres platiníferos se caracterizan por la ausencia casi total de paladio y la presencia de oro. El paladio y en menor porcentaje el platino, rodio y rutenio son solubilizados durante la formación de los placeres, quedando como remanentes aleaciones de osmio-iridio. Los únicos placeres económicamente importantes en la actualidad están localizados en Colombia, Alaska, La Unión Soviética y Sur Africa, aunque sólo representa aproximadamente un 3% del total de la producción mundial.

Los metales del grupo del platino raramente se observan en rocas silíceas o alcalinas y nunca en concentraciones de importancia. Sin embargo, los mayores porcentajes de la producción mundial se recuperan de los procesos finales de refinación del cobre, el cual principalmente proviene de áreas de rocas silíceas o alcalinas (MINERAL FACIS AND PROBLEMS, 1975).

Desde el punto de vista genético, los metales del grupo del platino en general se han asociado con rocas ultrabásicas que pueden hacer parte de complejos zonados, estratificados y ofiolíticos, originados los primeros por diferenciación magmática en zonas orogénicas, pertenecientes los segundos a terrenos continentales cratónicos estables, o como terrenos alóctonos de dorsales oceánicas los terceros (COLEMAN, 1977).

## GEOQUIMICA

Los metales del grupo del platino se dividen según su posición en el sistema periódico de los elementos en dos subgrupos a saber:

— Metales ligeros del platino: rutenio, rodio, paladio.

— Metales pesados del platino: osmio, iridio, platino (RANKAMA y SAHAMA, 1962).

Las principales propiedades físicas del platino son: No. atómico: 78, peso atómico: 195,2, densidad: 21.45, dureza: 4.3, punto de fusión: 1.769°C, punto de ebullición: 3.800°C, es dúctil y maleable.

El rasgo más notable de su carácter general, está dado por su naturaleza fuertemente siderófila, siendo evidente que la mayor parte de los metales del platino están concentrados en el núcleo de ferroníquel, en el que estos metales están disueltos en el hierro. Sin embargo, se han reportado cantidades considerables de rutenio y osmio en la fase sulfurada de los meteoritos, además de su presencia en varios sulfuros que hacen creer que el paladio en particular, pero también el rutenio, el platino y el osmio son calcófilos. Es evidente que el carácter calcófilo no es tan pronunciado como el siderófilo. La excepción la tiene el paladio, que predomina en los yacimientos de sulfuros sobre los demás metales del platino, pero su abundancia es inferior en otros medios, comparada con los demás metales del grupo. En los casos en que coexisten fases metálicas con fases sulfuradas, los metales del platino por ser siderófilos se incorporan preferentemente a la primera. Cuando hay sustitución de la fase metálica por una fase silicatada, estos metales se concentran en el sulfuro, indicando que su carácter litófilo es muy débil (RANKAMA y SAHAMA, 1962).

La incompetencia de los metales del platino para combinarse con otros elementos, y sus puntos de fusión elevados, hacen que se concentren en las primeras fracciones que se separan durante la cristalización magmática. Por tanto las dunitas, piroxenitas y serpentinas contienen con frecuencia cantidades apreciables de ellos. En rocas ultramáficas comúnmente están asociados con la cromita, con la cual se concentran primordialmente el rutenio y el rodio.

En las rocas que cristalizan durante la etapa principal de la diferenciación, los metales del platino faltan casi por completo. Por lo tanto los gabros están siempre desprovistos de ellos; se desconocen yacimientos primarios de platino en rocas más ácidas que gabros y noritas.

En los procesos de meteorización de los sulfuros platiníferos, estos metales se disuelven, exceptuando el paladio, y se precipitan con facilidad en las zonas de oxidación formando minerales independientes como esperrilita y cooperita. La oxidación y meteorización prolongada separa los metales de platino en estado nativo llegando a formar placeres.

## MINERALOGIA

Los metales del platino ocurren en la naturaleza en dos formas: como aleaciones naturales y como compuestos químicos en los cuales estos metales intervienen como cationes. Las aleaciones son soluciones sólidas y tienen rangos tan amplios en composición como sus factores cristalográficos lo permiten. Los compuestos químicos tienen un amplio rango en composición pero dentro de límites atómicos, controlados por sustituciones de aniones y cationes de radio iónico comparable (MERTIE, 1969).

Las aleaciones naturales de platino encontradas en placeres consisten generalmente en dos tipos y pueden ocurrir sepa-

radas o juntas. Estas aleaciones se han designado genéricamente como "platino" y "osmiridio". El platino incluye invariablemente cantidades de los otros cinco metales del grupo (osmio, iridio, rodio, rutenio y paladio) y el osmiridio consiste principalmente de iridio y osmio con algunos porcentajes de rutenio, rodio y platino.

Numerosas designaciones mineralógicas han sido dadas a aleaciones específicas que en general no son muy aceptadas. En la Tabla 1 se reportan las más conocidas hasta el presente, aunque algunas implican duplicación o nombres impropios (GABRI, 1981).

Existen además, otras combinaciones mineralógicas a las cuales aún no se les ha asignado ningún nombre.

TAR. 1: Minerales de Platino.

MINERAL	COMPOSICION
Arseno Paladinita	$Pd_3(As, Sb, Sn)_3$
Braggita	$(Pt, Pd, Ni)_5S$
Cooperita	$(Pt, Pd, Ni)_5S$
Frodita	$(Pd, Pt)(Bi, Te)_2$
Geversita	$Pt, (Sb, As, Bi)_2$
Hollingsworthita	$(Rh, Ru, Pt, Pd)As_5$
Irasita	$(Ir, Ru, Rh, Pd, Pt)As_5$
Kotulskita	$Pd(Te, Bi)$
Laurita	$(Ru, Ir, Os)_2S_2$
Michenerita	$(Pd, Pt)(Bi, Sb)Te$
Monchelta	$(Pt, Pd)(Te, Bi)_2$
Niggliita	$(Pt, Pd)(Sn, Sb, Bi, Te)$
Paladinita (Paladita)	$PdO$
Esperryllita	$(Pt, Rh)(As, Sb, S)_2$
Estano Paladinita	$(Pd, Pt, Cu)_3Sn_2$
Estano Platinita	$Pt_3Sn_2$
Sibio Paladinita	$Pd_3Sb$
Vysotskita	$(Pd, Ni, Pt)_5S$
Zvyaginzevita	$(Pd, Pt, Au)_3(Pb, Sn)$

Los metales del platino pueden ser tabulados en diferentes órdenes de acuerdo con sus propiedades físicas. En general estos seis elementos son divididos en dos grupos de acuerdo con sus densidades; platino, iridio y osmio son los más densos y el iridio tiene la mayor densidad reconocida en la naturaleza. De acuerdo con el número y peso atómico decreciente y con el incremento en el punto de fusión, punto de ebullición y dureza se han ordenado en platino, iridio, osmio, rutenio, rodio y paladio (Tabla 2)

La susceptibilidad magnética es variable dentro del grupo del platino de acuerdo a los porcentajes de cada uno de ellos dentro de las aleaciones y a los diferentes componentes con los cuales es posible combinarlos. Dicha susceptibilidad y otras propiedades físicas no es posible tabularlas por interpolación lineal con base en proporciones conocidas de cada uno de ellos, ya que existen propiedades impredecibles en los diferentes compuestos o aleaciones que se pueden hacer.

TAB. 2: Propiedades físicas de los metales del grupo del platino.

Nombre	Nº. Atómico	Peso Atómico	Densidad 20°C	Dureza (Esc. Mohs)	Pto. Fus. °C	Pto. Eb. °C	Características
Iridio	77	193.1	22.65	6.5	2.443	4.500	Quebradizo
Osmio	76	190.2	22.61	7.0	3.045	5.020	Quebradizo
Rutenio	4	101.7	12.45	6.5	2.310	4.080	Quebradizo en frío Maleable altas temperaturas
Rodio	45	102.9	12.41	6.0	1.960	3.700	Quebradizo en frío Maleables altas temperaturas
Paladio	46	106.7	12.02	4.8	1.552	2.900	Maleable y dúctil pero menos que el Pt.

### CLASES DE YACIMIENTOS

Los tipos de yacimientos que producen metales del platino y sus depósitos correspondientes son: (BAIEMAN, 1968).

#### CONCENTRACION MAGMÁTICA

##### Magmatismo primario:

- Diseminación con cromita en dunitas cuya erosión produce depósitos de placer. Ej: Urales, Alaska, Colombia.
- Segregación por cristalización fraccionada. Ej: Merensky Reef, Rustenburg, Africa del Sur.

##### Magmatismo secundario:

- Segregación de líquidos inmiscibles. Ej: Vlackfontein (Sud Africa).
- Inyecciones de líquidos inmiscibles. Ej: Sudbury (Canadá).
- Metasomatismo de contacto. Ej: Tweetfontein, Potgietersrust (Sur Africa).
- Hidrotermales. Ej: Sudbury (Canadá); Waterburgo (Sur Africa).
- Depósitos de placer: Ej: Montañas Urales, Colombia, Alaska.

### SITUACION MUNDIAL

#### RESERVAS

Las reservas mundiales de los metales del grupo de platino se basan en reservas base, término más amplio que incluye recursos "in situ" considerados como económicos (reservas), recursos marginalmente económicos (reservas marginales), y recursos subeconómicos (reservas subeconómicas).

La Tabla 3 muestra las reservas mundiales en orden de importancia según Loebenstein, 1983.

AB. 3: Reservas mundiales de platino (Millones de onzas Troy)

RESERVAS					
Países	Pla- tino	Paladio	Rodio	Grupo del Platino	Res. Base del Grupo Platino
<b>Africa:</b>					
República de Suráfrica	385	253	50	790	970
Zimbawe	1	1	1	1	1
<b>Europa:</b>					
U.R.S.S.	60	120	4	190	200
<b>Norte América:</b>					
Estados Unidos	1	1	-	1	16
Canadá	4	4	1	8	9
<b>Sur América:</b>					
Colombia	1	-	-	1	1
<b>Total reservas</b>	<b>450</b>	<b>380</b>	<b>50</b>	<b>1.000</b>	<b>1.200</b>

### PRODUCCION

A continuación se presentan la capacidad de producción estimada para 1985, la producción mundial de platino entre 1973 y 1983, y el promedio anual de precios de distribuidor para el grupo de los metales del platino, entre 1977 y 1981 (tablas 4, 5 y 6).

TAB. 4: Capacidad de producción mundial estimada para 1985 en kilogramos (LOEBENSTEIN, 1983).

Estados Unidos	467
Canadá	18.663
Colombia	1.555
Finlandia	31
U.R.S.S.	111.975
Yugoeslavia	249
Etiopía	31
Sur Africa	136.858
Zimbawe	311
Japón	1.400
Australia	622
<b>Total</b>	<b>272.162</b>

TAB. 5: Producción mundial de platino en kilogramos (según el Servicio Geológico Alemán).

	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Finlandia	23	21	19	19	20	20	51	28	112	274	280
Yugoslavia				156	177	186	184	153	112	108	103
Japón	317	473	603	833	1.009	1.070	1.077	1.286	1.128	1.346	1.822
Filipinas	207	114	44								
Etiopía	7	7	5	5	3	4	3	4	4	4	4
Sur Africa	73.491	88.023	80.869	83.979	89.267	88.956	93.839	96.421	96.732	80.869	80.869
Zimbawe								304	233	139	124
Canadá	11.018	11.963	12.417	12.965	14.475	10.768	6.157	12.776	11.902	7.105	5.195
USA	621	394	589	190	173	257	227	104	228	250	195
Colombia	820	656	688	522	539	434	402	446	460	622	622
Australia	30	35	57	360	420	642	300	392	466	432	432
URSS	76.204	77.759	82.424	94.866	96.421	97.976	99.531	101.036	104.197	108.862	111.975
<b>TOTAL</b>	<b>162.738</b>	<b>179.444</b>	<b>177.715</b>	<b>193.895</b>	<b>202.504</b>	<b>200.315</b>	<b>201.771</b>	<b>213.000</b>	<b>215.574</b>	<b>1200.01</b>	<b>201.619</b>

TAB.6: Promedio anual de precios de distribuidor para el grupo de los metales del platino (LOEBENSTEIN, 1983), en dólares por onza troy.

Año	Platino	Paladio	Rodio	Iridio	Rutenio	Osmio
1977	157	49	409	258	35	130
1978	261	63	524	240	33	130
1979	445	120	770	280	32	130
1980	677	201	729	666	35	130
1981	446	95	498	529	32	130

## EL PLATINO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Los placeres de platino en Colombia, como ya se mencionó, se conocen desde 1778 y fueron por más de cien años trabajados con métodos completamente rudimentarios. A finales del Siglo XIX algunas compañías extranjeras iniciaron, por medio de dragas, intentos de explotaciones a gran escala sobre los aluviones auríferos y platiníferos del río Nechí en el Departamento de Antioquia, pero estas fueron gradualmente adquiridas por la Pato Consolidated Gold Dredging Ltd. El mayor porcentaje del producto metálico adquirido en estas operaciones es oro, hasta el punto de que el producido anual del platino no excede de 15 onzas, cantidad significativa desde el punto de vista de la dispersión muy amplia en la ocurrencia del metal.

Los principales placeres en el país, ocurren en el departamento del Chocó, aunque localidades con manifestaciones menores recuperables a escala muy doméstica, están diseminadas en una provincia geográfica que se extiende sobre la mitad occidental del país desde Panamá hasta el Ecuador (Fig. 1).

Las zonas de explotación tradicional a grande escala y las consideradas con reservas potenciales importantes, están localizadas sobre el piedemonte de la Cordillera Occidental en su flanco occidental, principalmente en los valles de los ríos San Juan y Atrato, los cuales nacen en la parte alta de dicha cordillera y corren hacia el suroeste-oeste y hacia el oeste-norte respectivamente.

Entre las localidades de menor importancia donde se han reportado manifestaciones de platino en Colombia se pueden mencionar (Fig. 1): río Timbiquí, afluente del río Patía, río Baudó, río Micay, río Guapi, río Chaquenodá, río Murri, río Nechi en Antioquia y en algunas playas de la costa del Pacífico.

### DEPOSITOS ALUVIALES DEL DEPARTAMENTO DEL CHOCO

Los depósitos aluviales del Chocó son los principales productores de platino en Suramérica; su explotación se inició desde 1778 y aún continúa. La cuenca del río San Juan con sus tributarios los ríos Condoto, Opogodó, Sipi, Novita, Cajón, Tamáná y Suruco principalmente, ha sido la zona donde las acti-

RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

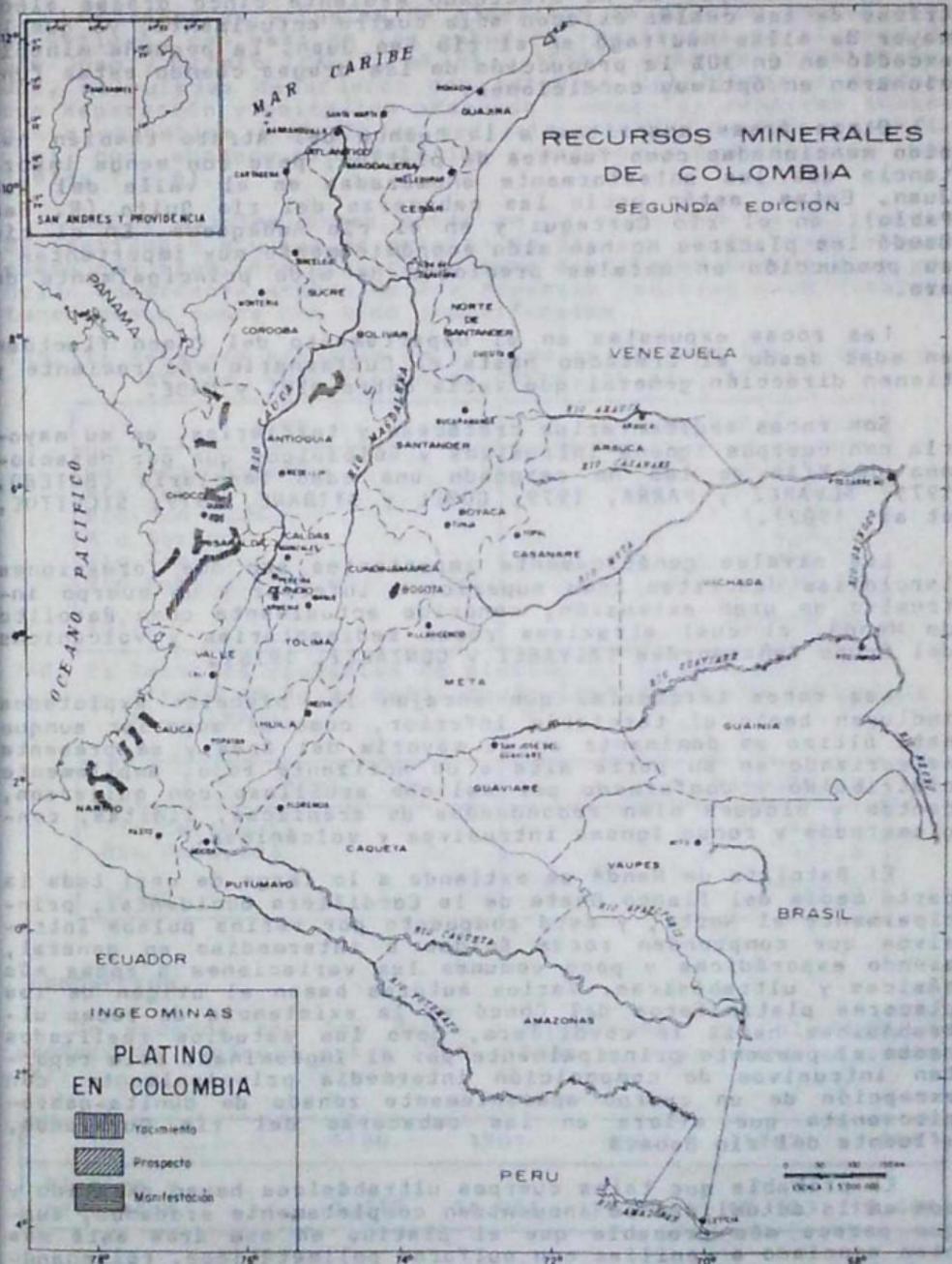


FIG.1: Localización del Platino en Colombia.

vidades de minería en pequeña y gran escala se han desarrollado. Dicha minería se ha efectuado mediante cinco dragas eléctricas de las cuales existen sólo cuatro actualmente, ya que la mayor de ellas naufragó en el río San Juan. La pequeña minería excedió en un 30% la producción de las dragas cuando estas funcionaron en óptimas condiciones.

Otras áreas descritas a la cuenca del Atrato también han sido mencionadas como fuentes de platino, pero con menos importancia que las anteriormente enumeradas en el valle del San Juan. Estas, están hacia las cabeceras del río Quito (R. San Pablo), en el río Cortegui y en el río Andágueda. En el río Baudó los placeres no han sido económicamente muy importantes; su producción en metales preciosos ha sido principalmente de oro.

Las rocas expuestas en el Departamento del Chocó fluctúan en edad desde el Cretáceo hasta el Cuaternario más reciente; tienen dirección general que varía entre N20E y N40E.

Son rocas sedimentarias cretáceas y terciarias, en su mayoría con cuerpos ígneos intrusivos y volcánicos que por dataciones de K/Ar se les ha asignado una edad terciaria (BOTERO, 1975; ALVAREZ y PARRA, 1979; GOBEL y STIBANE, 1979; SILLITOE, et al, 1982).

Los niveles genéticamente importantes son dos formaciones terciarias descritas como superior e inferior y un cuerpo intrusivo de gran extensión, conocido actualmente como Batolito de Mandé, el cual atraviesa rocas sedimentarias y volcánicas del Grupo Cañasgordas (ALVAREZ y GONZALEZ, 1978).

Las rocas terciarias que encajan los placeres explotados incluyen tanto el terciario inferior, como el superior aunque este último es dominante en la mayoría del área y se presenta meteorizado en su parte alta a un horizonte rojo, ampliamente distribuido y conformado por caliche arcilloso con guijarros, cantos y bloques bien redondeados de areniscas, lilitas, conglomerados y rocas ígneas intrusivas y volcánicas.

El Batolito de Mandé se extiende a lo largo de casi toda la parte media del flanco Oeste de la Cordillera Occidental, principalmente al Norte, y está compuesto por varios pulsos intrusivos que comprenden rocas ácidas e intermedias en general, siendo esporádicas y poco comunes las variaciones a rocas más básicas y ultrabásicas. Varios autores basan el origen de los placeres platiníferos del Chocó en la existencia de rocas ultrabásicas hacia la cordillera, pero los estudios realizados hasta el presente principalmente por el Ingeominas, solo reportan intrusivos de composición intermedia principalmente, con excepción de un cuerpo aparentemente zonado de dunita-gabro-piroxenita que aflora en las cabeceras del río Curazamba, afluente del río Bebará.

Es probable que tales cuerpos ultrabásicos hayan existido y que en la actualidad se encuentren completamente erodados, aunque parece más probable que el platino en esa área esté más bien asociado a venillas con sulfuros polimetálicos, relleno de pequeñas fracturas o diseminado en las rocas básicas del Batolito de Mandé. La existencia de pirita en todos los cateos y la naturaleza ferromagnética del platino recuperado en esta área hablan en favor de esta última posibilidad, aunque en las diversas mineralizaciones de sulfuros explotados para oro en el Batolito de Mandé no se ha reportado la existencia de platino.

## RESERVAS

Las reservas actuales de minerales de platino en Colombia se estiman, con base en los estudios realizados en el área de San Juan y Atrato (CALLE, et al., 1984), como reservas probadas, calculadas de acuerdo con estudios detallados y sondeos con separación y ubicación adecuada y como las reservas indicadas o probables, calculadas mediante una exploración superficial, con sondeos exploratorios y sujetos a comprobación (ver Tablas 7 y 8).

Además existen áreas donde se ha reportado la existencia de cantidades mínimas de metales de platino especialmente asociado con aluviones explotados para oro. Estas ocurrencias podrían enmarcarse dentro de las reservas posibles pero desafortunadamente nunca han sido cuantificadas.

TAB. 7: Reservas probadas de platino en la zona San Juan - Atrato. (Modificado de CALLE, et al., 1984).

Area	Kg metal crudo
Condoto-Opoqodó	2.475,31
Río Iró	8,56
Río San Juan	1.333,06
Río Suruco	149,98
Río Tamañá	271,41
Río Cabi	153,23
TOTAL	4.391,55

TAB. 8: Reservas probables de platino en la zona San Juan - Atrato en kg de metal crudo (Modificado de CALLE, et al., 1984).

Area	kilogramos
Río Corteguí	465,2
Río Beberamé	177,0
TOTAL	642,2

## PRODUCCION

De acuerdo con los datos suministrados por el DANE, la producción nacional entre 1980 y 1984 en onzas troy se resume así:

	1980	1981	1982	1983	1984
Platino y asociados	13.345	14.804	11.886	10.303	10.600

## COMERCIO

## IMPORTACIONES

De acuerdo con datos estadísticos suministrados por el DANE, hasta 1983 se habían hecho importaciones relacionadas

con el platino y metales asociados por los valores globales citados a continuación:

- 1980	\$ Col. 510.000
- 1981	29'000.000
- 1982	-----
- 1983	5'134.000

## EXPORTACIONES

Según el DANE, los valores, en pesos colombianos, correspondientes a exportaciones relacionadas con platino, fueron de \$29'065.000 para 1981 y \$70'861.000 para 1983.

## MINERIA

Los controles ambientales impuestos a la industria del cobre a nivel mundial, afectan el rendimiento como subproducto, de los metales del platino.

En Colombia existen problemas principalmente de tipo energético, político y social para la explotación de los aluviones en el Chocó; estos están dados por el escaso nivel de electrificación en la zona y el deficiente mantenimiento de las fuentes de energía eléctrica necesarias para el funcionamiento de las dragas.

La exploración y comprobación de nuevos recursos no se hace desde varios años, por lo cual los recursos probados donde operan las dragas actualmente, cada día son más escasos.

## PERSPECTIVAS

La Tabla 9 muestra el resumen de las proyecciones en la demanda mundial, teniendo en cuenta la producción primaria y la recuperación secundaria al reciclar productos con contenidos de metales del platino (LOBENSTEIN, 1983).

La sustitución de los metales del platino en la industria automotriz, especialmente para el platino y el paladio, no tiene hasta el presente competidores debido a la escasa cantidad y bajo costo de ellos aplicada en la fabricación de convertidores para catalización.

En la industria petrolera el molibdeno y el cromo están siendo sustituidos por metales del grupo del platino; lo mismo que en reacciones de hidrogenación, estos metales están tomando el puesto del níquel y del níquel - molibdeno con sacrificio parcial de la eficiencia.

El oro y la plata han sido sustituidos por platino y paladio principalmente en terminales eléctricos, debido a su bajo precio.

En aplicaciones odontológicas recientemente el paladio ha sido sustituido por el oro y en aleaciones donde se requiere resistencia, tales como puntos de contacto eléctrico, el rutenio ha sustituido al iridio como material que proporciona más dureza a menor costo.

TAB.9: Probable demanda mundial de platino para los años 1990 y 2.000 (Miles de onzas Troy).

Clase demanda	Rango de Pronóstico		Demanda Probable		Rata Crec.	
	1981	Bajo	Alto	1990	2.000	Prom. anual prob. %
Primaria	6.823	7.100	10.800	7.800	8.900	1.4
Secundaria	1.014	1.400	2.400	1.300	1.900	3.3
TOTAL	7.837	8.500	13.200	9.100	10.800	1.7
Acumulativa prim.		133.000	166.000	66.000	150.000	

## BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, E. y PARRA, E., 1979. Evaluación del proyecto de cobre y molibdeno en las cabeceras del río Muerto, Municipio de Acandí, Departamento del Chocó, Inf. 1979. Ingeominas, 203 p. Regional Medellín.
- ALVAREZ, E. y GONZALEZ, H., 1978.- Geología del Cuadrángulo 1-7 (Urrea). Informe 1761. Ingeominas, 347 p. Medellín.
- BATEMAN, A. M., 1968.- Yacimientos minerales de rendimiento económico. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- BOTERO, A.G., 1975.- Edades radiométricas de algunos plutones colombianos. Revista Minería, Vol. XXXVII No. 8336-8342. Medellín.
- BUREAU OF MINES, 1975.- Mineral facts and problems. Bulletin 667. USA.
- CABRI, L.J., 1982.- Platinum-Grup Elements: Mineralogy, Geology, Recovery. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Ottawa, Ontario.
- CALLE, B., URREA, S. y MUÑOZ, V., 1984.- Estudio sobre posible reactivación de mineros del Chocó S.A. Ingeominas - Mineros de Antioquia S.A. Ecominas. Informe inédito.
- COLEMAN, R.G., 1977.- Ophiolites, ancient oceanic lithosphere? Springer-Verlag. Berlín. 229 p.
- DANE, 1983. Colombia estadística.
- FARABER, 1921.- Economic geology of the platinum metals. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 630. Washington.
- GÖBEL, V. y STIBANE, F., 1979.- Edad K/Ar en hornblenda de plutones tonalíticos. Cordillera Occidental, Colombia S.A. Universidad Nacional de Colombia, Pub. Esp. Geol. No. 13. Medellín.
- LOEBENSTEIN, J.R., 1983.- Platinum - Grup Metals. Bureau of Mines. United States Department of the Interior. Mineral Commodity Profiles. Washington.

- MERTIE, B.J., 1969.- **Economic geology of the platinum metals.**  
U.S. Geol. Surv, Prof. Paper 630.
- RANKAMA K. y SAHAMA Th. G., 1962.- **Geoquímica.** Edic. Aguirre  
S.A. España.
- SILLITOE, R. M., JARAMILLO, L. y ESCOVAR, R., 1982.- **Setting  
characteristics and age of the Andean porphyry copper belt  
in Colombia.** Econ. Geol. 77, 1837-1850.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1969.- **Economic geology of  
the platinum metals.** U.S. Geol. Surv, Prof. Paper 630.  
Washington.

RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

Segunda Edición

## MINERALES METALICOS

# MINERALES DE ALUMINIO

HUMBERTO ROSAS G.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	49
Introducción .....	50
Usos .....	50
Ambiente Geológico .....	51
Geoquímica .....	51
Mineralogía .....	52
Tipos de Yacimientos .....	52
Beneficio y Metalurgia .....	53
Obtención de alúmina .....	53
Metalurgia a partir de la Alúmina .....	53
Situación Mundial .....	54
Reservas .....	54
Producción .....	54
El Aluminio en Colombia .....	56
Depósitos de Bauxita .....	56
Explotación .....	58
Reservas .....	59
Producción .....	59
Comercio .....	59
Perspectivas .....	59
Impacto ambiental .....	61
Bibliografía .....	62

## RESUMEN

El aluminio se extrae de la naturaleza a partir del material llamado bauxita, constituido por hidróxidos de aluminio con impurezas. De la bauxita se obtiene la alúmina ( $Al_2O_3$ ) mediante un tratamiento con soda cáustica conocido como proceso Bayer. La alúmina se reduce a aluminio por electrólisis en un baño de criolita (sales de fluor) fundida. Aproximadamente 5 toneladas de bauxita dan 2 de alúmina y 1 de aluminio. El principal productor mundial de aluminio es Estados Unidos seguido por Japón, Unión Soviética y Canadá. En la producción de alúmina sobresalen en su orden Australia, Estados Unidos, y la Unión Soviética. En la producción de bauxita, Australia, Guinea y Jamaica.

Colombia cuenta con una reserva de 400 millones de toneladas de arcilla bauxítica, de la cual pueden obtenerse mediante lavado 100 millones de toneladas de bauxita de alto grado. Estas cifras corresponden a yacimientos existentes en los departamentos de Cauca y Valle. Manifestaciones de bauxitas menos conocidas se presentan en los departamentos de Antioquia, Meta y Santander.

No obstante la presencia de tales recursos, la producción nacional de bauxita carece de significación mundial, pues se limita a unas 30.000 toneladas anuales que se emplean en la elaboración de químicos y refractarios para el consumo interno.

Esta falta de utilización de los recursos aluminicos se debe en parte a consideraciones de tipo técnico, respecto al tratamiento previo a que debe someterse la arcilla bauxítica

para concentrar su alúmina y reducir el contenido de impurezas, principalmente sílice y hierro. Al respecto, la Empresa Colombiana de Minas (ECOMINAS), contrató la realización de análisis de beneficio así como de sus características industriales (ORMET CORPORATION, 1981 y UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN, 1982), de acuerdo con recomendaciones formuladas en un informe de Naciones Unidas (SGIMOND, 1976). En este informe se considera que Colombia presenta circunstancias especialmente favorables para desarrollar la industria del aluminio, tanto en el proceso químico de obtención de alúmina, como en el metalúrgico.

## INTRODUCCION

El aluminio es uno de los llamados metales livianos por su baja densidad, equivalente a una tercera parte de la del hierro. Se puede moldear y soldar con facilidad; es más maleable y dúctil que el cobre y su conductividad eléctrica es dos veces mejor que la de éste. Estas propiedades, además de su abundancia y relativo costo, hacen que el aluminio posea una amplia gama de usos industriales.

El aluminio se encuentra más fuertemente ligado al oxígeno que el cobre, estaño, plomo, zinc, hierro y demás metales que desde hace 6.000 años el hombre aprendió a reducir a su estado metálico mediante el proceso de la fundición. Esta estrecha unión química con el oxígeno dificulta la reducción del metal; por ello, fue solamente con el desarrollo de la ciencia moderna y la tecnología que en los siglos XIX y XX, se descubrieron los métodos para obtención del aluminio libre. El metal fue aislado por primera vez en 1825, y en 1885 vino a producirse comercialmente en Francia mediante reducción química, aunque a un costo demasiado alto para que su uso fuera extendido. A medida que la técnica fue mejorando, su precio cayó de US \$545 la libra en 1852, a US\$ 7.85 en 1886.

Hoy, el aluminio se ha convertido en el metal más ampliamente usado en la industria después del hierro. De allí la importancia de estimular la explotación mineral y la transformación industrial de este importante metal en el país.

## USOS

La bauxita, material natural de donde se extrae el aluminio, se utiliza fundamentalmente para la producción de alúmina ( $Al_2O_3$ ), a partir de la cual se libera por electrólisis el aluminio. Una pequeña parte de la bauxita tiene otros usos: en abrasivos, refractarios, y productos químicos tales como el sulfato de alúmina en el tratamiento de aguas para acueductos.

Más del 90% de la alúmina obtenida de la bauxita se utiliza en la obtención de aluminio. Otros usos menores incluyen la industria química, abrasivos, refractarios y la producción de zafiros artificiales.

El aluminio como metal tiene aplicación prácticamente en todos los sectores de la economía. Tanto en cantidad como en valor supera los demás metales con excepción del hierro. Su mercado abarca áreas como transporte, construcción, electricidad, empaques, bienes de consumo durable y maquinaria y equipo.

## AMBIENTE GEOLOGICO

El aluminio es constituyente principal de muchos tipos de rocas. En la naturaleza siempre aparece combinado con otros elementos formando principalmente silicatos. Menos abundantes que éstos son los hidróxidos aluminicos, constituyentes esenciales de la bauxita. Tales hidróxidos son: Gipsita  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  denominado tipo Trihidrato, Boehmita  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  denominado tipo Monohidrato alfa y Diáporo  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  denominado tipo Monohidrato beta, los cuales aparecen mezclados en proporciones muy variables. Por ejemplo, la bauxita de la región mediterránea de Europa está predominantemente formada por boehmita, mientras que en las bauxitas del Norte y Sur América predomina la gipsita. El corindón,  $Al_2O_3$ , no se incluye como bauxita aunque pueden existir gradaciones de bauxita o corindón.

La bauxita se forma por meteorización química de rocas aluminicas, y pertenece por tanto al grupo de las lateritas. Las condiciones que favorecen la formación de bauxita son: 1) clima tropical, 2) lluvias abundantes, 3) buena permeabilidad de la roca origen, 4) buen drenaje superficial, 5) largos períodos de estabilidad tectónica que permitan la meteorización y preservación del suelo resultante.

Los factores anteriores determinan que los silicatos aluminicos de la roca original se alteren a silicatos hidratados los cuales, por acción combinada del agua superficial y las bacterias, liberan la sílice y ésta migra en solución produciéndose una concentración de hidróxidos aluminicos.

## GEOQUIMICA

El aluminio ocupa el tercer lugar en abundancia, después del oxígeno y el silicio, dentro de la corteza terrestre de la cual, constituye el 8.1% en peso.

Los minerales aluminicos más abundantes se encuentran en forma de silicatos como constituyentes esenciales de las rocas ígneas. De estos los más abundantes son los feldespatos que conforman el 59.5% del promedio de las rocas ígneas. En rocas sedimentarias, el contenido del elemento aluminio Al es de 8% en shales, 2.5% en areniscas, y 0.42% en carbonatos. En las rocas metamórficas de origen sedimentario como ígneo, el proceso metamórfico no introduce mayores cambios en el contenido general de aluminio, a menos que la roca haya sido invadida por soluciones durante el metamorfismo. Por lo tanto, el contenido de alúmina en una roca metamórfica es similar al de la roca ígnea o sedimentaria de donde procede.

Durante la meteorización, bajo condiciones de alta temperatura y buen drenaje, los más importantes minerales aluminicos tales como feldespatos y feldespatoides dan lugar a los minerales arcillosos illita, con 13.5% de Al, y caolinita con casi 21% de Al. Bajo condiciones de drenaje deficientes se forma montmorillonita (con un 11% de Al) en vez de illita y caolinita.

El contenido global de alúmina en los minerales originales, se mantiene en los minerales arcillosos recién formados y solamente una pequeña cantidad migra en solución. Bajo condiciones de extrema meteorización, la sílice y los alcalis se lixivian, dando lugar a la formación de bauxita. En ésta el aluminio puede presentarse en forma de gipsita (34.6% de Al),

boehmita (45% de Al), o diásporo (45% de Al), junto con hidróxidos aluminicos coloidales.

## MINERALOGIA

Los recursos potenciales de aluminio, diferentes a bauxita comprenden diversas rocas y minerales tales como alunita, shales aluminicos, arcillas aluminicas, nefelina sienita y anortosita.

La alunita  $KAl(SO_4)_2(OH)_6$  es un mineral blanco que contiene 37% de alúmina y se forma por descomposición de rocas volcánicas traquíticas. Actualmente constituye una fuente de aluminio en la Unión Soviética.

Shales aluminicos con un contenido de 20 a 24% de  $Al_2O_3$  han sido investigados en los Estados Unidos. Una planta piloto para pruebas industriales de estos shales fue construida en Ohio, pero los ensayos para producción industrial no han sido satisfactorios.

Arcillas altamente aluminicas, consistentes principalmente de caolín, con un contenido de 25 a 35% de  $Al_2O_3$  son consideradas como fuente alterna de aluminio; durante la Segunda Guerra Mundial este tipo de arcillas fue usado como fuente de aluminio en Alemania y Japón y con este fin se están investigando en Polonia, Unión Soviética, Suráfrica y Estados Unidos, país donde se consideran como el recurso potencial de aluminio más importante después de la bauxita.

La sienita nefelínica es una roca ígnea rica en sodio, de grano medio, compuesta principalmente de nefelina, feldespatos alcalinos y minerales ferromagnesianos. De este tipo de roca se obtiene alúmina en la Unión Soviética. La anortosita es una roca ígnea de grano medio a grueso, compuesta principalmente de plagioclasa, y contiene 23 a 28% de alúmina. Es posible que en el futuro se utilice esta roca para obtener alúmina en Estados Unidos.

## TIPOS DE YACIMIENTOS

Los depósitos de bauxita, al ser formados por concentración residual, están asociados con superficies de erosión. De acuerdo con las formas de estas superficies los depósitos pueden presentarse en forma de capas, estratificadas o no, como también en bolsadas ocupando depresiones cavernosas de solución sobre topografía cárstica o sobre superficies arcillosas irregulares. En algunos casos, la bauxita es erosionada por las aguas y acumulada en otro lugar formando un nuevo depósito transportado.

Comúnmente la bauxita aparece asociada con arcilla la cual representa una etapa intermedia en el proceso de bauxitización. En este caso, se presenta una gradación de la bauxita a través de la arcilla hasta la roca original.

El elevado contenido de sílice que frecuentemente se presenta en las partes superiores de muchas capas de bauxita se debe posiblemente a deposición capilar y por evaporación de las soluciones que desplazan la sílice y en cierta medida a resiliificación (BATEMAN, 1978).

Con excepción de los depósitos del sur de Europa donde se emplea comúnmente la minería subterránea, la mayoría de los

depósitos comerciales de bauxita en el mundo son superficiales o se encuentran bajo una cubierta suficientemente delgada para permitir su explotación a cielo abierto.

## BENEFICIO Y METALURGIA

Normalmente la bauxita se lava para remover los minerales arcillosos y con ellos gran parte de la sílice. En algunas bauxitas ferruginosas el contenido de hierro se logra reducir mediante tamizado o separación de minerales pesados. La bauxita generalmente se muele a un tamaño aproximado de 5 cm y luego se seca, con lo cual se logra bajar su humedad de 25 a 5%, especialmente cuando debe transportarse a grandes distancias. Algunas bauxitas requieren cierto contenido de humedad para evitar su pulverización durante el transporte. Técnicas de separación magnética para eliminar el hierro se practican a muy limitada escala en bauxitas destinadas a usos metalúrgicos.

### OBTENCION DE ALUMINA

Aunque la investigación sobre extracción de alúmina a partir de diversos tipos de minerales ha continuado por muchos años, prácticamente toda la que se produce comercialmente se obtiene por el método patentado por Karl Bayer en 1888. En el proceso Bayer la bauxita se hace reaccionar con soda cáustica a elevada temperatura y presión, para lograr una solución bódica aluminica, de la cual se separa por precipitación el trihidróxido aluminico  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  o alúmina hidratada. En la etapa de precipitación se regenera la soda cáustica y ésta, junto con la alúmina no precipitada, se recicla en los digestores. El trihidróxido de aluminio lavado y filtrado se calcina para obtener la alúmina  $Al_2O_3$  que se emplea para fines metalúrgicos. Una porción de la alúmina puede dejarse en la forma hidratada para usos químicos. Aproximadamente 4 toneladas de bauxita se requieren para producir dos toneladas de alúmina, de las cuales se obtiene, por electrólisis una tonelada de aluminio. En la Tabla 1 se indica la clasificación de la bauxita, por grados.

TAB.1: Clasificación de la bauxita por grados.

GRADO	$Al_2O_3$ %	$SiO_2$ %	$Fe_2O_3$ %	$TiO_2$ %
SECA:				
Metalúrgico	40 - 60	1 - 15	3 - 25	1.5 - 3.5
Químico	Mínimo 56	Máximo 5-12	Máximo 3	Máximo 3.5
CALCINADA:				
Refractarios	85 - 90	5 - 8	Máximo 2.5	Máximo 4
Abrasivos	85 - 88	Máximo 7	3 - 8	Mínimo 3

Fuente: Kurtz, H.F. et al., 1980.

### METALURGIA A PARTIR DE LA ALUMINA

El aluminio se produce por electrólisis de la alúmina en un baño de criolita fundida. La criolita es un mineral natural o sintético que contiene sodio aluminio y fluor. La alúmina empleada debe tener una pureza mayor de 99.5% de  $Al_2O_3$  en base seca. La celda de reducción electrolítica consiste en una caja de carbón que contiene una base de aluminio fundido que sirve de cátodo, un ánodo de carbón y un electrolito de criolita

fundida con la alúmina disuelta. La alúmina se reduce a aluminio en el cátodo y el carbón se oxida a dióxido de carbono en el ánodo. Las celdas trabajan con corriente continua. Antes de efectuar la rectificación de la corriente, se requieren unos 6 a 7 kilovatios hora de corriente alterna por cada libra de aluminio producida. El requerimiento total de energía de la planta es aproximadamente de 9 kilovatios hora por libra de aluminio producida.

## SITUACION MUNDIAL

### RESERVAS

En 1979, las reservas mundiales de bauxita, fueron estimadas en 22.670 millones de toneladas (KURTZ et al, 1980). En la Tabla 2 se indican las reservas por áreas geográficas. La tabla no incluye los recursos subeconómicos hipotéticos o especulativos, con los cuales el total ascendería al orden de 40 a 50 mil millones de toneladas.

En 1945 las reservas estimadas fueron de unos mil millones en 1965 de 6 mil millones, y en 1979 de 23 mil millones. Este aumento de las reservas ha venido paralelo con el rápido crecimiento de la producción mundial de bauxita lo cual ha llevado el descubrimiento de nuevos yacimientos.

### PRODUCCION

En 1983, Estados Unidos fue el mayor productor mundial de aluminio, seguido de la Unión Soviética, Canadá, Alemania Federal, Noruega y Australia en su orden. Las cifras de producción mundial de bauxita, alúmina y aluminio se indican en las tablas 3, 4 y 5 respectivamente. Últimamente la producción ha continuado aumentando pero a un ritmo más bajo del que se esperaba.

Se creía que el rápido crecimiento de la demanda que experimentó el aluminio en las décadas del 60 y del 70, y su consiguiente aumento de precio, continuaría a través de los 80. Sin embargo por las condiciones de demanda anotadas anteriormente, no fue así. Durante el año de 1985 el precio de la alúmina en el mercado libre tuvo un fuerte descenso del orden

TAB.2:Reservas mundiales de bauxita (millones/ton).

<b>NORTE AMERICA</b>	
Estados Unidos	40
Jamaica	2.000
Otros	210
<b>Total</b>	<b>2.250</b>
<b>SUR AMERICA</b>	
Brasil	2.500
Guyana	700
Suriname	490
Otros	300
<b>Total</b>	<b>3.990</b>
<b>EUROPA</b>	
Grecia	700
Hungría	300
URSS	300
Yugoslavia	400
Otros	90
<b>Total</b>	<b>1.790</b>
<b>AFRICA</b>	
Camerún	1.000
Ghana	570
Guinea	6.500
Sierraleona	130
Otros	5
<b>Total</b>	<b>8.205</b>
<b>ASIA</b>	
China (Continental)	150
India	1.000
Otros	65
<b>Total</b>	<b>1.915</b>
<b>OCEANIA</b>	
Australia	4.500
Otros	20
<b>Total</b>	<b>4.520</b>
<b>Total Mundial</b>	<b>22.670</b>

Fuente: Kurtz H., et al. 1980.

del 45% al caer de US\$ 120-135/ton. a alrededor de US\$ 70/ton. Al mismo tiempo, el precio del aluminio primario bajó en un 31% de £945/ton a alrededor de £655/ton.

Quizás el problema más difícil que hoy afrontan los productores de aluminio es el hecho de que el mercado haya madurado a tal punto que, es difícil en este momento prever un crecimiento en su consumo como el experimentado en años pasados (MINING JOURNAL, 1985). Es poco probable que otra nueva aplicación del aluminio tan exitosa y valiosa como la última ocurrida con los envases para bebida, pueda producirse en un futuro muy próximo. De todos modos, las circunstancias del mercado irán imponiendo los correspondientes ajustes a los productores. Por el momento, el panorama económico mundial del aluminio no se vislumbra muy despejado para el inmediato futuro.

TAB.3: Producción mundial de bauxita (miles de toneladas).

	1983	1984	1985
<b>Europa:</b>			
Francia	1.595	1.530	1.470
Grecia	2.455	2.386	2.360
Yugoslavia	3.500	3.347	3.480
Otros	23	10	10
Total	7.573	7.273	7.320
<b>Africa:</b>			
Guinea	12.986	14.738	14.740
Otros	879	1.087	1.090
Total	13.865	15.825	15.830
<b>Asia:</b>			
India	1929	2036	1.700
Otros	1.586	1.812	1.770
Total	3.515	3.848	3.470
<b>América:</b>			
Estados Unidos	679	856	720
Brazil	5.239	6.433	6.430
Guyana	1.087	2.485	2.130
Jamaica	7.682	8.735	6.140
Surinam	2.793	3.375	3.330
Total	17.480	21.884	18.790
<b>Australia:</b>	24.372	3.182	32.180
Total mundial	66.805	81.012	77.590

Se excluyen los datos del bloque Soviético y China.

Fuente: Mining Annual Review, 1986.

TAB. 4. Producción mundial de alúmina (miles de toneladas).

	1983	1984	1985
Europa	4.351	5.235	4.868
Africa	564	550	563
Norteamérica	5.073	5.750	4.560
Latinoamérica	4.170	4.604	4.556
Asia Sur	532	644	684
Asia Oriental	1.347	1.472	1.316
Australasia	7.305	8.800	8.804
Total	23.342	27.055	25.351

Se excluyen los datos de Yugoslavia, el bloque Soviético y China.

Fuente: Mining Annual Review, 1986.

TAB.5: Producción mundial de aluminio (miles de toneladas)

	1983	1984	1985
<b>Europa:</b>			
Reino Unido	253	288	276
Francia	361	342	293
Alemania Fed.	743	777	746
Italia	196	230	224
Holanda	236	244	244
Noruega	715	761	724
España	358	381	370
Yugoslavia	258	268	271
Otros	465	476	451
<b>Total</b>	<b>3.585</b>	<b>3.767</b>	<b>3.599</b>
<b>Africa:</b>	424	413	473
<b>Norte América:</b>			
Estados Unidos	3.353	4.099	3.500
Canadá	1.091	1.223	1.281
<b>Total</b>	<b>4.444</b>	<b>5.322</b>	<b>4.781</b>
<b>Latinoamérica:</b>			
Brasil	401	455	518
Venezuela	335	387	396
Argentina	133	134	140
Otros	69	67	65
<b>Total</b>	<b>938</b>	<b>1.043</b>	<b>1.119</b>
<b>Asia:</b>			
Japón	256	287	227
India	205	268	267
Bahrain	172	177	175
Dubai	151	155	158
Indonesia	115	207	217
Otros	82	97	112
<b>Total</b>	<b>981</b>	<b>1.191</b>	<b>1.156</b>
<b>Australasia:</b>			
Australia:	475	755	848
Nueva Zelandia	220	243	243
<b>Total</b>	<b>695</b>	<b>998</b>	<b>1.091</b>
<b>Total Mundial</b>	<b>11.067</b>	<b>12.734</b>	<b>12.219</b>

Se excluyen los datos del bloque Soviético y China.  
Fuente: Mining Annual Review, 1986.

## EL ALUMINIO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS DE BAUXITA

Las zonas de manifestación de bauxita más importantes son: La Sierra de La Macarena (Meta), los Llanos de Cuivá (Antioquia, Abrego (Norte de Santander) y el Valle del Alto Cauca (Cauca y Valle del Cauca) (Fig. 1).



FIG. 1: Yacimientos de Bauxita.

Los yacimientos aparecen formados preferencialmente en áreas de topografía moderada, paralelamente con la actual superficie de erosión, lo cual indica que las condiciones topográficas no han experimentado cambios sustanciales desde el comienzo de la bauxitización, y por tanto la bauxita corresponde a una etapa temprana de bauxitización, seguramente de edad reciente (ROSAS, 1973).

En la Tabla 7 aparecen los resultados químicos de bauxita proveniente del Alto Cauca; los valores se refieren a agregados gibásiticos separados del material arcilloso en que se encuentran, mediante lavado y tamizado con agua.

TAB.7: Composición química de la bauxita del Cauca. Valores en porcentaje). Análisis realizado en INGEOMINAS.

Componente	Arcilla Bauxítica	Agregados Gibásiticos
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.70 - 43.87	59.02
SiO <sub>2</sub>	20.07 - 32.34	3.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.16 - 13.03	4.43
TiO <sub>2</sub>	0.74 - 1.11	1.19
CaO	0.03 - 0.08	0.05
MgO	0.24 - 0.71	0.12
MnO	0.04 - 0.10	0.02
Pérdidas por ignición	16.67 - 23.41	32.15

## EXPLORACION

En el país existen pequeñas explotaciones de bauxita en los alrededores de los municipios de Jaundi, San Antonio, Bitaco y La Cumbre (Departamento del Valle). Por lo delgado de la cubierta superficial que yace sobre el horizonte bauxítico, la explotación se efectúa a cielo abierto, en forma rudimentaria, a pico y pala.

La arcilla bauxítica se beneficia mediante un proceso de lavado y tamizado con agua; la arcilla es removida por el agua mientras los agregados gibásiticos quedan retenidos en la malla.

En algunas pruebas de laboratorio se observó que la pérdida de humedad natural en la arcilla bauxítica causó dos efectos opuestos en el proceso de beneficio por el método de lavado y tamizado: un efecto positivo al favorecer el crecimiento de agregados gibásiticos por deshidratación y acreción de óxidos aluminicos coloidales, lo cual permite recuperar agregados más gruesos y un efecto negativo porque promueve la aglutinación de partículas de óxido de hierro en granos de mayor tamaño, impidiendo la separación de agregados gibásiticos menores.

Estos ensayos indicaron que, aunque de la arcilla bauxítica previamente deshidratada pueden recuperarse agregados gibásiticos de mayor tamaño, mayor cantidad puede obtenerse del material que conserva su humedad natural. Cuando esta humedad se pierde, es posible recuperar los agregados mayores de 2 mm, equivalentes a un 15% (en peso) del material en base seca; los agregados menores de 2 mm no pudieron ser separados por

resultar tan gruesos como los granos de óxido de hierro. En cambio, empleando arcilla-bauxítica sin secar, se obtuvieron agregados gibsíticos de 0.5 mm, los cuales representan un 25% en peso, del material total en base seca. Estudios detallados sobre beneficio y características industriales de las bauxitas del Valle fueron realizados por Ormet Corporation (1981), y Université Catholique de Louvain (1982).

## RESERVAS

Los únicos estudios detallados sobre reservas de bauxita en Colombia se refieren a los yacimientos del Alto Cauca. Su potencial se estima en 400 millones de toneladas de bauxita de bajo grado, de las cuales pueden obtenerse 100 millones de toneladas de bauxita lavada de alto grado, compuesta de agregados con las características que se muestran en la Tabla 3 (ROSAS, 1976).

## PRODUCCION

La producción nacional de bauxita proviene de los yacimientos del Valle del Cauca. Mensualmente se producen alrededor de 3.000 toneladas de bauxita lavada que en su gran mayoría se destina a la industria química, principalmente a la producción de sulfato de alúmina. El país no produce alúmina ni aluminio primario, pero transforma aluminio con base en metal importado.

## COMERCIO

En 1985 el país importó bauxita por un valor de US\$806.260 de los cuales US\$ 800.696 estuvieron representados por bauxita con destino a la producción de refractarios.

Las importaciones nacionales de aluminio en sus diferentes formas ascendieron en 1985 a un total de US\$ 63.587.238 FOB. En la Tabla 8 se indica el total de las importaciones durante los últimos tres años. En la Tabla 9 se muestra la distribución de las importaciones en 1985 por países de origen.

El país no exporta bauxita ni alúmina. En cambio realice algunas exportaciones menores de productos de aluminio derivados de la industria de transformación del metal. En la Tabla 10 se indican las exportaciones durante 1985, según los diferentes tipos de productos, y en la Tabla 11 las exportaciones según los países de destino.

## PERSPECTIVAS

La industria del aluminio ofrece algunas perspectivas favorables para el país. En primer término, es un hecho que se cuenta con depósitos plenamente identificados de bauxita en el Valle y el Cauca, que se encuentran en explotación, si bien en pequeña escala. Tales yacimientos representan reservas estimadas de 100 millones de toneladas, suficientes para ensanchar la industria química que actualmente se surte de este material, así como para crear una industria de aluminio en el país. Además, según informe de las Naciones Unidas (SIGMOND, 1976) Colombia ofrece circunstancias especialmente favorables para el establecimiento de la industria del aluminio. Para la obtención de alúmina, el país cuenta con los recursos básicos

TAB. 8. Importaciones colombianas de aluminio, por productos (valores en dólares)

	1983	1984	1985
Aluminio en bruto y desperdicios de aluminio	26'595.856	36'084.606	31'298.405
Barros, perfiles y alambres de aluminio	15'222.455	7'758.221	15'607.811
Planchas, hojas y tiras de aluminio	3'201.133	3'013.772	8'059.172
Polvo y Partículas de aluminio	314.001	107.101	413.243
Tubos, barras y accesorios de aluminio	1'093.518	609.409	617.130
Diversos tipos de recipientes y envases de aluminio	426.285	1'656.445	253.229
Cables, cordajes y análogos de alambre de aluminio	12'052.594	7'713.619	6'111.943
Artículos, partes y piezas de aluminio para uso doméstico	375.213	219.312	270.629
Otras variadas manufacturas de aluminio	1'618.273	910.964	956.567
Totales	60'899.328	58'073.449	63'587.320
=====			
Fuente: INCOMEX. Los valores corresponden a licencias de importación aprobadas, con base en precios FOB.			

TAB. 9. Importaciones colombianas de aluminio, según países de origen, en 1985 (valores en dólares).

Países	
Estados Unidos	8'279.521
Venezuela	36'224.902
Yugoslavia	3'628.474
Japón	1'323.472
Alemania Federal	1'308.717
Brasil	5'469.166
Canadá	3'610.495
Francia	574.605
Ecuador	744.000
Holanda	387.485
	61'550.837
	=====
Otros países	2'036.401
Total importaciones	63'587.238
	=====
Fuente: INCOMEX. Los valores corresponden a licencias de importación aprobadas, con base en precios FOB.	

como son la bauxita, la soda cáustica, y el carbón, y para la obtención del metal posee lo fundamental que es el potencial hidroeléctrico. Según el citado informe la disponibilidad de energía eléctrica, aún en ausencia de los demás recursos ju-

TAB. 10: Exportaciones colombianas de aluminio, según tipos de productos, en 1985. (Dólares).

Desperdicios y desechos de aluminio	85.320
Barras, perfiles y alambres de aluminio	4.687
Planchas, hojas y tiras de aluminio	244.224
Tubos, barras y accesorios de aluminio	53.538
Recipientes y envases de aluminio	3'540.796
Artículos de aluminio para cocina	132.562
Otras varias manufacturas de aluminio	281.427
TOTAL	<u>4'342.554</u>

Fuente: INCOMEX.

tificaría la producción de aluminio con base en materias primas importadas.

De otra parte, recientemente se firmó un convenio entre los gobiernos de Colombia y Jamaica para la exportación de carbón a este país, a cambio de alúmina, de la cual Jamaica es uno de los mayores productores del mundo.

TAB. 11: Exportaciones colombianas de aluminio según países de destino en 1985 (Dólares).

Trinidad, Tobago	1'527.337
Nicaragua	548.867
El Salvador	979.938
Honduras	207.972
Panamá	220.403
Costa Rica	188.728
Ecuador	172.198
Estados Unidos	134.454
Venezuela	196.970
	<u>4'176.912</u>
Otros países	165.642
	=====
Total exportaciones	4'342.554

Fuente: INCOMEX.

## IMPACTO AMBIENTAL

Respecto al impacto que sobre el medio ambiente podría causar la explotación a gran escala de los yacimientos de bauxita en el país, conviene diferenciar, con base en experiencias de las explotaciones existentes, dos tipos de actividades: 1) La extracción del material bauxítico que se encuentra en el yacimiento y 2) El necesario lavado del material para disminuir su contenido de impurezas.

En lo que se refiere a la actividad propiamente minera de extracción del material bauxítico, conviene anotar que los yacimientos ocurren preferencialmente en zonas de topografía moderada muchas de las cuales, pese a la acidez del suelo, están destinadas a la agricultura y la ganadería, lo que implicaría un sacrificio de la actividad agropecuaria en aras de la minería. Esta última se reduciría a remover la capa de suelo que yace sobre el horizonte bauxítico (3.50 m de espesor máximo) con buldozer y extraer el material bauxítico a cielo abierto. En tal caso, habría que considerar la factibilidad de rehabilitar las tierras una vez removido el horizonte bauxítico.

Para tal efecto, la explotación debería contemplar un método que permite extender uniformemente sobre el terreno explotado, la cubierta superficial removida en el descapote.

En cuanto a la actividad de lavado de material, se presenta el problema del enturbiamiento de las corrientes naturales que lógicamente se emplearían para tal fin. Este problema podría obviarse con la construcción de estanques de sedimentación que, por un lado recogerían las aguas turbias procedentes de los lavaderos y por otro permitirían la salida de aguas claras una vez sedimentadas las "colas" formadas por partículas de arcilla y otras impurezas que entran en suspensión.

### BIBLIOGRAFIA

- BATEMAN, A. L., 1978.- Yacimientos minerales de rendimiento económico, Ediciones Omega, 975 p.
- BAUMGARDNER, L.H. y HOUGH, R.A., 1983.- Bauxite and Alumina. Minerals Yearbook, U.S. Bureau of Mines, v. 1:131-141. Washington.
- FORERO, C.H., 1957.- Bauxite en Colombia. Informe 1259. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- KURTZ, H. F. y BAUMGARDNER, L. H., 1980.- Aluminum, Mineral Facts and Problems, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. Bull, 671: 9-33. Washington.
- MCCAWLEY, FX, y STEPHENSON, P.A., 1983.- Aluminum. Minerals Yearbook, v.1, U.S. Bureau of Mines. p. 81-102. Washington.
- MINING JOURNAL, 1985.- Aluminum producers need time. Vol. 305, No.7842, p. 421-422. Londres.
- ORMET CORPORATION, 1981.- Evaluation of Colombia, S. A., bauxitic clays. 49 p. Burnside, Louisiana.
- PAVA-SILVA, F. y VAN DER HAMMEN, T. 1959.- Sobre la geología de la parte sur de La Macarena. Informe 1321. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- ROSAS, G., H. 1973.- Bauxite in the Morales Cajibío area, Cauca, Colombia, I.C.S.O.B.A., Jer. Congreso Internacional p. 237-244. Miza.
- \_\_\_\_\_, 1976.- Estudio sobre los depósitos de bauxita en Cauca, Valle, especialmente en el área de Morales y Cajibío. Bol. Geol. Ingeominas, 22 (1):57-84. Bogotá.
- SIGMOND, G., 1976.- Report of the Technological Advisory Mission concerning technical assistance for the establishment of the aluminium industry using indigenous raw materials and hydroelectric energy in Colombia. United Nations Industrial Development Organization IS/COL/75/012/11-01.
- UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN, 1982.- Estudio del tratamiento de arcillas bauxíticas de Colombia. 25 p.
- WOKITTEL, R., 1955.- Bauxites en los llanos de Cuiva. Informe 1092. Serv. Geol. Nal. Bogotá.

## MINERALES DE ANTIMONIO

PEDRO MARIN R.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	63
Introducción .....	64
Usos .....	64
Ambiente Geológico .....	64
Geoquímica General .....	64
Antimonio en la litosfera .....	66
Mineralogía .....	69
Tipos de Yacimientos .....	69
Situación Mundial .....	72
Reservas y Producción .....	72
Consumo .....	74
El Antimonio en Colombia .....	74
Depósitos .....	74
Comercio .....	75
Perspectivas .....	75
Bibliografía .....	76

## RESUMEN

El antimonio (Sb), fue descubierto como metal en las primeras décadas del Siglo XVII. Se presenta en la naturaleza en estado nativo, pero es más común en la forma de sulfuro; también se presenta como antimoniuro y como óxido. El antimonio puede considerarse como un elemento depositado a partir de soluciones hidrotermales de baja temperatura y poca profundidad (rellenos de fisuras). La edad de los diferentes yacimientos de antimonio varía desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, pero hay un grupo de yacimientos muy característico y muy importante en el Terciario.

Aunque Colombia produce estibina en muy pocas cantidades, el antimonio por su comportamiento químico lo consideramos muy importante en la prospección de muchos tipos de depósitos, ya que se le califica como uno de los mejores elementos guía para la búsqueda de metales básicos y preciosos. El antimonio se presenta en muchos tipos de depósitos, particularmente en los que contienen sulfuros y sulfosales y generalmente se asocia con Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, U, Ba, Pb, Sn, As, P, S, Se, Nb, Te, Mo, Ta, Co, Ni, Fe, W y metales del Pt.

Las principales manifestaciones de antimonio en Colombia se encuentran en la Cordillera Central, en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Quindío, Risaralda y Tolima. En algunos de estos sitios se explota la antimoniita, la cual es concentrada y vendida con destino al exterior. Como en Colombia no existen plantas de refinación de este elemento, el antimonio metálico tiene que ser importado en su totalidad para el consumo nacional.

El antimonio se usa en la fabricación de acumuladores. En forma metálica y de alta pureza (99,999%) se emplea en com-

puesto intermetálico para semiconductores y en otras aplicaciones químicas. También se usa como agente endurecedor para aleaciones empleadas en bombas para compuestos químicos y en revestimientos de tanques.

## INTRODUCCION

El antimonio se conoce desde hace muchos siglos; inclusive en el Antiguo Testamento ya es mencionado como el "stibium", usado en la pintura. Pliny Secundus denominó al elemento "Stibium" y Geber al traducirlo al Latín lo llamó "Antimonium". Basil Valentin preparó el elemento y describió sus compuestos en su tratado "The Triumphal Chariot of Antimony" en el Siglo XV (ROYLE y JONASSON, 1984).

Aunque el antimonio se encuentra en más de 100 minerales, no es muy abundante en la corteza terrestre. Es posible encontrarlo en estado nativo, pero es más común en la forma del sulfuro estibina ( $Sb_2S_3$ ). También se presenta como antimoniuro de varios metales pesados y como óxido. El antimonio se extrae de los sulfuros por oxidación y posteriormente se reduce con sal y limadura de hierro. A partir de óxidos, el antimonio se extrae reduciéndolo con carbono.

El antimonio es un mal conductor del calor y de la electricidad y tiene una dureza entre 3 y 3,5. Su punto de fusión es de  $630,74^{\circ}C$ ; su gravedad específica es de 6,6 (WEAST, 1973).

## USOS

Cuando el antimonio se mezcla con otros metales, aumenta la dureza de estos, su resistencia a la corrosión y por consiguiente estas aleaciones soportan con mayor facilidad cualquier esfuerzo. El antimonio se vende comercialmente como metal, óxido, antimoniuro de plomo y como sulfuro.

El antimonio se usa en la fabricación de acumuladores. En forma metálica y de alta pureza (99,999%) se emplea en compuestos intermetálicos para semiconductores y en otras aplicaciones químicas. El antimonio se utiliza también como agente endurecedor en aleaciones empleadas en bombas para compuestos químicos y en revestimientos de tanques. Los óxidos de antimonio se emplean en pinturas, plásticos y cerámicas. Los sulfuros de antimonio se utilizan en la fabricación de munición y por esta razón es considerado como un mineral estratégico. El antimonio y muchos de sus compuestos son tóxicos; la máxima concentración en el aire tolerada por el hombre es de  $0,3 \text{ mg/m}^3$ . La concentración atmosférica de estibina debe ser menor que  $0,1 \text{ ppm}$  (WEAST, 1973).

## AMBIENTE GEOLOGICO

### GEOQUIMICA GENERAL

En algunas de las reacciones químicas, el antimonio se comporta similarmente al bismuto y arsénico y se presenta en la naturaleza en tres estados de oxidación. El estado metálico o covalente (0) es común en determinados yacimientos. Los estados (III) y (V) son comunes en algunos minerales complejos y en determinadas sales. Debido a los múltiples estados de oxidación del elemento y a la tendencia para formar compuestos solubles y complejos, la geoquímica del antimonio es muy complicada y no está muy bien caracterizada. En la Figura 1 se

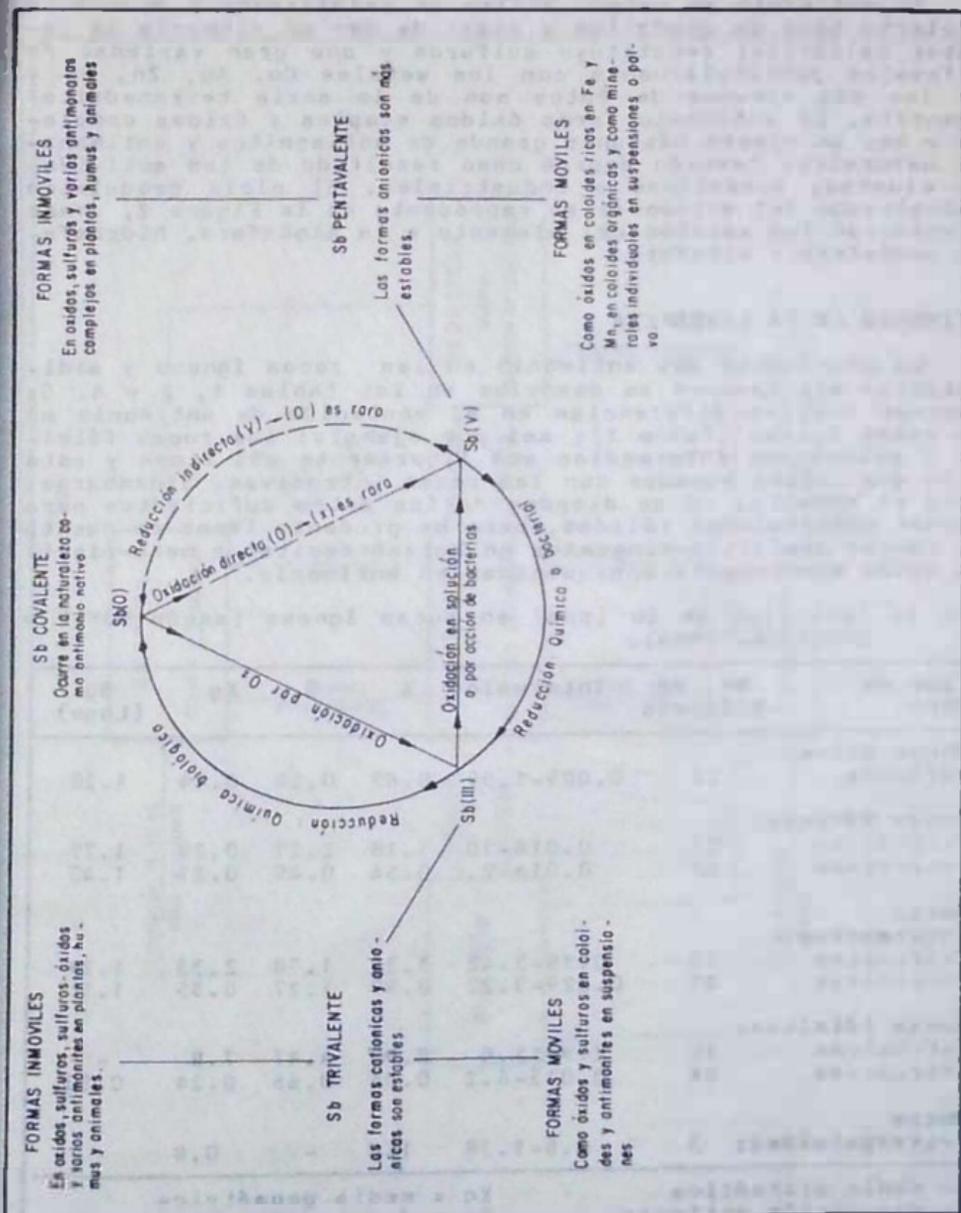


FIG. 1; Ciclo de las interconversiones del Antimonio. Según Boyle y Jonasson (1984).

presenta el ciclo generalizado de las interconversiones del antimonio en la naturaleza. Los elementos más comúnmente asociados al antimonio son el arsénico y el azufre.

El antimonio en estado nativo es relativamente abundante en cierto tipo de depósitos a pesar de ser un elemento de carácter calcófilo; constituye sulfuros y una gran variedad de sulfosales particularmente con los metales Cu, Ag, Zn, Pb y Fe; los más comunes de éstos son de la serie tetrahedrita-tenantita. El antimonio forma óxidos simples y óxidos complejos y hay un número bastante grande de antimonitos y antimonatos naturales; también ocurre como resultado de las actividades mineras, domésticas e industriales. El ciclo geoquímico generalizado del antimonio se representa en la Figura 2, donde se observan los aportes del elemento a la atmósfera, hidrosfera, pedósfera y biósfera.

### ANTIMONIO EN LA LITOSFERA

La abundancia del antimonio en las rocas ígneas y sedimentarias más comunes se describe en las tablas 1, 2 y 4. Se observan ciertas diferencias en el contenido de antimonio en las rocas ígneas (Tabla 1); así por ejemplo: las rocas félsicas y extrusivas intermedias son ligeramente más ricas y esto es lo que parece suceder con las rocas intrusivas. Sin embargo, hasta el momento, no se dispone de los datos suficientes para obtener conclusiones válidas, pero es prudente tener en cuenta que muchos depósitos minerales en meta-andesitas y meta-ríolitas están enormemente enriquecidas en antimonio.

TAB. 1: Contenido de Sb (ppm) en rocas ígneas (según BOYLE y JONASSON, 1984).

Tipo de Roca	No. de Análisis	Intervalo	X	S	Xg	Sg (Loge)
<b>Rocas ultrabásicas:</b>	22	0.005-1.59	0.69	0.54	0.44	1.28
<b>Rocas Máficas:</b>						
Extrusivas	27	0.016-10	1.18	2.21	0.29	1.79
Intrusivas	69	0.014-2.	0.54	0.49	0.27	1.40
<b>Rocas Intermedias:</b>						
Extrusivas	15	0.18-5.42	3.39	1.78	2.33	1.28
Intrusivas	25	0.029-3.22	0.99	1.27	0.35	1.51
<b>Rocas Félsicas:</b>						
Extrusivas	10	2.9-15.0	8.9	4.47	7.8	-
Intrusivas	88	0.015-6.2	0.36	0.66	0.24	0.80
<b>Rocas feldespatoides:</b>	3	0.8-1.39	1.0	-	0.8	-
X = media aritmética			Xg = media geométrica			
S = desviación estándar			Sg = desviación estándar (loge) = logarítmica			

Dentro de las rocas sedimentarias, los shales y argilitos contienen la mayor cantidad de antimonio. Las facies ricas en sulfuros, especialmente las de pirita están comúnmente enri-

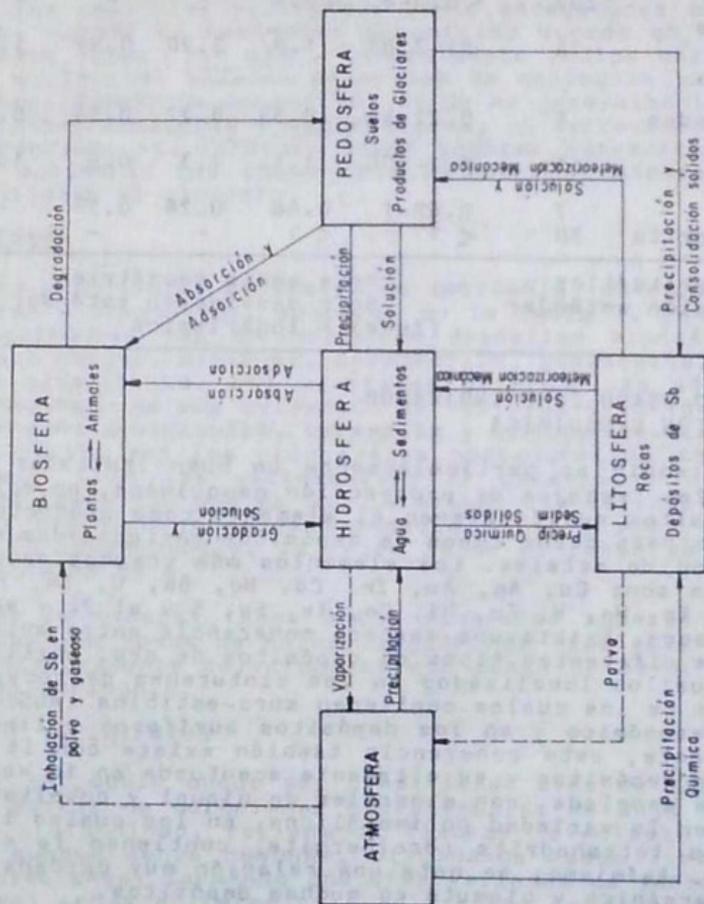


FIG. 2: Ciclo geoquímico generalizado del antimonio. Según Boyle y Jonasson (1984).

quecidas en antimonio. Los sedimentos de ríos, quebradas y lagos varían ampliamente en el contenido del elemento, dependiendo esencialmente de la proximidad a rocas o depósitos con alto contenido del mismo. Valores mayores de 5 ppm de Sb están invariablemente asociados a depósitos ricos en antimonio o a rocas piríticas.

TAB. 2: Contenido de Sb en rocas sedimentarias (ppm).

Tipo de Roca	No. de Análisis	Intervalo	X	S	Xg	Sg (Loge)
-Sedimentos recientes	1200	<0.5-6	<0.5	-	-	-
-Sedimentos oceánicos	14	01-7.03	1.9	2.28	0.99	1.23
-Areniscas, Arcosas, Conglomerados	8	0.22-54	0.59	0.27	0.54	0.48
-Shale y Argilita	52	0.1-300	1.1	1.3	0.6	1.1
-Caliza Dolomita	7	0.09-1	0.46	0.28	0.59	-
-Yeso-Anhidrita	30	< 1	< 1	-	-	-

X = media aritmética  
S = desviación estándar  
Xg = media geométrica  
Sg = desviación estándar (loge) = logarítmica

#### EL ANTIMONIO USADO COMO INDICADOR DE PROSPECCION GEOQUIMICA

El antimonio es particularmente un buen indicador en la mayoría de los trabajos de prospección geoquímica, no solo para los depósitos que contienen el elemento como producto económico, sino para otros tipos de depósitos enriquecidos en una gran cantidad de metales. Los elementos más comunes asociados al antimonio son: Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Ba, U, Sn, Pb, P, As, Bi, Nb, Ta, Mo, W, Fe, Ni, Co, Te, Se, S y el Pt y sus metales asociados. Existe una marcada coherencia entre antimonio y oro en los diferentes tipos de depósitos de oro, particularmente en aquellos localizados en los cinturones de rocas verdes, algunos de los cuales contienen auro-estibina ( $AuSb_2$ ) como mineral económico y en los depósitos auríferos polimetálicos. Igualmente, esta coherencia también existe con la plata en todos sus depósitos y es altamente acentuada en la variedad plata nativa asociada con minerales de níquel y cobalto (Tipo Cobalto) y en la variedad polimetálicos, en los cuales los minerales como tetrahedrita (dreiberghita) contienen la mayoría de la plata. Asimismo, se nota una relación muy cercana entre antimonio, arsénico y bismuto en muchos depósitos.

Determinados tipos de depósitos de uranio, particularmente aquellos enriquecidos en arseniuros de níquel y cobalto (Tipo Jacimov-Great Bear Lake) están altamente enriquecidos en antimonio; igualmente sucede con los depósitos asociados a calderas volcánicas con una paragénesis mineral polimetálica. Algunos depósitos de uranio en areniscas (Tipo Colorado Plateau), también presentan un alto contenido en antimonio alojado principalmente en pirites. Algunas pegmatitas y ciertas zonas albitizadas portadoras de Nb, Ta, Be y Sn pueden estar ligeramente enriquecidas en antimonio principalmente en minerales como tantalita (estibirotantalita) y columbite (estibiocolumbita).

El antimonio puede ser usado como indicador con muy buen resultado en prácticamente todos los métodos de prospección geoquímica. La selección del método a emplearse debe estar sujeta al conocimiento de la movilidad o fijación del elemento en sus depósitos y en sus rocas encajantes, en los gossans y en las zonas oxidadas en los suelos suprayacentes, en las corrientes de agua y sus precipitados, en los sedimentos de ríos y lagos y en la vegetación.

Uno de los rasgos particularmente ventajosos del antimonio como indicador ("pathfinder") en la prospección de depósitos metalíferos es su baja concentración (0.5 ppm) en la mayoría de los ambientes geológicos tanto endógenos como supergénicos. Cuando el contenido encontrado excede en más de dos veces este valor (>2 ppm), generalmente indica una mineralización en la cual algunos minerales de antimonio pueden estar presentes. Además la proporción As/Sb es generalmente uniforme en ambientes endógenos y supergénicos; un decrecimiento en esta proporción, sin embargo, puede indicar concentraciones altas en antimonio que están relacionadas con mineralizaciones que contienen el elemento.

## MINERALOGIA

Los principales minerales de antimonio, esencialmente antimonatos y stimonitos, aparecen en la Tabla 3. Los minerales más importantes del antimonio en depósitos hipogénicos son: antimonio nativo, estibina, tetrahedrita, jamesonita, boulangerita y pirargirita. Los minerales supergénicos más comunes, como resultado de una oxidación de sulfuros y sulfosales hipogénicos son: senarmonita, kermesita y bindheimita. La arsenopirita y pirita son los principales portadores de antimonio en las rocas y en los yacimientos; el primero de ellos puede contener hasta 100 ppm de Sb. La abundancia terrestre de antimonio y arsénico es aproximadamente 0,5 y 3 ppm, respectivamente. En consecuencia, la razón As/Sb en rocas continentales superficiales es 6.

Por lo general todos estos minerales supergénicos están asociados con zonas de meteorización, de diaclasas de fracturas y directamente relacionados con zonas de mayor concentración del antimonio.

## TIPOS DE YACIMIENTOS

El antimonio puede ser clasificado como un elemento formado a partir de soluciones hidrotermales de baja temperatura y poca profundidad, rellenando fisuras, diaclasas y en otros casos, aunque menos comunes, originando masas irregulares de reemplazamiento, formando una gran variedad de yacimientos tales como: venas epitermales, yacimientos de reemplazamiento y yacimientos asociados a fuentes termales y a pegmatitas (Fig.3).

Según Buchanan (1981) y Hodges et al (1984) la precipitación de los depósitos epigenéticos presenta una zonificación promedio, empezando muy cerca de la superficie por los metales preciosos, los cuales pueden presentarse hasta los 350 m de profundidad, muy cerca al nivel de ebullición para pasar luego a la zona de los metales básicos. Sin embargo, hay excepciones a este modelo, tal como es el caso en la Vega, Cauca, donde algunas mineralizaciones se inician con oro para luego pasar a estibina, nuevamente a oro y luego a metales básicos.

TAB. 3: Minerales de Antimonio (Según BOYLE y JONASSON, 1984)

**Compuestos intermetálicos:**

Estibarsen	SbAs	Alemontita	SbAs+As o Sb
		Paradocrasita	Sb <sub>2</sub> (Sb,As) <sub>2</sub>

**Sulfuros, Antimoniuros, Arseniuros y Teluros:**

Estibina	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Sudburita	(Pd,Ni) Sb
Cuproestibita	Cu <sub>2</sub> (Sb,Tl)	Auroestibita	AuSb <sub>2</sub>
Horsfordita	Cu <sub>5</sub> Sb	Estistita	SnSb

**Sulfosales:**

Eakinerita	Cu <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	Estefanita	Ag <sub>5</sub> SbS <sub>3</sub>
Famatinita	Cu <sub>3</sub> SbS <sub>4</sub>	Boulangerita	Pb <sub>5</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub>
Tetrahedrita	(Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	Bournonita	PbCuSbS <sub>3</sub>
Miargirita	Ag Sb S <sub>2</sub>	Jamesonita	Pb <sub>4</sub> FeSb <sub>6</sub> S <sub>14</sub>
Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	Samsonita	Ag <sub>4</sub> MnSb <sub>2</sub> S <sub>6</sub>

**Oxidos, hidróxidos, oxihaluros:**

Senarmontita	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nadorita	PbSbO <sub>2</sub> Cl
Valentinita	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Estibiconita	Sb, Sb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH)
Cervantita	Sb, SbO <sub>4</sub>	Bindheimita	Pb <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (O,OH)
Kermesita	Sb <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O	Estibiocolumbita	SbNbO <sub>4</sub>
Estibivanita	Sb <sub>2</sub> V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Estibiotantalita	SbTaO <sub>4</sub>

Los yacimientos de antimonio varían en edad desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, pero hay un grupo de yacimientos muy característicos e importantes en el Terciario. Asimismo, el antimonio se encuentra altamente difundido en trazas, subordinado o como elemento principal en muchos depósitos de minerales; tiende a ser concentrado en los depósitos ricos en sulfuros ya sea en forma independiente o como constituyente menor de un gran número de sulfuros, arseniuros y sulfosales. Los minerales de antimonio más comunes en los yacimientos hipogénicos (endógenos) son: antimonio nativo, estibina y una gran variedad de sulfosales, entre las que sobresalen tetrahedrita, jamesonita, boulangerita, bournonita, polibarrita y pirargirita. El antimoniuro de oro, auro-estibina, AuSb<sub>2</sub>, es común en ciertos depósitos auríferos (Fig. 3) particularmente en los enriquecidos en antimonio. Los minerales supergénicos del antimonio más comunes son: kermesita, senarmontita, estibiconita, nadorita y bindheimita. En algunos depósitos la pirargirita puede ser de origen secundario.

La gran mayoría del antimonio comercial se obtiene como subproducto de la fundición y reducción de plomo, cobre, plata y oro. Algunas vetas de estibina y sus accesorios supergénicos son esencialmente trabajadas para antimonio. Los siguientes son los yacimientos en los cuales se presenta el antimonio:

1. Depósitos de cobre en shales, argilitas y esquistos (Tipo Kupferachiefer-White Pine -Zambia).
2. Depósitos de Cobre (uranio, vanadio, plata y plomo) en areniscas tipo capas rojas.
3. Depósitos de Plomo-Zinc en rocas calcáreas (Tipo Valle del "Mississippi" y "Pine Point").

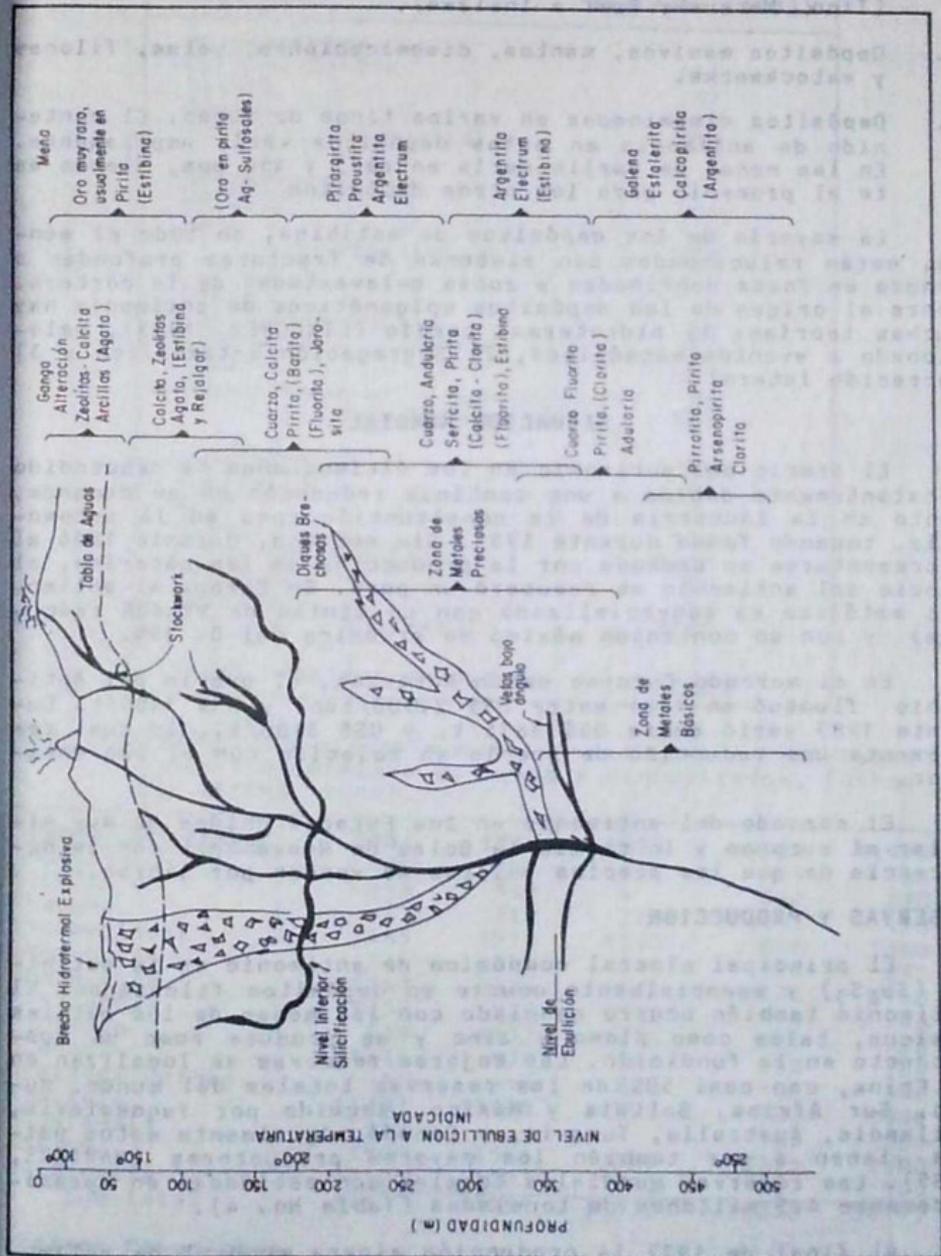


FIG. 3: Modelo del promedio de los depósitos epigenéticos. Se según Buchanan (1981) y Hodges, Zambrano et al. (1984).

4. Depósito Tipo Skarn.
5. Segregaciones y disseminaciones de sulfuros y minerales del Grupo del Platino en rocas máficas y ultramáficas (Tipo Merensky Reef e Insizwa).
6. Depósitos masivos, mantos, disseminaciones, vetas, filones y stockworks.
7. Depósitos disseminados en varios tipos de rocas. El contenido de antimonio en estos depósitos varía ampliamente. En las menas de Carlin varía entre 5 y 450 ppm, siendo este el promedio para los otros depósitos.

La mayoría de los depósitos de estibina, en todo el mundo, están relacionados con sistemas de fracturas profundas y menudo en fosas confinadas a zonas sollevadas de la corteza. Sobre el origen de los depósitos epigenéticos de antimonio hay muchas teorías: 1) hidrotermal tardío (LINDGRÉN, 1933), relacionado a eventos magnéticos, 2) Segregación metamórfica y 3) Secreción lateral.

#### SITUACION MUNDIAL

El precio del antimonio en los últimos años ha descendido constantemente debido a una continua reducción en su demanda, tanto en la industria de la construcción como en la automotriz, tocando fondo durante 1983. Sin embargo, durante 1984 al incrementarse su demanda por la producción de las baterías, el precio del antimonio se recuperó un poco. En Europa el antimonio metálico es comercializado con un mínimo de 99-60% (Regulus) y con un contenido máximo de arsénico del 0- 15%.

En el mercado Europeo según Rotterdam, el precio del Antimonio fluctuó en 1984 entre US\$ 2.500/ton. y US\$ 3400/t. Durante 1985 varió entre US\$ 2675/t. y US\$ 3100/t., lo cual representa una reducción de precio en relación con el año anterior.

El mercado del antimonio en los Estados Unidos es muy similar al europeo y lo regula la Bolsa de Nueva York con la diferencia de que los precios y lotes se venden por libras.

#### RESERVAS Y PRODUCCION

El principal mineral económico de antimonio es la estibina ( $Sb_2S_3$ ) y esencialmente ocurre en depósitos filonianos. El antimonio también ocurre asociado con las menas de los metales básicos, tales como plomo y zinc y se produce como un subproducto en la fundición. Las mejores reservas se localizan en la China, con casi 50% de las reservas totales del mundo, Rusia, Sur Africa, Bolivia y México, seguido por Yugoslavia, Tailandia, Australia, Turquía, y Canadá. Igualmente estos países vienen a ser también los mayores productores (MARTERS, 1985). Las reservas mundiales totales son estimadas en aproximadamente 4.5 millones de toneladas (Tabla No. 4).

Al final de 1977 la producción minera mundial de antimonio metálico totalizó 70.126 toneladas para descender a 47.793 a finales de 1983. La tendencia al ascenso en la producción se mantendría ligeramente en 1984; sin embargo, durante 1985 se presentó una ligera disminución (Tab. 5). El descenso en la producción se originó esencialmente en Bolivia, (quien es el primer productor de antimonio en el mundo), al cerrar durante

TAB. 4: Reserva mundial de Antimonio en miles de toneladas de contenido de Antimonio.

Regiones	Reservas (1993)
<b>Norteamérica</b>	
Estados Unidos	125
Canadá	67
México	235
Sub-total	427
<b>Suramérica</b>	
Bolivia	400
Perú	68
Sub-total	468
<b>Europa</b>	
Checoslovaquia	50
Italia	125
Rusia	285
Yugoeslavia	95
Sub-total	555
<b>Suráfrica</b>	
Australia	140
<b>Asia</b>	
Malasia	142
China Continental	2250
Tailandia	95
Turquía	130
Sub-total	2617
<b>Total reservas mundiales</b>	<b>4547</b>

TAB. 5: Producción minera mundial de antimonio. Toneladas de contenido metálico en menas y concentrados. (Datos según MATERS, 1986).

Mundo Occidental	1981	1982	1983	1984	*1985
Austria	601	667	720	508	360
Italia	696	339	-	317	270
España	663	710	710	453	350
Yugoeslavia	1455	1517	1150	898	1360
Marruecos	504	845	844	725	635
Suráfrica	9747	9134	9136	8776	8160
Tailandia	1750	970	972	816	900
Turquía	838	1237	1236	907	900
Canadá	1670	970	968	980	360
Estados Unidos	586	456	879	505	540
Bolivia	15301	13978	12000	9702	9000
Guatemala	500	-	-	363	360
Méjico	1800	1565	1565	2995	2000
Australia	1126	1203	1202	907	900
Sub-total	37237	33591	31373	28052	26195
<b>Países Comunistas</b>					
China	10000	9000	9000	12694	12700
Rusia	6500	6500	6500	10880	10800
Checoslovaquia	900	950	920	1224	1200
Sub-total	17400	16450	16420	24798	24700
Total Mundial	54637	50041	47793	52850	50895
* Estimadas					

1982 y 1983 la mina Caracota y Vinto. No obstante la Empresa Mineral Bernal Hermanos con su planta de fundición ha anunciado un proyecto de expansión a gran escala y en consecuencia, la producción para 1986 se podría incrementar en un 5%.

## CONSUMO

El antimonio permanece muy unido a las industrias automotriz y de la construcción. Sin embargo, en los últimos años el uso del antimonio ha descendido muchísimo en la fabricación de baterías, en el endurecimiento del plomo y como agente vulcanizante. Igualmente sucede en la industria de la construcción. Al recuperarse la industria automotriz y de la construcción el mundo occidental durante 1982 y 1983, la demanda del antimonio se incrementó. Por ejemplo, en Los Estados Unidos, el consumo de antimonio primario se incrementó de 8.540/t en 1982 a 8.699/t en 1983 aumentando en 1.8%, cifra que puede ser un poco mayor en Europa y que muy seguramente se mantendrá hasta 1986.

## ANTIMONIO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Los yacimientos y ocurrencias de antimonio más importantes conocidos en la bibliografía minera nacional, corresponden a manifestaciones de estibina asociada a arsenopirita en estrecha relación con minerales auro-argentíferos. Cuando esto es el caso, la estibina no es beneficiada, e inclusive este mineral es considerado poco atractivo para cualquier mineralización por los problemas que conlleva en la extracción de oro. Asimismo, en algunas manifestaciones de antimonio han sido descritos varios sulfoantimoniuros de plomo, cobre y plata.

Las principales manifestaciones de antimonio se encuentran en la Cordillera Central en los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Tolima, Cauca y Nariño. En la Cordillera Oriental se conocen algunas concentraciones de sulfoantimoniuros de plomo en los municipios de Rendón, Zetaquirá Soatá (Boyacá). La descripción de los lugares en donde el antimonio ha sido detectado, se encuentra en el informe especial de WOKITIEL (1960).

### MANIFESTACIONES

A continuación se describen las localidades (Fig. 3) con mayores posibilidades para que cualquier compuesto de antimonio sea recuperado económicamente:

**Distrito Manizales - Villa María - Neira.** - En esta zona se encuentran localizadas varias minas; entre ellas merecen destacarse La Gloria y La Cristalina, las cuales fueron explotadas hasta 1902 y 1941, respectivamente.

**Zona Calaró - Salento.** - En esta región se encuentra la mina La Sierra, la cual fue abandonada en 1970 por bajo rendimiento, y el prospecto Barcelona; el estudio de este último fue suspendido en 1971 por su poca importancia económica.

**Zona Rioabucio - Quinchía - Quítica.** - En esta área se encuentran varias manifestaciones de antimonio y algunas de ellas han sido explotadas intermitentemente como es el caso de la mina de Jesús Gómez, la mina Vendecabezas y La Palma.

estas dos últimas se benefició tanto el oro como el antimonio, pero fueron abandonadas por su bajo rendimiento económico.

*Zona Ibaqué - Cajamarca.* - En esta región se presentan 6 manifestaciones de antimonio; una en Ibaqué y las cinco restantes en el municipio de Cajamarca. La más promisoría de todas ellas es el prospecto Cocora, ubicado en la vereda El Tambo, municipio de Ibaqué; las demás se consideran como simples manifestaciones sin importancia económica (BUITRAGO y BUENAVENTURA, 1975).

*Zona Norte del Tolima.* - En esta área se encuentran dos manifestaciones; una corresponde a la mina abandonada Las Damas, localizada en el municipio de Herveo, la cual estuvo en explotación hasta 1945; la otra corresponde a la manifestación Cajones, ubicada en el municipio de Líbano (BUENAVENTURA, 1975).

*Distrito Minero de Titiribi (Antioquia).* - En esta zona se presentan algunas manifestaciones de antimonio, dentro de las cuales merecen destacarse una manifestación de estibina en el municipio de Barbosa, paraje La Pureza, y otra manifestación de Antimonio, arsénico y oro en la vereda Las Flores, municipio de Andes, en donde el tenor de oro es de 2,5 gr por tonelada y 1% de antimonio (WOKITTEL, 1960).

## COMERCIO

En la tabla 6 se presentan las importaciones de antimonio metálico y en otras formas, entre los años de 1980 y 1985. No se tienen datos sobre producción y no hubo exportaciones.

TAB. 6: Importaciones de antimonio.

AÑO	EN BRUTO		EN OTRAS FORMAS	
	Tons.	US. \$(CIF)	Tons.	US. \$(CIF)
1980	1	3.000	-	-
1981	15	55.000	-	-
1982	37	244.000	-	-
1983	13	43.000	-	-
1984	15	48.000	1	5.000
1985	40	160.000	-	-

Fuente: DANE

## PERSPECTIVAS

En el caso del antimonio, un gran porcentaje de material en el mercado pertenece a la producción secundaria y gran parte (80%) se deriva de los desechos de baterías. Durante la actual recesión, el mercado de los desechos se incrementó considerablemente. Como un ejemplo tenemos el caso de los Estados Unidos, donde el consumo de los desechos, de 47% en 1981 se incrementó a 55% en 1982; sin embargo, se espera que para 1986 el consumo descienda al 50%; no obstante que los problemas ambientales y ecológicos asociados con el tratamiento de los metales de antimonio y las menas son mínimos, los usos secundarios del antimonio seguirán siendo importantes.

El uso del antimonio puede ser substituido en algunas áreas. En pinturas químicas, en pigmentos y porcelanas, el antimonio puede ser reemplazado por compuestos de titanio, zinc, cromo y circonio. Combinaciones de calcio, estroncio, estaño, cobre, selenio, azufre y cadmio, sustituyen al antimonio para endurecer el plomo. Igualmente, compuestos orgánicos selectos y óxidos hidratados de aluminio están ampliamente aceptados como una alternativa como materiales retardantes en la combustión.

#### BIBLIOGRAFIA

- BOYLE, R.W. and JONASSON, I.R., 1984.- The geochemistry of antimony and its use as an indicator element in geochemical prospecting. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 20 No.3, Elsevier, Amsterdam.
- BUCHANAN, L.J., 1981.- Precious Metal Deposits Associated with volcanic environments in the Southwest, in relations of tectonic to Ore Deposits in the Southern Cordillera. Edit by William R. Dickinson and William D. Payne, Tucson, Arizona.
- HODGINS, C.A. et al., 1983.- Mineral Resource Assessment of Colombia. U.S. Geological Survey - Ingominas, Menlo Park, U.S.A.
- MASTERS, H.R., 1985, 1986.- Antimony. Mining Annual Review, published by the Mining Journal, London.
- NEWHOUSE, M. H., 1928.- The time sequence of hypogene ore Mineral Deposition. *Econ. Geol.* V. 23, p. 647-659.
- PARK, C.F. and McDIARMID, R.A., 1964.- Ore Deposits, M. H. Freeman and Company. 475 p. San Francisco.
- WEAST, R.C., 1973.- (Editor). Handbook of chemistry and Physics. Fifty four edition.
- WELLS, R.C., 1915.- fractional Precipitation of some Ore forming compounds of Moderate Temperature. U.S. Geol. Surv. Bull. 609, 46 p. Washington.
- WOKITTEL, R., 1960.- Recursos Minerales de Colombia. Comp. Est. Geol. Of. de Colombia. Tomo X, Serv. Geol. Nat. 393 p. Bogotá.

## MINERALES DE ARSENICO

JOSE HUMBERTO CABALLERO A.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	77
Introducción .....	78
Usos .....	78
Ambiente Geológico .....	79
Geoquímica .....	80
Mineralogía .....	80
Tipos de Yacimientos .....	82
Beneficio y Metalurgia .....	82
Situación Mundial .....	83
Reservas .....	83
Precios y Producción .....	84
Consumo y Perspectivas .....	84
El Arsénico en Colombia .....	85
Depósitos .....	85
Producción .....	88
Comercio .....	89
Impacto Ambiental.....	89
Bibliografía .....	91

## RESUMEN

El arsénico es un elemento del Grupo V-A de la Tabla Periódica, relativamente escaso en la corteza. Por sus propiedades tóxicas, se utiliza en la agricultura para la fabricación de pesticidas, inmunizantes y defoliantes; también se utiliza en las industrias del vidrio, la electrónica y la metalurgia.

No se explota ninguna mina específicamente para este elemento; el elemento se obtiene como resultado de la refinación de concentrados de cobre, plomo y metales preciosos. Los minerales principales de arsénico son arsenopirita, lollingita, esmaltita, arsenolita, que se presentan en 6 tipos diferentes de depósitos que son en orden de importancia, yacimientos de arsenigita asociados a cobre-cinc-plomo, de cobre con pirita rica en arsénico, de plata nativa y arseniuros de níquel y cobalto, de oro rico en arsénico, de sulfuros de arsénico y de estaño ricos en arsénico.

En Colombia no se tienen mayores detalles sobre reservas de arsénico; todo se limita a la mención de arsenopirita generalmente asociada con filones de metales preciosos en los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Tolima, Cauca, Nariño y Santander; sería interesante estudiar la factibilidad de recuperar el arsénico a partir del proceso de beneficio de algunas menas de metales preciosos.

Las reservas mundiales se estimaron para el año de 1984 en 4.1 millones de toneladas cortas y unos recursos aproximados de 11.0 millones de toneladas cortas. La producción aumentó desde fines de la Segunda Guerra Mundial como una respuesta a las mayores necesidades de pesticidas de la agricultura industrial. En la década de los 70 se presenta paralelamente un descenso en la producción y un aumento en los precios como consecuencia de las medidas de protección del medio ambiente adoptadas por la mayoría de los países industrializados.

La posibilidad de nuevos pesticidas de origen orgánico menos nocivos para la salud humana y la existencia de sustitutos en las industrias metalúrgica y de vidrio dejan poco futuro para este elemento.

## INTRODUCCION

El arsénico es un metal de color blanco de estaño, que al contacto con el aire se torna rápidamente pardo-amarillo y luego negro; se le encuentra en la naturaleza en una variedad gama de minerales y compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. En la actualidad no existen menas explotadas exclusivamente para su obtención siendo más bien un subproducto del procesamiento de algunas menas complejas, valiosas para la obtención de cobre, oro y plata; por el contrario, se le considera como una impureza problemática para el beneficio y recuperación de aquellos minerales.

Las primeras referencias históricas de este elemento se remontan a los antiguos griegos quienes describieron un mineral sandarach conocido hoy como rejalgar ( $As_2S_3$ ) y oropimente ( $As_2S_5$ ) tal vez equivalente al arsenicum y aurorpigmentum de entonces. Aunque desde aquellos tiempos se conocieron sus propiedades tóxicas los antiguos griegos mencionan en sus escritos propiedades medicinales para algunos preparados de arsénico.

Se piensa que Alberto Magnus obtuvo el elemento en el año de 1250 y en 1649 Schroenöder publicó 2 métodos de preparar el elemento. Según Greenspoon (1973) fue Lemery quien por primera vez obtuvo arsénico metálico en el Siglo XVII mediante el calentamiento de arsénico blanco al cual agregó potasio y jabón. Brandt mostró en 1733 que el arsénico blanco era una ceniza de óxido de arsénico metálico.

La casi totalidad de los suministros de arsénico del Siglo XIX se obtuvieron de las minas existentes en las regiones de Cornwall y Devón en Inglaterra y de Freiberg en Alemania.

El crecimiento en la demanda del arsénico ha venido ligado fundamentalmente al aumento en las necesidades de pesticidas que tiene la agricultura industrial. En Colombia no se ha producido hasta el momento y las necesidades de la industria nacional se suplen mediante importaciones.

## USOS

Loebenstein (1980) calculó que aproximadamente el 97% del consumo de arsénico se hace en la forma de compuestos de este elemento mientras que el 3% restante se utiliza como metal.

Los usos principales del arsénico están en la agricultura industrial, silvicultura, industrias de vidrio, cerámica y pinturas cuya materia básica más importante es el arsénico blanco, presentado comercialmente como polvo fino de color blanco con un contenido aproximado del 99.5% de trióxido de

arsénico; otros compuestos comerciales importantes son los arsenatos o sales de ácido de arsénico.

Cerca del 82% de la demanda total del arsénico según Greenspoon (1975), se utiliza principalmente en la agricultura industrial, por sus cualidades tóxicas. En esta rama se emplea en herbicidas, desecante de plantas, defoliante, insecticidas, esterilizante de suelos, cebos para insectos, etc. Los compuestos más usados como pesticidas son arsenato de plomo, acetato arsenito de cobre, arsenito de sodio, arsenato de calcio y algunos tipos orgánicos como ácido metilarsénico y ácido dimetilarsénico. El ácido dimetilarsénico, conocido como el agente azul, fue utilizado extensamente en Vietnam con propósitos militares y usado hoy como silvicida para el control de bosques. El arsenocromato de cobre, arsenato de sodio y arsenato de cinc se utilizan como inmunizadores de madoras.

Compuestos fenilarsénicos como el ácido arsenálico se utilizan como aditivos de algunos alimentos derivados de carne de aves y cerdos y para combatir algunas enfermedades. Aún se utilizan en algunos países pequeñas cantidades de compuestos de arsénico para la fabricación de drogas especialmente para combate de enfermedades parasitarias. En la manufactura del vidrio se usa el arsénico en forma de trióxido como un agente decolorante, el ácido arsénico se emplea algunas veces para dispersar las pequeñas burbujas que se acumulan en el vidrio; usos menores se tienen en la industria cerámica y la fabricación de medicinas veterinarias. En metalurgia se le emplea en aleaciones con plomo para la fundición de municiones; se alea con cobre para mejorar en este elemento su resistencia a la corrosión y a la abrasión a temperaturas elevadas; sirve para elevar la temperatura a la que debe ejecutarse cualquier proceso de recuperación en determinada aleación (MARIN, 1978).

El arsénico de Gallium y sus aleaciones son unos de los compuestos más importantes para la fabricación de semiconductores, diodos y lasers de temperatura ambiente, dispositivos de microondas, celdas solares y superficies fotoemisivas (MINERALS YEARBOOK, 1983).

### AMBIENTE GEOLOGICO

El arsénico se considera como un elemento relativamente escaso en la corteza terrestre; Rose et al (1979) considera un promedio de concentración en rocas corticales de 2 ppm mientras que Levinson (1980) trae un valor de 1.8 ppm.

En la Tabla 1 se presentan las concentraciones promedio de este elemento en los distintos tipos de rocas.

TAB. 1: Concentraciones promedio en los distintos tipos de rocas en ppm.

	Hawkes & Webb (1962)	Rose et al. (1979)	Levinson (1980)
Ultramáficas	2.8	1.0	
Máficas	2.0	1.5	2.0
Intermedias			2.0
Félsicas	1.5	2.1	1.5
Calizas		1.1	2.5
Areniscas y cuarcitas		1.2	1.2
Lutitas	4.0	12.0	15.0

Es común encontrar algunos minerales arseníferos en ciertos yacimientos resultantes de metamorfismo de contacto y los formados por emanaciones de tipo volcánico. Es probable que en la pirita, en los fosfatos, en los silicatos de las rocas ígneas y en la galena existan cantidades apreciables de este elemento (RANKAMA & SAHAMA, 1962).

El arsénico puede entrar en el proceso de sedimentación proveniente de la meteorización de rocas ígneas, de las emanaciones volcánicas, de fuentes termales y modernamente de emanaciones industriales. Las concentraciones de arsénico obtenidas para suelos no contaminados varían entre 1 y 50 ppm, con un promedio aproximado de 5 ppm; el promedio para aguas superficiales es de 2 ppm en agua dulce y 0.001-0.008 mg/litro en agua de mar; en aguas subterráneas se han encontrado valores superiores a los de aguas de superficie no contaminadas artificialmente; en Nueva Zelanda se ha medido hasta 8.5 mg/litro en aguas de áreas con actividad geotérmica, mientras que en el Japón los valores oscilan entre 1.8 - 6.4 mg/litro.

### GEOQUIMICA

El arsénico es un elemento del grupo V-A de la Tabla Periódica, número atómico 33 y peso atómico 74,9222; sublima a los 673°C y funde a 217°C y 34 atmósferas de presión. En la naturaleza sólo se encuentra un isótopo, el  $As^{75}$ . Muy raras veces se le encuentra en estado nativo; se combina fácilmente con azufre, selenio y telurio para formar sulfurosales y arseniuros con varios metales pesados, principalmente el cobre, hierro, níquel y cobalto (RANKAMA Y SAHAMA, 1962); puede ser de carácter calcófilo con un comportamiento similar al antimonio y el bismuto; se asocia frecuentemente con U, Sn, Bi, Mo, P, Fe y en especial con el Au en casi todos los tipos de depósitos de este último (RUSE et al, 1979).

Presenta movilidad alta en ambiente primario mientras que en ambiente oxidante está controlado por la coprecipitación con óxidos de Fe.

En ambientes pobres en hierro o relativamente reductores, puede llegar a ser relativamente móvil al hacerse más soluble como se demuestra por su contenido promedio más alto en el agua que en las rocas.

El arsénico tiene gran valor como elemento guía o indicador de mineralizaciones, para la exploración de depósitos principalmente de Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Co, mediante la investigación de suelos, aguas y sedimentos; bajo condiciones especiales el contenido de arsénico en plantas ha representado una herramienta de mayor utilidad que la de los suelos y las aguas.

### MINERALOGIA

El arsénico se encuentra en la naturaleza en forma nativa y como sulfuros, arseniuros y sulfuroarseniuros de metales pesados, óxidos y arseninatos; en la Tabla 2 se presentan algunos de los minerales que poseen As en su estructura molecular, arreglados con respecto a los metales principales.

El elemento nativo se encuentra como cortezas arrinonadas, estalactitas y formaciones concéntricas en yacimientos hidrotermales; los minerales primarios son la arsenopirita o mispiquel ( $FeAsS$ ), Lollingita ( $FeAs_2$ ), esmaltila ( $CoAs_2$ ),

Artículo	Arácnico	Simbólico	Óxidos	Cobre	Enfero	Hierro	Hungarico	México	Flaha	Plomo	Talio	Zinc
Almonilla AsB	Arácnico Nativo As	BuAsS <sub>4</sub>	OsAsS <sub>4</sub>	Dosisgita OsAsS <sub>4</sub>	Colanite OsAsS <sub>4</sub>	Lallingi- ter FeAs <sub>2</sub>	Aracnoide- sita FeAs <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	OsAs <sub>2</sub>	Pearosita (As <sub>2</sub> O) <sub>3</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Sarcosita PbAs <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	Yrbosita Tl(As, Sb) <sub>3</sub> S <sub>5</sub>	Asenita Zn <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH)
	Malajyer* AsS	Malasita Bi <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Glaucodit (OsFe)AsS	Terranita OsAsS <sub>4</sub>	Monsi- ganit FeAs <sub>2</sub>	Alomita HAs <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub>	Huchisita NiAs <sub>2</sub>	Prasosita As <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Prasosita As <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Baumbosita Pb <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Lorenzita TlAs <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	Kostigitas Zn <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Orpimente* As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		Saffranita OsAs <sub>2</sub>	Enargita OsAs <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	Encomol- ita* FeAs <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> O	Nicolita NiAs	Nicolita NiAs	Ematita As <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Ematita As <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Dufrenoyisita Pb <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Kachimoo- nita (PbTl) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>10</sub>	Legrosnita Zn <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Lallingit* FeAs <sub>2</sub>		Enxanderru- dita OsAs <sub>2</sub>	Solignu- nita OsAs <sub>2</sub> S <sub>4</sub>		Clasmita NiAs <sub>2</sub>	Clasmita NiAs <sub>2</sub>	Trochocmita As <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Trochocmita As <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Jacobinita Pb <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		
	Mimogal* FeAs <sub>2</sub>		Ematita OsAs <sub>2</sub>			Bismolite BiAs <sub>2</sub>	Bismolite BiAs <sub>2</sub>	Bismolite BiAs <sub>2</sub>	Bismolite BiAs <sub>2</sub>	Cerrosita Pb <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		
	Terranita OsAs <sub>2</sub> S <sub>4</sub>		Estirina Os(AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			Caradefinita NiAs <sub>2</sub>	Caradefinita NiAs <sub>2</sub>	Caradefinita NiAs <sub>2</sub>	Caradefinita NiAs <sub>2</sub>	Miskenita Pb <sub>2</sub> As <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> Cl		
	Onegita OsAs <sub>2</sub> S <sub>4</sub>		Fonobita (NiOs)HAsO <sub>4</sub> 4H <sub>2</sub> O			Fonobita (NiOs)HAsO <sub>4</sub> 4H <sub>2</sub> O	Beudanticita Pb <sub>2</sub> As <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>2</sub>					
	Asenolita As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					Aracnoidita Ni <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	Aracnoidita Ni <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	Aracnoidita Ni <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	Aracnoidita Ni <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>			
	Clasmita As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>											
	Simpsonita Fe <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 8H <sub>2</sub> O											
	Encomolite* FeAs <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> O											
	Famocositide- rita Fe <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>											
	Ferrisimpsonita Fe <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O											
	Almonilla AsB											

\* Principales minerales de arsénico.

chlolandita o rommelsbergita ( $\text{NiAs}_2$ ), nicolita ( $\text{NiAs}$ ), tennantita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_3$ ), enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), cobaltita ( $\text{CoAsS}$ ), escudrudita ( $\text{CoAs}_3$ ), cloantita ( $\text{NiAs}_{3-2}$ ), Nicolita gerdasfita ( $\text{NiAsS}$ ) y varios más, en general bastante raros.

Los minerales secundarios más importantes son: arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) formado a expensas del arsénico nativo, misetesita  $\text{PhS(AsO}_4)_3\text{Cl}$  derivada de arseniuros, sulfoarseniuros y sulfarsenitos (arsenopirita y tetraedrita) observadas como impurezas en las menas primarias de plomo; olivenita ( $\text{Cu}_3\text{As}_2\text{O}_8\text{Cu}$ ) derivada generalmente de enargita, la eritrita ( $\text{CO}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) producida por la meteorización de depósitos con cobaltita, escudrudita y otros arseniuros de cobalto; en las zonas de oxidación de yacimientos con abundante arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) se forma en masas a veces considerables la escorodita ( $\text{Fe(AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Como resultado del proceso de meteorización de la nicolita ( $\text{NiAs}$ ) y niquelescudrudita se forma annabergita  $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .

De los minerales mencionados el arsénico se extrae principalmente de los siguientes (BETEJTIN, 1977):

- Rejalgar,  $\text{AsS}$ . (70.1% de As y 29.9% de S).
- Oropimente,  $\text{As}_2\text{S}_3$ . (61% de As y 39% de S).
- Lollingita,  $\text{FeAs}_2$ . (27.2% de Fe y 72.8% de As).
- Mispiquel,  $\text{FeAsS}$ . (34.3% de Fe, 46.0% de As y 19.7% de S).
- Escorodita,  $\text{Fe(AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . (34.6% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 49.8% de  $(\text{As}_2\text{O}_5)$ , 15.6% de  $\text{H}_2\text{O}$ ).
- Enargita,  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ . (48.3% de Cu, 19.1% de As, 32.6% de S e impurezas de Sb, Fe, Pb, Zn, Ag).
- Tennantita ( $\text{Cu}_3\text{As}_3\text{S}_3$ ).

## TIPOS DE YACIMIENTOS

Ningún depósito se explota en la actualidad exclusivamente para arsénico; toda la producción mundial se obtiene como un subproducto de los procesos de beneficio y refinación de menas de cobre ricas en arsénico y en menor proporción de menas de oro y plomo-zinc.

Gualtiere (citado por JERSEN y BATEMAN, 1981) clasifica los yacimientos ricos en este metal de acuerdo con los minerales de importancia económica; estos son en su orden:

- Depósitos de enargita asociada a cobre-zinc-plomo.
- Yacimientos de cobre con pirita rica en arsénico.
- Yacimientos de plata nativa y arseniuros de níquel y cobalto.
- Yacimientos de oro ricos en arsénico.
- Yacimientos de sulfuros de arsénico y yacimientos de otros ricos en sulfoarseniuros.
- Depósitos de estaño ricos en arsénico.

## BENEFICIO Y METALURGIA

Ningún depósito se explota exclusivamente para arsénico en la actualidad; por el contrario, se le considera un elemento nocivo para el proceso metalúrgico, lo que ha impulsado grandes esfuerzos tecnológicos dirigidos hacia su remoción como elemento contaminante de los metales importantes.

El arsénico se recupera a partir del tratamiento del chorro de partículas derivadas del proceso de refinación de meta-

los básicos (Cu, Pb) y de oro. Los residuos de este proceso, que pueden contener hasta un 30% de trióxido de arsénico (arsénico blanco), se recogen en un precipitador electrostático, denominado de Cottrell, se mezclan con galena o pirita y se someten a tostación. Durante el proceso anotado el trióxido de arsénico sublima colectándose entonces en condensadores; el precipitado puede tener varios grados de pureza y dependiendo de la concentración requerida, se somete el producto a un proceso de purificación por resublimación en hornos reverberadores, tantas veces como sea necesario (LOFRENSTEIN, 1980).

La refinaria de Asarco en Estados Unidos procesa concentrados de cobre con altos porcentajes de arsénico como los que exportan desde Filipinas, que pueden contener hasta el 9% y el enviado desde Perú que alcanza hasta un 12% de contenido de arsénico. Para contrarrestar estos altos contenidos, las compañías refinadoras han ideado un sistema de castigo a los precios de los refinados de metales básicos que llegan a sus plantas y que se evalúa con base en el costo de los pasos extras que se deben dar en proceso de remoción del arsénico.

El arsénico de común ocurrencia en los filones de metales preciosos en la forma de arsenopirita juega un papel negativo durante el beneficio de oro, puesto que su presencia entorpece y aumenta los costos del proceso de cianuración, principal sistema de beneficio de los minerales ricos en oro y plata, obligando a la tostación del mineral pulverizado como paso previo al de cianuración.

## SITUACION MUNDIAL

### RESERVAS

No es fácil estimar las reservas mundiales de este metal puesto que raras veces se registra su contenido en las menas a las cuales se encuentra asociado; los datos que se poseen generalmente se infieren como una función de las reservas de cobre y con base en los productos de la refinación de los minerales importantes. GREENSPOON (1975) considera para el caso de los Estados Unidos un promedio de 17.5 libras de arsénico por tonelada de reserva de cobre, mientras que LOEBENSTEIN (1980) utiliza un promedio de 12 libras por tonelada corta de reservas de cobre y 1.6 libras por la de plomo.

En la Tabla 3 se muestran los estimativos hechos desde 1967 hasta 1983 en millones de toneladas cortas, contenidas en las reservas de cobre y plomo.

TAB. 3: Reservas y Recursos mundiales de arsénico (Millones de toneladas).

Año	Reservas	Recursos	Referencia
1967	4.2		Paone, 1970
1974	3.8	13.2	Green Spoon, 1975
1979	3.4	11.1	Loebenstein, 1980
1981	4.5	11.1	Loebenstein, 1982
1982	4.5	11.0	Loebenstein, 1983
1983	4.1	11.0	Edelstein, 1984

## PRECIOS Y PRODUCCION

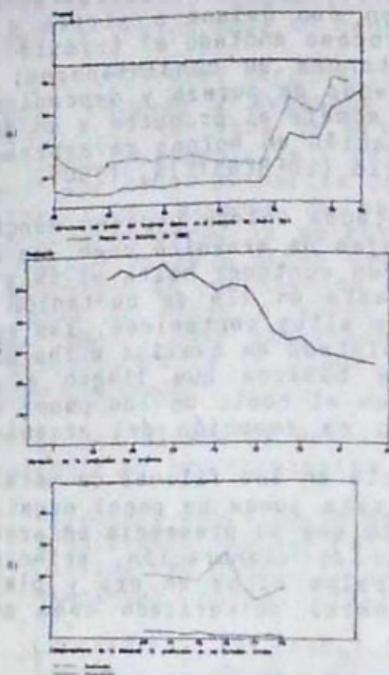


FIG. 1: Precios, Producción y Demanda.

El compuesto de arsénico más común es el trióxido de arsénico u óxido arsenioso ( $As_2O_3$ ) conocido en el mercado como arsénico blanco; la presentación se hace como un polvo blanco y fino que generalmente contiene 99.5% de  $As_2O_3$ . Los requerimientos comerciales exigen un contenido mayor de 99%, sin aglomeraciones y en algunos casos con ciertos patrones de solubilidad en ácido nítrico. Otros productos importantes son: arsénico metálico, sulfuro de arsénico, arsenato de sodio y ácido arsenico.

La producción de arsénico ha venido en aumento desde la Segunda Guerra Mundial cuando los pesticidas empezaron a jugar un papel importante en la agricultura industrial. Por la década de los 70 se registró un notable descenso en la producción mundial, como respuesta a las estrictas medidas de protección del medio ambiente

promulgadas por la mayoría de los países industrializados. En la Figura 1B se muestra el comportamiento de la producción mundial entre los años 1963 y 1984 compilada de publicaciones del Minerals Yearbook (1981-1983).

Solo se poseen datos de los precios del arsénico por el mercado de Nueva York desde el año de 1958. Como se puede observar en la figura 1A su comportamiento fue bastante estable hasta el año de 1973, donde se inicia una etapa de aumento paulatino llegando a un valor de 38.7 centavos por libra por el año de 1979, lo que representa un aumento mayor de 300% en solo 6 años. Si se comparan las gráficas A y B de la Figura 1 se observa una buena correlación entre dos épocas diferentes la primera de las cuales va hasta los años 1973-1974 caracterizada por precios y producción relativamente estables y la segunda entre los años 1974 y 1980 que se destaca por el aumento pronunciado en los precios y la caída de la producción mundial. Las medidas ambientalistas citadas anteriormente, explicarían la coincidencia de estos dos fenómenos.

## CONSUMO Y PERSPECTIVAS

Poco se conoce de la demanda del arsénico a nivel mundial, solo se dispone de información de Estados Unidos que a cierta forma puede reflejar su comportamiento para el caso de los países industrializados (Fig. 1C).

Los problemas de contaminación generados por el uso extensivo de arsénico, han estimulado la búsqueda de compuestos orgánicos sintéticos que sustituyan los pesticidas, herbicidas y desecantes fabricados con este elemento; aunque sus costos de producción son todavía muy altos, el selenio y el céri-

pueden sustituir al arsénico como decolorante en la industria del vidrio. Aleaciones de calcio y plomo reemplazan la de antimonio-plomo-arsénico usadas en baterías de automóviles, de buena aceptación en el mercado (LOEBENSTEIN, 1980).

El desarrollo de pesticidas orgánicos, las normas de protección al medio ambiente que se empiezan a adoptar incluso en países subdesarrollados y la perspectiva de tecnologías más económicas para la producción de los pesticidas sustitutos afectan el futuro de la demanda mundial del arsénico; sin embargo el incremento en la demanda por alimentos y la mayor industrialización de la agricultura mantendrán el uso de pesticidas elaborados con arsénico por más tiempo.

## EL ARSENICO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

En Colombia no existen minas que se exploten para arsénico como elemento principal ni hay plantas refinadoras que lo beneficien como subproducto de otros metales. Aún cuando se conocen algunas mineralizaciones de arsenopirita, rejalgar y oropimente, sólo se han efectuado exploraciones durante la Segunda Guerra Mundial, en el área del municipio de Samaná (Caldas), sin ningún resultado positivo conocido (MARIN, 1978).

Las noticias que se tienen de los minerales de arsénico siempre están referidas a la descripción de arsenopirita como uno de los constituyentes de la ganga de otros depósitos de mayor importancia, sin tener en cuenta que este mineral puede tener importancia económica (MARIN, 1978).

En Colombia solo se conoce el arsénico asociado con filones de metales preciosos aunque no se puede descartar la presencia de otros tipos de depósitos. Las regiones más prometedoras están relacionadas con este tipo de minería principalmente en los departamentos de Antioquia, zona central y oriental y en el departamento de Nariño, área de Guachavés (Fig. 2).

Para recuperar el oro incluido en minerales como piritita y arsenopirita se utiliza el método de cianuración previa tostación del mineral pulverizado a 400 - 600 y 750°C, con el fin de eliminar el arsénico que actúe como cianicida. Sería interesante estudiar la factibilidad de instalar la tecnología adecuada en algunas de las plantas que utilicen este método de tostación con el fin de recuperar el arsénico en su forma trióxido (arsénico blanco) y sustituir las importaciones que hoy se hacen.

En el catálogo de los yacimientos minerales de Colombia de reciente publicación (MUTIS, 1983) se recogen los principales lugares del país donde se menciona la presencia de arsenopirita. A continuación se describen las principales áreas con manifestaciones encontradas en el país (Fig. 2).

### DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

Se conocen algunas manifestaciones de arsenopirita todas asociadas con filones de oro y plata.

*Distrito Minero del Centro.*— Localizado sobre la Cordillera Occidental, comprende los municipios de Abriaquí, Caicedo, Frontino y Urrao. Se trata de mineralizaciones filonianas de sulfuros con oro y plata emplazados en rocas dioríticas y

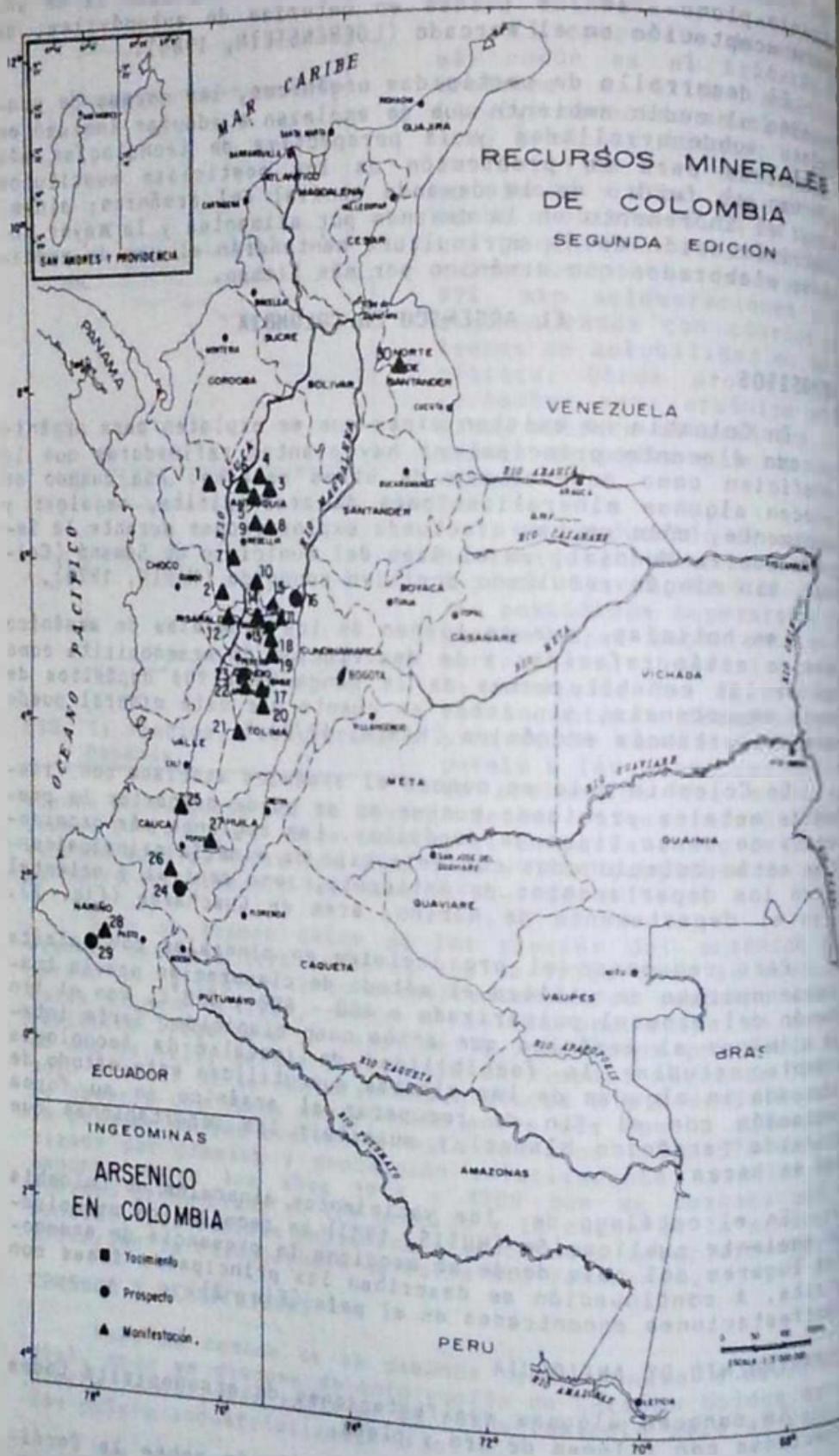


FIG. 2: Arsénico en Colombia.

volcano-sedimentarias del Grupo Cañasgordas; las vetas se componen en orden de abundancia de pirita, calcopirita, arsenopirita, pirrotita, esfalerita, galena, plata y oro en ganga de cuarzo y calcita, todas relacionadas con las intrusiones dioríticas terciarias. Ejemplo de estos filones son El Volado, El Apucarco, El Zarcero, Las Hebreas, El Dique, La Clara, La Fortuna.

*Distrito Minero del Suroeste.*— Conformado por los municipios de Salgar, Bolívar, Betania y Andes. Se trata de filones de oro y de plata en ganga de cuarzo relacionados con los intrusivos dioríticos que conforman los farallones del Citará; la totalidad de las minas fueron explotadas en la década del 40 y se encuentran abandonadas en la actualidad; los principales filones son Tapará, Santa Cruz, Santa Teresa, La Sombra, Santa Elena, San Esteban, Alejandria, La Paz, Baronesa y La Lucera, todas en la jurisdicción del municipio de Los Andes.

*En la Zona Central del Departamento.*— Se conocen manifestaciones en los distritos Batolito Antioqueño y Sonsón. En el primero, en general se trata de minería abandonada debido quizás al empobrecimiento de los filones. En el área de Carolina y Guadalupe hay manifestaciones de arsenopirita en las minas La Bramadora, La Trinidad, El Machete y El Oso, caracterizadas por su alto contenido de estibina y en menores cantidades pirita, arsenopirita, oro y plata. En el distrito minero de Sonsón, se encuentran filones cuarzosos con sulfuros que contienen oro, asociado con el Batolito de Sonsón de edad jurásica y con pórfidos del Terciario; algunas de las minas, todas abandonadas en la actualidad, son las de San Vicente, La Elvira y La Picota, cuyos filones se componían en orden de importancia de pirita, arsenopirita, calcopirita, galena, estibina y cuarzo con contenidos variables de oro.

*En la parte Nororiental del Departamento.*— Se conoce la presencia de arsenopirita en los filones auríferos del distrito minero de Amalfi - Anorí encajadas en esquistos y neises de edad paleozoico. Las principales manifestaciones de arsénico se conocen con los nombres de La Trinidad, La Italia, El Robal, Yolombito, Salazar, La Cristalina, La Clara, La Ilusión, La Esperanza entre otras (RODRIGUEZ y PERNEY, 1983).

#### DEPARTAMENTO DE CALDAS

Marín (1978) describió los prospectos El Vergel, Guacas y Los Andes todos localizados en las inmediaciones del municipio de Marquetalia en la parte oriental del departamento. Se trata de potentes filones de sulfuros intruidos en rocas metamórficas del Paleozoico cuya composición predominante es pirita, calcopirita, arsenopirita, galena local y cantidades variables de oro y plata. Todos han sido explotados para oro y plata, pero en la actualidad se encuentran abandonados aunque podrían ofrecer posibilidades económicas; se desconoce su potencial como productores de arsénico.

En el municipio de Samaná, López (1971) menciona el prospecto Media Cuesta constituido por un filón macizo de sulfuros de 2 m de espesor encajado en rocas cuarzdioríticas. Predominan en él pirita, arsenopirita, calcopirita, trazas de galena y molibdenita.

Otras manifestaciones de arsénico en el Departamento de Caldas se encuentran en la mina Sonrisa, en el municipio de Manzanera, en las minas de uro de Marmato, en la región de

Morevia municipio de Marulanda, en Pensilvania localidad de Viscaya y en los alrededores de Samaná región de Sinaf en las minas La Plata y La Cristalina. Algunas de estas manifestaciones podrían ser de interés para el elemento analizado (MUTIS 1983) pero no se tiene mayor información al respecto.

DEPARTAMENTO DEL CAUCA

Mutis (1983) menciona la presencia de minerales de arsénico en 7 localidades entre las cuales se destacan las siguientes:

- Mina La Concepción, localizada en el municipio de Alaquet en el sitio denominado La Cucutilla; se trata de varios filones encajados en rocas cuarzodioríticas de textura porfídica y limolitas; se explotan en la actualidad para oro. Mineralógicamente se componen de pirita, arsenopirita, calcopirita, magnetita y oro; podrían ser aprovechadas para el comercio local del metal.

- En el municipio de Buenos Aires, en la parte norte del departamento, se reportan filones compuestos por oro, arsénico, antimonio, molibdeno y níquel trabajados bajo los nombres de minas La Bárbara y Las Leches, que según Mutis (1983) han sido prospectados recientemente.

- En el Cauca se sabe de la presencia de uropimente en los municipios de Buenos Aires y Silvia, mina La Antigua. En el municipio de El Bordo, área de Piedra Sentada, se conocen mineralizaciones interesantes de arsenopirita.

DEPARTAMENTO DE NARIÑO

En el municipio de Guachavés se conocen desde principios del siglo, filones auríferos importantes que rellenan fisuras en rocas volcánicas del tipo brechas y andesitas basálticas del Cretáceo. Los minerales constituyentes de las venas son pirita, arsenopirita, esfalerita, calcopirita y galena en ganga de cuarzo y dolomita; el contenido de oro oscila generalmente entre 4 y 10 gr/tonelada, alcanzando hasta 80 gr/tonelada en algunas muestras de la mina Bomboná. El contenido de arsénico puede llegar en partes hasta un 23% del total de la vena (JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY, 1983). Según los estudios hechos recientemente por un convenio Colombo-Japonés, parece factible el desarrollo semi-industrial de esa minería de oro mediante la creación de una planta central que procese el mineral producido por las minas de la región; de concretarse este proyecto podría convertir la zona en un buen productor de arsénico. Las principales minas en actividad son Paraiso, Diamante, Bomboná, Deaquite, Gitana y Hormiga siendo El Diamante la de mayor producción de oro.

Otras manifestaciones de las cuales se tienen muy pocos datos, se localizan en los departamentos de Norte de Santander, Quindío y Tolima en general asociadas a mineralizaciones filonianas explotadas para oro y plata.

PRODUCCION

Hasta la fecha no se registra ninguna producción en el país; las necesidades nacionales de esta materia prima se satisfacen mediante la importación. Es muy poca la información de que se dispone por lo que se hacen muy difíciles las pro-

yecciones económicas con miras a la planeación de su exploración, explotación y comercialización.

## COMERCIO

En la Tabla 4 se presentan algunos de los datos de importaciones, suministrados por el DANE (1985).

TAB. 4: Importaciones de arsénico en Colombia.

Año	Ton./métricas	Pesos Colomb.
1971	13.9	163.968
1972	764.7	8.948.084
1973	1.096.5	15.620.594
1980	1.0	493.000
1981	1.5	778.000
1983	98.0	7.068.000

Fuentes: Banco de la República y DANE.

## IMPACTO AMBIENTAL

El arsénico se conoce desde tiempos remotos por sus propiedades tóxicas en la mayoría de sus compuestos, los cuales pueden ser inhalados, ingeridos o absorbidos a través de la piel; algunas exposiciones industriales pueden producir en el hombre dermatitis, irritaciones del tracto respiratorio y algunos tipos de cáncer.

El principal medio de transporte del arsénico lo constituye el agua; cuando está asociado con hierro y aluminio puede precipitarse en cantidades considerables. Se le encuentra en diferentes composiciones en el agua oxigenada, algunas aguas subterráneas profundas y ciertos organismos marinos que tienen la propiedad de transportar arsénico inorgánico en formas orgánicas complejas.

En suelos oxigenados el arsénico inorgánico se presenta en su forma pentavalente y bajo condiciones reductoras en forma reductora. Su lixiviación es lenta por encontrarse ligado a hidróxidos de hierro y aluminio. En el aire de áreas urbanas, su concentración puede variar desde unos nanogramos a pocas decenas de microgramos por metro cúbico; cerca de algunas refineras se han medido concentraciones superiores a 1 microgramo por metro cúbico (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1981).

De acuerdo con la World Health el arsénico se encuentra también en el vino, las aguas minerales, el tabaco y algunas medicinas usadas para el tratamiento de la leucemia y soriasis. El hombre puede inhalar diariamente 0.2 mg dependiendo de la cantidad de alimentos de mar y tabaco que consuma; un fumador promedio puede llegar a absorber hasta 20 mg de arsénico diariamente. La principal exposición ocupacional ocurre por la inhalación de partículas con arsénico como es el caso de los trabajadores de las refineras de plantas de beneficio o los que laboran en el uso y producción de pesticidas; para ilustrar la emisión de arsénico al ambiente durante el proceso industrial, se muestra en la Figura 3 con cifras para el año 1973, la polución por este elemento en los Estados Unidos.

El arsénico puede afectar muchos sistemas orgánicos incluyendo el respiratorio, gastrointestinal, cardiovascular.

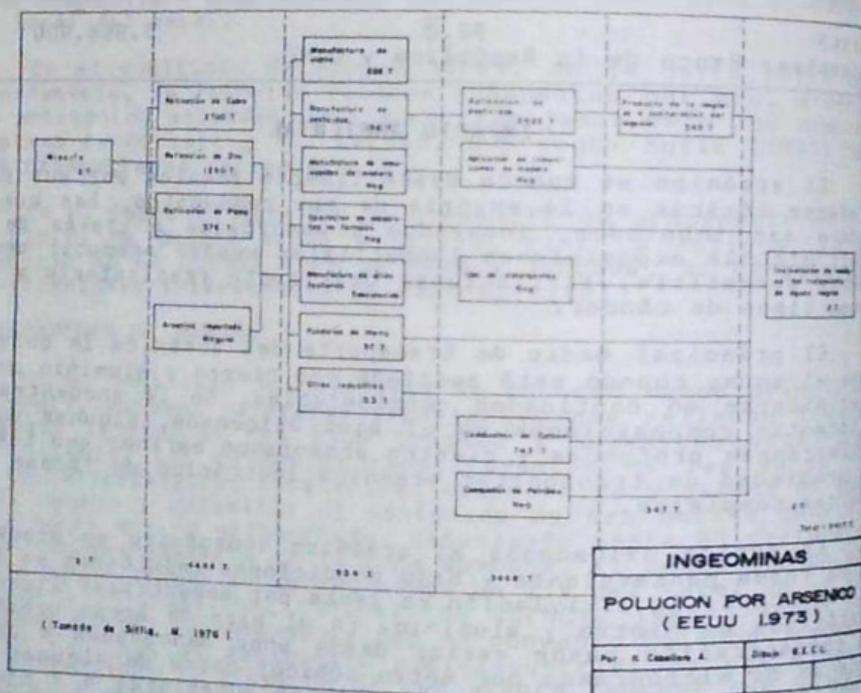


FIG. 3: Polución por Arsénico (EE.UU. 1973).

nervioso y circulatorio. La exposición al arsénico trivalente puede afectar los cromosomas; estudios epidemiológicos muestran una alta potencialidad al cáncer de la piel, el tracto respiratorio y el sistema linfático, para personas que por algún motivo inhalan cantidades altas de arsénico.

Las distintas leyes ambientales normalmente regulan la emisión primaria de las refinerías de cobre, plomo y oro, las descargas de las plantas que procesan compuestos inorgánicos de arsénico y la fabricación y el uso de los pesticidas.

### BIBLIOGRAFIA

- BANCO DE LA REPUBLICA, 1976.- **Anuario de Comercio Exterior.** Investigaciones internas. Bogotá.
- BETEJIN, A., 1977.- **Curso de Mineralogía.** Edit. Mir, 739 p. Moscú.
- COX, D., 1983.- **Ore Deposits Models.** Mineral Resource Assessment of Colombia. USGS-INGEOMINAS. p.43.
- DANE, 1985.- **Estadísticas.** Bogotá.
- EDELSTEIN, D.L., 1984.- **Arsenic.** in: Mineral Commodity Summaries. U.S. Bureau of Mines. pp. 10-11, Washington.
- GREENSPOON, G.N., 1975.- **Arsenic.** in: Mineral Facts and Problems. U.S. Bureau of Mines. pp.99-106. Washington.
- HAWKES, H.E. & WEBB, I.S., 1962.- **Geochemistry.** in: Mineral Exploration. Harper and Row, 415 p. New York
- HUTCHINSON, C.S., 1982.- **Economic deposits and their tectonic setting.** John Wiley and Sons. 365 p. New York.
- JERSEN, M.L. & BATEMAN, A.M. 1981.- **Economic Mineral Deposits.** John Wiley and Sons. 593 p. New York.
- JICA, 1983.- **Report on geological survey of Piedrancha** --- Consolidated report Tokyo.
- LEVINSON, A.A., 1974.- **Introduction to exploration geochemistry.** Applied Publ. Ltd. 611 p. Calgary, Canadá.
- \_\_\_\_\_, 1980.- **Introduction to exploration geochemistry. Supplement.** Applied Publ. Ltd. Calgary, Canadá.
- LOEBENSTEIN, J.R., 1980.- **Arsenic.** Mineral Fact and Problems. U.S. Bureau of Mines. pp.1-8. Washington.
- \_\_\_\_\_, 1982.- **Arsenic.** in Mineral Commodity Summaries. U.S. Bureau of Mines. pp.10-11. Washington.
- \_\_\_\_\_, 1983.- **Arsenic.** in: Mineral Commodity Summaries. U.S. Bureau of Mines. pp.10-11. Washington.
- LOPEZ, J.H., 1971.- **Ocurrencias minerales del Departamento de Caldas.** Inf. 1602. Ingeominas.
- MARIN, P.A., 1978.- **Arsénico.** en: Recursos Minerales de Colombia. Pub.Geol.Esp. Ingeominas, No.1: 31-41. Bogotá.

MINERALS YEARBOOK, 1981.- **VI. Metals and Minerals**. Bureau of Mines. pp. 939-942. Washington.

\_\_\_\_\_. 1982.- **VI. Metals and Minerals**. Bureau of Mines. pp. 931/3A. Washington.

\_\_\_\_\_. 1983.- **VI. Metals and Minerals**. Bureau of Mines. pp. 955/61. Washington.

MUTIS, J.V., 1983.- **Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia**. Pub. Geol. Esp. Ingeominas, No. 13, p.462. Bogotá.

PAONE, 1970.- **Arsenic in Mineral fact and Problems**. U.S. Bureau of Mines. pp.479-487. Washington.

RANKAMA, K. y SAHAMA, G., 1962.- **Geoquímica**. Aguilar. 862 p. Málaga, España.

RODRIGUEZ, C.J. y PERNET, A., 1983.- **Recursos Minerales de Antioquia**. Bol. Geol. 26 (3) 116 p. Bogotá.

ROSE, A.W., HAWKES, N.E. & WEBB, I.S., 1979.- **Geochemistry**. in: Mineral Exploration. (2a. Ed.). Academic Press.

STANTON, R.L., 1972.- **Ore petrology**. McGraw-Hill. 713 p. New York.

SILLITOE, R.H., 1983.- **Enargite-bearing massive sulfide deposits: high in porphyry copper system**. Econ. Geol. Vol. 78. 348-351.

SITTIG, M., 1976.- **Toxic Metals Pollution Control and Worker Protection**. 350 p. Noyes, London.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1981.- **Arsenic**. In: Environmental Health, criterio 18. Naciones Unidas. 174 p. Ginebra.

## MINERALES DE BISMUTO

PEDRO MARIN R.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	93
Intraducción .....	93
Usos .....	94
Ambiente Geológico .....	94
Geoquímica .....	94
Mineralogía .....	95
Tipos de Yacimientos .....	95
Técnicas de prospección.....	95
Situación Mundial .....	96
Producción .....	96
Consumo .....	96
Precio .....	96
Perspectivas .....	98
El Bismuto en Colombia .....	98
Bibliografía .....	99

## RESUMEN

El bismuto (Bi), se encuentra en la naturaleza en estado libre y en forma combinada constituyendo algunos compuestos como bismita ( $Bi_2O_3$ ), y la bismutita ( $Bi_2S_3$ ), que conforman las menas más importantes de este elemento.

El bismuto, con muy pocas excepciones, se obtiene como un subproducto en la refinación de otros elementos, con los cuales se presenta asociado; dichos elementos pueden ser: cobre, plomo, zinc, molibdeno, plata, oro, estaño, tungsteno y cobalto.

El uso del bismuto, en los países desarrollados, está restringido a tres industrias principales: la farmacéutica, la de aleaciones de baja fusión y la de aditivos metalúrgicos.

La presencia del bismuto en Colombia ha sido reportada únicamente en dos localidades: una en el departamento de Nariño y la otra en el departamento de Norte de Santander, formando asociaciones con oro y plomo respectivamente; ninguna de las dos está en explotación y por consiguiente, el bismuto para el consumo nacional tiene que ser importado en su totalidad.

## INTRODUCCION

El bismuto, Bi, es un elemento metálico muy frágil, cristalino y de color blanco. Se encuentra en la naturaleza como metal libre y en forma combinada constituyendo algunos minerales como la bismutita ( $Bi_2S_3$ ) y la bismita ( $Bi_2O_3$ ), los cuales son considerados como las menas más importantes de este elemento. Estos dos minerales están ampliamente distribuidos en pequeñas cantidades a través de todos los continentes.

El bismuto funde a  $271.3^{\circ}C$ . y ebulle a  $1560(\pm 5)^{\circ}C$  y su gravedad específica es de 9,447 ( $20^{\circ}C$ ). En la antigüedad el bismuto fue confundido con el estaño y el plomo. Sin embargo, Claude Geoffroy El Joven demostró en 1753 que este elemento

era distinto del plomo. El bismuto es el más diamagnético de todos los metales y su conductividad del calor es una de las más bajas; posee una resistencia eléctrica muy alta, teniendo por consiguiente el más alto efecto Hall (alto incremento de resistencia eléctrica cuando se le coloca en un campo magnético) (WEAST, 1973).

El bismuto se expande 3,2% al solidificarse. Esta propiedad hace de las aleaciones con el bismuto muy útiles para objetos agudos sujetos a desgaste por altas temperaturas (WEAST, 1973).

La obtención del bismuto requiere de un proceso metalúrgico muy complicado. La mena se reduce en hornos especiales, con carbón o hierro, mezclándola con cenizas sódicas. Cuando el bismuto está asociado con el plomo, éste se disuelve en ácido clorhídrico formando un oxiclorigenato, el cual posteriormente se funde y se obtiene el bismuto como elemento (BATEMAN, 1942).

Los mayores productores de bismuto en el mundo occidental son: Perú, Japón, México, Bolivia, Estados Unidos y Canadá.

El bismuto también puede obtenerse como subproducto en la refinación del plomo, cobre, estaño y oro.

## USOS

El bismuto asociado con otros metales forma aleaciones de muy baja fusión, las cuales son extensamente usadas en sistemas automáticos de seguridad en la lucha contra los incendios. El bismuto se utiliza para obtener hierros maleables, y en la actualidad está encontrando uso como un catalítico para elaborar fibras acrílicas. También se emplea como un material termoensamblador (tiene la más alta negatividad conocida) y su encontrado aplicación como transportador del  $U^{233}$  y  $U^{235}$  los cuales constituyen la fuente energética de los reactores atómicos. Asimismo este elemento es altamente utilizado en las industrias de cerámica, textil y de cosméticos.

El futuro económico del bismuto parece bastante bueno, sin embargo, la demanda de este elemento depende directamente de la demanda de plomo en el sentido de que, si hay un incremento en la producción de plomo, habrá un incremento en la producción del bismuto.

## AMBIENTE GEOLOGICO

### GEOQUIMICA

El contenido de bismuto en la corteza terrestre es de 0,1 ppm. Posiblemente el material con más alta concentración de bismuto son los nódulos de manganeso del fondo oceánico, la cual varía de 0,5 a 24 ppm. En rocas sedimentarias, su contenido varía de 0,3 ppm en areniscas a 1 ppm en shales. Las rocas silíceas tienen una concentración entre 0,002 ppm y 0,3 ppm (HAWKES and WEBB, 1962).

El bismuto es calcófilo teniendo una fuerte afinidad por el azufre. Se precipita con mucha facilidad en forma de carbonato básico a partir de la descomposición hidrolítica de sales de bismuto en solución acuífera. El bismuto se concentra en la zona de oxidación de los sedimentos especialmente en presencia de hidróxido férrico. También se deposita asociado a los sul-

furos de hierro formados por reducción en los cienos bituminosos, y se le ha encontrado en los tejidos de algunos animales marinos (RANKAMA y SAHAMA, 1954).

## MINERALOGIA

Los principales minerales de bismuto son: bismuta u ocre de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), bismutin ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), tetradimita ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) y bismuto nativo (RUTLEY, 1948).

## TIPOS DE YACIMIENTOS

Debido a que el bismuto siempre se encuentra asociado con otros elementos como Ag, Au, Ni, Cu, Pb, Zn y Co, generalmente no se le explota como elemento principal, aunque hay excepciones muy importantes como es el caso de la mina Los Cóndores en la Argentina, donde bismuto nativo y bismutita se encuentran asociados a wolframita. De igual modo, el bismuto se obtiene como un subproducto de la minería del berilo en el área de Córdoba y San Luis (Argentina). En otros países este metal es extraído como producto secundario en la minería del estaño, tungsteno y molibdeno. Sin embargo, la gran mayoría del bismuto producido se obtiene en los procesos metalúrgicos de la refinación de menas de plomo, menas de cobre-plomo-zinc y menas de plata-cobalto-níquel.

Cuando el bismuto se encuentra como elemento fundamental, siempre se le ha visto asociado con rocas félsicas, considerándose que existe una gran afinidad entre este elemento y este tipo de rocas; así por ejemplo en el área de Cobalto (Canadá) hay una asociación de Ag-Co-Ni con bismuto y uranio, la cual puede ser anómala con respecto a su origen ya que la mayoría de las rocas ígneas en el área son diabasas, con las cuales se podrían relacionar estos depósitos. Sin embargo, esta anomalía puede ser aparente, ya que en zonas cercanas al área de Cobalto se presentan las mismas mineralizaciones asociadas con diabasas o granitos. Consecuentemente, es lógico suponer que estas mineralizaciones se emplazaron después que las rocas félsicas y que no están relacionadas con las diabasas (STANTON, 1972).

La mayoría del bismuto producido en los Estados Unidos proviene de depósitos hipogénicos, algunos de los cuales se formaron cerca a rocas ígneas intrusivas o directamente asociadas con ellas. También se conocen pequeñas bolsadas de menas de bismuto en diques pegmatíticos, en venas de cuarzo y en depósitos de metamorfismo de contacto. La asociación más importante es la que presentan los depósitos de reemplazamientos en calizas, la cual consiste en plomo-zinc-plata con bismuto tanto en la zona de oxidación como en la zona de sulfuros. Los depósitos de Leadville y Gilman en Colorado, Tintic y Little Cottonwood en Utah, Darwin en California, y Patagonia en Arizona, son muy buenos ejemplos de este tipo (HASLER, et al., 1973).

## TECNICAS DE PROSPECCION

Debido a que la principal producción de bismuto se obtiene como subproducto en la explotación de otros elementos, se ha investigado muy poco acerca de su prospección. Para incrementar la producción de bismuto debe orientarse una investigación hacia el mejoramiento de los actuales procesos de recuperación metalúrgica y hacia la explotación de los nódulos de manganeso del fondo marino como una fuente posible de producción.

## SITUACION MUNDIAL

## PRODUCCION

Sin lugar a dudas el incremento de US\$2.00 a US\$6.50/lb en 1984 estimuló a los productores a obtener una mejor refinación del bismuto. Parte de este incremento se obtuvo de metales almacenados; sin embargo la contribución del reciclaje de las sales redujo los catalizadores y la chatarra y al disminuir el precio, el tratamiento se hizo demasiado costoso; en consecuencia su refinación decayó (FICKLING, 1986).

Con excepción de las menas bolivianas, el bismuto se obtiene totalmente como un subproducto. Los bolivianos hicieron grandes esfuerzos en poner a producir la mina Iama y su planta Telemayo, pero la caída del precio en 1985 frustró todo intento. La otra fuente en Salsigne (Francia) hubiera entrado en producción si los precios de 1984 se hubieran sostenido, por consiguiente parece muy improbable que ésta entre en producción en un tiempo corto. Los mayores productores de bismuto en 1985 fueron Perú, México, Estados Unidos, Bélgica y Japón y en menor proporción Canadá, Corea del Norte, República de China, Bulgaria y Alemania Oriental.

## CONSUMO

El consumo del bismuto se incrementó durante 1983 - 1985 en comparación con los años anteriores, a medida que la industria universal se resarcía de la recesión económica mundial. Igualmente, nuevos productos con base en este metal fueron manufacturados con resultados satisfactorios. Indudablemente el bajo precio del metal estimuló su uso, ayudado además, por sus características no tóxicas y su bajo punto de fusión. Nuevamente los países del Bloque Este fueron compradores y consumidores muy importantes del Bloque Occidental. Asimismo, los productos farmacéuticos que contienen bismuto se recuperaron a partir de 1979. La maquinaria libre de aceros se constituyó en un importante factor de consumo desde 1982 y se espera un incremento mayor en los próximos años. El mercado tradicional para aleaciones de bajo punto de fusión, mostró una recuperación universal y el bismuto desplazó al plomo, cadmio y estaño.

Durante 1985 el consumo de bismuto se mantuvo constante en los Estados Unidos con 1200 t y en el Japón con 320 t; con datos de otros países se obtiene una cifra global de 3000 t, la cual fue inferior a 1984 con 3500 t.

## PRECIO

La compañía MCP-PELAD publicó un precio de oferta para Europa y USA de US\$ 2.30/lb, el cual permaneció estable durante 1983. El precio en el mercado libre promedió alrededor de US\$ 1.60/lb con tendencia a la alza y cerró a US\$ 1.80/lb. Esta tendencia continuó durante 1984 y en diciembre una libra de bismuto alcanzó un valor de US\$ 6.40. En el año de 1985 el bismuto sufrió una nueva caída y cerró a US\$ 3.60/lb. Sin embargo, en febrero de 1986 su precio descendió a US\$ 2.90 - 3.20/lb. Este descenso fue continuo y en noviembre llegó a US\$ 1.90 - 2.15/lb. No obstante se espera que en los próximos años el precio del bismuto se recupere.

Ministerio de Minas y Energía  
BIBLIOTECA

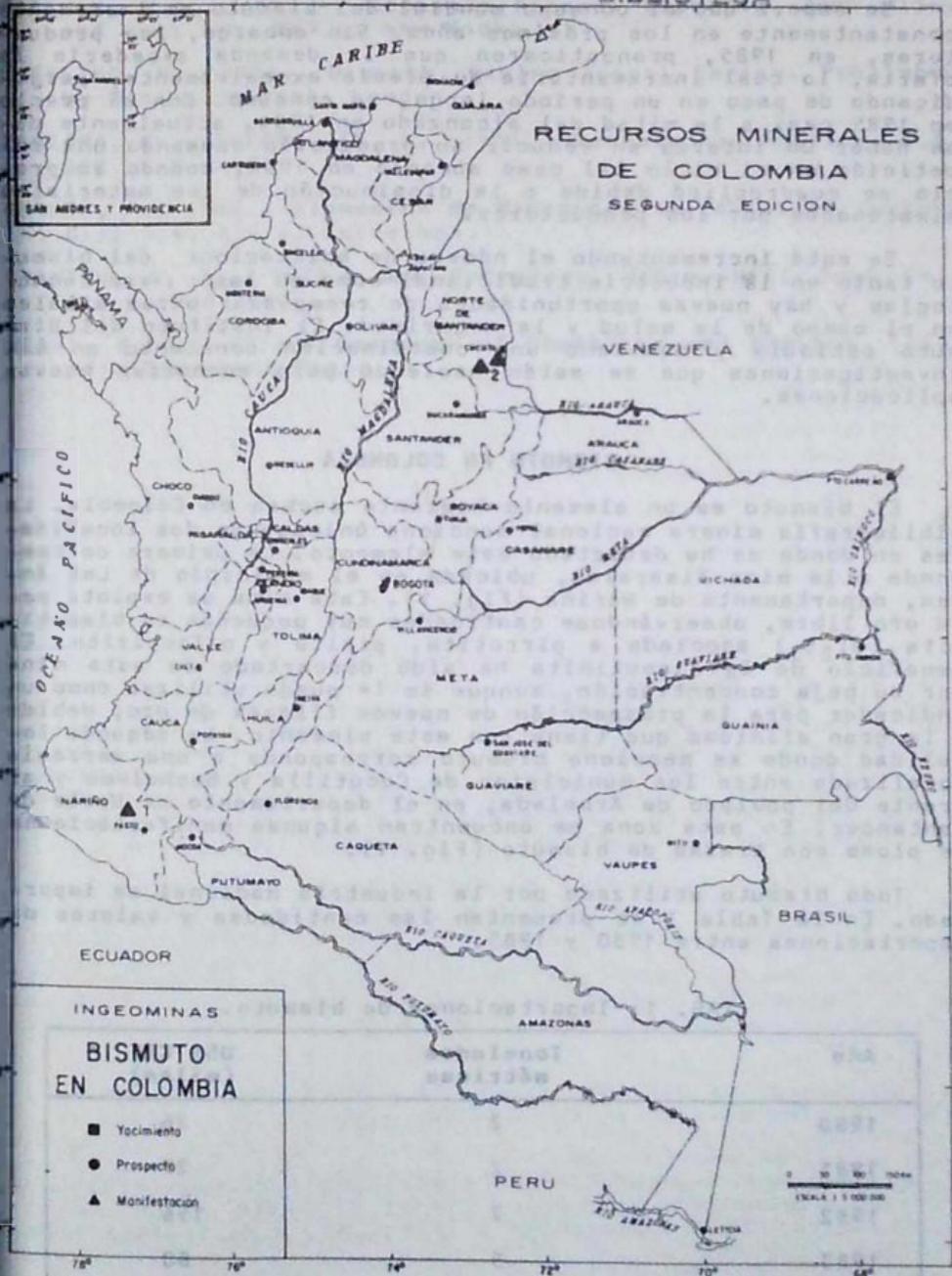


FIG. 1: Bismuto en Colombia. 1) Municipio Los Andes (Nariño), 2) Cucutilla y Bochalema (Norte de Santander).

## PERSPECTIVAS

Se espere que el consumo mundial del bismuto se incremente constantemente en los próximos años. Sin embargo, los productores, en 1985, pronosticaron que la demanda excedería la oferta, lo cual incrementaría su precio excesivamente, perjudicando de paso en un periodo largo, su consumo. Con el precio en 1985 casi a la mitad del alcanzado en 1984, actualmente debe haber un interés en reducir su producción causando una repetición en el ciclo tal como sucedió en 1984, cuando su precio se cuadruplicó debido a la disminución de los materiales almacenados por los productores.

Se está incrementando el número de aplicaciones del bismuto tanto en la industria tradicional como en las nuevas tecnologías y hay nuevas oportunidades de reemplazar otros metales en el campo de la salud y la seguridad. El Instituto del Bismuto estudia y mantiene una coordinación constante en las investigaciones que se estén haciendo para encontrar nuevas aplicaciones.

## BISMUTO EN COLOMBIA

El bismuto es un elemento bastante escaso en Colombia. La bibliografía minera nacional menciona únicamente dos localidades en donde se ha detectado este elemento. La primera corresponde a la mina Risarealda, ubicada en el municipio de Los Andes, departamento de Mariño (Fig. 1). Esta mina se explota para oro libre, observándose cantidades muy pequeñas en bismutinita ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ) asociada a pirrotita, pirita y calcopirita. El beneficio de la bismutinita ha sido descartado en esta mina por su baja concentración, aunque se le puede utilizar como un indicador para la prospección de nuevos filones de oro, debido a la gran afinidad que tiene con este elemento. La segunda localidad donde se menciona bismuto corresponde a una serranía localizada entre los municipios de Cucutilla y Bochalema y el frente del poblado de Arboleda, en el departamento de Norte de Santander. En esta zona se encuentran algunas manifestaciones de plomo con trazas de bismuto (Fig. 1).

Todo bismuto utilizado por la industria nacional es importado. En la Tabla 1 se presentan las cantidades y valores de importaciones entre 1980 y 1985.

TAB. 1: Importaciones de bismuto.

Año	Toneladas métricas	US\$ CIF (miles)
1980	2	26
1981	2	29
1982	7	156
1983	5	80
1984	1	1
1985		

## BIBLIOGRAFIA

- BATEMAN, M.A., 1942.- **Economic Mineral Deposits.** John Wiley and Sons Inc. 989 p. New York.
- FICKLING, M., 1986.- **Bismuth.** Mining Annual Review. Published by Mining Journal. London.
- RANKAMA, K. y SAHAMA, TH. G., 1954.- **Geoquímica.** Aguilar, S.A. 862 p. Madrid.
- RUTLEY, F., 1948.- **Elementos de Mineralogía.** Editorial Gustavo Gili S.A. 475 p. Barcelona.
- STANTON, R. L., 1972.- **Ore Petrology.** McGraw-Hill Book Co., 713 p. New York.
- WEAST, R. C., 1973.- **Handbook of Chemistry and Physics.** (45a. ed): Cleveland Press.

## MINERALES DE CADMIO

EDUARDO ALBERTO CARDOZO PUENTES

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	100
Introducción.....	101
Usos.....	101
Ambiente Geológico.....	103
Geoquímica.....	103
Mineralogía.....	103
Tipos de Yacimientos.....	104
Beneficio y Metalurgia.....	105
Situación Mundial.....	105
Reservas.....	105
Producción.....	106
Consumo.....	108
El Cadmio en Colombia.....	110
Depósitos.....	110
Comercio.....	110
Bibliografía.....	112

## RESUMEN

El cadmio es un metal relativamente escaso en la naturaleza, blando, de color blanco plateado, dúctil y maleable. Tiene diversas aplicaciones de las cuales las principales son: como revestimiento o galvanizado de otros metales o del acero para prevenir la corrosión; como pigmento colorante de plásticos, pinturas, cerámicas y esmaltes vítreos; como estabilizador del polivinil cloruro; como uno de los materiales activos de los electrodos en las baterías de níquel-cadmio y como constituyente de gran cantidad de aleaciones especiales.

No existe minería para cadmio en razón a que sus minerales independientes, los sulfuros greenockita y hawelita, no son lo suficientemente abundantes en la naturaleza.

Por tanto la principal fuente de cadmio es la mena de zinc de la cual se obtiene como un subproducto de recobro de la fundición de concentrado de zinc y de la refinación de metal de zinc.

Los depósitos más importantes de zinc (y por ende de cadmio) se pueden agrupar en dos grandes tipos:

- 1) Depósitos no necesariamente restringidos a rocas sedimentarias entre los cuales se tiene: a) Skarn de Pb-Zn, b) Depósitos de reemplazamiento irregular, y c) Depósitos de vena.
- 2) Depósitos localizados dentro de secuencias estratificadas de rocas sedimentarias o volcánicas, o depósitos estratocónfinados. De éstos últimos se extrae la mayor cantidad de Zn en el mundo.

El cadmio es un agente de polución ambiental de primer orden y por esta razón, día a día en muchos países industrializados aumentan las restricciones sobre la cantidad que puede ser emitida al medio ambiente.

### INTRODUCCION

El cadmio fue descubierto en 1817 por Stromeyer, en Gotingen, Alemania, como una impureza de un carbonato farmacéutico de zinc el cual, al ser quemado, inesperadamente produjo un óxido pardusco a pesar de no poseer hierro. Casi al mismo tiempo Hermann encontró cadmio en un óxido de zinc, cuando al tratar su solución con sulfuro de hidrógeno produjo un precipitado amarillo en vez de blanco; éste sin embargo, había sido confiscado en Magdeburg bajo la sospecha de contener arsénico. Al nuevo elemento se le dió el nombre de cadmio, debido a su frecuente ocurrencia en el óxido de zinc (el cual fue conocido por los antiguos griegos bajo el nombre de Kadmeia).

El cadmio es un metal de color blanco plateado, blando (dureza 2 en la escala de Mohs) dúctil y maleable. En contacto con el aire se oxida rápidamente, perdiendo su brillo metálico y formando una pátina de óxido de cadmio. Su número atómico es 48 y peso atómico 112.40; el peso de sus isótopos estables y sus proporciones es como sigue:

<u>Isotopo</u>	<u>Porcentaje</u>
Cd <sup>108</sup>	1.27%
Cd <sup>109</sup>	.88%
Cd <sup>110</sup>	12.39%
Cd <sup>111</sup>	12.75%
Cd <sup>112</sup>	24.07%
Cd <sup>113</sup>	12.26%
Cd <sup>114</sup>	28.86%
Cd <sup>116</sup>	7.58%

La densidad del cadmio es de 8,65 gramos por centímetro cúbico a 20°C; punto de fusión 321°C y punto de ebullición 765°C; arde con facilidad en el aire y al rojo, descompone el agua.

Tiene una valencia de +2 y un radio iónico de 0.97Å. Pertenece al Grupo IIB de la Tabla Periódica junto con el zinc y el mercurio, razón que explica su similitud con estos metales. De hecho, las propiedades del cadmio son tan semejantes a las del zinc que ambos elementos se encuentran invariablemente juntos.

### USOS

El cadmio tiene numerosas aplicaciones, de las cuales las principales son: como revestimiento o galvanizado de otros metales o del acero, para prevenir la corrosión; como pigmento colorante de plásticos, pinturas, cerámicas y esmaltes vítreos; como estabilizador del polivinilcloruro; como uno de los materiales activos de los electrodos en las baterías de níquel-cadmio y como constituyente de gran variedad de aleaciones especiales.

Por muchos años la galvanoplastia fue el principal empleo del cadmio; sin embargo, esta utilización ha decrecido paulatinamente en la medida en que se han hecho más costosas las

controles sobre las emanaciones producidas por los procesos de esta índole. De igual forma, cada día aumentan las restricciones en ciertos países sobre el empleo de productos galvanizados con cadmio. A pesar de estos inconvenientes, los revestimientos con cadmio ofrecen ventajas definidas sobre otros materiales en ciertas áreas de uso.

El cadmio se puede aplicar tanto eléctrica como mecánicamente a altas tasas, logrando un espesor uniforme sobre objetos de formas intrincadas. Posee resistencia superior a los ambientes alcalinos y excelente resistencia al agua marina y las atmósferas tropicales. Además se puede lograr una igual protección con un menor espesor de cadmio que con un recubrimiento de zinc. El cadmiado consiste en el revestimiento electrolítico de una pieza metálica con cadmio para evitar la corrosión atmosférica.

En la industria del transporte se emplea en el galvanizado de cerrojos y en partes del carburador y del magneto. Otros usos en galvanoplastia incluyen revestimiento de herramientas de arquitectura y de precisión, herramientas electrónicas y maquinaria industrial.

El principal empleo de los compuestos de cadmio es la elaboración de pigmentos y pinturas que se caracterizan por su alta resistencia a la corrosión. Los colores en la gama de amarillo se elaboran con sulfuros de cadmio-zinc y los colores en la gama amarillo-rojo son producidos por sulfuros y seleniuros de cadmio. El empleo de pigmentos que contienen cadmio ofrece ventajas especiales en la industria. Así, su alta estabilidad al calor (arriba de  $600^{\circ}\text{C}$ ) los hace particularmente adecuados en el moldeado de plásticos de altas temperaturas. Estos pigmentos son también buenos reflectores de la luz y son estables contra el intemperismo. Los compuestos de cadmio se usan también como pigmentos en plástico, pinturas, esmaltes, lecas y tintas de impresión.

En la industria del plástico y productos sintéticos los compuestos de cadmio tienen también amplia utilización como compuestos estabilizadores tanto de la forma rígida como de la forma flexible del polivinil cloruro, para impedir la degradación del plástico durante su proceso, como posteriormente, durante su exposición a la luz ultravioleta. Los esteratos de cadmio junto con compuestos de bario y zinc se emplean como estabilizadores de calor y como clarificadores. En razón de su alta toxicidad el cadmio no se usa en plásticos para envases de alimentos.

Un importante renglón en el empleo del cadmio en su consumo en la industria de baterías recargables de níquel-cadmio. En este renglón el cadmio actúa como uno de los elementos activos de los electrodos. Estas ofrecen ventajas excepcionales sobre otras pues son de larga vida, tienen buen funcionamiento en un amplio rango de temperaturas, dan el máximo de operación y baja caída de voltaje, tiene bajos costos de operación y baja tasa de autodescarga. Celdas selladas se utilizan en calculadoras porta-recargables, herramientas accesorios, radios y teléfonos. Las células mayores con selenio se utilizan en aviación como fuentes auxiliares de energía para iluminación.

El cadmio también se usa en tubos fluorescentes de fósforo y tubos de imagen de televisión; en catálisis para la producción de alcoholes primarios y ésteres; tiene también un

importante aplicación en la tecnología de reactores nucleares para fabricar las barras de control, dada su capacidad de captura neutrónica (para el isótopo  $Cd^{113}$ , la sección eficaz de captura de neutrones térmicos es de  $2.10^4$ b).

En conclusión la amplia variedad de usos del cadmio, lo hace un tema atractivo de discusión, partiendo del principio de que en Colombia hay importantes industrias establecidas que indudablemente lo requerirán. Sin embargo, se debe estar alerta en su utilización pues, por su alta toxicidad, ha sido declarado elemento peligroso para el medio ambiente en Estados Unidos, y puede darse el caso que poco a poco vaya siendo sustituido por otros elementos en los países industrializados. Pero si se tiene en cuenta que la industria instalada para su recuperación no se puede desmontar fácilmente, su producción puede ser desviada hacia los países subdesarrollados, como es el caso de muchos herbicidas, plaguicidas, medicamentos, ropas, etc., que están prohibidos en países industrializados pero que son de consumo corriente en Latinoamérica.

## AMBIENTE GEOLOGICO

### GEOQUIMICA

Químicamente el cadmio es muy similar a los otros dos elementos de su grupo en la Tabla Periódica: el zinc y el mercurio. Esta similitud justifica su relativa concentración en los minerales de zinc a pesar de poseer un radio iónico mucho mayor (0.97Å vs 0.74Å); sin embargo, el cadmio es relativamente más sulfófilo que el zinc y de ahí que se concentre más en los estadios finales de la diferenciación magmática, con sus menas hidrotermales asociadas. Mayor concentración aún presentan los ambientes sedimentarios reductores de baja temperatura (WEDDOW, 1973).

### MINERALOGIA

Existen muy pocos minerales independientes de cadmio; los principales son los sulfuros greenockita y hawleyita ( $CdS$ ) ninguno de los cuales es suficientemente abundante para ser considerado mena de cadmio.

Estos dos minerales son isoestructurales con la wurtzita y la esfalerita respectivamente y existe una completa solución sólida entre ellos.

Asimismo, la otavita (carbonato anhidro de cadmio,  $CaCO_3$ ) es la forma análoga de cadmio de la smithsonita,  $ZnCO_3$ .

El metal en estado nativo es desconocido. El óxido de cadmio natural ( $CdO$ ), sólo ha sido encontrado en Sardinia como una fina capa sobre hemimorfita.

El más común de los minerales independientes de cadmio es la greenockita, que ocurre comúnmente como una eflorescencia terrosa de color amarillo o como una pátina de alteración sobre minerales de Zn, principalmente esfalerita. Se presenta en cristales del sistema hexagonal, dihedral-pirámidal. Cristales raros y pequeños que usualmente termina abajo en pedión y arriba en pirámide. Sus propiedades físicas son: dureza, 3; gravedad, 4.9; lustre adamantino a resinoso terroso. Su color varía de amarillo a amarillo naranja y rojo ladrillo.

## TIPOS DE YACIMIENTOS

El cadmio se encuentra invariablemente en los depósitos de zinc. En éstos, que ocurren en diversos ambientes geológicos, se tiene como regla general que su temperatura de formación tiene que ver parcialmente sobre la concentración de cadmio. De ahí que, por regla general, los depósitos de metamorfismo de contacto y reemplazamiento que se forman a relativas altas temperaturas, presentan un menor contenido de cadmio que las menas hidrotermales intermedias y que los depósitos del tipo sedimentario (LUCAS, 1980).

De acuerdo con esta premisa, tratar los depósitos de cadmio es tratar los distintos depósitos de zinc. De forma general los depósitos de zinc se puede agrupar en dos grandes grupos: a) Depósitos no necesariamente restringidos a rocas sedimentarias, y b) Depósitos localizados dentro de secuencias estratificadas de rocas sedimentarias o volcánicas o depósitos estratoconfinados.

### DEPOSITOS NO NECESARIAMENTE RESTRINGIDOS A ROCAS SEDIMENTARIAS

Este grupo incluye los siguientes tipos:

1. Depósitos de plomo zinc de pirometamorfismo de contacto (skarn).
2. Depósitos de reemplazamiento, de distribución irregular.
3. Venas de plomo, zinc y otros metales.

### DEPOSITOS ESTRATOCONFINADOS

Son depósitos localizados dentro de secuencias estratificadas de rocas sedimentarias o volcánicas. Este tipo de depósito da cuenta por las mayores cantidades de zinc y cadmio explotadas en el mundo.

En general, aunque los depósitos ocurren en diversas situaciones tectónicas, la mayor parte presentan tectónica local extensional asociada con un adelgazamiento de la corteza.

Asimismo, aunque en las soluciones mineralizantes puede haber un componente magmático, este puede no representar la parte principal.

Dentro de los depósitos estratoconfinados se incluyen los siguientes tipos:

- Cobre - zinc - plomo en vulcanitas félsicas e intermedias (Ej. Kuroko).
- Cobre-zinc en vulcanitas máficas (Ej. Chipre).
- Plomo-zinc exhalativo en sedimentitas de origen marino (McArthur River).
- Plomo-zinc en carbonatos (Ej: Missisipi Valley).
- Plomo (zinc) en arenitas (Ej: Morocco).

Estos depósitos son tratados en el Capítulo referente al Zn.

## BENEFICIO Y METALURGIA

No existe minería para cadmio en razón a que los minerales independientes de cadmio, los sulfuros greenckita y hawellita, no son suficientemente abundantes en la naturaleza.

La principal fuente de cadmio comercial es la mena de zinc, y el cadmio es, de hecho, el principal subproducto de recobro de la fundición de concentrado de zinc y de la refinación de metal de zinc.

El cadmio y sus compuestos generalmente, tienen puntos de fusión y de ebullición más bajos que los del zinc y sus compuestos análogos; más aún, el óxido de cadmio se puede reducir más fácilmente que el óxido de zinc. Estas diferencias constituyen las bases para el recobro del cadmio como un subproducto de la fundición de zinc.

Este recobro involucra varios procesos: durante el horneado y sintéresis de los concentrados de zinc el cadmio se volatiliza y los vapores y polvo resultantes se colectan como polvos de chimenea en precipitadores electrostáticos. El contenido inicial de cadmio en estos polvos de chimenea es aproximadamente del 10%. El vapor puede ser beneficiado para producir un polvo de chimenea rico en cadmio mediante revolatilización, en condiciones controladas en un horno reverberatorio.

En el método electrolítico de producción de zinc, el concentrado horneado y el polvo de chimenea colectado son precipitados con ácido sulfúrico y se precipita un residuo de zinc-cadmio por adición de polvo de zinc. Los vapores o residuos pueden alcanzar de 5 a 50% de cadmio.

Todo el proceso final de recobro de cadmio comprende la disolución del material portador de cadmio, seguido por varios pasos de purificación y desplazamiento.

Los métodos de transformación se pueden agrupar en dos sistemas: a) electrolítico, en el cual el cadmio es recobrado por electrólisis de soluciones purificadas, y b) electromotor, por el cual el metal de cadmio (cadmio metálico) en la forma de esponja es desplazado de las soluciones purificadas por polvo de zinc. La esponja puede ser transformada en briquetas y llevadas a una retorta, para beneficio por destilación y entonces refundida o moldeada en formas (presentaciones). Alguna parte de la esponja es usada directamente en compuestos de cadmio.

## SITUACION MUNDIAL

### RESERVAS

La Tabla 1 tomada de Lucas, 1980, resume los cálculos hechos para esa fecha como reservas de cadmio en el mundo.

TAB. 1: Reservas de cadmio en el mundo (miles de metros cúbicos).

PAIS	RESERVAS <sup>1</sup>	OTROS <sup>2</sup>	TOTAL
<b>Norte América</b>			
Estados Unidos	55	165	
Canadá	75	120	220
México	20	5	195
Otros	10	ND	25
Total	160	290	10
	=====	=====	450
<b>Sur América</b>			
Perú	35	20	
Brasil	40	15	55
Otros	10	5	55
Total	85	40	15
	=====	=====	125
<b>Europa</b>			
Irlanda	50	10	
España	10	10	60
Unión Soviética	45	45	20
Yugoeslavia	10	10	90
Otros	55	15	20
Total	170	90	70
	=====	=====	260
<b>África</b>			
República de Sur Africa	50	30	80
África Sur Occidental (territorio de Namibia)	10	10	20
Zaire	5	5	10
Otros	10	15	25
Total	75	60	155
	=====	=====	=====
<b>Asia</b>			
China Continental	20	10	30
India	10	5	15
Japón	20	5	25
Otros	50	20	70
Total	100	40	140
	=====	=====	=====
<b>Oceanía</b>			
Australia	55	80	135
Otros	ND	ND	ND
Total en el Mundo	645	600	1.245
	=====	=====	=====

1. Datos de U.S. Geological Survey y basados en los recursos de zinc. Incluye reservas medidas e indicadas.

2. Incluye reservas inferidas y algunos recursos económicos pero hipotéticos, en distritos conocidos y algunos identificados como sub-económicos.

ND. Sin datos disponibles.

## PRODUCCION

Aunque el cadmio fue descubierto en 1817, su uso comercial sólo comenzó desde 1870. Todo el cadmio comercial utili-

zado al finalizar el siglo XIX se produjo en las minas del distrito plomo-zinc de Silesia Superior, que por esa época pertenecía a Alemania, pero que después de la I Guerra Mundial pasó a Polonia.

La producción (germánica) acumulada, y de aquí toda la producción mundial, en el siglo XIX alcanzó la cifra de 115 toneladas métricas. Los Estados Unidos comenzaron a extraer cadmio de las minas de zinc del distrito de Joplin, Missouri, en 1906.

Los datos de producción mundial de cadmio (Tabla 2) indican un crecimiento acelerado desde el siglo pasado hasta la década del 70 del presente siglo; a partir de entonces la producción se ha estabilizado dentro del límite 17 a 18 mil toneladas métricas, al tiempo que la producción de Estados Unidos ha mostrado notable disminución:

TAB. 2: Producción mundial de cadmio y participación de Estados Unidos.

Año	Total Mundial Ton./métrica	Producción de EE. UU.	% de partici- pación pro- ducción de EE. UU.
1882	3.5	0	0
1900	13.5	0	0
1907		6	2
1917		112	0
1935	3.150	1800	57.1%
1970	16.500	4300	27%
1980	17.231	1578	9%
1983*	17.364	1052	6%

\* Estimada

El cadmio se obtiene casi exclusivamente como subproducto de la producción de zinc, en un promedio aproximadamente de 3 kg de cadmio por cada tonelada de zinc producido. Es así como las fluctuaciones en la producción de zinc reflejan consecuentemente fluctuaciones en la producción de cadmio.

Este caso se observa claramente en la actualidad. De hecho, las estadísticas reflejan un incremento en la producción de ambos metales en un 7% sobre la producción de 1982. Wilson, (1984).

En general, la producción y el consumo de cadmio en todo el mundo está en un estrecho balance. La Tabla 3 muestra de manera completa la producción mundial de cadmio por país, para los últimos cinco años. Como aspecto importante se observa que la producción mundial para este lapso presenta sólo leves fluctuaciones, ubicándose en un valor aproximado de 17.000 toneladas métricas por año.

En esta tabla se presentan los valores de la producción en bruto de menas, concentrados, polvo de chimenea, y otros materiales tanto de origen doméstico como de importaciones. Las fuentes no indican si los valores o parte de ellos se originan por recuperación secundaria (chatarra). Ha sido extractada de Plunkert (1983), quien a su vez la elaboró con información obtenida de World Metal Statistics (publicado por World Bureau of Metallgesellschaft Aktiengesellschaft, Frankfurt am Main).

TAB. 3: Producción mundial de cadmio por país (Toneladas métricas). Tomada de Plunkert, 1983.

PAIS	1979	1980	1981	1982*	1983*
Argelia	64	60	65*	65	65
Argentina	36	18	-	21	19
Australia (refinado)	804	1.012	1.031	1.010	1.000
Austria	34	36	55	48	50
Bélgica	1.440	1.527	1.176	1.001	1.100
Brasil	21	41	45	70	60
Bulgaria*	210	200	200	200	200
Canadá (refinado)	1.455	1.303	1.298	809	1.107
China*	250	250	270	300	300
Finlandia	590	581	621	566	566
Francia	689	789	663	803	803
R.F.A.*	15	16	16	16	16
R.D.A.	1.266	1.194	1.192	1.030	1.000
India	166	89	113	131	115
Italia	527	568	482	515	500
Japón	2.597	2.163	1.977	2.034	2.200
Korea del Norte	150	140	140	100	100
República de Korea	50	365	300	320	300
México (refinado)	830	778	590	607	900
Namibia	81	69	-	110	25
Holanda	416	455	518	485	480
Noruega	115	130	117	104	104
Perú	190	172	307	421	400
Polonia	773	698	580	570	570
Rumania	90	85	85	80	80
España	222	309	303	289	280
Unión Soviética	2.580	2.850	2.900	2.900	3.000
Reino Unido	424	375	278	354	380
Estados Unidos	1.823	1.578	1.603	1.007	1.052
Yugoeslavia	289	201	208	205	200
Zaire	212	168	230	281	285
Zambia	-	1	1	-	-
TOTAL	18.679	18.221	17.364	16.452	17.257

\* Estimada

Según estadísticas de la Compañía Amax Zinc Company Inc se registraron los siguientes precios en dólares por libra de metal de cadmio para 1983:

Enero-Mayo,	1.00
Mayo-Agosto,	1.15
Agosto-Diciembre,	1.25

Los precios comerciales registrados se distribuyen así:

Enero,	0.65 - 0.70
Septiembre,	0.90 - 0.97
Diciembre,	0.90 - 0.95

## CONSUMO

Según datos de Wilson, 1984, el consumo de cadmio en los países occidentales durante 1983 fue de 13.500 toneladas aproximadamente. Esta cifra refleja un aumento del 5% con respecto al año inmediatamente anterior, al tiempo que se equipara con el 7% de incremento en la producción para ese periodo. Estas cifras demuestran que la producción y el consumo están

en estrecho balance, a nivel mundial.

La distribución de los porcentajes mayores de consumo se muestra en la Tabla 4.

TAB.4: Distribución de los porcentajes mayores de consumo de cadmio.

PAIS	CONSUMO	PORCENTAJE
Estados Unidos	4.000	30
Bélgica	1.800	13
Japón	1.500	11
R.F.A.	1.500	11
R.U.	1.375	10
Otros Países Occidentales	3.325	24

Datos globales de 1978-1979 (LUCAS, 1980) indican que Estados Unidos, Unión Soviética, República Federal Alemana, Bélgica, R.U. y Japón consumieron 80% de la producción total para ese período.

#### CONSUMO POR AREAS DE UTILIZACION

Wilson (op. cit) presenta datos de los cuatro países que consumen tres cuartas partes del cadmio en el hemisferio occidental (Tab. 5). De otros países no se conocen estadísticas confiables o simplemente no se dan a conocer, como es el caso de los países socialistas.

TAB.5: Uso de cadmio de los principales consumidores en el Hemisferio Occidental.

PAIS	USO	% TOTAL DE CADMIO
EE. UU., R.F.A., Japón y R.U.	Galvanoplastia	28
	Pigmentos	25
	Estabilizadores (de plásticos)	12
	Baterías	29
	Aleaciones	5

#### SUSTITUTOS

En galvanoplastia el zinc puede ser sustituido por cadmio excepto para aplicaciones en ambientes alcalinos, donde la placa debe ser excepcionalmente fina, o donde la soldabilidad o ductibilidad de la superficie galvanizada es un factor importante.

El futuro para los pigmentos de cadmio, a diferencia de la galvanoplastia, es prometedor, puesto que éstos ofrecen ventajas técnicas que no tiene cualquier otro sistema de colorantes.

En pinturas y pigmentos los mejores sustitutos del cadmio son otros compuestos inorgánicos. El óxido férrico hidratado y los cromatos de plomo y zinc pueden ser sustitutos para la gama del amarillo. Sin embargo a estos compuestos les falta estabilidad al calor, propiedad especialmente importante en el moldeado de plásticos de alta temperatura. En la gama del rojo

el óxido férrico puede substituir al cadmio pero a sus tintes, les falta brillo.

Las sustancias más eficientes conocidas como estabilizadores de plásticos son los compuestos de estaño (organotín). Sin embargo, debido a sus altos costos, se prefieren los compuestos de cadmio.

Las baterías ácido-plomo son el sustituto de más bajo costo de las baterías de cadmio. Las baterías ácido-plomo son fácilmente recargables y tienen más capacidad por unidad de peso que las baterías níquel-cadmio. Las baterías de cadmio generalmente son más seguras y tienen mayor duración.

Para aleaciones con bajos puntos de fusión metales como bismuto, estaño, galio e indio, pueden servir como sustitutos. En aleaciones intermedias (bracing alloys), níquel, estaño, e plata; en soldaduras, las aleaciones estaño-zinc pueden ser sustitutos.

## EL CADMIO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

En Colombia, de acuerdo con Albers, et al. (1983) las calizas de la Formación Payandé y otras formaciones mesozoicas en la parte sur de la Cordillera Central, constituyen un ejemplo en el Dominio 8 (Fig. 1), que incluye los terrenos Cajamarca, Payandé Garzón, Caquetá y Amazonas (ETAYO et al., 1983). Ejemplo de skarn Zn se encuentra en El Sapo, Mocoa, Suspiro y Las Palmitas, en el Huila.

No se conocen datos sobre cadmio en depósitos de reemplazamiento de distribución irregular en Colombia.

En los depósitos de vena (plomo-zinc) no existe información sobre cadmio en el país.

En cuanto al cadmio en depósitos estratoconfinados, en los del tipo plomo-zinc exhalativo hospedados en sedimentitas de origen marino, el mejor prospecto es el de la cuenca de Cundinamarca (Fig. 1), cuyos depósitos evaporíticos y finogranulares del Cretácico inferior, aparentemente estuvieron acompañados por fallamiento e intrusiones de diques basálticos (ETAYO, et al., 1973; FABRE y DELALOYE, 1983 en ALBERS et al., 1983).

En los de tipo plomo-zinc en carbonatos, se puede mencionar como prospecto los depósitos samíticos (Paleozoicos) de cobertura, que suprayacen el basamento cristalino en el Dominio 28, Araracuara (ALBERS, et al., 1983).

### COMERCIO

En la Tabla 6 se presentan las importaciones de cadmio en los últimos años. No se tienen datos de producción, ni de exportaciones de este metal o de sus minerales.

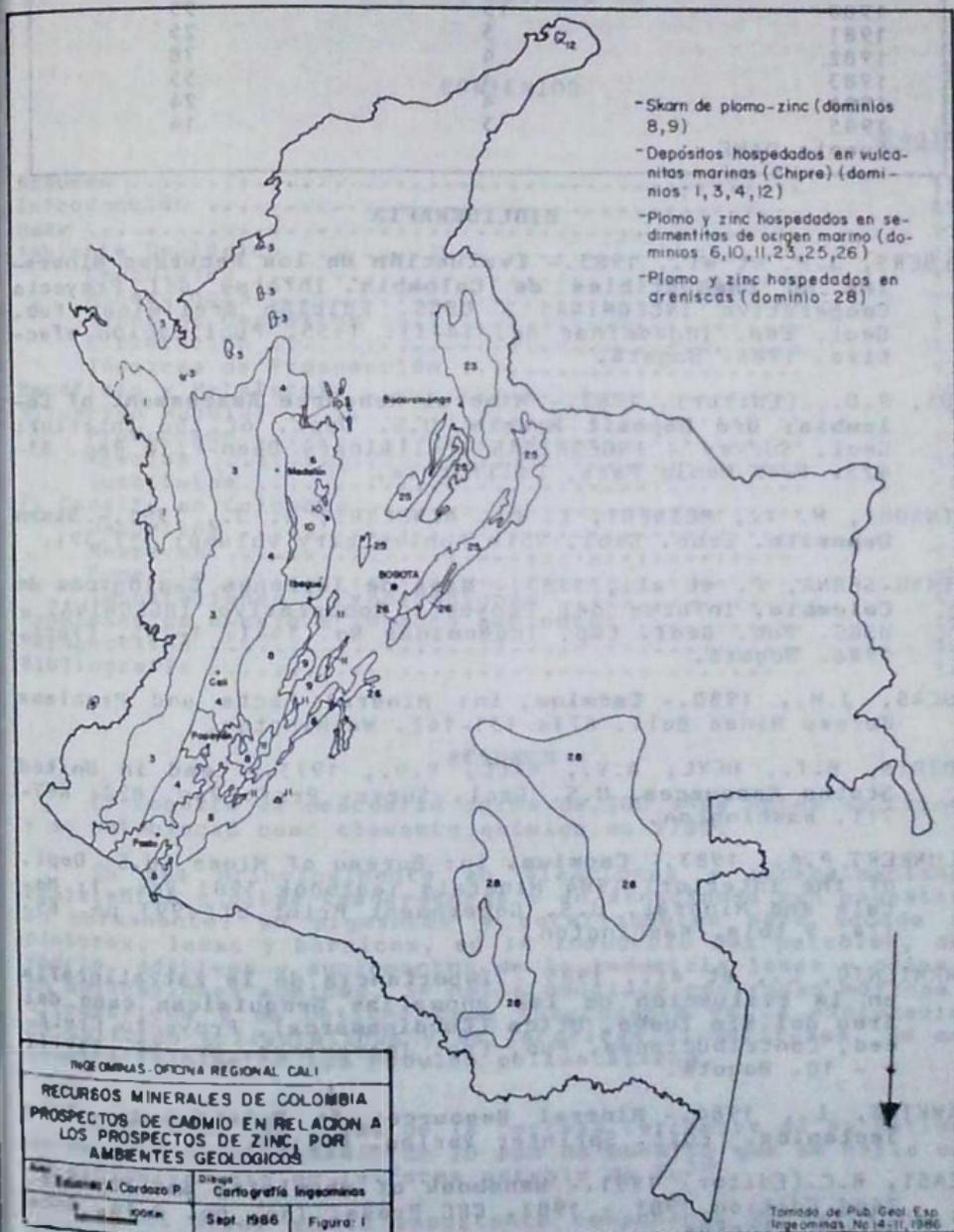


FIG. 1: Prospectos de cadmio en relación a los prospectos de zinc, por ambientes geológicos.

TAB. 6: Importaciones de Cadmio.

Año	Ton./métricas	US\$ CIF(en miles)
1980	15	95
1981	5	25
1982	4	78
1983	3	55
1984	4	24
1985	3	14
Fuente:DANE		

## BIBLIOGRAFIA

- ALBERS, J.P. et al., 1983.- Evaluación de los Recursos Minerales no Combustibles de Colombia. Informe del Proyecto Cooperativo INGEOMINAS - USGS. Edición preliminar Pub. Geol. Esp. Ingeominas No. 14-II: 1:55. Publicación efectiva. 1986. Bogotá.
- COX, P.D., (Editor), 1983.- Mineral Resource Assessment of Colombia: Ore Deposit Models. U.S. Dept. of the Interior; Geol. Survey - INGEOMINAS preliminary Open-File Rep. 83-423: 1-49 Menlo Park, California.
- EINAUDI, M. T., MEINERT, L. D., NEWBERRY, R. J., 1981.- Skarn Deposits. Econ. Geol. 75th Anniversary volume: 317-391.
- ETAYO-SERNA, F. et al., 1983.- Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Informe del Proyecto Cooperativo INGEOMINAS - USGS. Pub. Geol. Esp. Ingeominas No. 14-I: 1-235. Efect. 1986. Bogotá.
- LUCAS, J.M., 1980.- Cadmium. in: Mineral Facts and Problems Bureau Mines Bull. 671: 131-142. Washington.
- MORRIS, H.T., HEYL, A.V., HALL, R.B., 1973.- Lead in United States Resources. U.S. Geol. Survey Prof. Pap. 820: 697-711. Washington.
- PLUNKERT, P.A., 1983.- Cadmium. in: Bureau of Mines (U.S. Dept. of the Interior) 1984 Minerals Yearbook 1983 Vol. 1: Metals and Mineral. U.S. Government Print off 993 pp. 69-174, 9 tabs. Washington.
- SARMIENTO, L., et al., 1985.- Importancia de la Estratigrafía en la evaluación de las anomalías Geoquímicas caso del área del Río Zumbá, Utiaca (Cundinamarca). Proyecto Cretáceo, Contribuciones. Pub. Esp. Ingeominas, No. 16, XXVIII 5 - 10. Bogotá.
- SAWKINS, L., 1984.- Mineral Resources in Relation to plate Tectonics. Edit. Springer Verlag. Berlin.
- WEAST, R.C.(Editor) 1981.- Handbook of chemistry and Physics. 26nd Edition 1981 - 1982. CRC Press, Inc. pp. B-14. Boca Raton, Florida.
- WEDON, H. Jr., 1973.- Cadmium. in: United States Resources: U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.820:105-109. 4 tabs. Washington.
- WILSON, D.N., 1984.- Electronic Metals and Minerals. Mining Annual Review (June 1984). Mining Journal Ltd. London.

## MINERALES DE COBALTO

EDUARDO ALVAREZ G.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	113
Introducción .....	114
Usos .....	114
Ambiente Geológico .....	114
Geoquímica .....	115
Mineralogía .....	115
Tipos de Depósitos .....	116
Explotación .....	117
Técnicas de Prospección .....	117
Beneficio y Metalurgia .....	117
Situación Mundial .....	117
Producción .....	117
Precios .....	117
Sustitutos .....	119
El Cobalto en Colombia .....	119
Depósitos .....	119
Reservas .....	119
Comercio .....	121
Importaciones y Exportaciones .....	121
Problemas de manejo e impacto ambiental .....	121
Perspectivas .....	121
Bibliografía .....	122

## RESUMEN

El cobalto se descubrió cerca de 200 años Antes de Cristo y se estableció como elemento químico en 1780.

Se usa principalmente en aleaciones y superaleaciones resistentes a altas temperaturas y en aleaciones con magnetismo permanente; en pigmentos y catalizadores para secado de pinturas, lacas y barnices, en la industria del petróleo, del vidrio, aditivos y suplementos de la industria lanar y ovina y en aplicaciones médicas. Se halla asociado con rocas máficas y ultramáficas y se obtiene como subproducto en la explotación de sulfuros polimetálicos y de lateritas níquelíferas. Se encuentra también en los nódulos polimetálicos.

Dentro de las rocas de la corteza terrestre se ha estimado un contenido promedio de 20 ppm de cobalto que se halla casi exclusivamente en la forma estable de  $\text{Co}^{59}$ .

Es el mayor y más importante componente de cerca de 70 minerales y aparece como elemento menor o traza en muchos otros.

En Colombia su ocurrencia y explotación están ligadas a la explotación de pequeños depósitos aislados de sulfuros y a la extracción y beneficio de las lateritas níquelíferas de Cerro Matoso de las cuales se obtiene como subproducto.

La producción mundial para 1983 se calculó en 24.127,5 toneladas de metal.

Las reservas y la producción nacional se desconocen totalmente. Las únicas fuentes posibles de cobalto estudiadas sistemáticamente son los depósitos lateríticos del Departamento de Córdoba y las lateritas del Valle del río Medellín. La extracción de cobalto depende del rendimiento económico que pueda ofrecer la minería del níquel, pues sólo se obtiene como subproducto.

Las importaciones están controladas por el gobierno nacional. El ingreso de cobalto para usos médicos o investigativos está controlado por el IAN (Instituto de Asuntos Nucleares).

Las exportaciones no tienen control aparente. Su calidad de subproducto hace que salga del país en concentrados de Cu y posiblemente en el ferroníquel que se exporta.

### INTRODUCCION

El cobalto fue usado por primera vez como pigmento para colorear vidrio cerca de 200 años Antes de Cristo. Fue separado como metal por el sueco G. Brant en 1742 y establecido como elemento químico por Bergman (SIBLEY, 1975).

Su uso como metal se inició en 1907 cuando Elwood Haynes recibió patente por una serie de aleaciones de cromo-cobalto llamadas "Stellitas". Su mayor uso en los primeros años de su aplicación fue en cerámica y pinturas; en la actualidad más del 90% del cobalto utilizado va a la fabricación de aleaciones.

En 1920 las compañías Saito y Honda del Japón, publicaron por primera vez las propiedades magnéticas de aceros con alto contenido de cobalto, y en 1930 la compañía Mishima descubrió que ciertas aleaciones de hierro, aluminio y níquel tenían propiedades magnéticas permanentes. Desde 1960 se ha dado especial atención a las investigaciones sobre el uso de cobalto en aceros, imanes permanentes y aleaciones resistentes a altas temperaturas.

### USOS

El cobalto se usa principalmente en aleaciones y superaleaciones con magnetismo permanente, aleaciones para cortar metales y de alta resistencia al desgaste, pigmentos y catalizadores para secado de pinturas, tintas, lacas y barnices, catalizadores químicos, en las industrias del petróleo, del vidrio, en aditivos y suplementos para la industria lanar y ovina y en varias aplicaciones médicas en forma de  $Co^{60}$ .

### AMBIENTE GEOLOGICO

El cobalto se halla asociado con rocas máficas y ultramáficas que pertenecen a complejos ofiolíticos, zonados o estratificados, provenientes de dorsales oceánicas, como producto de diferenciación magmática, o como parte de áreas cratónicas estables (COLEMAN, 1977).

Las mayores concentraciones de cobalto en la corteza terrestre se hallan en las citadas rocas y su contenido decrece progresivamente en las series de diferenciación magmática des-

de las rocas ultramáficas a las ácidas. Lo mismo sucede con la relación níquel-cobalto, principalmente porque el cobalto entra en la red cristalina de los silicatos de magnesio en las primeras etapas de la cristalización, después que el níquel lo ha hecho, debido a que el radio iónico del níquel está más próximo al del magnesio (ALVAREZ, 1978).

La concentración promedio de cobalto en rocas ultramáficas es de 270 ppm. En sedimentos no se ha definido muy bien la concentración de dicho elemento debido al bajo contenido. Teniendo en cuenta varias fuentes, se ha establecido en rocas sedimentarias un promedio de 4 ppm en areniscas, 6 ppm en rocas carbonatadas, 40 ppm en limolitas, arcillas, lodolitas y shales. En rocas sedimentarias ricas en hierro se ha reportado un contenido de 20-300 ppm y en fosforitas entre 2-50 ppm (KRAUSKOPF, 1955). En sedimentos ricos en carbón se han reportado concentraciones mucho más altas así: para limolitas carbonosas 500 ppm, 148 ppm para cenizas de carbón, 490-3280 ppm para cenizas de petróleo y más de 90.000 ppm ó 9% en cenizas de asfalto (ALVAREZ, 1978).

Aunque el cobalto puede ser recuperado como coproducto o como subproducto de la minería del cobre, níquel, plata y otros minerales, es usualmente obtenido como subproducto de la minería del hierro, cromo, plomo, zinc, uranio y magnesio.

## GEOQUIMICA

El contenido promedio del cobalto en las rocas de la corteza terrestre se ha estimado en 20 ppm; se encuentra casi exclusivamente en la forma estable de  $\text{Co}^{59}$  (RANKAMA y SAHAMA, 1962), excepto para algunas trazas de  $\text{Co}^{60}$ , producto de fisión y de rayos cósmicos.

Artificialmente han sido creados nueve radioisótopos cuyo número de masa son de 54 a 58 inclusive, 60, 61, 62 y 64, de los cuales el  $\text{Co}^{60}$  aporta la más importante fuente de radiactividad. El radio iónico del cobalto es de 0.72 Å para  $\text{Co}^{2+}$  y 0.63 Å para  $\text{Co}^{3+}$ , estrechamente relacionado con los radios iónicos del  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , con los cuales se asocia comúnmente en la naturaleza.

Durante el metamorfismo, aparentemente la movilidad y la concentración del cobalto es casi nula, por tanto el contenido de los diferentes tipos de rocas metamórficas depende casi exclusivamente del cobalto contenido en las rocas ígneas o sedimentarias originales. El promedio para rocas metamórficas proveniente de rocas máficas y ultramáficas es de 100 ppm en contraste con neises granatíferos que sólo contienen cerca de 8 ppm.

Bajo condiciones oxidantes el cobalto muestra una fuerte tendencia a concentrarse con el manganeso. En las teorías sobre la distribución de los nódulos de manganeso en el fondo del Océano Pacífico, se ha enfatizado en que los óxidos de manganeso precipitan como partículas coloidales submicroscópicas atrapando todo el níquel, cobre, cobalto, zinc y molibdeno del agua (VHAY et al., 1976).

## MINERALOGIA

El cobalto es el mayor o más importante componente de 70 minerales aproximadamente y aparece como elemento menor o tra-

za en muchos otros, específicamente en los que contienen Ni, Fe<sup>2+</sup> o Mn<sup>4+</sup>.

Los minerales altos en cobalto y que se explotan o concentran por su contenido del metal (VHAY et al, 1976) son:

Mineral	% de Cobalto
1. Heterogenita, CoO (OH)	64,1 (teórico)
2. Linneita, Co <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	58,0 (teórico)
3. Carolita, (Co <sub>2</sub> Cu) S <sub>4</sub>	35,2 - 36,0
4. Cobaltita, (Co, Fe) AsS	26,0 - 32,4
5. Siegenita, (Co, Ni) <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	20,4 - 26,0
6. Eritrita, (Ni, Co) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	18,7 - 26,3
7. GlaucoDOT, (Co, Fe) AsS	12,0 - 31,6
8. Eskuterudita, (Co, Fe) As <sub>2</sub>	10,9 - 20,9
9. Seflorita, (Co, Fe) AS <sub>2</sub>	13,0 - 18,6
10. Arsenopirita, Fe (Co) AsS	38 (máximo)
11. Pirita, (Fe, Ni, Co) S <sub>2</sub>	13,0 (máximo)
12. Pentlandita, (Fe, Ni, Co) <sub>9</sub> S	1,5 (máximo)
13. "Asbolita" (óxidos de Manganeso + Co)	0,5 - 5,0
14. Pirrotita, (Fe, Ni, Co) x-1 Sx	1,0 (máximo)
15. Esfalerita, ZnS (Co)	0,3 (máximo)
16. Óxidos de Manganeso	0,10 - 1,0 (o más)

Además existen 27 minerales entre sulfuros, seleniuros, sulfosales, sulfatos, hidratos y arseniuros de cobalto que contienen relativamente buenas cantidades del elemento pero generalmente son de rara ocurrencia y no tienen importancia comercial.

## TIPOS DE DEPOSITOS

El cobalto se extrae de depósitos minerales como producto principal y como subproducto. La mayor producción de este elemento proviene como subproducto de la extracción de depósitos estratocofinados de diferentes edades y composiciones. La minería de hierro, cromo, plomo, zinc, uranio, manganeso y níquel aportan al mercado como subproducto, el mayor porcentaje del cobalto que se consume.

Los yacimientos de cobalto pueden clasificarse geológicamente de acuerdo a su ambiente genético o de acuerdo a su ocurrencia (ALVAREZ, 1978) en:

- Depósitos hipogénicos asociados con rocas intrusivas áficas.
- Depósitos de metamorfismo de contacto asociados con rocas máficas.
- Depósitos lateríticos o residuales producidos por meteorización de rocas máficas.
- Sulfuros masivos en rocas metamórficas principalmente de origen volcánico-sedimentario.
- Depósitos hidrotermales de varias clases.

- Depósitos estratiformes.

- Depósitos formados como precipitados químicos.

## EXPLORACION

Debido a que el cobalto ocurre en la naturaleza asociado principalmente con níquel y cobre, su explotación se hace paralela con dichos elementos. La diversidad de depósitos ha hecho necesario el desarrollo de varias técnicas para su extracción, entre las cuales se pueden enumerar los sistemas de "Open Pit", "Cut and Fill", "Blasthole Stopping" y "Block Caving" (SIBLEY, 1975).

## TECNICAS DE PROSPECCION

Aparte de las técnicas desarrolladas para la extracción de los nódulos de manganeso, relativamente poco o nada se ha implementado para la búsqueda del elemento.

Teniendo en cuenta que la mayor parte del metal que se produce se obtiene como subproducto, los mayores esfuerzos han sido dirigidos a examinar cuidadosamente las áreas donde las asociaciones minerales pueden aportar datos, para la explotación económica de otros minerales con asociaciones de cobalto, que desde un punto de vista secundario puede agregar rentabilidad al proyecto. Este es el caso de las explotaciones de los pórfidos cupríferos y de los depósitos lateríticos.

## BENEFICIO Y METALURGIA

Una amplia variedad de técnicas metalúrgicas se han usado para procesar cobalto dependiendo del estado original del mineral. Si se encuentra en forma de arseniuros, sulfuros u óxidos, sistemas únicos o una combinación de ellos, pueden ser utilizados para su beneficio. Se pueden enumerar: concentración magnética, lixiviación a temperaturas normales o elevadas, presiones con soluciones amoniacales y precipitación química por sólidos, líquidos o gases.

En general los minerales extraídos contienen entre 0.1 y 0.5% de cobalto, el cual necesariamente debe ser concentrado antes de su procesamiento. Luego de la flotación del mineral original, se obtiene un concentrado cuyo contenido inicial aumenta entre cuatro y ocho veces.

## SITUACION MUNDIAL

### PRODUCCION

Los principales productores de cobalto en el mundo son Zaire, Zambia y la URSS, que en 1983 produjeron el 70% del metal. A continuación se presenta la producción por países entre 1973 y 1983 (Tab. 1)

### PRECIOS

En general, en los últimos tres años los precios del cobalto han estado más o menos estables. Su variación ha dependido principalmente de la oferta y la demanda pero ésta no ha sido muy sensible. Desde 1983 el precio ha variado entre 4,75 y 6,00 dólares por libra (MINING ANNUAL REVIEW, 1984).

TAB. 1: Producción mundial de cobalto por países (Tomado del Servicio Geológico Alemán BGR).

PAIS	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Finlandia	1270	1067	1170	1210	1200	1240	1070	950	940	930	907.2
Filipinas	40.8	29.9	117	492	1084	1192	1369.8	1330.8	997	570.5	598.7
Marruecos	1422	1627	1961	705	1015	1134	960.7	838.2	789.3	698.5	-
Botswana	6	33	81	150	163	261.3	293.9	225.9	254	254	254
Simbawe	23	28	18	-	-	18.1	208.7	117.9	99.8	99.8	63.5
Zambia	4300	1379	2383	2175	1704	3741.2	4280.1	4399.8	3415.6	3247.7	3202.4
Zaire	15052	17545	13638	10686	10208	13095	14029	14432	11124	11303.5	11303.5
Canadá	1790	1923	1338	1356	1485	1233.7	1381	2118.2	1816	1496.9	1583.9
Brasil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	117.9
Australia	776	1078	2709	3250	3324	3265	3046	3704	3266	2177.2	1814.4
Nueva Caledonia	1724	1917	3420	5551	4569	154.6	248.6	358.3	369.2	271.2	272.2
Cuba	1633	1633	1633	1600	1633	1463.3	1230	1613	1714.6	1496.9	1651.1
URSS	1678	1724	1814	1800	1905	1950.4	1995.8	2086.5	2177.2	2268	2358.7
TOTAL	29714.8	30983.9	30282	28290	28290	28748.2	30113.7	32174.6	26962.7	24814.3	24127.5

## SUSTITUTOS

El níquel puede ser sustituido por cobalto o éste por aquel en ciertos usos, con pocos cambios en el terminado final de los productos.

Los sustitutos de cobalto como catalizador o secador de pinturas usualmente son menos efectivos.

El uso del cobalto en superaleaciones les da a éstas, propiedades magnéticas que se superan a las de cualquier otra aleación. Cualquier sustitución por cobalto resulta en pérdida de peso además de la adición de otras propiedades físicas muy ventajosas que él posee. Ninguna sustitución ha sido hallada para el uso de cobalto en carburos y aceros para herramientas; sin embargo se ha encontrado que la combinación de níquel, vanadio, molibdeno y tungsteno o cromo pueden desarrollar propiedades iguales o superiores a los compuestos con cobalto.

## EL COBALTO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

En la actualidad los depósitos en explotación en Colombia se refieren a algunas explotaciones de concentrados de sulfuros pequeños y aislados, de donde se obtiene cobalto como subproducto. Entre otras, se pueden citar las minas El Roble, La Equis y La Bramadora en Antioquia, algunas minas del Distrito Minero de California y Vetas en Santander y algunas explotaciones aisladas de sulfuros en los departamentos del Cauca y Nariño.

Existen zonas promisorias en la Cordillera Occidental y Central, en las cuales ya se conocen manifestaciones de pórfidos cupríferos que podrían producir en un futuro cantidades importantes del elemento (Fig. 1).

En Colombia, aparte de pequeños depósitos citados de sulfuros que se explotan para la obtención de concentrados de cobre, plomo y zinc principalmente, y de los cuales seguramente se extrae el cobalto como subproducto, existen los depósitos lateríticos de Cerro Matoso en el Departamento de Córdoba, actualmente en explotación, con unos 60 millones de toneladas de mineral de 0.05% promedio de cobalto, valor muy aproximado.

En el mismo Departamento de Córdoba también existen lateritas níquelíferas en el corregimiento de Uré (San Juan, Alto del Oso, La Viera y Mogambo), y en el municipio de Planeta Rica (Cerro Sabanas y Cerro Querezas), cuyo promedio aproximado en cobalto es de 0.03% (ATCHLEY, 1958).

### RESERVAS

Las reservas de cobalto en Colombia se desconocen completamente. Las únicas fuentes posibles de cobalto que han sido estudiadas sistemáticamente son los depósitos lateríticos del Departamento de Córdoba y las lateritas del Valle del río Medellín. Tanto las lateritas de Uré como las de Planeta Rica tienen contenidos de cobalto muy bajos (máximo 0.05%); la extracción de este elemento depende del rendimiento económico que podría proporcionar la minería del níquel. Desde el punto de vista del níquel fueron estudiadas las áreas y la rentabilidad del proyecto hizo que se desechara cualquier estudio posterior.



FIG. 1: Cobalto en Colombia.

Desde el punto de vista del cobre y sulfuros asociados, existen reservas probadas de este elemento en el municipio de Mochoa, que posiblemente pueden aportar cantidades apreciables de Co recuperable como subproducto. Igualmente puede suceder con los recursos probables de cobre y asociados, en los pórfidos cupríferos de Pantanos-Pegadorcito y Murindó, departamentos del Chocó y Antioquia.

## COMERCIO

### IMPORTACIONES Y EXPORTACIONES

Las importaciones de cobalto en cualquiera de sus formas están restringidas por el gobierno nacional. El ingreso al país de bombas de cobalto para uso médico o investigativo está controlado por el Instituto de Asuntos Nucleares.

Las exportaciones en la actualidad se hacen de manera indirecta y aparentemente sin control debido a que seguramente el elemento se está obteniendo como subproducto de la exportación de concentrados de sulfuros de Cu y del ferroníquel que se exporta de Cerro Matoso.

### PROBLEMAS DE MANEJO E IMPACTO AMBIENTAL

Los problemas en la exploración, explotación y beneficio y el impacto ambiental causado por estos procesos, son los mismos que se causan con la prospección y minería de los depósitos a cielo abierto, ya que este elemento se obtiene como subproducto de la extracción de sulfuros polimetálicos y de yacimientos lateríticos.

La separación y refinación de los diferentes minerales hasta el producto final, ha hecho necesaria la adopción de sofisticados procesos y medidas preventivas, para evitar la contaminación del medio ambiente que se venía causando al liberar en la atmósfera gases y desechos venenosos. En la actualidad las leyes al respecto en los países industrializados son muy estrictas. En Colombia, existen las medidas correctivas que evitan la contaminación ambiental, pero falta educación de la población al respecto y normas más drásticas para que las medidas se cumplan.

### PERSPECTIVAS

Las perspectivas para el cobalto seguirán siendo de primer orden ya que está en primera lista como mineral estratégico. Las proyecciones mundiales estiman una demanda para el año 2.000 entre 69,8 y 113,0 millones de libras que corresponden a una tasa de crecimiento de 2.4 a 4.2% anual entre 1973 y dicho año.

En la última década se han sofisticado técnicas de explotación para la recuperación de los nódulos de manganeso del fondo marino. En la actualidad se tratan de fijar parámetros que regulen dicha explotación para los diferentes países interesados en ella. Este hecho abre una inmensa perspectiva no sólo para el aumento en la producción de cobalto, sino para los demás metales asociados en los nódulos.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ G., E., 1978.- **Cobalto**. Recursos Minerales de Colombia. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, No. 1: 544. Bogotá.
- ATCHLEY, W. F., 1958.- **Preliminary Exploration of Nickeliferous Laterite Deposits; Córdoba Colombia**. Informe para Richmond Oil Company of Colombia.
- COLEMAN, R. G., 1977.- **Ophiolites, ancient oceanic lithosphere?** Springer-Verlag. 229 p. Berlin.
- KRAUSKOPF, K. B., 1955.- **Sedimentary Deposits of Rare Metals**. Economic Geology, 50th Anniversary Volume: Urbana, Ill., Econ. Geology Publ. Co., p. 411-463.
- MINING ANNUAL REVIEW, 1984.- **Cobalt**. By a Special Contributor. Londres.
- RANKAMA, K., SAHAMA, Th., G., 1962.- **Geoquímica**. Colección Ciencia y Técnica. Ed. Aguilar. Madrid.
- SIBLEY, S., 1975.- **Cobalt**. Mineral Facts and Problems. Bureau of Mines. Bull. 667. Washington.
- VHAY, J., BROBST, D. A., and HEYL, A.A., 1976.- **Cobalt**. In: United States Mineral Resources, U.S. Geol. Survey, prof. Paper 820, p. 143-154. Washington.

## MINERALES DE COBRE

ALFONSO ARIAS T. y LUIS E. JARAMILLO C.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	123
Introducción .....	124
X Usos .....	124
Ambiente Geológico .....	125
Geoquímica .....	125
Mineralogía .....	125
Tipos de Depósitos .....	127
Métodos de explotación .....	130
Situación Mundial .....	133
Depósitos .....	133
Recursos .....	134
Precios .....	135
Tendencia de la producción, consumo y proyección del Cobre .....	135
X El Cobre en Colombia .....	138
Exploración .....	139
Prospectos del tipo pórfido cuprífero .....	143
Mineralizaciones hidrotermales, metasomatismo de contacto, reemplazamientos .....	166
Perspectivas .....	179
Bibliografía .....	180

## RESUMEN

A nadie escapa la gran importancia del cobre en el desarrollo industrial y económico del país; desafortunadamente Colombia debe abastecerse de este elemento en otros países ya que la producción nacional de cobre, es ínfima comparada con la demanda. Todo el cobre refinado que se consume en la industria nacional es importado de otros países. Pequeñas minas como El Roble y La Equis en el Departamento del Chocó, Mina Vieja en el Tolima y algunas en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander se han explotado intermitentemente y su producido ha sido exportado en forma de concentrados al exterior.

Además de las mineralizaciones filonianas y del tipo skarn conocidas, los estudios geológicos y geoquímicos regionales adelantados por el INGENMINAS permitieron la delimitación de zonas promisorias para la búsqueda de este mineral y la ubicación de varios prospectos de pórfidos cupríferos donde, mediante trabajos detallados, se determinó su potencial económico, siendo el de Mocoa el de mayor interés. Teniendo en cuenta la posición de Colombia dentro del Cinturón Metalogénico Circumpacífico, la probabilidad de localizar depósitos importantes de cobre es relativamente alta; la exploración regional debe tener dentro de sus objetivos la identificación de dichos depósitos. Sin embargo, su evaluación detallada y posible desarrollo, etapas que implican inversiones elevadas, sólo deben acometerse siguiendo un estricto orden de prioridades y dentro del marco universal de la oferta y demanda de minerales.

## INTRODUCCION

El presente artículo es una actualización del escrito incluido en la primera edición de Recursos Minerales de Colombia (Pub. Geol. Esp. de INGEOMINAS No. 1, 1978) cuyo autor es Eufredo Escorche B. Los principios generales sobre sabiente geológico, tipo de yacimiento, métodos de explotación, etc., válidos actualmente y la descripción de afloramientos, manifestaciones y prospectos en los cuales con posterioridad al trabajo mencionado no se haya adelantado nuevos estudios, sólo se hará una breve mención de los mismos y se remitirá al lector la fuente donde se encuentra la información detallada. El objetivo básico de este trabajo es el de dar a conocer la situación actual de la exploración y evaluación de varios prospectos de cobre en Colombia, su mineralogía, génesis probable y posibilidades económicas. Para tener algunos puntos de comparación se incluyen estadísticas de producción, consumo y precios y se esbozan tendencias del mercado que pueden presentarse en el futuro y que serán factor decisivo para la explotación o no de algunos depósitos.

El cobre, uno de los metales más útiles y de gran versatilidad, ha sido usado por el hombre desde hace más tiempo que cualquier otro metal con excepción del oro. Hasta finales del siglo XVII se utilizó en pequeña escala; de 1801 a 1810 la producción mundial anual era de 18.200 toneladas, cantidad menor que la producción mensual en algunas de las minas de los tiempos actuales. Los depósitos pequeños de alto grado fueron explotados en primer lugar; hacia 1905, se inició la minería de superficie de depósitos porfíricos de bajo grado, los cuales actualmente producen el 55% del cobre mundial (NACIONES UNIDAS, 1982).

## USOS

Después del hierro, el cobre es uno de los principales metales de la industria moderna. Debido a sus propiedades físicas, ha sido utilizado desde los tiempos primitivos tanto en estado metálico como en aleaciones con muchos otros metales. Sus propiedades físicas (DANA, 1960) son: cristalografía cúbica hexaquisoctaédrica, cristales normalmente mal formados, en ramas o grupos arborescentes. Se presenta generalmente en masas, placas y escamas irregulares. Dureza 2,5 - 3; G= 8,9; funde a 1.083°C; fracture astillosa; color rojo característico en superficie fresca que se oscurece con brillo apagado por su pátina; muy dúctil y maleable. Su conductibilidad eléctrica por unidad de área y por peso es sólo superada por la plata y el aluminio. Estas propiedades junto con su conductibilidad térmica, buena resistencia a la corrosión, y a la carencia de magnetismo hacen del cobre un elemento de innumerables aplicaciones industriales.

Sus aleaciones tradicionales, latón, bronce, plata-níquel y cuproníquel, contienen no menos del 40% de cobre. Más de la mitad (53%) de los 1,5 millones de toneladas de cobre (COX et al., 1973, p. 164) utilizadas por los Estados Unidos durante 1970, fueron consumidas en la industria eléctrica, el 16% en la industria de la construcción, el 12% en maquinarias industriales, el 8% en la industria de transporte, el 6% en la industria militar, y un 5% en usos varios.

Colombia importa para diversos usos industriales, principalmente cobre refinado, una cantidad aproximada de 15.000 toneladas por año.

## AMBIENTE GEOLOGICO

## GEOQUIMICA

El cobre es un elemento químico del grupo I-B de la Tabla Periódica; número atómico 29, peso atómico 63,546; presenta los isótopos  $\text{Cu}^{63}$  (69,09%) y  $\text{Cu}^{65}$  (30,91%). Se presenta en la naturaleza en estado nativo (Cu) y también formando compuestos en forma de  $\text{Cu}^{+1}$  (radio iónico 0,96Å). En su estado de  $\text{Cu}^{+2}$ , principalmente en fosfatos y sulfatos es isomorfo con el Zn(0,74Å), Mg(0,66Å) y  $\text{Fe}^{+2}$ (0,74Å); radios iónicos tomados de Krauskopf, 1967. En los sulfuros el  $\text{Cu}^{+2}$  es isomorfo con el Zn (como en la tetrahedrita) y el  $\text{Cu}^{+1}$  con la plata.

Es de anotar la gran afinidad del Cu por el azufre, lo cual ha determinado la manera de presentación en la corteza terrestre en forma de sulfuros y sulfosales que son los minerales más importantes.

El contenido de cobre en los diferentes tipos de roca se presenta en la Tabla tomada de Cox et al. (1973), de la cual se deduce que el cobre es concentrado durante el ciclo ígneo en rocas basálticas y gabroides. "El contenido de cobre en estas rocas se refleja en sus ferromagnesianos, piroxenos y biótitas, en los que, según Goldschmidt (1954, p. 182), probablemente ocurre en forma de diminutos cristales de sulfuros".

TAB. 1: Contenido de Cu en diferentes tipos de rocas (en ppm). Tomada de Cox et al. (1973).

Tipo de roca	Rango	Promedio
<b>Rocas Igneas:</b>		
Ultramáficas	-	15
Básicas y gabroides	30 - 160	90
Andesitas	-	35
Graníticas	5 - 30	15
<b>Rocas Sedimentarias:</b>		
Calizas	-	4
Areniscas	10 - 20	10(?)
Limos y arcillas	18 - 120	45
Suelos	2 - 100	20

Durante la cristalización de las rocas ígneas, el cobre y algunos otros elementos que no se combinan fácilmente para formar silicatos, se pueden concentrar y aún pueden llegar a constituir un yacimiento mineral. Si el magma es rico en volátiles, el cobre se puede disolver, puede ser transportado y posteriormente depositado en forma de venas o conjunto de venas. Si el magma es pobre en volátiles (algunos magmas básicos), el cobre puede permanecer en la intrusión, concentrándose como sulfuros en un fluido inmiscible (ESCORCE, 1978).

## MINERALOGIA

La calcopirita, con un contenido de 34,6% de Cu, es el sulfuro de cobre más abundante en la naturaleza y por consiguiente una de las fuentes más importantes de este elemento. El cobre se puede presentar en estado nativo, como sulfuros, sulfosales, arseniuros, antimoniuros, seleniuros, telururos,

carbonatos y algunas veces formando silicatos. Los silicatos de cobre más importantes son la chalcocita,  $\text{Cu}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  y la diopsidea,  $\text{Cu}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; el primero es bastante frecuente; pero ninguno de los dos es un componente de las rocas ígneas; estos silicatos son de origen secundario y aparecen en la zona de oxidación de yacimientos de cobre. En la Tabla 2 se presentan los principales minerales de cobre y su ocurrencia.

TAB. 2: Minerales de cobre (principales y secundarios) y su ocurrencia. Tomado de Cox et al., 1973.

M I N E R A L E S	OCURENCIA						Zona de oxidación		Zona de sulfuros	
	Pórfidos	Venas y reemplazamientos	Sedimentos Estratiformes	Vulcanogénicos Estratiformes	Segregación Magmática	Enf. secund. Y	dep. secund.	Enf. secund. Y	dep. secund.	
<b>Principales:</b>										
Cobre nativo: Cu	-	-	0	0	-	-	X	0	X	
Chalcocita, $\text{Cu}_2\text{S}$	-	0	0	0	-	-	0	0	0	
Covellina, $\text{Cu}_2\text{S}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bornita, $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	X	0	0	X	0	0	-	-	-	
Calcopirita, $\text{CuFeS}_2$	0	0	0	0	0	0	-	-	-	
Enargita, $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	0	0	-	X	-	-	-	-	X	
Cuprita, $\text{Cu}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
Malachita, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
<b>Secundarios significativos:</b>										
Tetrahedrita, $(\text{Cu}, \text{Fe})_{10}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	-	X	-	-	X	-	-	-	-	
Tennantita, $(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	-	X	-	X	-	-	-	-	-	
Famatinita, $\text{Cu}_3\text{SbS}_4$	-	X	-	X	-	-	-	-	-	
Estannina, $\text{Cu}_2\text{FeSn}_4$	-	X	-	?	-	-	X	-	-	
Atacamita, $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_2$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
Tenorita, $\text{CuO}$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
Azurita, $\text{Cu}(\text{CO}_3) \cdot (\text{OH})_2$	-	-	-	-	-	-	X	-	-	
Chalcocita, $\text{Cu}_2\text{S}$	-	-	-	-	-	-	X	-	-	
Brochantita, $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$	-	-	-	-	-	-	X	-	-	
Antlerita, $\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
Calcantita, $\text{Cu}_5\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
Kroenquitte, $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	0	0	-	

0: Mineral principal de zona.  
X: Mineral secundario (en importancia).

En los yacimientos de cobre los minerales primarios de este elemento son básicamente sulfuros, calcopirita bornita y pirita ubicoota. Minerales propios de la zona de enfriamiento secundario son: Calcocita, covellina, bornita y cobre nativo. En la zona de oxidación tenemos cuprita, chalcocita, malaquita y azurita. La coloración que le imprimen al terreno los minerales de la zona de oxidación, han servido como guía durante la prospección de yacimientos de cobre.

#### CICLO GEOQUÍMICO DEL COBRE

"Mediante intrusiones ígneas o debido a migración de fluidos se pueden originar concentraciones de cobre en la corteza terrestre. Pero además de estos factores, el cobre puede con-

centrarse también como resultado de los procesos de meteorización, erosión y sedimentación. Puede ocurrir movilización y concentración de cobre, durante los procesos de metamorfismo o durante los eventos de una intrusión. Las aguas de percolación y las aguas connatas profundas pueden disolver, transportar y depositar este elemento para formar nuevos yacimientos. El cobre contenido en los basaltos que conforman los pisos oceánicos, más el cobre que es aportado a los mares y posteriormente depositado con los sedimentos marinos, puede ser removilizado durante los procesos de subducción de las placas oceánicas; posteriormente, al menos parte de este metal puede ser emplazado nuevamente por encima de la zona de subducción, en la corteza continental".

"Durante la meteorización de una mena de cobre, los sulfuros de cobre y hierro se descomponen y debido al ambiente oxidante que impera en la superficie se pueden suceder reacciones que producen óxido de hierro, los cuales llegan a constituir los sombreros de hierro que existen por encima de algunos yacimientos. El cobre puede ser infiltrado en solución por las aguas percolantes hacia niveles inferiores".

"Ya que el medio ambiente por debajo del nivel freático es alcalino y reductor, el cobre disuelto al entrar en contacto con los sulfuros primarios por debajo de la zona de oxidación, se precipita mediante reacciones, en forma de calcosina. Esencialmente este es el fenómeno de enriquecimiento supergénico, mediante el cual la roca es lixiviada en superficie y parte de su contenido de cobre es redepositado en profundidad, formándose un depósito de mayor tenor en un menor volumen de roca".

Información más amplia y las reacciones químicas que se producen son descritas por Escorce, 1976.

## TIPOS DE DEPOSITOS

A continuación enumeramos los principales tipos de yacimientos de cobre, según la clasificación presentada por Bateman (1968, p. 526). (En esa referencia se pueden consultar descripciones de cada tipo de yacimiento y ejemplos de mineralizaciones de diferentes localidades en el mundo).

- 1) Magmáticos: Yacimientos de cobre, níquel: Insizwa (Africa del Sur); Merenski Reef. (Transvaal).
- 2) Metasomáticos de contacto: Yacimientos antiguos de Merencí (Arizona); Bingham (Utah) y Cananea (México).
- 3) Hidrotermales: A) Relleno de cavidades.
  - 1) Vetas de fisuras: Butte (Montana).
  - 2) Rellenos de brechas: Nacozari (México).
  - 3) Rellenos de cuevas: Bisbee (Arizona).
  - 4) Rellenos de espacio poroso: depósitos de "red beds" en Nuevo México y Arizona: Urales (Rusia).
  - 5) Rellenos vesiculares: distrito del Lago Superior.
8. Reemplazamiento:
  - 1) Masivos: Bisbee, United Verde (Arizona) Bingham, Flin Flon (Manitoba).
  - 2) Filón: Kenecott (Alaska): Magma, Globe, Bisbee (Arizona).

- 3) Delimitado: Los pórfidos cupríferos de: Bingham (Utah) Ely (Nevada): Chuquilcamata y Potrerillos (Chile).
4. Sedimentarios: Kupferschiefer, Mansfeld (Alemania).
5. Oxidación superficial: Bisbee y Globe (Arizona); Chuquilcamata (Chile); Katanga (Congo Belga).
6. Enriquecimiento supergénico: algunos pórfidos cupríferos, Cananea (México); United Verde Extensión (Arizona).

#### YACIMIENTOS DEL TIPO PORFIDO CUPRIFERO

Los pórfidos cupríferos son depósitos de gran tamaño y bajo tenor (el promedio es de 0.4% de cobre), que contienen sulfuros de cobre y hierro diseminados; a menudo asociados con oro, molibdeno y plata, los cuales se encuentran en, y alrededor de zonas del techo de cúpulas, relacionadas en profundidad con dioritas y granodioritas que se presentan tanto en arcos de islas como en márgenes cratónicas continentales. La mineralización está diseminada toscamente sobre grandes volúmenes de roca, las cuales son extraídas generalmente mediante minería a cielo abierto. Los depósitos de pórfido cuprífero representan el 52,4% de los recursos de cobre del mundo, estimados en  $351 \times 10^6$  toneladas (HUTCHISON, 1983).

El origen de los depósitos de pórfido cuprífero ha sido explicado mediante la tectónica de placas por varios autores; uno de los artículos más importantes es el de Sillitoe (1972), quien después de describir las características geológicas y genéticas de los depósitos de pórfidos cupríferos y el de origen de las rocas ígneas calco-alcalinas, manifiesta que, en vista de la íntima relación en tiempo y espacio existente entre la génesis de los depósitos de pórfidos y el magmatismo calco-alcalino, incluyendo los componentes de los "stocks" de pórfido y el contenido metálico, se postula que son originados por fusión parcial de la corteza oceánica sobre una zona de subducción. Más aún, depósitos porfídicos de cobre y molibdeno se consideran confinados a cinturones orogénicos caracterizados por magmatismo calco-alcalino resultante del hundimiento de la placa oceánica bajo la placa litosférica adyacente, en algunos casos con la consiguiente colisión continental. En el escrito mencionado, Sillitoe expone que la única fuente de metales disponible para todos los depósitos de pórfido cuprífero, parece ser la parte superior del manto.

Descripción de este tipo de yacimiento puede encontrarse en Lowell y Guilbert (1970), en el cual los autores consideran las características geológicas de 27 pórfidos cupríferos y modelan un yacimiento típico. También se puede consultar el trabajo de Tittley y Hicks (1971) en el que los autores estudian este tópico y traen 15 ejemplos de yacimientos localizados en el suroeste de los Estados Unidos. Aquí nos limitamos a mencionar los rasgos comunes en estos yacimientos y posteriormente se discutirán las mineralizaciones de este tipo presentes en Colombia.

Un pórfido cuprífero es un yacimiento de sulfuros en el cual la mineralización, que consiste principalmente de pirita calcopirita y molibdenita en cantidades variables, se encuentra diseminada y en forma de venillas en la roca huésped que a su vez presenta diferentes halos de alteración, como consecuencia de la acción de los fluidos hidrotermales; presenta además las siguientes características comunes:

1. Bajo tenor. Presenta un contenido de cobre por tonelada muy bajo. La mineralización primaria puede ser en promedio del orden de 0,6 a 0,8% de cobre.
2. Está relacionado en espacio y tiempo con intrusivos porfiríticos cuarzosos, cuya composición mineralógica varía de granodiorita a cuarzodiorita.
3. Generalmente esta asociado con chimeneas brechosas (breccia pipe) y presenta amplias zonas con brechas de relleno de fracturas (Crackle breccia).
4. La mayoría de estos yacimientos fueron emplazados durante el Cretáceo superior y hasta el Terciario medio.
5. La mineralización primaria consiste esencialmente de sulfuros tales como calcopirita, bornita, molibdenita y pirita ubícuota.
6. Los fluidos hidrotermales han afectado fuertemente a las rocas adyacentes al yacimiento, generando diferentes halos de alteración.
7. Los procesos de enriquecimiento supergénico han jugado un papel importante en el desarrollo del tenor de la mena. Muchos yacimientos de este tipo deben su valor económico precisamente a estos fenómenos.

La alteración hidrotermal que presentan estos yacimientos ha servido como herramienta eficaz en la etapa de exploración de los mismos, puesto que los halos generadores se pueden extender a varios centenares de metros del yacimiento mismo.

La naturaleza de la alteración depende de varios factores: composición y estructura de la roca huésped, características de los fluidos invasores, temperatura y presión a que tienen lugar las reacciones.

En el modelo de Lowell y Guilbert (1970 p. 381) se reconocen 4 tipos de halos concéntricos de alteración: una zona potásica en el centro, seguida de una zona filica, más hacia el exterior una zona argílica y por último la más externa, la zona de alteración propilítica.

La zona potásica se caracteriza por la presencia de biotita, cuarzo, feldespato de potasio, sericita, algo de anhidrita, en forma diseminada o en venillas, reemplazando minerales primarios de la roca.

Sericita, cuarzo y pirita son los productos principales de la zona de alteración filica. El distintivo característico de esta zona es la sericitación completa de todos los silicatos.

Caolín, cuarzo y montmorillonita son los productos de alteración de la zona argílica, que se caracteriza por la conversión de la plagioclasa en minerales de arcilla.

La paragénesis de la alteración propilítica consiste principalmente de albita, epidota, clorita, carbonatos, además de sericita, pirita, óxidos de hierro, y en menor escala zeolitas. El proceso de albitización es importante en la alteración de las plagioclasas más cálcicas que liberan calcio y por consiguiente se enriquecen en sodio.

Las investigaciones llevadas a cabo hasta el presente, relacionadas con la alteración hidrotermal que presentan los pórfidos cupríferos, han llevado a reconocer dos modelos fundamentales, el de Lowell y Gilbert y el modelo diorítico (HOLLISTER, 1975). La relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  en la roca huésped, modifica el efecto del metasomatismo de potasio, hidrógeno y azufre, siendo ésta la causa básica de las diferencias entre los dos modelos. El modelo diorítico contempla una zona potásica central, con ortoclasa, biotita y ortoclasa-clorita como facie dominante y una aureola propilítica externa. La zona filica está pobremente desarrollada y no existe en el modelo diorítico; por consiguiente la zona propilítica se puede presentar adyacente a la potásica.

*Mineralogía de los depósitos de pórfido cuprífero.*— La calcopirita que contiene 34.6% de Cu es el sulfuro de cobre más abundante en la naturaleza y por lo tanto una de las fuentes más importantes de este elemento. El cobre se puede presentar en estado nativo, como sulfosales, arseniuros, antimonio, seleniuros, telururos, carbonatos y algunas veces formando silicatos.

En los yacimientos porfiríticos los minerales primarios de cobre son únicamente sulfuros; calcopirita, bornita y pirita ubicuos. Minerales propios de la zona de oxidación son cuprita, crisocola, malaquita y azurita; la coloración que le imprime al terreno los minerales de la zona de oxidación, ha servido como guía para la prospección de yacimientos de cobre.

En los depósitos de pórfido cuprífero, Lowell y Gilbert, 1970, muestran las zonas de alteración y la correspondiente asociación mineral en cada una de ellas.

## MÉTODOS DE EXPLOTACION

El método que ha de utilizarse durante la explotación de un yacimiento depende de las características del mismo, tipo de emplazamiento, volumen de mineral, su extensión, su profundidad, su tenor, etc. Esencialmente estos métodos se pueden dividir en dos grupos; superficiales y subterráneos; los procedimientos de superficie son preferidos donde son practicable, porque suelen ser los más baratos. A continuación se definen a grandes rasgos los métodos más utilizados en la explotación de yacimientos de cobre en el mundo. Una descripción más detallada de estos sistemas de extracción se puede consultar en diferentes textos, por ejemplo en Mining Engineers Handbook (PEELE, 1956).

## EXPLOTACION DE BLOQUES

Este es un método subterráneo que consiste en aislar grandes bloques de mineral, dejándolos suspendidos o colgados de su parte superior. Posteriormente son perforados y volados y el mineral cae en los túneles que pasan por las bases de los bloques; durante la caída y debido a su propio peso, el material se rompe en fragmentos más fáciles de manipular. Mediante este sistema se realiza la rotura de la mayor parte de la roca sin tener que hacer muchas voladuras. Este método es empleado principalmente en caso de venas anchas, capas gruesas, depósitos masivos de menas homogéneas, y en pórfidos cupríferos.

## EXPLOTACION POR NIVELES

Es un método subterráneo. Se penetra en el terreno mediante pozos verticales o inclinados, o bien (en regiones montañosas) por medio de galerías o túneles. El procedimiento consiste en desarrollar una serie de galerías horizontales, espaciadas verticalmente de 15 a 30 pies, que van en orden descendente desde la parte superior del yacimiento hacia niveles inferiores del mismo. El mineral existente por encima de un nivel es perforado y volado para hacerlo caer, descendiendo por declives hacia las vagonetas. Al terminar los trabajos de este nivel se procede con el nivel inmediatamente inferior.

## SOCAVACIONES Y HUNDIMIENTOS

Es también subterráneo. Consiste en practicar socavaciones y hundimientos en el yacimiento. Se procede a realizar voladuras en los techos de las socavaciones previas; el mineral se fragmenta, cae y rellena las socavaciones. Debido a que el material después de fragmentado y removido de su emplazamiento original, ocupa un mayor volumen (30 a 50% de incremento), para poder avanzar los trabajos es necesario ir extrayendo parte del mineral suelto que cae en las cámaras y generar así un espacio apropiado entre las pilas de fragmentos y el techo de la socavación.

El método permite la extracción prácticamente completa de mineral que rellena venas, y que son relativamente estrechas y pendientes. En caso de venas demasiado anchas o yacimientos muy grandes, no se puede mediante este método extraer toda la vena, ya que es necesario dejar pilares permanentes de soporte entre socavaciones que garanticen la seguridad de la mina.

Las aplicaciones del método están limitadas por la pendiente, forma, resistencia y carácter del yacimiento y sus paredes. Es un método aconsejado por lo simple; requiere poca entibación, y por consiguiente más bajos costos.

## EXPLOTACION A CIELO ABIERTO

Como su nombre lo indica, es un método de excavación superficial. El sistema ha sido especialmente diseñado para extraer minerales que yacen en o cerca a la superficie. En la explotación a cielo abierto la sobrecarga se extrae y se transporta a los terrenos de desecho; esta carga puede ser relativamente blanda, en cuyo caso puede ser excavada directamente, o puede ser roca dura que debe ser volada con explosivos. El yacimiento se trabaja mediante terrazas que describen una espiral descendente; las excavadoras instaladas en las terrazas cargan el mineral y los desechos en vagones de ferrocarril o en camiones apropiados (con más de 100 toneladas de capacidad) para ser transportados a la superficie superior.

La excavación resultante puede alcanzar un diámetro de varios centenares de metros, la escala de las operaciones puede ser de muchos miles de toneladas diarias. A medida que avanzan los trabajos de extracción deben ensancharse más hacia afuera con el fin de conservar la seguridad de la pendiente y evitar desprendimientos de rocas.

La extracción a cielo abierto es una operación barata comparada con los métodos subterráneos, y es por lo tanto muy utilizada en casos de yacimientos del tipo pórfido cuprífero,

o en los que se deba extraer mucho material estéril en proporción con el mineral propiamente dicho.

### EXTRACCION POR LIXIVIACION

El método consiste esencialmente en remover en solución mediante solventes comunes como agua, ácido sulfúrico, minerales solubles tales como ciertos minerales de cobre, nitratos, halita.

En el caso del cobre, la lixiviación se puede aplicar al material de desecho que se ha ido acumulando y que posea algún contenido de este elemento (por ejemplo 0,1% o menos); también se ha aplicado el método al mineral in situ. El material de desecho es sometido a un baño ácido en tanques revestidos de asfalto; el cobre se disuelve ( $\text{Cu}^{++}$ ), posteriormente se retira el líquido y el cobre se precipita electrolíticamente.

Durante la lixiviación in situ, los solventes son autogenerados por la acción del agua sobre sulfuros de hierro; se genera ácido sulfúrico y sulfato férrico que disuelven el cobre en forma de sulfato. La solución portadora de cobre se lleva a superficie mediante bombas que deben ser de un material resistente al ataque por ácidos. Este líquido se hace pasar sobre chatarra de hierro, donde se precipita el cobre.

Para aplicar la lixiviación in situ, se requieren ciertas condiciones favorables; entre ellas tenemos: a) presencia de sulfuros de hierro en cantidad suficiente para generar sulfato férrico, b) una estructura geológica favorable que permita almacenar las soluciones portadoras de cobre colectadas, sin pérdidas excesivas, c) las rocas del yacimiento deben permitir el paso del agua sin que se caucen derrumbes y sin desintegrarse y d) suministro adecuado de agua y chatarra de hierro.

### LIXIVIACION BACTERIAL

A partir de la década del 70 se ha venido investigando la aplicación de la biotecnología en la industria minera; un artículo enfocado hacia la utilización de esta moderna técnica en países en vías de desarrollo es el de Warhurst (1984), quien adelantó su trabajo de campo en Bolivia, Perú y Chile, países del Pacto Andino, y del cual se extraen los conceptos que se incluyen a continuación:

La lixiviación bacteriana se emplea para la recuperación de los minerales presentes en recursos previamente no explotables, tales como los materiales de desecho y menas marginales cuyo tenor es inferior a la ley de corte del depósito. También se utiliza para la recuperación de los sub-productos que dependen de la zonación regional, como pueden ser molibdeno, oro o plomo, zinc y plata, y para extraer elementos contaminantes. Esta es la razón por la cual existe una relación estrecha entre la mineralogía del depósito y las técnicas que pueden usarse para la extracción y recuperación de los metales asociados.

La lixiviación bacteriana es un proceso natural que ocurre cuando ciertos micro-organismos, especialmente el *Thiobacillus ferrooxidans*, facilita la conversión de sulfuros minerales normalmente insolubles, como pirita, calcopirita etc., en formas solubles en agua liberando por tanto los iones metálicos asociados, para la subsiguiente recuperación. La bacteria obtiene la energía que necesita para su funcionamiento y creci-

nimiento de la oxidación de compuestos inorgánicos de hierro y azufre; la adición de soluciones de ácido sulfúrico acelera los procesos de oxidación cerca de un millón de veces más rápido que en el aire.

Puesto que las bacterias son organismos vivos, requieren de condiciones especiales para su máximo funcionamiento y crecimiento, y por consiguiente para alcanzar los porcentajes óptimos de oxidación y lixiviación. En general requieren de abundante oxígeno, pH ácido, nutrientes específicos y temperatura moderada mientras se disuelven algunos metales, por ejemplo uranio, que puede ser tóxico bajo ciertas condiciones.

Además, las características del sistema de lixiviación (su mineralogía, tamaño de partículas, porosidad de la presa, flujo de aire y de perfil de temperatura) también afectarán la eficiencia de las reacciones biológicas y por lo tanto se debe tener en cuenta las cantidades y porcentajes de contenido mineral que pueden entrar en las soluciones.

Es dentro de ese amplio rango de condiciones y requerimientos complejos, que se debe enfocar el desarrollo de los parámetros necesarios para optimizar el proceso de lixiviación y hacerlo económico.

En el escrito de Warhurst se consideran tres formas principales para la utilización de la lixiviación bacteriana; éstas son: primero, la lixiviación de sulfuros contenidos en las acumulaciones del estéril provenientes de la operación minera de depósitos trabajados con una ley de corte alta; segundo, la lixiviación, en los depósitos nuevos en operación, del material de descapote y de la mena marginal durante su desarrollo, y tercero por lixiviación en tanques o sistemas confinados bajo condiciones estrictamente controladas que es la más reciente posibilidad de concentración de sulfuros.

Teniendo en cuenta que este proceso ofrece buenas posibilidades de recuperación de valores notables de cobre, presentes en el material de descapote y en las menas marginales durante la explotación, y que además puede ser un factor de regulación de la contaminación en los nuevos proyectos a llevarse a cabo principalmente en países en vía de desarrollo, se concuerda con la autora que es una alternativa que debe ser estudiada.

En el informe preliminar de Factibilidad Económica del Depósito de Cobre y Molibdeno de Mocoa (NACIONES UNIDAS, et al, 1984), se hace énfasis en que la ubicación de estéril y colas provenientes de la explotación debe ser objeto de estudio detallado durante el estudio de factibilidad económica, en el cual se debe incluir aspectos sobre la lixiviación bacteriana.

## SITUACION MUNDIAL

### DEPOSITOS

Aproximadamente el 70% de los recursos conocidos en el mundo (COX et al, 1973) se pueden agrupar en orden decreciente de importancia en las siguientes categorías geológico-geográficas: Depósitos de pórfidos cupríferos del suroeste de los Estados Unidos, depósitos cupríferos sedimentarios de Zaire y Zambia, y los pórfidos cupríferos y depósitos cupríferos sedimentarios de Rusia. Otros recursos importantes en el mundo son

los pórfidos cupríferos de Oceanía, México, oeste del Canadá y Europa Central, así como los depósitos sedimentarios del suroeste de Europa.

## RECURSOS

Según Naciones Unidas (1982), las reservas mundiales en 1976 son del orden de 451'200.000 toneladas con contenido promedio de 0,76% de cobre, las cuales son suficientes para atender las necesidades globales por varios años; asimismo, este informe muestra que las reservas de cobre, con tasas de crecimiento de la producción entre el 2 y el 5% por año a partir de 1976, alcanzarían para 40 y 28 años respectivamente.

Se estima que los recursos aún no descubiertos que yacen en distritos cupríferos conocidos, suministrarán otros 400 millones de toneladas de cobre. Recursos importantes de esta categoría ocurrirían en las provincias pórfido-cupríferas del suroeste de Arizona, oeste del Canadá, Chile y Perú. Probablemente se descubrirán grandes depósitos sedimentarios de cobre en el África, en Rusia y al norte de las Montañas Rocosas (COI et al, 1973). Los recursos potenciales mundiales, incluyendo los hipotéticos y especulativos, alcanzan a 1.627 millones de toneladas de cobre. Un recurso adicional de 690 millones de toneladas pueden encontrarse en los nódulos de manganeso provenientes de los fondos marinos (ROSENKRANZ et al, 1983); sin embargo, de llegar a explotarse, el efecto de los nódulos en aguas profundas al mercado de cobre probablemente no sería importante, si se tiene en cuenta que alcanzándose una extracción de 20 millones de toneladas anuales de nódulos, la contribución a la producción mundial de cobre sería menor del 2% (NACIONES UNIDAS, 1982).

Otras áreas en que podrían encontrarse importantes recursos de cobre son la región oriental asiática y Oceanía, donde se estima que existen 35 millones de toneladas de cobre recuperable; tres países: Australia, Filipinas y Papua Nueva Guinea cuentan con más del 90% de los recursos de la región (ROSENKRANZ et al, 1983).

Además de los recursos mencionados anteriormente, debemos agregar como posibles fuentes de cobre los yacimientos subeconómicos o marginales que entrarían en explotación, de acuerdo con las fluctuaciones en el precio del metal o con los avances tecnológicos para su beneficio. Entre estos últimos sobresale la lixiviación bacteriana, proceso mediante el cual es posible obtener cantidades apreciables de cobre provenientes del tratamiento de los minerales presentes en la zona considerada estéril o de aquellas menas marginales con contenidos inferiores a la "Ley de corte" del depósito.

La aplicación conocida de esta tecnología se ha efectuado en las zonas de "deposición de estéril" de minas en países industrializados, que no fueron construidas con los parámetros acordes para la optimización de este proceso. En estados Unidos se obtienen promedios de recuperación de 40 a 60% del contenido de metal en periodos comprendidos entre cinco y veinte años. Proyectos realizados a nivel de laboratorio y planta piloto, muestran promedios de recuperación de metal sobre el 80% en periodos de 18 meses a 2 años. Estos resultados fueron obtenidos por CENTROMIN, Perú, en la mina de Toromocho (WARKURS, 1984).

## PRECIOS

La actual recesión económica mundial ha afectado de una manera notoria el precio de los metales en el mercado, de la cual el cobre no ha sido la excepción y por consiguiente esta es una de las variables críticas para el desarrollo de nuevos proyectos mineros, que ha llevado al cierre temporal o definitivo de minas en explotación. Por otra parte, esta situación ha hecho que la industria busque la forma de reducir costos de producción, aumentando la productividad mediante modernas técnicas de explotación y beneficio.

En el gráfico de la Figura 1, tomado de varios números del Mining Journal, se muestra la variación del precio del cobre en libras esterlinas por tonelada durante el período de 1979-1987. Como puede verse, los precios más altos durante este lapso se obtuvieron a principios de 1980 y 1985, cuando alcanzaron alrededor de 1330 y 1310 libras por toneladas respectivamente. Los menores precios se obtuvieron en 1980, 1981 y 1982, cuando la mayor parte del tiempo la cotización estuvo por debajo de 900 libras por tonelada y se llegó al precio inferior de aproximadamente 725 libras por tonelada; en 1983 y 1984 el mercado se sostuvo entre 900 y 1100 libras por tonelada. Desde mediados de 1985 el precio viene con tendencia a la baja, cotizándose la tonelada entre 950 y 1100 libras; el precio actual (1986) está alrededor de 905 libras por tonelada, esperándose según algunos analistas, una ligera recuperación aún cuando ésta puede ser no muy alta ni muy significativa.

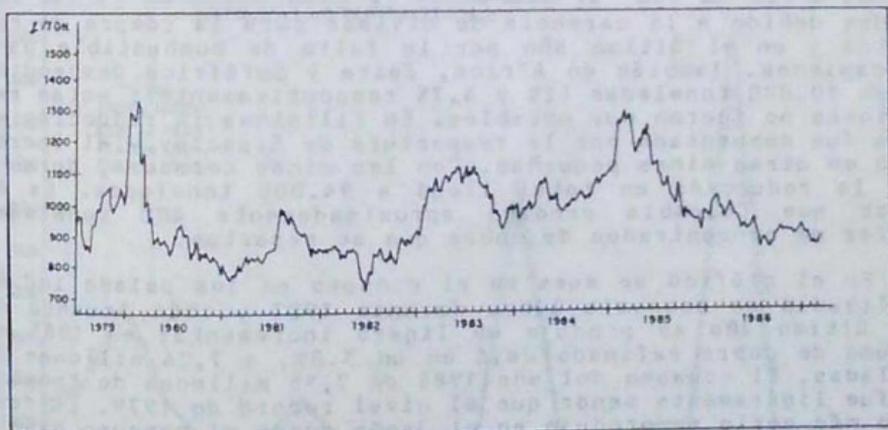


FIG. 1: Variaciones en el precio del cobre según el LME (Tomado de varios números de MINING JOURNAL).

### TENDENCIA DE LA PRODUCCION, CONSUMO Y PROYECCION DEL COBRE

Según el Mining Annual Review (1986), durante los cinco años pasados, desde 1980, el desempeño del cobre ha estado por debajo de las expectativas creadas; después de unos años en declinación se espera una recuperación que permita acercarse a los niveles alcanzados en 1973-74 y 1979-80. De hecho, una serie de factores han influido para no alcanzar estas escalas y aún seguirán vigentes durante algún tiempo.

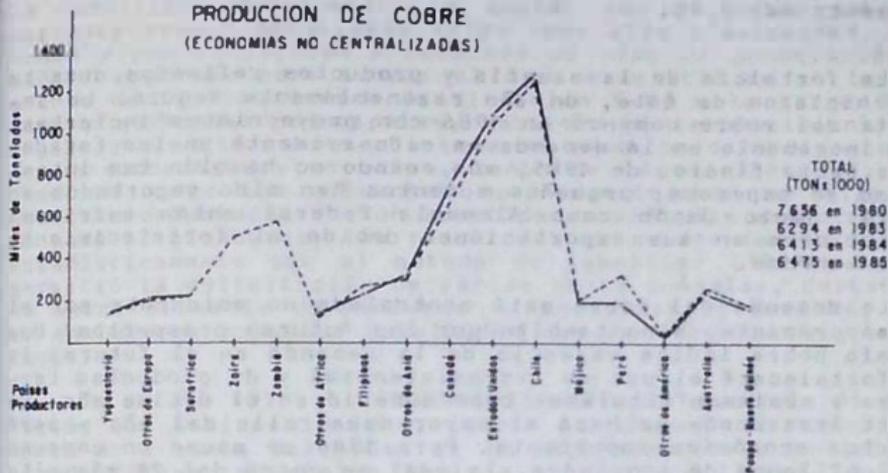
Altas existencias, menor uso, altas tasas de interés, el estado de las finanzas de los países en desarrollo, menor proporción de la expansión económica mundial y la carencia de inversiones especulativas en el metal, todos ellos han evitado el incremento de los precios que la industria ha venido esperando. No obstante el alto grado de consumo en los años anteriores, y los factores adversos mencionados, 1985 arrancó relativamente bien y las existencias continuarán en declinación. Si el consumo puede mantenerse bajo estas condiciones, y se añade una renovación a la recesión prevalecte en los últimos años, hay una esperanza razonable (no espectacular) para un incremento en los precios cuando cambien los factores adversos. Con la caída de los precios del petróleo esto podría producirse.

La producción de cobre en el mundo occidental, según dato del Bureau of Mines, 1983, alcanzó en 1980 a la cantidad de 7,6 millones de toneladas; hasta 1983 vino en decrecimiento con producción de 6,3 millones de toneladas; un ligero incremento se nota en 1984, cuando se llegó a producir 6,4 millones de toneladas. (En la Figura 2 se representa este incremento mostrando la producción de 1983 y 1984). En 1985 la producción minera totalizó 6,46 millones de toneladas con un incremento marginal de 0,75% sobre el año anterior. Chile aumentó su producción en 51.000 toneladas o sea 4%; otros incrementos incluyen Perú en 6,3%, Australia en 8.3% y Canadá en 2.3%; la producción en Estados Unidos permaneció sin cambios con respecto al año anterior. Entre las reducciones, la más notoria es la de Zambia con un 15%, al descender la producción en 85.000 toneladas debido a la carencia de divisas para la compra de repuestos y en el último año por la falta de combustible para los camiones. También en África, Zaire y Sudafrica descendieron en 10.000 toneladas (2% y 4.7% respectivamente); estas reducciones no fueron muy notables. En Filipinas la reducción en Atlas fue compensada por la reapertura de Sipalay y el incremento en otras minas pequeñas. Con las minas cerradas, durante 1985 la reducción en total llegó a 94.000 toneladas. Es de anotar que Colombia produce aproximadamente 300 toneladas anuales de concentrados de cobre que se exportan.

En el gráfico se muestra el consumo en los países industrializados de economía libre durante 1983 y 1984, cuando en este último año se produjo un ligero incremento; en 1985 el consumo de cobre refinado cayó en un 3.8%, a 7,26 millones de toneladas. El consumo del año 1984 de 7,55 millones de toneladas fue ligeramente menor que el nivel record de 1979. El descenso más serio se produjo en el Japón donde el consumo disminuyó en 10,5% (143.000 toneladas). El poco mercado de la industria electrónica fue el factor para que el consumo en los Estados Unidos también descendiera, aunque menos drásticamente, en 82.000 toneladas. Por el contrario, debido a la debilidad del dólar, las importaciones aún permanecen altas, especialmente para consumo en productos de latón. Otro factor fue el efecto continuo de las altas tasas de interés, las cuales fortalecieron el uso de las existencias y de productos terminados y semi-manufacturados.

En el Canadá el consumo declinó en cerca de 5%, mientras que por la recesión en Sudafrica, se llegó al 19% de su demanda en 1984. La demanda de Taiwan cayó en cerca del 25% en contraste marcado con Corea del Sur donde un incremento del 40% en la industria automovilística ayudó a un mayor consumo de cobre, en cerca del 6%.

### PRODUCCION DE COBRE (ECONOMIAS NO CENTRALIZADAS)



1983 - - - -  
1984 ————

### CONSUMO COBRE REFINADO (ECONOMIAS NO CENTRALIZADAS)

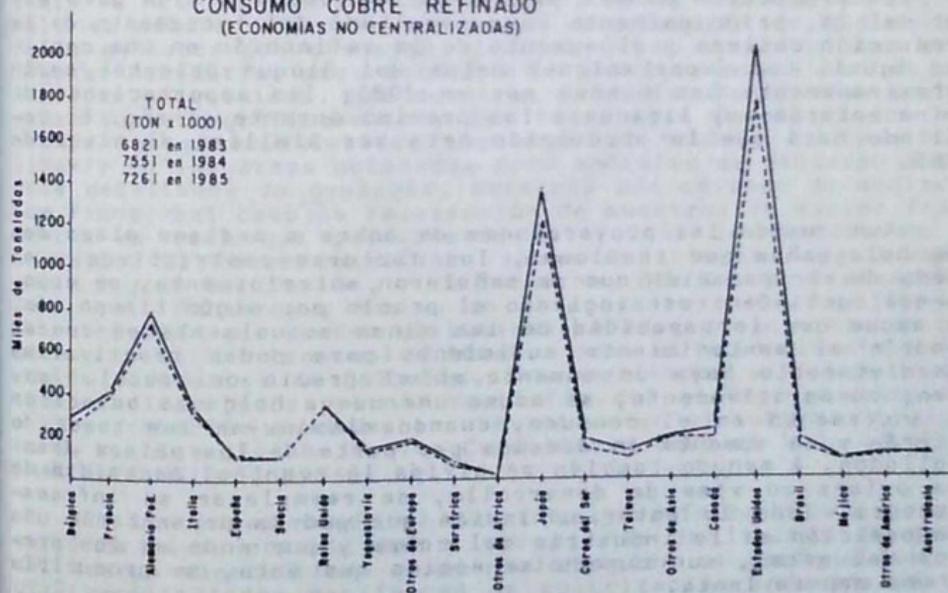


FIG. 2: Países productores y consumidores de cobre. Datos tomados de Mining Annual Review, 1986.

En Europa donde la reactivación económica ha empezado un poco más tarde, la declinación total no fue tan notoria como en Japón y Estados Unidos, aumentando el 1.4% (39.000 toneladas). En Francia disminuyó en cerca del 5%, en la República Federal de Alemania del 2.8%, mientras que en Bélgica registró un aumento del 3,1%.

La fortaleza de la minería y productos refinados durante 1985, hicieron de éste, un año razonablemente seguro. La industria del cobre comenzó en 1986 con proyecciones inciertas. Algún incremento en la demanda ha sido evidente en los Estados Unidos hacia finales de 1985, aún cuando no ha sido tan intenso como se esperaba; pequeños aumentos han sido reportados en Francia. Tanto Japón como Alemania Federal están sufriendo restricciones en sus exportaciones debido al fortalecimiento de sus monedas.

La demanda del cobre está controlada no solamente por el consumo presente, sino también por los futuros prospectos. Una economía pobre indica carencia de la demanda en el futuro, lo cual fortalecerá el uso de las existencias y de productos terminados y semimanufacturados como sucedió en el último año. Es en esta área donde se hará el mayor desarrollo del año y será un factor económico importante. Para 1986 se asume un consumo de 7,4 millones de toneladas, la cual es cerca del 2% más alto que el nivel de 1985.

La producción minera para 1986 se espera sea un poco mayor del 2%, principalmente como resultado del incremento de la producción chilena y el aumento de la refinación en una cantidad igual. Las exportaciones netas del Bloque Oriental serán aproximadamente las mismas que en 1985; las importaciones de China estarán muy ligadas a los precios durante el año. El resultado hará que la producción neta sea similar al nivel de 1985.

Aun cuando las proyecciones de cobre a mediano plazo son más halagüeñas que recelosas, los factores restrictivos y el grado de recuperación que se señalaron anteriormente, se espera que continúen restringiendo el precio por algún tiempo más. Se asume que la capacidad de las minas actualmente en receso tendrán el mantenimiento suficiente para poder reactivarlas inmediatamente haya un aumento en el precio del metal. También, comparativamente, se asume una nueva holganza basada en un incremento en el consumo, cuando disminuyan las tasas de interés y se aumente la demanda por parte de los países desarrollados. A menudo también se olvida la eventual necesidad de los países en vías de desarrollo, de reemplazar su infraestructura. Todo lo anterior indica que podría presentarse una recuperación en la industria del cobre y por ende en los precios del metal, aun cuando se estima que ésta, se producirá de una manera lenta.

### EL COBRE EN COLOMBIA

En esta sección se hace la descripción de la exploración que para cobre se ha adelantado en el país: métodos empleados y resultados obtenidos; asimismo, en los prospectos donde se han efectuado estudios detallados se indicarán las características de la mineralización y el potencial económico.

## EXPLORACION

A partir de 1970 el INGEOMINAS, con miras a la búsqueda de depósitos de metales básicos, inició el reconocimiento geológico y muestreo geoquímico regionales en la parte norte de la Cordillera Occidental. La región con un mejor potencial presenta rasgos peculiares tales como alta pluviosidad, selva densa y por consiguiente carencia de vías de penetración. El método empleado para cubrir el área consistió en el levantamiento de 17 transversas de dirección E-W, a lo largo de los ríos y quebradas principales, haciendo el reconocimiento geológico y simultáneamente la toma de muestras de sedimentos finos y concentrados en batea, tanto de la corriente principal como de todos los afluentes que desembocaran en ella. Las muestras colectadas fueron sometidas a análisis espectrográfico para 32 elementos; los resultados obtenidos fueron tratados estadísticamente por el método de Lepeltier (1969), lo cual permitió la delimitación de varias zonas anómalas, destacándose entre ellas la de Pantanos - Pegadorcito y Murindó, donde se adelataron estudios detallados que se describirán más adelante.

En el año 1973, el INGEOMINAS mediante convenio de cooperación con Naciones Unidas, inició la búsqueda de metales básicos en 2 zonas del país: en la región suroeste con el denominado "Proyecto Metales Básicos de la Cordillera Central y Occidental" en un área de 90.000 km<sup>2</sup>; un poco más tarde, en el extremo norte de la Cordillera Occidental se efectuó el "Proyecto de Metales Básicos del Darién". En la exploración regional, el método empleado fue el de recolección de sedimentos finos en todos los drenajes, junto con las observaciones geológicas necesarias para ayudar a la interpretación de los resultados geoquímicos. Las muestras de sedimentos fueron analizadas espectrográficamente y los resultados interpretados mediante curvas acumulativas siguiendo el trabajo de Lepeltier (1969); en las áreas obtenidas como anómalas se hicieron estudios detallados de geología, muestreo más cerrado de sedimentos finos, así como la recolección de muestras de suelos fragmentos de roca que permitieran determinar la validez de la anomalía. El haber localizado zonas de interés como Acandí, en la región del Darién, y El Infierno, Río Chili, Piedrancha, Domicinal, Patascoy y Mocoa, en el proyecto suroeste, lleva a la conclusión que pueden utilizarse métodos geoquímicos en regiones de climas tropicales húmedos como el predominante en la región occidental de Colombia, con resultados ampliamente satisfactorios. Descripciones completas del sistema de muestreo e interpretación de datos se encuentran en el informe "Proyecto de Metales Básicos en las Cordilleras Central y Occidental" (NACIONES UNIDAS, 1976).

En las zonas donde el muestreo geoquímico detallado resultó de mayor posibilidad y con el fin de limitar la forma del cuerpo mineralizado y su prolongación en profundidad, se utilizaron métodos geofísicos de polarización inducida-resistividad (PI-RES) y transversas magnetométricas; recientemente se ha empleado el CSAMT (Método Audio Magnetotélúrico de Fuente Controlada) además de los anteriores.

De acuerdo con lo expresado por Ropaín (comunicación escrita) el método CSAMT, utiliza todas las señales electromagnéticas audibles con frecuencias que oscilan entre 10 Hz y 20 KHz; estas señales son enviadas a través de un dipolo eléctrico (transmisor) con fuente controlada y captadas en un receptor con el cual se puede calcular la resistividad y profundi-

dad de penetración en Hz, pero teniendo en cuenta siempre los campos eléctricos y electromagnéticos a diferentes frecuencias. Este método permite determinar dentro de un área de interés bastante grande, las zonas de bajos resistivos, en las cuales se ha podido establecer la dependencia de la resistividad con la geología y la alteración hidrotermal presentes, y por consiguiente son los sitios más adecuados para la posterior utilización del método PI-RES que lleva a una delimitación más estrecha de la zona o zonas con mayor contenido de sulfuros. Cada uno de los métodos geofísicos requiere un registro sistemático en el área estudiada, con el fin de comprobar los parámetros de resistividad aparente y porcentaje de efectos de frecuencia (PEF) en superficie, con los de resistividad en profundidad obtenidos en forma indirecta, y además sacar los espectros correspondientes y determinar las zonas de bajos resistivos.

Los métodos geofísicos, por sí solos, no dan los resultados esperados; es necesario combinarlos con otros métodos de prospección como geología y geoquímica detallada para que produzcan su mayor efectividad. En Colombia la utilización de los métodos mencionados ha sido de gran ayuda en la delimitación de cuerpos mineralizados y en la localización de pozos exploratorios, con efectos ampliamente positivos, en varias zonas promisorias.

Los trabajos geológicos y de exploración regionales adelantados por el INGEOMINAS, con entidades como el U.S.G.S. y Naciones Unidas, permitieron la localización y delimitación de las áreas más favorables para la búsqueda de depósitos del tipo pórfido cuprífero, y presentar teoría acerca de su génesis en las mineralizaciones mejor conocidas. En los Andes Colombianos, Jaramillo y Escovar (1980), distinguen dos cinturones que contienen prospectos de pórfidos cupríferos, los cuales presentan características diferentes y son denominados "Cinturón Central" y "Cinturón Cuprífero Occidental". El primer cinturón coincide con la Cordillera Central, cuyo núcleo está formado por rocas metamórficas con edades que van del Precámbrico al Paleozoico inferior; existen además algunos sedimentos jurásicos y cretáceos distribuidos a lo largo de la cordillera. Durante el Jurásico se desarrolló una intensa actividad magmática importante a lo largo del actual flanco oriental de la Cordillera Central. En este cinturón se localizan los prospectos de Mocoa, Alisales, Patascoy, El Plano, Dolores, El Infierno - Río Chili y Los Andes.

El cinturón occidental concuerda con la cordillera del mismo nombre, constituida por una secuencia ofiolítica con rocas ígneas básicas y ultramáficas, basaltos, sedimentos pelágicos y turbiditas, atravesada por una serie calcoalcalina de batolitos y stock de composición predominantemente tonalítica y cuya edad varía del Eoceno al Mioceno medio. Los prospectos de Acandí, Murindó, Pantanos-Pegadorcito, Río Andágueda, Piedrasentada, Dominical y Piedrancha, se ubica en este cinturón. Los dos cinturones están limitados por la zona de Falla de Romeral, que separa los basamentos de corteza continental de la Cordillera Central, de la corteza oceánica de la Cordillera Occidental.

Posteriormente en la publicación "Setting, Characteristics, and Age of the Andean Porphyry Copper Belt in Colombia" (SILLITOE, et al., 1982), se definen en los Andes Colombianos

tres cinturones diferentes de pórfidos cupríferos (Fig. 3): el occidental, emplazado desde principios del Eoceno hasta el Eoceno medio en el basamento ofiolítico, dominio oceánico a lo largo de la Cordillera Occidental; el oriental, generado durante el Jurásico medio, a principios del Cretáceo, en el dominio continental y situado a lo largo de flanco oriental de la Cordillera Central y el flanco occidental de la Cordillera Oriental; entre los dos anteriores se localiza el tercer cinturón formado durante el Mioceno, en el contacto de los dominios oceánico y continental a lo largo y en los flancos de la depresión Cauca-Patía.

Los diferentes prospectos de pórfidos cupríferos están situados en los tres cinturones, según el artículo arriba mencionado, de la siguiente manera: en el cinturón oriental en la vertiente este de la Cordillera Central están los prospectos de Andes y El Infierno - Río Chili; en el flanco oeste de la Cordillera Oriental se encuentran los pórfidos relacionados con las mineralizaciones de California, en el macizo de Santander y el prospecto de Dolores, en el noroeste del macizo de Garzón; el depósito de Mocoa se encuentra en el extremo sur del cinturón donde se unen las cordilleras Central y Oriental. En el cinturón occidental, en la vertiente oeste de la Cordillera Occidental se encuentran los prospectos de Pantanos - Pegadorcito, Murindó, Río Andágueda y Piedrancha; este cinturón se extiende hacia el norte, a la Serranía del Darién donde se presenta el prospecto de Acandí y en la República de Panamá el prospecto contiguo de río Pito. En el tercer cinturón definido a lo largo de la depresión Cauca - Patía incluye, en la región sur, las ocurrencias de El Jambo, Dominical, Piedrasentada y el Piso, en la parte norte la débil mineralización porfirítica relacionada con el distrito de oro de Marmato.

Las características de alteración-mineralización en los sistemas del tipo pórfido-cuprífero de Colombia son extremadamente variables y no forman un patrón sencillo o modelo zonal.

Los prospectos mejor mineralizados en los cinturones occidental y oriental presentan alteración sericitica y de silicatos de potasio intimamente relacionadas con áreas de abundante calcopirita o bornita y molibdenita; en Murindó la alteración potásica varía hacia el exterior a la propilitización sin pasar por una alteración sericitica importante. En Mocoa y en el sector oeste de Pantanos - Pegadorcito, la alteración sericitica es dominante en superficie y lleva a una alteración potásica en profundidad. En California se reconoció alteración argílica avanzada caracterizada por alunita, caolinita, pirofilita y silicificación afanítica en adición a seritización. En contraste, los sistemas más débilmente mineralizados en todos los cinturones están dominados por conjuntos propiliticos caracterizados por clorita, epidota, albita y calcita. Esta alteración típica se encuentra en el cinturón central de Piedrasentada, Dominical, El Jambo, El Piso y Marmato, pero también es predominante en Acandí, El Infierno - Chili, Andes y Dolores. Alteración sericitica localmente superimpuesta a propilitización se encuentra en El Infierno - Chili, Acandí y El Jambo. En prospectos dominados por conjuntos propiliticos, la alteración potásica, está esparcida y débilmente desarrollada en parches como se notó en Andes, El Infierno - Chili y Dolores.

En cuanto al contenido metálico en los sistemas porfiríticos de Colombia sólo es posible conocerlo de una manera real en Mocoa donde se ha llevado a cabo un extenso programa de

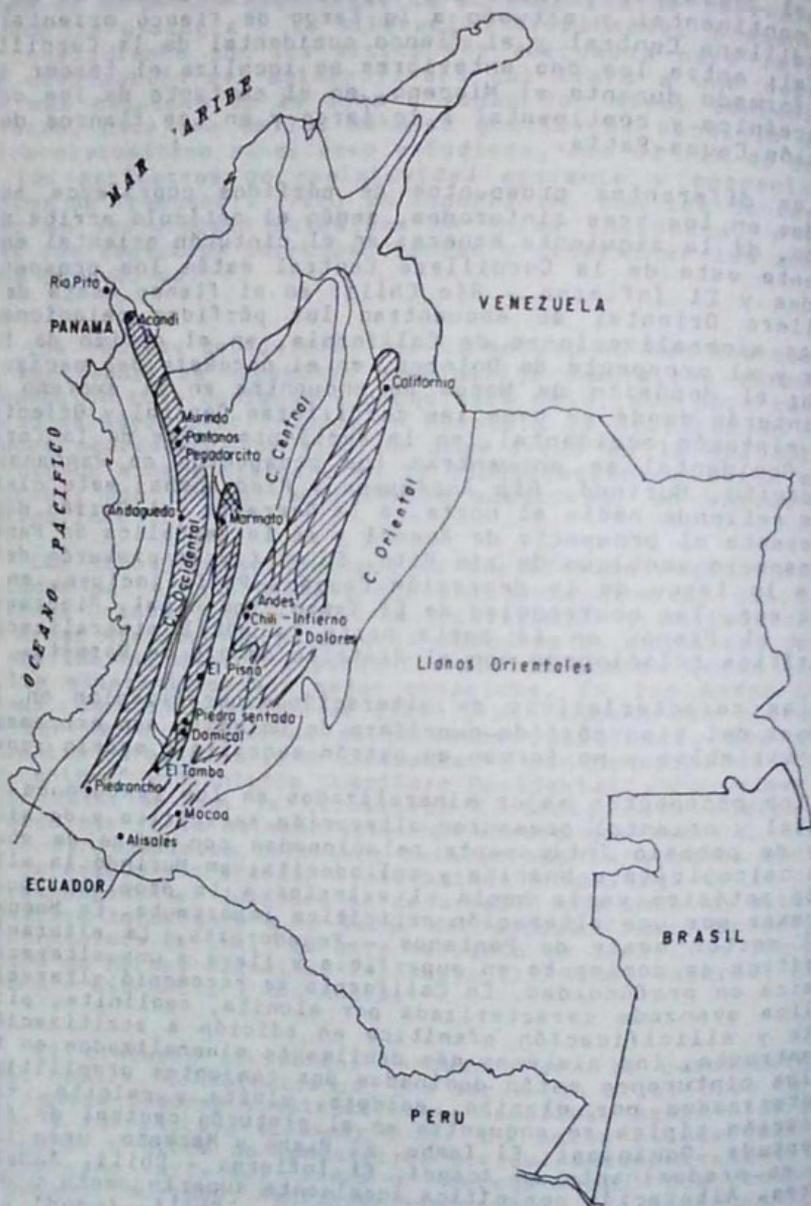


FIG. 3: Localización de los principales prospectos de cobre porfídico relacionados con los tres cinturones morfo-estructurales (SILLITOE, et al., 1982).

perforación. Muchos prospectos se caracterizan por la presencia de cobre y molibdeno, con muy bajo contenido de oro. La proporción Cu Mo varía desde 50:1 a 60:1 en Pantanos, 20:1 a 30:1 en Acandí, 12:1 a 16:1 para el mayor porcentaje de mineralización en El Infierno - Chillí, y 6,5:1 en Mocoa. Oro, es aparentemente significativo sólo en La Rica, sector de Murindó, en el cinturón occidental, donde fragmentos de roca ligeramente oxidados contienen más de 1,5 ppm y suelos más de 2,5 ppm; también se presenta en el sector de San Antonio, en California, cinturón oriental, donde el análisis de muestras de fragmentos de roca colectadas lejos de los filones auríferos, dieron de 0,1 a 1,2 ppm de oro; en ambas zonas se presenta molibdeno.

Depósitos importantes con venas de oro ocurren en el área de California y en el stock de Marmato; venas con algo de oro-plata se encuentran en la periferia del sistema de Dominical (SILLITOE et al., 1982).

A continuación se da a conocer la información más reciente obtenida en la exploración y evaluación de algunos prospectos de cobre y molibdeno que se han adelantado en el país; especial énfasis se ha dado a la Cordillera Occidental, donde por su ambiente geológico se encuentran depósitos de tipo porfido cuprífero, los mayores productores de cobre en el mundo. Esta descripción se hará según el tipo de depósito y por departamentos (Fig. 4), sistema éste empleado en el trabajo de Escorze (1978). Para las manifestaciones donde no se han realizado nuevos estudios se hará la reseña tomada textualmente de ese trabajo.

## PROSPECTOS DEL TIPO PORFIDO CUPRIFERO

Un resumen de las mineralizaciones de este tipo, incluyendo la relación de los informes que pueden ser consultados para ampliación del tema es como sigue:

### ANTIOQUIA

*Prospecto de Pantanos - Pegadorcito.* - (RAMIREZ y ARIAS, 1973). El área de Pantanos - Pegadorcito está localizada al NW de la ciudad de Medellín, en la vertiente oeste de la Cordillera Occidental, y en los límites de los municipios de Frontino y Dabeiba. Está comprendida en las planchas 128-II-B y 129-I-A del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

La roca predominante en el área es una cuarzodiorita de grano medio, intruída por varios cuerpos de dacita y pórfidos dacíticos. La composición de la cuarzodiorita varía entre los siguientes rangos: cuarzo 10-20%; plagioclasa 55-75%; máficos (hornblenda y biotita) 5 - 25%; opacos 0,5 - 5 - 5%. La dacita porfirítica es de tipo hipobasal, con fenocristales de cuarzo y plagioclasa y matriz afanítica de color gris claro.

La fotointerpretación del área y las zonas aledañas muestran la existencia de 4 direcciones dominantes de diaclasamiento, así como la presencia de una falla principal de dirección N-NW denominada localmente falla de Murindó.

Una característica común en la mayor parte de las rocas del área, es la alteración sufrida por los minerales máficos, los cuales son reemplazados por clorita y epidota. La mineralización

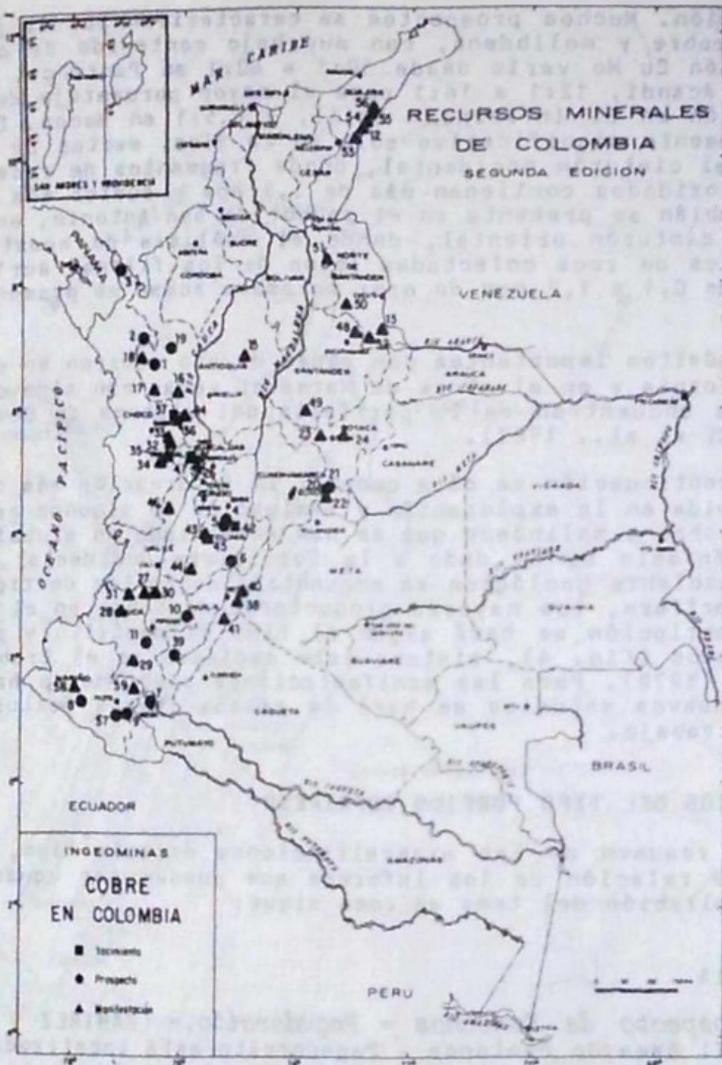


FIG.4: 1) Pantanos-Pegadorcito, 2) Murindó, 3) Acandí, 4) El Infierno - Dhill, 5) Andes, 6) Colores-Natagaima, 7) Mocos, 8) Piedrancha, 9) Patascoy, 10) El Pinar, 11) Piedrasentada, 12) Campo florido, 13) Cerro El Cacho, 14) Cerro Plateado de Salgar, 15) La Clara de La Unión, 16) Páramo de Urao, 17) Mandó, 18) Ciénaga del Tadio, 19) La Esperanza, 20) Cerro El Cobre, 21) U Colonia, 22) Farallones de Medina, 23) Gachentivá, 24) Monquirá, 25) La Pibagina, 26) El Tascón, 27) Suárez-Piedraimán, 28) Mechengue, 29) Cerro Gordó, 30) La Teta, 31) Río Naya, 32) Río Cuchadó, 33) Río Anquedé, 34) Quebrada Móbó, 35) Sitio López, 36) Santa Anita, 37) El Roble, 38) Cerro Neiva, 39) Gronates, 40) El Suspiro, 41) El Hobo, 42) Mina Vieja, 43) Los Guayabos, 44) Puerto Saldaña, 45) San Antonio-Río Tetuán, 46) El Dovia, 47) Belén de Umbria, 48) La Baja, 49) Bolívar-Vólez, 50) Cáchira, 51) El Carmen, 52) El Tuto, 53) Serranía de Perijá: Los Portales, 54) Serranía de Perijá: El Dulce, 55) Serranía de Perijá: Cerrito-Ojo, 56) Serranía de Perijá: El Salado, 57) Cinco (5) Prospectos: Monopamba, Alisales, Blanca, Afiladores y Los Cedros, 58) Barbecosa, 59) Buesaco, 60) La Equia.

lización pirita, calcopirita y bornita ocurre diseminada y en venillas dentro de la cuarzdiorita y la dacita porfirítica.

El muestreo geoquímico detallado permitió la delimitación de 2 zonas anómalas en cobre, molibdeno y plata: la zona de Pantanos en 6 km<sup>2</sup>, presenta valores desde 0,07 a 1,5% de cobre en muestras de rocas y la zona de Pegadorcito a 2 km al NW de la primera, cubre un área de 2 km<sup>2</sup> y presenta valores de 0,07 a 1,0% de cobre en muestras de roca. Ambas anomalías fueron corroboradas por los resultados de los análisis obtenidos en muestras de suelos, finos, y concentrados de bates.

Con el fin de comprobar las anomalías en profundidad se perforaron en Cerro Pantanos siete pozos exploratorios. Los dos primeros se abandonaron por problemas técnicos; el pozo No. 3 con 20 m de profundidad dio valores de cobre entre 1.500 y 11.500 ppm; el pozo No. 4 llegó a 63 m de profundidad dando entre 35 y 12.000 ppm de cobre; el pozo No. 5 con 34,5 m de profundidad dio valores entre 5 y 22.000 ppm de cobre.

El área de este proyecto, mediante el edicto No. 054, junio 4/74 del Ministerio de Minas y Energía le fue entregada como aporte a la Empresa Colombiana de Minas. En 1980 se celebró un contrato entre INGEOMINAS y ECOMINAS para la exploración minera, incluyendo los tópicos de geología, geofísica, geoquímica y perforaciones, trabajos que se realizaron entre marzo de 1981 y diciembre de 1982.

Las actividades realizadas y las conclusiones obtenidas se presentan en el informe "Estudio para Justificación de la Prefactibilidad en el Prospecto de Pórfido Cuprífero de Pantanos - Pegadorcito, Departamento de Antioquia" (ALVAREZ et al., 1983), entregado a ECOMINAS. Algunos datos relativos a este informe son los siguientes: la geología detallada permitió separar cinco diferentes tipos de pórfidos, como también cinco zonas de alteración hidrotermal-mineralización, entre las cuales, la fílica delimita la zona con mayor contenido de cobre. Los estudios de geoquímica se basaron en 665 muestras de suelos colectadas a lo largo de transversas y 274 muestras de esquilmas de roca tomadas sobre los afloramientos de las quebradas en los sectores de mayor interés. Todas las muestras se analizaron por absorción atómica para Cu, Mo, Pb y Zn y algunas para Au y Ag; los valores obtenidos en los análisis para cada elemento se trataron estadísticamente por los métodos de Lepeltier y promedio móvil. Estudios geofísicos combinados de polarización inducida y magnetometría señalaron la existencia de zonas con anomalías fuertes en Pegadorcito y Pantanos. Desde, tanto en superficie como en profundidad, en concordancia con las delimitadas superficialmente por geología y geoquímica. En las zonas consideradas como óptimas se perforaron 9 pozos, para un total de 2.756,61 m, habiéndose encontrado un comportamiento muy heterogéneo, tanto en litología como en alteración hidrotermal y mineralización, lo cual no permitió ninguna correlación espacial entre ellas. También se pudo determinar la existencia de dos etapas de mineralización y una etapa de intrusión de pórfidos post-mineralización. Aprovechando los pozos que resultaron con mayor contenido de mineral, se hizo una estimación de reservas por medio de microcomputador, en el cual se obtuvieron por distintos métodos del orden de 60 a 70 millones de toneladas con 0,6% de cobre y 90 ppm de molibdeno, con una confiabilidad de 10% en tonelaje y 5% en tenor; es preciso anotar que gran parte de estas reservas se encuentran por debajo del nivel freático regional.

Desde el punto de vista económico, el informe concluye que el prospecto de pórfido cuprífero de Pantanos - Pegadorca, no ofrece perspectivas favorables, dadas las condiciones actuales y el futuro próximo del mercado de minerales.

*Area de Dabeiba.*— En el municipio de Dabeiba, 30 km al SE de la población, en el cañón del río Julio afluente del Inguaridó, se encuentra la mina la Esperanza; además del cobre en filones se reporta calcopirita y pirita diseminadas (1,2% Cu) en rocas porfíricas propilitizadas (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 1978, Bogotá).

## CAUCA

*Prospecto El Pisno.*— (ORREGO, 1977). Situado al NE del departamento, en la cima de la Cordillera Central, límites de los municipios de Silvia y Belalcázar. En el área afloran rocas metamórficas cretáceas y pre-cretáceas intruidas por rocas ígneas porfíricas de composición diorítica a cuarzodiorítica de edad terciaria. El conjunto se presenta cubierto por rocas volcánicas andesíticas de edad terciaria-cuaternaria. La mineralización es principalmente diseminada y en venillas, asociadas a los pórfidos andesíticos, dacíticos y dioríticos. El principal sulfuro es pirita, junto con calcopirita, molibdenita, oro, galena, blenda y pirrotina; en algunos sitios se observan calcosina y covelina. Se distinguen cuatro facies de alteración hidrotermal: potásica, sílica, argílica y propílica. Los resultados geoquímicos de muestras de rocas y sedimentos activos demostraron que existen zonas anómalas en Cu, Mo, Au, Pb, Zn y Ag.

En la región de Piedrasentada (MARILANDA, 1976) localizada al SE de Popayán, entre los municipios de Rosas y El Bordo, se detectaron 4 zonas anómalas en cobre (extensiones menores de 0,5 km<sup>2</sup> para cada una de ellas) en pórfidos propilitizados. La mineralización, diseminada y en venillas, es muy pobre, pero dadas las condiciones geológicas observadas, el autor de ese trabajo recomienda adelantar estudios geofísicos.

Con base en los trabajos anteriores y con el propósito de clarificar la geología, determinar las estructuras geológicas y evaluar la potencialidad minera del área, el INGEOMINAS firmó en mayo de 1984, un convenio de cooperación técnica con el Gobierno Japonés para el estudio de esta región, iniciándose los trabajos de campo en agosto del mismo año.

El área bajo exploración denominada "Almaguer" está localizada al sureste de Popayán y hace parte de los municipios caucanos de La Sierra, La Vega, Almaguer y Bolívar. Una vez hecha la evaluación de la geología y la geoquímica regional de más de 4.000 muestras de sedimentos activos. (Fase I del proyecto), las siguientes 4 áreas fueron seleccionadas para estudios posteriores: Piedrasentada (21 km<sup>2</sup>) Dominical (16 km<sup>2</sup>), Cerro Negro (20 km<sup>2</sup>) y La Medina (4 km<sup>2</sup>); en las dos primeras se efectuaron trabajos de geofísica detallada y perforaciones exploratorias. En Cerro Negro se encontraron indicios de mineralización filoniana de oro y plata y de sulfuros diseminados asociados a cuerpos intrusivos; debido a que la zona de interés corresponde a una región montañosa de difícil acceso y con muy débiles indicios de mineralización, lo cual dificulta extremadamente cualquier geoexploración, los esfuerzos se orientaron hacia las dos primeras áreas mencionadas. En La Medina, no se encontró ningún rasgo geológico que indicara la presen-

cia de una posible mineralización en el área (JICA, MMAJ, INGEOMINAS, 1985).

Area Piedrasentada: Tomada del Informe JICA, MMAJ, INGEOMINAS, 1985 y 1986, Fases I y II. El área de interés está localizada 40 km al sur de Popayán, con una extensión de 6 x 3,5 km. Los pueblos más cercanos corresponden a Piedrasentada al oeste y La Sierra al este. Igualmente, existe un caserío sobre la carretera Panamericana donde se encuentra una oficina de TELECOM y una Inspección de Policía.

La geología del área está compuesta en orden ascendente por: rocas verdes volcánicas cretáceas (Grupo Diabásico), Formación Esmita del Terciario, intrusivos ígneos terciarios y la Formación Popayán del Terciario-Cuaternario. Las rocas del Grupo Diabásico afloran en la parte oeste y especialmente en la zona de San Francisco, son de composición basáltica, color gris verde oscuro, textura afanítica, localmente presentan indicios de alteración hidrotermal, observándose únicamente cloritización y epidotización asociadas a venillas de cuarzo y calcita, asociación típica de alteración propilitica; esporádicamente esta roca se encuentra interestratificada con capas muy delgadas de shales silíceos. La Formación Esmita está compuesta por limolitas, areniscas y en menor proporción conglomerados en estratos casi horizontales a excepción de las regiones cercanas a los intrusivos y fallas cuando los afectan. La Formación Popayán consta esencialmente de conglomerados no consolidados y areniscas inmaduras y mal sorteadas, flujos de lodo y en menor proporción limolitas; el origen del material de esta secuencia es volcánico. Grupos intrusivos ácidos a intermedios se encuentran distribuidos en toda el área de interés en formas irregulares y con base en observaciones de campo se pueden dividir en dos grupos: uno de composición diorítica o granodiorítica, holocristalino, equigranular y el otro es de textura porfídica y de composición dacítica o andesítica; como producto final de la actividad magmática se observan en varios sitios diques básicos negros. La edad absoluta de las rocas intrusivas en la región fue datada por Sillitoe et al. (1982), en 17,4 millones de años, a partir de muestras seleccionadas en Zanja Grande, edad que concuerda con las obtenidas en otras regiones.

Las fallas predominantes observadas en el área tienen una dirección NNW (N60W) la cual es perpendicular al rumbo general predominante NNE; el modelo de distribución de los intrusivos y la elongación sugiere que existieron fallas direccionales NE-SW, NW-SE, y en menor proporción E-W y N-S durante la actividad magmática.

Tres tipos de mineralización fueron observados en el área: la primera es disseminación y "Net work" compuesta esencialmente por pirita y en menor proporción por minerales de Cu y Mo, generalmente asociada a las rocas intrusivas; la segunda corresponde a filones o vetas de cuarzo limonitizadas, con un ancho que varía entre 5 y 30 cm y dirección general N-S y NW-SE; la mayoría fueron prospectadas para oro y una contiene estibina; se considera que esta mineralización está muy cerca a la superficie y es de muy baja temperatura. El tercer tipo, mineralizaciones de placer, son trabajadas manual e intermitentemente en los tributarios y ríos principales de la región.

Con el objeto de delinear mejor la zona y determinar las características, se adoptaron dos métodos geofísicos: CSAMT

que permitió conocer la dependencia de la resistividad con geología y alteración hidrotermal y el SIP (Método espectro de polarización inducida) aplicado a las zonas resistivas y prometedoras para de esta manera localizar las fuentes y establecer sus características.

Para comprobar la continuidad de la mineralización a profundidad en el área de Piedrasentada, se perforaron 5 pozos con profundidades variables entre 300,6 y 351,4 m, para un total de 1.655,6 m perforados; los núcleos obtenidos y los sondeos fueron descritos teniendo en cuenta la litología, alteración y mineralización; asimismo, cada 15 m se tomó una muestra con una longitud de 1,5 m correspondiente a un cuarto de núcleo total para ser analizada por absorción atómica para oro, plata, molibdeno, cobre, plomo y zinc.

Como resultado de los trabajos anteriores se obtienen algunas conclusiones entre las cuales se destacan las siguientes: se identificaron dos épocas de mineralización, la más antigua corresponde al depósito de la mena de magnetita concentrada en el Grupo Diabásico, y la más reciente es la mineralización de tipo pórfido cuprífero asociada con rocas intrusivas e intermedias de edad Mioceno, la cual produce una zona de alteración propilítica ampliamente distribuida, constituida principalmente por pirita con muy pocas cantidades de calcopirita y molibdenita presentes en venas de cuarzo; el tenor promedio de los análisis es: oro 0,1 g/t y cobre 0,03%; el resto de los elementos tales como plata, molibdeno, plomo y zinc son demasiado bajos para discutirlos; por todo lo anterior se considera que el área de Piedrasentada fue notablemente estudiada y que no es necesario adelantar trabajos posteriores en dicha zona.

Área Dominical: Informe JICA, MMAJ, INGEOMINAS, 1985 y 1986. Se localiza al sur del área anterior y en cercanías del caserío San Miguel, con una forma rectangular de 4x4 km limitada al oeste por el río Pancitará y al noreste la bordea el río Putis; las elevaciones varían entre 1100 y 1600 m, s.n.s.

La geología del área representada por la Formación Esbista intruida por cuerpos cuarzodioríticos, dacíticos y microdioríticos. Descansando discordantemente sobre las unidades anteriores se encuentra la Formación Popayán del Terciario Cuaternario. Los cuerpos intrusivos tienen una distribución característica tal como sucede con la diorita holocristalina al NE y la dacita porfídica al S. En la zona central del cuerpo dacítico se encuentra una roca diorítica; la relación existente entre estas dos rocas es transicional; igualmente sucede al NE del área donde aflora una microdiorita dentro del cuerpo diorítico. La elongación de los intrusivos está controlada por direcciones primarias NE-SW, NW-SE y subordinadas E-W, N-S.

Dentro de la zona de interés se observaron dos tipos de mineralización: una compuesta por diseminación y reticulada y la otra conformada por mineralizaciones filonianas. La primera se presenta en la parte central de la zona trabajada y relacionada a los cuerpos intrusivos dioríticos y los dacíticos; las ocurrencias minerales se encuentran como relleno de fisuras y diseminación; la composición mineralógica está representada esencialmente por pirita (0,5% por volumen) y en menor proporción calcopirita y muy pequeñas cantidades de molibdenita; debido a la intensa meteorización química en el área, la mayoría de los sulfuros a lo largo de los filos están lixiviados y transformados a agregados limoníticos. La minera-

lización filoniana fue observada dentro y en los alrededores de la mineralización diseminada; sin embargo, un filón independiente fue localizado en el flanco norte del río Putis conformado esencialmente por estibina-calcopirita y pirita en ganga de cuarzo. Los rasgos estructurales promedios de los filones son:  $N45^{\circ}60'W$  en dirección, buzamiento vertical y un espesor entre 15 y 60 cm.

En el centro del área con mineralización diseminada, las rocas exhiben alteración filica en una extensión no mayor de 100 m; el resto de la zona presenta alteración propilítica constituida por la presencia de clorita-epidota y ocasionalmente calcita. En los alrededores del área con diseminación es común encontrar venillas de pirita rellenando fracturas y diaclasas; la alteración de la roca encajante es muy débil y la textura de la roca y su composición mineralógica no presentan ningún cambio físico-químico.

En la zona de interés, en las diferentes líneas geológicas se efectuaron trabajos geoquímicos mediante la recolección de muestras de suelo, horizonte B, espaciadas entre 150 a 200 m; en las quebradas se recolectaron muestras de fragmentos de roca en todos los afloramientos existentes. Las muestras de suelos fueron analizadas por absorción atómica para Au, Ag, Cu, Pb, Mo, Ni y Cr; las de fragmentos de roca se analizaron para Au, Cu y Mo.

Métodos geofísicos de SIP e IP se realizaron durante 1985, levantándose 4 líneas de 1,5 km cada una y se leyeron 212 estaciones para cada método; durante 1986 se hizo un mayor detalle geofísico del área utilizando el método IP en 7 líneas cuya longitud total fue de 12 km y de 120 el número de estaciones medidas.

De acuerdo con Marín (Informe interno INGEOMINAS, 1987) con el fin de comprobar la mineralización en profundidad, durante 1986, se perforaron 6 pozos exploratorios en el área de Dominical; la longitud de los sondeos varió entre 300 y 350 m alcanzándose un total de 2.050 m perforados. Con base en los datos proporcionados por el muestreo de esquirlas de roca en superficie, se decidió muestrear los núcleos obtenidos cada 15 m en un tramo de 2 m en los primeros cinco pozos y en el último (CJM-11) cada 30 m, con un total de 111 muestras para ser analizadas por absorción atómica para oro, cobre y molibdeno. Los resultados de estos análisis no fueron enteramente satisfactorios; sin embargo, los primeros 140 m del pozo CJM-7 presentaron una alteración argílica avanzada (Cu entre 0,1 y 0,2%, Au 0,4 gr/t y Mo 0,01), para pasar luego a una alteración propilítica con decrecimiento en el tenor de la mineralización. Los demás sondeos siempre se iniciaron con una alteración propilítica bastante fuerte y una mineralización relativamente abundante, sin llegar a ser económica; a medida que se fueron profundizando disminuían considerablemente hasta perder todo interés. Esta situación confirma una interacción muy cercana a la superficie de soluciones hidrotermales ascendentes con aguas meteóricas descendentes, en donde la fuente mineralizada no fue lo suficientemente rica en contenido metálico, igual como para formar un depósito económicamente rentable. Igualmente, el modelo textural y mineralógico del pozo CJM-7 coincide con muchos depósitos epitermales ricos en oro, con la diferencia que el modelo de Dominical no presentó un contenido metálico alto.

## CHOCO

*Prospecto de Murindó.*— (GUARIN y ALVAREZ, 1977). Mediante el estudio geológico y geoquímico de 130 km<sup>2</sup> en la parte NE del Departamento del Chocó se detectaron 5 zonas anómalas en cobre con las cuales están relacionadas en parte otros elementos como molibdeno, zinc y oro, detectados en muestras de roca, suelos, sedimentos activos y concentrados de batea.

La cartografía geológica del área indica la existencia de rocas ígneas máficas, dioritas y gabros predominantemente, intruidas por el Batolito de Mandé que muestra cambios de facies produciendo cuarzdioritas propiamente dichas, cuarzdioritas y microcuarzdioritas porfiríticas y pórfidos cuarzdioríticos. El metamorfismo térmico generado por la intrusión ha producido rocas especialmente de la facie hornblenda-cornubanita. Además, pequeños cuerpos de serpentina se presentan esporádicamente asociados con zonas de fallas.

Las rocas ígneas mencionadas junto con pórfidos dacíticos y andesíticos, los cuales forman pequeños cuerpos elongados que cortan el batolito, y la ocurrencia esporádica de basalto hornbléndico, sugieren el desarrollo de un magmatismo cálcico-alcalino. El sistema de fallas de Murindó ha producido intenso cizallamiento y deformación en las rocas adyacentes, originando desde brechas hasta ultramilonitas.

La prospección geoquímica detallada de suelos sobre las 5 zonas de interés confirmó y demarcó mejor las anomalías. Sólo tres de ellas, por su extensión y rango de valores, tienen potencialmente mayor importancia.

La primera zona se localiza entre la quebrada La Rica, afluente del río Coredecito y las cabeceras de la quebrada Bgatal, tributaria del mismo río. Ocupa un área total de 1 km<sup>2</sup>, alargada en dirección norte-sur, con un rango en contenido de cobre en suelos de 300 a 4.200 ppm. Presenta en gran parte oro asociado, en un área irregular de 0,5 km<sup>2</sup> con valores entre 0,05 y 2,50 ppm. Exhibe además molibdeno asociado, en concentraciones que fluctúan entre 10 y 200 ppm; el zinc se presenta en forma periférica a las anomalías de cobre.

En el sector de Jarapetó, situado a 1,7 km al noroeste de la primera, existe otra anomalía importante. De forma aproximadamente rectangular con un área de 1,1 km<sup>2</sup> y su contenido de cobre en suelos fluctúa entre 350 y 1.390 ppm, mientras que en rocas varía entre 700 y 15.000 ppm. Muestra también en parte oro asociado y zonas de concentraciones de molibdeno entre 10 y 700 ppm se superponen en alto porcentaje a la anomalía cuprífera, la cual exhibe además un halo de zinc.

La tercera anomalía de importancia está localizada en el sector de Táparos, 2 km al norte de la anterior. Se presenta en bandas alargadas, lo cual sugiere un posible control estructural de la mineralización. Está fraccionada en tres anomalías mayores, desconociéndose su área total, pero excede de 0,3 km<sup>2</sup>. Los valores de cobre en suelos oscilan entre 350 y 980 ppm. Presenta oro, molibdeno, zinc y plomo asociados.

En el área, los sulfuros principales son pirita y calcopirita que ocurren en forma diseminada y en venas rellenas de fisuras. Las soluciones hidrotermales han sido muy activas en el área, prevaleciendo las alteraciones propiliticas y potási-

cas ligadas a las anomalías para cobre más importantes que fueron demarcadas en el estudio.

Por las características litológicas, estructurales, de mineralización, alteración, y respuestas geofísicas observadas, los autores concluyen que las zonas anómalas para cobre delimitadas en el estudio, ofrecen condiciones altamente favorables para el desarrollo de yacimientos del tipo pórfido cuprífero.

*Prospecto de Acandí.* - (Tomado de INGEOMINAS, 1982, NACIONES UNIDAS, 1977a). En enero de 1975, dentro del Programa Metales Básicos de INGEOMINAS-Naciones Unidas, se llevó a cabo la prospección minera de la Serranía del Darién, en la parte septentrional de Colombia, cerca de la frontera con Panamá. El programa se inició con un reconocimiento general del área entre Juradó en la Costa Pacífica y Sautatá sobre el río Atrato, y de aquí hasta Zapzurro en la Costa Atlántica. Luego se prosiguió con un reconocimiento semi-detallado del río Tigre hacia el norte, área seleccionada con base en los primeros resultados geoquímicos y por su ambiente geológico similar al del río Pito en Panamá, donde se encuentra una mineralización del tipo pórfido cuprífero.

Esta primera etapa condujo al descubrimiento de valores anómalos de cobre, molibdeno y zinc en los sedimentos activos de los ríos Muerto y Acandiseco. Con base en estos resultados, el programa se concentró en esta zona en la cual se realizó un levantamiento topográfico de las quebradas y filos, un estudio geológico y geoquímico detallado y una serie de perfiles de polarización inducida y magnetometría.

En el área afloran rocas intrusivas y volcánicas, cuya edad probable va desde el Cretáceo superior hasta el Terciario superior, y las cuales constituyen la prolongación oriental de la Cordillera Central de Panamá. La secuencia volcánica aflora en la parte oeste del área estudiada y representa probablemente las rocas más antiguas existentes. Se le asigna una edad Cretácea por correlación con rocas similares en Panamá. El grupo está constituido por lavas y tobas andesíticas y basálticas con variaciones texturales de afaníticas a porfiríticas. Diabases, latitas y latitas cuarzosas forman parte de este grupo, aunque en menor proporción; muestran escasa magnetita, y esporádicamente pirita.

Las rocas intrusivas de esta zona hacen parte del Batolito de Acandí conformado por cuarzodiorita de edad terciaria ( $38 \pm 3$  m.a., K/Ar), con facies leucocrática, horabléndica y diorítica, intruida por algunos pórfidos considerados tardíos. Esta secuencia intruye rocas volcánicas de composición basáltica-andesítica de edad Cretácea tardía. La mineralización de cobre y molibdeno está relacionada con la cuarzodiorita, la cual está afectada por alteración hidrotermal propilitica y filítica. El modelo general que exhiben las rocas intrusivas de la provincia comagmática del río Muerto - Acandiseco y río Pito en Panamá, sugiere que estas rocas son producidas por diferenciación de un magma parental, con posible asimilación parcial de las rocas volcánicas pre-existentes.

En cuanto a la geología estructural del área río Muerto-Acandiseco se puede manifestar que en general todas las rocas muestran fuerte fracturamiento y cisallamiento. Se destacan dos sistemas de diaclasamiento, N-S y E-W, pero no se observó una relación clara con la mineralización, aunque por geofísica

se sugiere un control estructural de la mineralización con rumbo aproximado  $N20^{\circ}E$ . En cuanto a los cizallamientos se destacan dos sistemas en direcciones N-S y  $N20^{\circ}-30^{\circ}W$ . Las cizalladuras son verticales mostrando desplazamientos laterales tanto a la derecha como a la izquierda.

Los trabajos realizados en la segunda etapa, principalmente los sondeos con broca de diamante, el estudio microscópico de mayor cantidad de secciones delgadas y el mayor detalle cartográfico, permitieron hacer una interpretación y delimitación de las zonas de alteración hidrotermal, resultando solamente dos tipos de alteración propilítica y filica.

La alteración propilítica cubre la mayor parte del área y consiste principalmente de clorita y en menor porcentaje epidota y calcita con venas silíceas. La albitización de los feldspatos y la cloritización intensa de los minerales ferromagnesianos dan origen a la epidota y a la calcita; también se concluyó que la alteración filica suprayace la propilítica en forma de cubierta con contactos subhorizontales. La zona propilítica relacionada con dicha cubierta es la que muestra mayor concentración de cobre y molibdeno. Según Sillitov (comunicación oral), la alteración potásica no existe en el área, y su lugar ha sido tomado por la propilítica. Los sulfuros presentes en esta zona son: pirita, calcopirita, bornita en menor cantidad y molibdenita en venas silíceas que no exceden el 2% del volumen total de la roca; la relación pirita/calcopirita es baja y varía de 1:1 a 2:1; son muy comunes las venas de yeso formado por hidratación a partir de la anhidrita que como tal, sólo fue encontrada en una muestra de pozo A-1 a 226 m de profundidad. El valor promedio en cobre para la zona propilítica mejor mineralizada varía entre 0,15 a 0,35% con 0,003% de molibdeno para dar una relación Cu / Mo de 30:1 a 50:1.

La alteración filica está bien desarrollada en el nacimiento de algunas quebradas y en la zona central de los filos 10, 104 y 110 afectando la cuarzodiorita y la cuarzodiorita leucocrática, siendo difícil su identificación en esta última por el índice de color tan bajo. Esta alteración se reconoce por el alto grado de silicificación penetrativa, por el reemplazamiento casi total de los ferromagnesianos por sílice y por la abundante sericita diseminada y en venas que dan en general a la roca un color blanco. La mineralización presente en esta zona consiste en pirita abundante en venillas y molibdenita relacionada con venas de cuarzo. La zona filica muestra la mayor abundancia de minerales secundarios de cobre; calcosinas, covelina, azurita y cuprita se encuentran diseminadas en cristales finos, a veces localizadas a lo largo de venillas reemplazando calcopirita y raramente exceden el 1% de la roca. Los efectos de la alteración filica sobre la roca original producen caolinización y sericitización a partir de la plagioclasa a lo largo del clivaje y en microfracturas; el cuarzo es esencialmente penetrativo y se desarrolla en mosaicos. Los minerales ferromagnesianos se encuentran casi totalmente destruidos dejando residuos de epidota y esfena. Minerales arcillosos asociados con los procesos de sericitización también están presentes. Gracias a las perforaciones realizadas sobre filo 104, fue posible determinar el espesor de la zona filica, el cual fluctúa entre 60 y 90 m.

Durante los trabajos de campo se observaron zonas arcillosas que pudieron indicar alteración argílica, pero fue imposible establecer criterios definidos para diferenciar tal alteración de la meteorización ya que ambos fenómenos están

superpuestos, especialmente en las zonas afectadas por cizallamiento y fallamiento.

Un programa de perforaciones, con broca de diamante, se realizó durante el estudio detallado (segunda fase), con el propósito de conocer el comportamiento de la mineralización y de los tipos de profundidad; debido a lo abrupto de la topografía, las perforaciones efectuadas fueron localizadas sobre los filos 104 y 110 en dirección vertical y basadas en el estudio combinado de la geología, geoquímica, alteración y geofísica realizadas en la primera etapa del proyecto. La longitud perforada fue de 1.110,09 m (3.642 pies) en 6 pozos cuya profundidad varió entre 90,12 y 343,2 m.

El muestreo de los núcleos se hizo cada 5 pies en los tramos donde la recuperación así lo permitió; cuando ésta fue muy baja, los tramos fueron variados tratando de obtener una cantidad de muestra suficiente; la mitad de la muestra se conservó en la caja como testigo y la otra mitad se envió al laboratorio para análisis por absorción atómica para Cu, Mo, Pb, Zn.

De las conclusiones del informe Naciones Unidas-INGEOMINAS (1982), se resaltan las siguientes: el tipo de roca que contiene la mineralización es una cuarzdiorita que conforma un cuerpo de dimensiones batolíticas, mientras que los pórfidos intrusivos en ella son notablemente estériles y de edad claramente posterior a la mineralización; se pudo determinar que la alteración propilítica que infrayace la cobertura filica es la que la contiene los mayores valores en metales básicos, tales valores corresponden a sulfuros primarios y disminuyen hacia la superficie dentro de la cubierta filica; el patrón de alteración en el área no es concéntrica, sino que muestra un zonamiento vertical con la presencia de sólo dos tipos de alteración: la filica y la propilítica; dadas las condiciones de pH y eH y las características topográficas del terreno, no existe en el área una zona de enriquecimiento supergénico. De acuerdo con los valores obtenidos para cobre y molibdeno en los análisis de los núcleos de perforación 0,2 Cu y 0,005% Mo respectivamente se concluye que el prospecto de pórfido cuprífero de Acandí, no alcanza niveles económicos para que pueda ser considerado como un depósito rentable en un futuro próximo. Por lo anteriormente expuesto no se recomiendan nuevos estudios en el área, sin descartar que en zonas aledañas no estudiadas en detalle por INGEOMINAS, se puedan definir prospectos de igual o mejores características, ya que tanto el norte como al sur del área se encuentra el mismo ambiente geológico.

*Prospecto de Piedrancha.*— (INGEOMINAS, 1977). El área de interés está localizada sobre el drenaje de la quebrada Piedrancha unos 60 km al oeste de Pasto. Durante los reconocimientos geológicos y geoquímicos del área se descubrieron 9 drenajes anómalos, los cuales mostraron valores significativos de cobre, plomo, zinc, plata y molibdeno. En general, la distribución de las anomalías sugiere cierta zonificación de los elementos con cobre y molibdeno hacia la parte central y plomo, plata y zinc hacia los bordes.

El conocimiento geológico que se tiene del área es muy limitado, pero el número de anomalías, así como de los factores geológicos favorables hallados hasta el momento indican que se trata de un área promisoría la cual debe ser objeto de una exploración detallada.

En junio de 1980 se firmó un convenio con el Gobierno del Japón por el término de 3 años, para explorar la región de Piedrancha y conocer el verdadero potencial minero de varias de sus áreas más prometedoras. Las labores desarrolladas y resultados obtenidos se describen ampliamente en los informes: "Report on Geological Survey of Piedrancha Area" Fase I, 1981; Fase II, 1982; Fase III, 1983; Consolidated Report, 1983 de MMAJ - JICA y en el Informe "Estudio Preliminar de Factibilidad del Desarrollo del Área el Diamante - Paraíso - Bomboná, Departamento de Nariño. Proyecto de Ingeominas", 1984, MMAJ - JICA, de los cuales se extrae la información que se presenta en continuación.

La región explorada, se localiza en el flanco occidental de la cordillera occidental, tiene una extensión aproximada de 1000 km<sup>2</sup> y cubre parte de los municipios nariñenses de Saaneniego, Guachavés y Piedrancha. Durante la primera fase se realizó el reconocimiento geológico y geoquímico regional y la ubicación de las anomalías principales.

De manera general la geología del área consiste, en la parte este, en rocas sedimentarias arcillosas, débilmente metamorfosadas, pertenecientes al Grupo Dagua, mientras que rocas verdes volcánicas, Grupo Diabásico se encuentran al oeste; la granodiorita de Piedrancha y la diorita de Canellera intruyen las rocas arcillosas en la parte central de la región oriental. El análisis radiométrico de una muestra de la diorita del río Canellera dio una edad de 29 m.a.

La mineralización es heterogénea y distribuida de acuerdo con las diferentes clases de rocas; venas auríferas polimetálicas se presentan principalmente en la parte este y mineralizaciones de tipo pórfido cuprífero se hallan al oeste. Los depósitos auríferos fueron divididos en dos grupos, uno de venas de cuarzo blanco lechoso se halla en la parte nororiental; el segundo grupo corresponde a venas polimetálicas con sulfuros abundantes y localizados en el sureste.

La exploración geoquímica regional y el estudio geológico permitieron la ubicación de cinco mineralizaciones de tipo pórfido cuprífero denominadas Río Blanco, La Verde, Ramos, Santa Rosa y Gualcalé este. Trabajos semidetallados llevaron a la conclusión que la mineralización y alteración es muy débil en La Verde y por lo tanto no se justifica estudio posterior; en las otras zonas es necesario efectuar programas detallados para determinar su verdadero interés económico; sin embargo, debido a la logística existente no se realizó estudio en esta zona y las actividades se orientaron hasta el nivel de prefactibilidad en la región de Bomboná - El Diamante, por su importancia para metales preciosos.

En Bomboná se observa una granodiorita de edad terciaria. La mineralización consiste en filones de relleno muy similares a los del Diamante; en ambas zonas las vetas tienen una dirección N60°W y buzamiento 60-90°NE, conformando estructuras en échelon y su continuidad horizontal alcanza entre 100 y 300 m. La composición mineralógica de estas vetas es esencialmente pirita y arsenopirita acompañadas con pequeñas cantidades de esfalerita, galena y calcopirita asociadas con cuarzo con ganga.

El área El Diamante está compuesta por rocas verdes volcánicas intruidas por un pequeño "stock" de granodiorita, localizado en la esquina suroeste de la zona. La mineralización

encontrada corresponde al tipo filoniano de relleno de fisura. Las vetas generalmente tienen una dirección N60°W y buzamiento 70°N y su espesor varía de 0,3 a 9 m y están compuestas por pirita, arsenopirita, esfalerita, galena y calcopirita asociadas con cuarzo; también se encuentra oro y plata nativos (electrum), argentita y pirita. Seis minas de oro están en explotación con una producción muy baja, mediante una tecnología muy incipiente.

Con esta información y previendo la posibilidad de establecer una mina con un movimiento diario de 150 toneladas de mena se decidió llevar a cabo la etapa de perforación, cuyo objetivo inicial fue el demostrar la existencia de 600.000 toneladas de mena. La perforación se inició en 1981 y en 1982 se terminaron 15 pozos para una profundidad total de 2093 m. Con estos sondeos se demostró la presencia de 477.000 toneladas de mena con un tenor de 5,8 gr de Au, 91 gr de Ag, 2,54% de As, 1,7% de Zn, 0,22% de Cu y 0,11% de Pb. El porcentaje del mineral explotable es de 88%; en consecuencia se estableció que la mina podría tener 10,6 años de vida con un movimiento diario de 150 toneladas de mena.

Como resultado final de esta investigación, en abril de 1984 se entregó el informe preliminar de factibilidad del área El Diamante en el cual están incluidas las diferentes posibilidades de explotación, beneficio, prueba metalúrgica, necesidades de equipo y obras de ingeniería, así como los diferentes estudios y actividades que habría que realizar durante la etapa de factibilidad.

#### NORTE DE SANTANDER

En el cerro El Cacho, municipio de Pamplona, 3 km al oriente de la carretera Pamplona - Chitaga, se presenta un área de unos 800 km<sup>2</sup> con mineralización diseminada en cuarzomonzonita muy fracturada; los minerales incluyen covelina, cobre nativo y malaquita (WARD y GOLDSMITH, 1970).

#### PUTUMAYO

*Prospecto de Mocoa.* - (ESCORCE, 1977). De acuerdo al proyecto Metales Básicos (Segunda Fase), se llevó a cabo un estudio geológico y geoquímico detallado, en un área de 27 km<sup>2</sup>, localizada al norte del río Mocoa, unos 10 km al N-NW de la población de Mocoa capital de la Intendencia del Putumayo. El marco geológico del área es similar al descrito por Barrero (1969) para la Cordillera Central en los alrededores de Payandé (Tolima).

Dentro de la zona cartografiada en este estudio, afloran rocas del Precámbrico, Triásico-Jurásico y Terciario medio. Las rocas asumidas como del Precámbrico ocupan una cuña, delimitada por fallas, cuyo contacto norte es con rocas sedimentariss marinas del Triásico superior, asignadas a la Formación Payandé. Estas, a su vez, infrayacen hacia el norte a rocas volcánicas subaéreas del Triásico superior y el Jurásico más inferior pertenecientes a la Formación Post-Payandé, redefinidas recientemente como Formación Saldaña. Las formaciones del Triásico-Jurásico están intruidas por "stock", apófisis y diques de textura porfirítica y de composición intermedia. Hacia el suroeste, están intruidas por el Batolito de Mocoa. La mayoría de estos intrusivos se puede considerar de edad Jurásica, y son en general contemporáneas con las rocas volcánicas del Post-Payandé. Hacia el sur y sureste, todas estas unidades

están en contacto fallado con rocas sedimentarias continentales del Terciario medio, las cuales están ampliamente cubiertas por gravas pertenecientes a terrazas cuaternarias.

Descripciones completas de las actividades desarrolladas, topografía, geología, geofísica, perforaciones, mineralización y alteración, cálculos de reservas, etc., se presentan en el informe de Sillitoe et al. (1984) y en el Informe Técnico Interno del Proyecto, de Naciones Unidas, INGEOMINAS y ECOMINAS (1983).

La última fase del estudio se orientó hacia la evaluación económica preliminar del depósito de Mocoa; los resultados obtenidos se incluyen en el informe de Naciones Unidas, INGEOMINAS, ECOMINAS (1984), cuyo resumen se transcribe totalmente a continuación.

### RESUMEN

En este informe se presentan los resultados del estudio preliminar de factibilidad económica para el depósito de cobre y molibdeno de Mocoa ejecutado por Naciones Unidas INGEOMINAS y ECOMINAS, en desarrollo del Proyecto Metales Básicos, Fase II, COL. 76/030. La inversión total del estudio fue del orden de US \$3.750.000, de los cuales US \$1.800.000 ha sido aportado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, US \$1.700.000 por INGEOMINAS y US \$ 250.000 por ECOMINAS.

### FACTORES GENERALES

El área del proyecto está ubicada en la región suroeste de Colombia, 12 km al norte de la ciudad de Mocoa, capital de la Intendencia del Putumayo (Fig. 1). Mocoa está unida a Pasto por una carretera destapada con una distancia de 140 km. Desde Bogotá hay 3 vuelos diarios a Pasto y 3 semanales a Puerto Amé.

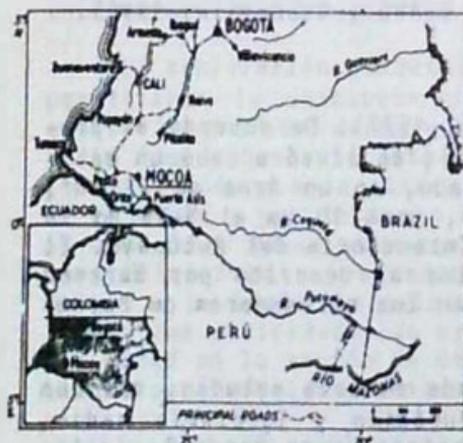


Fig. 1: Mapa de localización del depósito, Mocoa, Colombia.

La ciudad de Mocoa, es el lugar poblado más importante de la región, con una población cercana a los 15.000 habitantes, centro ganadero y agrícola pero cuyo desarrollo industrial es prácticamente nulo.

### EXPLORACION

El primer indicio de mineralización fue detectado por geoquímica de sedimentos activos en el drenaje superior del río Mocoa. El seguimiento de estas anomalías condujo al hallazgo de manifestaciones superficiales coincidentes con el actual depósito de Mocoa.

Durante la etapa de seguimiento, y ante la carencia de una base topográfica, fue necesario llevar a cabo trabajos de planimetría y altimetría para cubrir los 20 km<sup>2</sup> del área de influencia del proyecto.

Geológicamente, el depósito de Moco es un pórfido cuprífero con un contenido apreciable de molibdeno. La mineralización es esencialmente hipogénica y el enriquecimiento supergénicos, aunque presente, no se incluye en los cálculos de reservas ni se considera de interés económico.

Un programa de perforación de 31 pozos con un total de 18321 m permitió la delimitación y cubicación del cuerpo mineralizado de Moco.

### ESTIMACION DE RESERVAS Y DISEÑO MINERO

Con base en los análisis químicos de los núcleos de perforación, se procedió a la estimación de reservas y tenores del depósito:

- Inicialmente se efectuó la estimación manual de reservas mediante la utilización del volumen geométrico, promedio aritmético de los tenores y gravedad específica de 2,5 y 2,7 gr/cm<sup>3</sup>. La ley de corte utilizada fue de 0,25% Cu + 0,025% Mo ó 0,5% Cu equivalente. (Se basa en la relación de precios que es aproximadamente: Mo/Cu = 10/1). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:
  - 283,046.002 toneladas métricas con contenido promedio de 0,37% Cu y 0,061% Mo (gr. esp. 2.5).
  - 305,689.680 toneladas métricas con contenido promedio de 0,37% Cu y 0,061% Mo (gr. esp. 2.7).

Las anteriores se pueden considerar como reservas geológicas ya que no hay relación implícita con algún diseño minero.

- Las reservas explotables fueron calculadas mediante la simulación de los diseños: cielo abierto y subterráneo (hundimiento de bloques) utilizando el programa de computador DREMPAN ("Ore Reserve Estimation and Mine Planning") diseñado por la firma Mineral Systems Inc. La figura 2 muestra las tres alternativas de explotación consideradas para el depósito de Moco.
- Para los cálculos se asumió una gravedad específica de 2,7 gr/cm<sup>3</sup> (promedio de 108 mediciones en núcleos mineralizados), un área de influencia de 100 m a partir de cada perforación (determinada por variogramas) y una técnica de interpolación basada en el inverso de la distancia al cuadrado. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos.

### ESTUDIO METALURGICO

Un estudio metalúrgico sobre una muestra de 556 kg de núcleos de perforación representativos del depósito de Moco fue realizado en los Estados Unidos por Dawson Metallurgical Laboratories, de Murray, Utah. En la Tabla 2 se presentan los resultados de la prueba de circuito continuo sobre el compuesto total, los cuales fueron utilizados para la evaluación económica.

Los resultados se adaptan a las especificaciones exigidas para la comercialización de concentrados de cobre y molibdeno. Sin embargo se considera que una investigación más detallada en una fase posterior de factibilidad puede mejorar aún más, tanto la ley de los concentrados como la recuperación de cobre y molibdeno.

Los concentrados finales no muestran valores importantes de metales preciosos u otros elementos menores, como el renio pero tampoco metales que causen penalización como arsénico o bismuto.

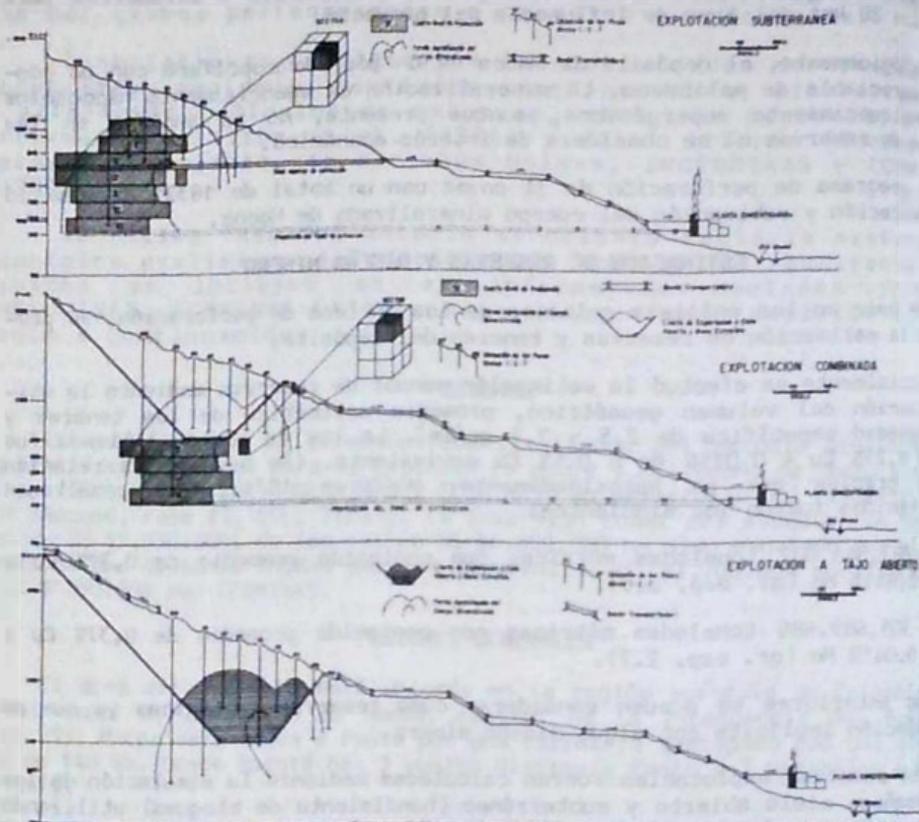


Fig. 2: Alternativas de explotación para el depósito de Mocos.

Tabla 1: Resumen de las alternativas de explotación

Variables	Diseño	Cielo Abierto	Subterráneo	Combinado	
				C.A.: cielo abierto	S.: Subterráneo
. Ley de Corte (Cu eq.)		0,6%	0,8%	C.A.: 0,6%	S.: 0,8%
. Reservas (Ton.met.)**		164,669.000	182,000.000	C.A.: 183,300.000	S.: 198,000.000
. Tenor %: Cu		0,399	0,3804	C.A.: 0,447	S.: 0,320
: Mo		0,0647	0,0739	C.A.: 0,066	S.: 0,076
: Cu (eq.)		1,046	1,12	C.A.: 1,108	S.: 1,08
. Relación: Estéril/Mena		2,19/1	-	C.A.: 1,58/1	-
. Operación: Diaria		30.000	30.000	-	30.000
(Ton.met.) Anual		10,500.000	10,500.000	-	10,500.000
. Vida de la mina (años)		21	23	C.A.: 8	S.: 10
. Preproducción (años)		5	5	-	5

\* Gravedad específica utilizada.

\*\* Incluye el factor de dilución.

Tabla 2.

Producto	Peso(%)	Análisis		Recuperación	
		Cu%	Mo%	Cu%	Mo%
1. Concentrados colectivos de Cu y Mo-flotación.	1,602	22,77	3,27	86,4	84,3
2. Concentrado final de Cu.	1,495	24,22*	0,05	85,9*	1,2
3. Concentrado final de Mo.	0,093	0,10	55,14*	0,0%	82,7*

\* Datos usados en la evaluación

### UBICACION DE ESTÉRIL Y COLAS

El estudio incluye un análisis preliminar de los requerimientos para la ubicación del estéril (sitio y volumen), así como un análisis similar para la disposición de colas.

Los drenajes naturales alrededor del depósito tienen capacidad suficiente para la ubicación del estéril, operación que no representa un riesgo de impacto ambiental. Se trata además de zonas baldías, lo cual elimina la compra de terrenos y disminuye el riesgo de problemas legales.

La ubicación de colas sí representa problema serio para el proyecto. El depósito se encuentra localizado en una zona abrupta y de alta pluviosidad en la parte alta del sistema hidrográfico del río Mocoa y por tanto, cualquier tipo de desequilibrio ambiental o factor contaminante va a tener un efecto multiplicador en toda la región. El análisis preliminar indica que la solución a este problema puede implicar una inversión de capital importante y por tanto es una de las áreas en que tendrá que poner especial énfasis el estudio de factibilidad económica.

### FUNDICION Y REFINACION

La producción de cobre refinado al fuego ("fire refined copper") tendría la ventaja de proporcionar materia prima a los fabricantes colombianos, para ser utilizada en el área de láminas, tubos, rodillos y otros productos de cobre-bronce. Sin embargo, la producción de Mocoa de unas 100 toneladas/día de cobre metálico no parece justificar la inversión necesaria para el montaje de una planta de fundición. Otro de los factores adversos, es la falta de metales preciosos que pudieran generar ganancia adicional en el proceso de fundición y refinación. Los cargos de fundición para cubrir inversión, depreciación y costos de operación de una nueva planta son en la actualidad del orden de US\$ 0,35/lb, lo cual hace difícil competir con las plantas ya establecidas.

Para efectos de la presente evaluación se ha considerado que la alternativa más viable para Mocoa es la producción de concentrados de cobre y molibdeno para exportación.

### INFRAESTRUCTURA

La localización del depósito de Mocoa, distante de los centros de consumo y de los puertos marítimos, así como la carencia de una infraestructura vial y de servicios, constituye uno de los obstáculos mayores para el desarrollo de Mocoa.

Al tiempo de la evaluación, la alternativa más viable para transportar los productos de Mocoa es la carretera: Mocoa - Pasto - Cal - Buenaventura, en una distancia total de 646km. La longitud es apreciable y es necesario recone-

truir por lo menos 50 km entre Mocoa y San Francisco, carretera intransitable, por camiones de gran tonelaje como los requeridos tanto para la operación de transporte de minerales, como para el envío de materiales y suministros para el proyecto.

Las facilidades del puerto de Buenaventura son aceptables y se considera que sólo se requiere de una mínima inversión para adaptarlas al almacenamiento y manejo de los concentrados de minerales.

En este momento no hay energía disponible para el proyecto Mocoa. Sin embargo, la Central Hidroeléctrica de Betania, actualmente en construcción, permitirá reforzar la línea de transmisión Popayán - Pasto. En esta ciudad se construirá una subestación con salidas suficientes en el nivel de 115 KV, se utilizará líneas de interconexión propuesta Pasto - Sibundoy - Mocoa.

La ciudad de Mocoa tendrá que ser adecuada para ubicar a la comunidad minera. Las necesidades del proyecto y las inversiones requeridas han sido incluidas en este informe.

### PARAMETROS ECONOMICOS

Dentro del estudio se hace la determinación de las inversiones requeridas para el desarrollo, los costos directos de operación y las bases de negociación de acuerdo a la Ley Colombiana. Asimismo, se realiza un análisis muy general de lo que puede ser el mercado de los productos y las posibles fuentes de financiación para el proyecto.

Todos los costos estimados se presentan dentro de un grado de precisión de  $\pm 25\%$ , considerando aceptable para un estudio preliminar de factibilidad. La base de la estimación la constituyó el sistema computarizado del U.S. Bureau of Mines. En todos los casos, los costos desarrollados fueron modificados y suplementados con el fin de adaptarlos a las condiciones específicas de Mocoa. Todos los costos fueron estimados a mayo de 1984.

La inversión necesaria para producir concentrados es del orden de US\$ 44 millones para el diseño minero a cielo abierto, US \$421 millones para el subterráneo y US\$ 427 millones para el combinado. Para la producción de cobre refinado la inversión se eleva a US \$ 538 millones, US \$495 millones y US\$ 502 millones, respectivamente.

Dentro de las bases de negociación se ha tenido en cuenta un documento reciente (1984) del Departamento Nacional de Planeación, el cual fija las políticas para la inversión extranjera de desarrollo en Colombia.

Un análisis rápido de los mercados señala a Japón y Europa como potenciales compradores de los productos de Mocoa y muestra que la producción de concentrados de cobre y molibdeno es la opción más viable para la comercialización.

### ADMINISTRACION DE PERSONAL Y ESTRUCTURA EMPRESARIAL

El desarrollo de Mocoa, requerirá de una importante contribución de personal foráneo, especialistas en las diferentes áreas del proyecto. Se debe fijar sin embargo, una participación integral del personal nacional a todos los niveles y pactar un entrenamiento adecuado, para lograr después de un tiempo razonable la sustitución de personal extranjero y obtener en esta forma el control y manejo de la empresa por parte de nacionales.

La estructura empresarial para el desarrollo de Mocoa se basa en un contrato de asociación de características similares a las que rigen el actual contrato de Cerro Matoso S.A., acorde con los términos de la legislación Colombiana. Asociación entre el Gobierno Nacional representado por una Compañía Minera Colombiana y uno o más inversionistas extranjeros representados por sus filiales. La participación patrimonial de acuerdo al marco de negociación ac-

tual puede variar desde 15% / 85% hasta 51% / 49% (empresa minera nacional/inversionista extranjero). Este tipo de participación patrimonial ha sido simulado como parte de la presente evaluación.

### EVALUACION FINANCIERA

La evaluación financiera del proyecto se hizo mediante la utilización del programa de computador INVESTO ("Investment Opportunity Analysis"), desarrollado por la firma Mineral Systems Inc., en el cual presenta la evaluación en términos de la siguiente información:

- . Reporte de entradas y esquema de producción
- . Reporte de costos de producción
- . Reporte de ingresos y flujo de fondos
- . Balances comparativos de las empresas participantes
- . Resumen financiero de las empresas participantes

Se simularon casos de evaluación para los tres diseños mineros: cielo abierto, subterráneo y combinado. Se corrió un total de 50 casos de los cuales 16 corresponden a análisis de sensibilidad de las variables críticas (precios, tenor, inversión y costos de operación).

En términos generales la evaluación muestra una rentabilidad similar para los tres diseños como se aprecia en la Tabla 3, donde se presentan 9 de los casos que se consideran más viables. Dentro del presente estudio se considera que dadas las condiciones geomorfológicas, climatológicas y algunos factores geomecánicos analizados, el diseño subterráneo es el más viable para explotar el depósito de Mocoa.

Tabla 3: Evaluación Económico-Financiera de los casos más viables

Diseño Minero	Casos	Gobierno Colombiano			Inversionista Extranjero		
		YIR(%)	Inversa.	FNC/INV	YIR(%)	Inversa	FNC/INV
Cielo Abierto	Caso 1	9,66	463,700	1,34/1	-	-	-
	Caso 2	14,31	159,834	2,62/1	5	153.566	0,31/1
	Caso 3	12,73	69,555	2,25/1	9.09	394.145	1,08/1
Subterráneo	Caso 1	13,63	420,600	2,18/1	-	-	-
	Caso 2	19,07	138.006	4,09/1	9.08	132.594	1,48/1
	Caso 3	18,33	63,090	4,78/1	12.47	357.510	1,72/1
Combinado	Caso 1	13,66	427.900	2,08/1	-	-	-
	Caso 2	20,87	141.729	4,34/1	6.17	136.171	0,86/1
	Caso 3	17,20	64.185	4,43/1	12.75	363.715	1,66/1

Caso 1. Gobierno: 100% de Patrimonio

Caso 2. Gobierno/Inversionista: 51% /49% + Préstamo de 40% de la inversión

Caso 3. Gobierno/Inversionista: 15% /85% hasta 51% /49%. Compra de participación. ("Buy out") al 3% anual y 30 veces las ganancias del operador.

Yir: Tasa interna de retorno

Inversa: Relación de flujo total de Fondos a la Inversión

Precio asumido para los metales: Cu: US \$ 1.00/lb (metal), Mo: US \$ 10.00/lb (concentrado)

En todos los casos considerados se tomaron precios de US \$ 10,00/lb de molibdeno. La sensibilidad demuestra que el precio es la variable crítica que determina la viabilidad del proyecto. Efectivamente, al bajar en un 25% los precios asumidos, la tasa interna de retorno baja a niveles inferiores al 5% y si se consideran los precios actuales (US 0,65/lb de cobre y US \$ 7,90/lb de molibdeno), la tasa interna de retorno es prácticamente negativa. De las anteriores consideraciones se puede concluir que para que el proyecto sea rentable, en el momento de la evaluación, se requieren precios de 0,90 - 1,00 US\$/lb de cobre y de 9,00 - 10,00 US\$/lb de molibdeno.

Asumiendo, se demuestra que el caso más atractivo para una futura negociación sería el de una participación inicial de 15% /85% (Gobierno/Inversionista) con una compra de participación del gobierno hasta llegar a la proporción 51% /49% a una tasa de 3% anual y a un precio de 25 veces las ganancias de la compañía operadora. Lo anterior resulta en tasas internas de retorno similares para los dos socios (Tabla 3, caso 3). Otra posible forma de atraer al inversionista es dándole un contrato de administración del orden de 1-2% sobre las entradas (ventas).

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el área de Mocoa se han identificado importantes reservas de cobre y molibdeno comparables a las existentes en otras partes del mundo en depósitos del mismo tipo actualmente en explotación.

La infraestructura general del proyecto es pobre y esto dificulta un posible desarrollo del depósito de Mocoa. Es sin embargo, el nivel actual de los precios del cobre y molibdeno la variable crítica que incide en la rentabilidad y no hace viable el proyecto.

Los factores de beneficio social y desarrollo regional integrado deben ser importantes en la decisión sobre el desarrollo del proyecto. No obstante, si el nivel de precios no mejora, los dos factores mencionados no son suficientes para decidir la realización del proyecto.

Mocoa es sólo el primer descubrimiento en una zona que presenta un buen potencial minero y donde no se han realizado trabajos detallados en las zonas adyacentes. Por tanto, se recomienda en forma muy especial la exploración sistemática de los alrededores, ya que si se logra la ubicación de nuevos prospectos, las posibilidades económicas en el campo de la minería, mejorarían sustancialmente.

*Área de Patascocoy.*— (INGEOMINAS, 1977). La zona de interés está localizada en el Cerro Patascocoy, unos 30 km al sureste de Pasto. La mayor parte del área la conforma una cuarzodiorita a veces de carácter porfirítico, la cual muestra indicios de alteración hidrotermal. El intrusivo muestra en general una intensa pirritización y zonas de oxidación (gossans). Durante el reconocimiento regional se localizaron los drenajes anómalos para cobre y molibdeno, los cuales tienen un área de influencia de unos 20 km<sup>2</sup>. Además algunos rodados de rocas alteradas mostraron valores en cobre de hasta 10.000 ppm y de molibdeno hasta de 120 ppm.

Un reconocimiento más amplio se realizó posteriormente sobre los ríos Bijinchoy y Volcancayo, con los resultados que se indican en el informe "Mineralización en la Zona de Patascocoy, Intendencia del Putumayo", Naciones Unidas (1981). Las rocas que forman el área enumeradas, de la más antigua a la más joven son cuarzomonzonita, cuarzodiorita, dacitas, tobas recientes y depósitos aluviales. La cuarzomonzonita, de posible edad Jurásico, podría pertenecer al mismo evento magnético que originó los cuerpos intrusivos que se emplazaron a lo largo de la Cordillera Central, tales como los batolitos de Ibaqué y Mocoa. La cuarzodiorita, de posible edad Cretácea, se encuentra principalmente en contacto fallado con la cuarzomonzonita, no siendo posible conocer la relación de esta roca con las demás del área, excepto con diques dacíticos y andesíticos que la intruyen. Pórfidos dacíticos-dacitas porfiríticos con variaciones locales a andesitas porfiríticas, intruyen a la cuarzomonzonita y cuarzodiorita a manera de diques y son de probable edad Terciaria. Lobos y cenizas y depósitos piroclásticos de edad Pliopleistoceno cubren parcialmente las rocas anteriores y están muy alteradas por meteorización; los depó-

sitos recientes de material clástico de origen aluvial forman terrazas pequeñas y de poca altura.

La alteración propilítica, con diferentes grados de intensidad, cubre aproximadamente el 90% de las rocas presentes en el área, mostrándose mejor desarrollada en zonas de mayor fracturamiento; la mineralización asociada consiste principalmente en pirita diseminada y muy ocasionalmente calcopirita; además macroscópicamente se identificó una buena cantidad de arsenopirita. La alteración argílica se expone muy claramente a lo largo del contacto entre la cuarzomonzonita y la cuarzodiorita en áreas tectónicamente afectadas; la mineralización presente consiste en pirita y calcopirita, mostrando además algunas pequeñas manifestaciones de crisocola, las cuales manchan con tonalidades verdosas la masa argilizada. Silificación penetrativa sólo existe en algunas pequeñas zonas propilíticas con enriquecimiento de pirita, calcopirita y cuarzo; también relacionadas a estas pequeñas áreas se observan venas de pirita y epidota de 1 a 5 mm de espesor; la calcopirita está ligeramente reemplazada por calcosina pero en cantidades sin ningún interés económico, que fácilmente pasan inadvertidas.

La prospección geoquímica se basó esencialmente en la recolección de sedimentos activos, algunos concentrados de batea y muestras de mano de las diferentes unidades litológicas del área; un muestreo de esquirlas de roca se realizó en los trayectos de las quebradas donde parecía existir alteración hidrotermal. Las diferentes muestras recolectadas fueron sometidas a análisis por absorción atómica para Cu, Mo, Pb, Zn. Los resultados obtenidos en sedimentos finos mostraron valores normales para estos elementos así: cobre, 35 ppm; molibdeno, 7 ppm; plomo, 35 ppm y zinc 200 ppm; en esquirlas de roca todas las muestras arrojaron valores en ppm de Cu, Pb y Zn, cercanos al promedio normal para el tipo de roca donde fueron tomados.

Por estas razones el informe concluye que la prospección geoquímica para mineralización del tipo pórfido cuprífero ejecutada en la región noroeste de la Cordillera de Patacoy y drenada por los ríos Bijinchoy y Volcancayo, sumada a la interpretación geológica, permite descartar el área para futuros trabajos de exploración en superficie y no justifica cualquier otro tipo de exploración más completa y de mayor inversión.

#### SANTANDER

*Area de San Antonio.*— (Tomado de MENDOZA y JARAMILLO, 1979). En la región de California, conocida por sus explotaciones para oro y plata desde la época de la Colonia, el INGEOMINAS adelantó un programa de prospección geológica y geoquímica detalladas con el objeto de hacer una revaluación de su potencial minero, en vista de la posibilidad de encontrar oro diseminado en la roca encajante de los filones trabajados.

En la parte central del área y principalmente en los alrededores de la quebrada San Antonio, aflora un pórfido (stock de la Baja) de composición granodiorítica con fenocristales de feldespatos hasta 2 cm de largo y cristales más pequeños de hornblenda y biotita en una matriz granular fina de color gris, compuesta por cuarzo y feldespatos con ligera alteración sericitica. El área muestra igualmente indicios de alteración hidrotermal, sustancialmente silificación. Un hecho interesante en esta zona es la presencia de minerales de uranio en el filón de San Celestino.

El muestreo geoquímico mostró que el área es esencialmente anómala para cobre. La Nippon Mining Company (Report of Prospection of the California Mines, July, 1967), calculó reservas en San Antonio del orden de 40.400 toneladas de mineral de cobre con tenor de 1,24%. Las reservas parecen insuficientes para considerar el área como depósito económico de cobre. Sillitoe et al (1982), consideran que las rocas expuestas en California corresponden a los niveles más superiores dentro de un sistema de pórfido cuprífero donde se reconoce una avanzada alteración argílica caracterizada por alunita, caolinita, pirafilita y silicificación en adición a sericitización y brechas hidrotermales; asimismo se obtuvo una edad de 1443 m.a. para la mineralización, con base en el análisis K/Ar de una sericita hidrotermal.

## TOLIMA

El borde oriental del Batolito de Ibaqué presenta buenas posibilidades para desarrollar un yacimiento del tipo pórfido cuprífero. Ya se conocen allí varias zonas anómalas las cuales son objeto de estudio por parte del INGEOMINAS. Estas zonas anómalas son entre otras: el área de El Infierno - Río Chill, y el área de Los Andes, además de numerosas mineralizaciones filonianas y de reemplazamiento que serán descritas posteriormente.

*Área de El Infierno - Chill.* - La mineralización cuprífera del área El Infierno - Chill está situada en el municipio de Rovira, entre los ríos Tuamo y Chill, ocupando una extensión de 3 km<sup>2</sup> aproximadamente (INGEOMINAS, Inf. Anual 1977). Se trata de una mineralización hidrotermal tipo cobre porfídico, alojada en la margen oriental del Batolito de Ibaqué (Jurásico superior), (BARRERO y VESCA, 1976). La roca aflorante en el área es una cuarzdiorita de grano medio a grueso, localmente porfirítica, la cual aparentemente está intruida por un cuerpo de dacita porfirítica, que es la roca huésped de la mineralización. Intruyendo las rocas ya mencionadas existen numerosos diques andesíticos, ricos en magnetita. Una falla vertical de dirección NW parece haber controlado en gran parte la mineralización.

La roca huésped está intensamente fracturada y presenta en superficie las siguientes zonas de alteración:

- Zona fuertemente silificada, posiblemente filica; consiste en amplias zonas casi totalmente reemplazadas por cuarzo con algo de pirita y calcosina diseminadas y de molibdenita y pirita en venas. Existen además ocasionalmente pequeños sectores más densamente mineralizados con pirita, calcopirita, bornita, cuprita, cobre nativo, calcosina, malaquita y covelina. Toda la roca huésped que presenta este tipo de alteración posee una textura original completamente borrada y ocupa la parte central del área mineralizada.
- Zona propilitica con silificación penetrativa; se trata de roca alterada y fracturada con abundante clorita, epidota y calcita, presentando simultáneamente gran cantidad de venas de cuarzo con pirita. La distribución areal de este tipo de alteración es la de una aureola o halo periférico a la zona central de fuerte silificación, a la cual se pasa gradacionalmente. Dentro de esta zona, se han encontrado amplios sectores con malaquita, calcanti-

ta, calcosina, neotolita, caolinita y óxidos de hierro, lo mismo que magnetita diseminada y en venas.

Zona propilítica; se trata de roca fracturada y alterada con cantidades variables de clorita, epidota y calcita. Las venas de cuarzo piritoso son escasas, lo mismo que las diseminaciones y venas de magnetita. Este sector posee forma de corona irregular que rodea a la zona de silificación penetrativa y que a su vez está rodeada por roca fresca.

Zona de oxidación con algo de gossan; se trata de un sector de roca alterada y meteorizada, caracterizada por la abundancia de arcillas y óxidos de hierro y manganeso formando localmente sombreros de hierro. Ocasionalmente se encuentran óxidos de cobre, pero en general el cobre parece haberse lixiviado. Este sector tiene forma alargada, formado en superficie sobre parte de las zonas, con fuerte a moderada silificación y que corresponde topográficamente a los terrenos altos y menos erosionados. El prospecto Chilí situado al sur del área, resultó formar parte periférica de la mineralización de El Infierno.

En el prospecto de cobre El Infierno se adelantaron los siguientes trabajos: geoquímica; mediante muestras de sedimentos activos y rocas se determinaron anomalías fuertes para cobre y molibdeno. Geofísica; habiéndose adelantado cuatro líneas de sondeos eléctricos por polarización inducida en el área central del prospecto, se comprobó la existencia de suelos sectores positivos. Geología; se elaboraron mapas geológicos detallados y de alteración hidrotermal a partir del reconocimiento en superficie.

El proyecto Metales Básicos INGEOMINAS - Naciones Unidas, adelantó allí un programa de perforaciones para conocer a profundidad la anomalía.

Se perforaron 6 pozos con un total de 1217 m y se obtuvieron 680 muestras (una cada 5 pies), las cuales fueron preparadas y analizadas por absorción atómica para cobre, molibdeno, plomo, zinc y plata. Los resultados obtenidos y su interpretación se muestran en el informe técnico del proyecto (NACIONES UNIDAS, 1981). Entre las conclusiones de este informe se destacan los dos siguientes: la zona estudiada en el proyecto Infierno presenta características de alteración hidrotermal y de mineralización semejantes a las conocidas en varios yacimientos de tipo pórfido cuprífero, sin embargo, su intensidad y continuidad no fueron suficientes para formar un depósito de importancia económica. En base a los resultados obtenidos, no se justifican trabajos futuros orientados hacia pruebas económicas.

*Área de Los Andes.* - La mineralización cuprífera de Los Andes, está situada en el municipio de Rovira y tiene una extensión superficial de 2,5 km<sup>2</sup>. Se trata de una mineralización hidrotermal de cobre y molibdeno alojada hacia el borde oriental del Batolito de Ibaqué (Jurásico superior) en forma de sulfuros diseminados y en vetillas (PULIDO et al., 1976; PULIDO, 1978).

En el área afloran cuarzodioritas, con texturas faneríticas, localmente porfiríticas, las cuales son intruidas por pequeños cuerpos de dacita porfirítica (Cretáceo superior a Terciario inferior?) y por diques dacíticos, andesácitos y apli-

ticos. Todas estas rocas están multifracturadas y localmente presentan profunda alteración hidrotermal, especialmente silificación en vetillas; se encontró además biotización asociada a la dacita porfírica en algunos lugares.

Los minerales predominantes son calcopirita y molibdenita. La primera está relacionada con la pirita y la segunda con las venas de cuarzo. Ocasionalmente se encuentran venas de blenda, galena y magnetita. Los minerales de oxidación son escasos y no hay enriquecimiento supergénico.

En resumen, la mineralización de cobre y molibdeno de los Andes parece tener una distribución irregular además del bajo contenido de metales indicado por las perforaciones y por lo tanto no es suficiente como para constituir un depósito de importancia económica.

**Prospecto Dolores - Natagaima.** - La mineralización cuprífera de Dolores - Natagaima está situada en la vereda Colopa, municipio de Natagaima, cerca de los límites con el municipio de Dolores. Se trata de una mineralización diseminada, tipo pórfido cuprífero alojada dentro de una epófisis monzonítica a granodiorítica, emplazada dentro de rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Post-Payandé (Jurásico). Se reconocieron en superficie varios sectores mineralizados, el mayor de los cuales tiene 0,5 km<sup>2</sup>. La roca huésped está localmente silificada por abundantes vetillas de cuarzo, pero en general presenta propilitización moderada a ligera. El mineral más abundante es pirita con trazas de calcopirita, calcosina y covelina. Hay además molibdenita asociada a las venas de cuarzo. No hay indicios de enriquecimiento supergénico y el contenido de minerales de cobre es realmente muy bajo (BUENAVENTURA, 1976).

Los trabajos de exploración adelantados hasta la fecha consistieron en el muestreo geoquímico de sedimentos activos y rocas, complementado con cartografía geológica detallada.

Se conocen áreas igualmente mineralizadas en la vereda Anchique al occidente de la población de Natagaima; también en el sector de San Alfonso, municipio de Villavieja (Huila) asociadas al mismo tipo de rocas.

## MINERALIZACIONES HIDROTHERMALES, METASOMATISMO DE CONTACTO, REEMPLAZAMIENTOS

A estos tipos de yacimientos pertenecen la mayor parte de las mineralizaciones de cobre conocidas en Colombia, a excepción de los prospectos de pórfidos cupríferos ya mencionados.

### ANTIOQUIA

En el occidente de Antioquia, en las vertientes al Atrato se encuentra cobre nativo y minerales de cobre en cantidades apreciables (WHITE, 1941), especialmente en los aluviones del río Sucio, en el municipio de Dabeiba. Este cobre parece que procede de yacimientos primarios en las cabeceras del río Iuguridó tributario del Amparradó, que a su vez lo es del río Sucio. En el Cerro Plateado, municipio de Salgar, existen unos filones de calcopirita de una potencia mínima de 0,60 m; se han explorado afloramientos en unos 400 m de longitud y se concluye que hay más de 5 millones de toneladas del mineral, con un 20% de cobre nativo, 7 a 8 gr de oro por tonelada y 10

gr de plata/ton. Los siguientes datos fueron tomados de Mutis (1954). En el municipio de Barbosa, sitio La Sofia, se reporta bornita en filones rellenando fisuras en esquistos hornbléndicos. En Amalfi se presentan calcopirita, galena y oro, en la mina La Clara de la Unión. Calcopirita en la mina El Hallazgo en Altamira. Municipio de Concordia, cobre de 0,5 a 2%, en el paraje El Sueño cerca a la quebrada Las Animas, carretera Bolumbolo - Concordia. En Dabeiba, cobre nativo en la localidad de Tuburidó, en la región de Termales las Cruces, mina de Basílica; los análisis indican 11,4% de Cu. En Jardín se presenta cobre nativo en la mina La Henciña. En Murindó, calcopirita en filones en el cerro Careperro paraje Ciénaga del Tadia. En Remedios, calcopirita y pirrotita en la localidad de El Chiquito. En Abriaquí se reporta la existencia de calcopirita en pequeños filones. En el municipio de Sonsón, Páramo de Los Parados, varios filones de calcopirita. En Iámesis, concentraciones de calcopirita en la mina La Rica. En Urrao, calcopirita filoniana en el paraje El Páramo; se reporta la presencia de cobre en las minas Los Rusos (10,79% y 2,01% Cu), mina El Fierro (0,67%), mina El Diamante (0,1% y 0,65% Cu). En Mandé se indica la presencia de calcopirita en algunos filones.

Al este del departamento (WOKITTEL, 1960) se conocen ocurrencias de cobre en las minas de oro de los municipios de Segovia, Santo Domingo, San Roque, Yolombó, San Rafael, Barbosa, Cianeros, Gómez Plata y San Carlos. En San Carlos se presenta el cobre con molibdenita.

*Cobre de Dabeiba.*— Mina La Esperanza. Localizada a 30 km al SE del municipio de Dabeiba, en el cañón del río Julio afluente del Iguaridó. En el área predominan shales intruidos por andesitas y pórfidos andesíticos, se presentan además brechas volcánicas y tectónicas. Se observan tres direcciones principales de cizalladuras: NS-N20°W; N70°W; N60°E; calcopirita, bornita, esfalerita y galena se presentan en venas de cuarzo entre las zonas de cizalladura. La mineralización en el área puede ocurrir como: 1) Filones de cuarzo hasta de 3 m de espesor, con valores de Cu, Zn, Au y Ag. 2) Pequeñas venillas con calcopirita diseminadas en la zona de brechas. Análisis practicados han dado los siguientes resultados: Au = 1,2%; Zn = 19% (Ministerio de Minas y Energía, Bogotá).

#### BOYACA

En este departamento se menciona la existencia de pequeñas manifestaciones de minerales de cobre en los municipios de Duitama, Gachantivá, Tunja y Paipa. Según Wokittel (1957) en Gachantivá y Monquirá explotaron a comienzos de siglo varios filones de cobre y se fundieron sus minerales cerca de las minas (vereda de las Minas del municipio de Gachantivá). Dos filones posiblemente los más importantes del distrito, tienen espesores de 15 a 60 cm y un tenor de 5 - 7% de cobre.

Según el censo de 1950, en Duitama figuran las siguientes minas de cobre: La Unión, Mina Nueva, California, Pittsburgh, Santa Rica y San Alejo (MURIKOVSKY, 1963). En ese mismo censo se reporta la mina Santa Isabel en el municipio de Nobas.

#### CALDAS

Dos prospectos que contienen minerales de cobre se conocen cerca de Anserma (HALL y FEININGER, 1970). Uno está a 2 km al norte de Anserma sobre el lado oriental del río Risarealda y

el otro a 3 km al SW de la misma ciudad sobre el lado occidental del mismo río. Los dos son de características similares; calcosina posiblemente supergénica con películas secundarias de malaquita y azurita relleno de fracturas en zonas de cizalladuras desarrolladas en metabasaltos del Cretáceo(?). Es posible obtener muestras con 3-4% de cobre, pero el tenor promedio en un ancho explotado mínimo de 1 m, se estima en menos de 1% Cu. No se observa continuidad en las zonas mineralizadas.

*Prospecto de cobre y molibdeno, La Plumbagina.* - (BOTERO, 1946). Localizado a 8 km de Anserma, en la región de Concharí, vereda Plumbagina. Consiste de una serie de vetillas lenticulares con calcosina, molibdenita, bornita y cuarzo con pigmentos de malaquita. El análisis practicado sobre muestras secas dio: 31,46% Cu y 6,5% Mo.

*Prospecto de cobre EL Tascón.* - (BOTERO, 1946). Situado a 10 km al SE de Anserma, región de Concharí. La roca huésped es de color oscuro muy fracturada e intruida por un granito al cual se relaciona la mineralización. El espesor de la mineralización es de 0,40 m. Los minerales en orden de abundancia son: bornita, pirrotita, calcosina, malaquita, cuprita (?) celvelina?; la ganga es de cuarzo y feldespato alterado.

#### CAUCA

En el Departamento del Cauca existen varias localidades que han sido explotadas para oro, las cuales presentan sulfuros de cobre asociado que podrían beneficiarse como subproductos (LEON y PADILLA, 1971) entre éstas tenemos: el área de la Ieta, al SE del municipio de Buenos Aires con varias venas de oro con plata y sulfuros de cobre asociados; área de Damián o Pasobobo en el corregimiento de Suárez; cerro de Muchinque-Santander, en el municipio de Santander de Quilichao; cerro de Muchinque - Jambo en el municipio de El Jambo a 20 km al oeste de la cabecera municipal; municipio de La Vega al SE del departamento, en las áreas de La Calixta, Huecohondo, Chapetón y Cerro Negro; en este último se conocen alrededor de 50 filones auríferos, y los datos de laboratorio dejan entrever el aprovechamiento del cobre como subproducto. Se mencionan también ocurrencias minerales de cobre en el área del río Naya.

*Prospecto de Suárez - Piedraimán.* - (INGEOMINAS - NACIONES UNIDAS, 1977a). Ubicado a 3 km por la carretera al sur de la población de Suárez, al norte del departamento. Las rocas antiguas expuestas son volcánicas andesíticas con intercalaciones de limolitas y liditas del Grupo Diabásico. Estas rocas están cubiertas por sedimentos terciarios plegados que consisten en lutitas, areniscas y conglomerados. Las unidades cretácicas han sido intruidas por un cuerpo diorítico a cuarzodiorítico con diques asociados; la zona de contacto ha sido mineralizada más o menos masivamente con pirita, pirrotita y calcopirita, y algunos sulfuros diseminados ocurren también en el intrusivo. Cuatro perforaciones se hicieron en el área sin resultados halagüeños.

*Área de Mechengue.* - (INGEOMINAS - NACIONES UNIDAS, 1977a). El trabajo geoquímico de sedimentos finos en esta región selvática indicó un área anómala de cobre. Las muestras posteriores de suelos y sedimentos restringieron el origen probable a una franja estrecha de rumbo norte-sur sobre el lado sur del río Mechengue. La interpretación de los resultados indicó que la mineralización está relacionada con una zona de cizalladura.

**Area de Cerro Gordo.**— Localizada cerca a la población de Bolívar, al sur, a dos horas y media de Popayán. Esquistos cuarzofericos están intruidos por una serie de diques de andesita a pórfidos cuarzodioríticos; pirrotina masiva con calcopirita ocurren esporádicamente en los esquistos; algunas venas discontinuas de cuarzo contienen arsenopirita y pirita dispersa. Existen evidencias de antiguos trabajos en una mina abandonada.

## CHOCO

Los datos de mineralizaciones en este departamento fueron tomados de Escorce (1962). El Chocó presenta un marco geológico favorable para las ocurrencias minerales de cobre; es posible que los intentos de explotación en algunos sitios hayan fracasado debido a la dificultad en transportar los concentrados, pues este departamento carece de vías de comunicación. Especial interés se debe prestar a las exploraciones en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental y en la Serranía del Baudó en su flanco oeste.

**Río Cuchadó.**— A seis horas de San Marino por el cruce del río Cuchadó, afluente del Andágueda. Se trata de un relleno de una zona de cizalladura en rocas diabásicas. La mineralización tiene un ancho promedio de 50 cm con pirita, calcopirita y cuarzo; en partes se pincha presentándose la roca completamente estéril.

**Río Anguedé.**— Esta mineralización fue explotada anteriormente, al parecer sin resultados positivos debido al estado actual de abandono. Se halla localizada a una hora y media a pie a partir de la desembocadura del río Anguedé en el río Andágueda. Se trata de una diaclasa en diabasas, de pocos centímetros de espesor, mineralizada con pirita, calcopirita, covelina y manchas de malaquita.

**Quebrada Mambú.**— Los sulfuros de cobre aparecen en el cauce de la quebrada a 3 km de su desembocadura al San Juan; el sitio está comunicado mediante una trocha con el caserío Mambú (Municipio de Tadó) que se halla ubicado a orillas del río San Juan.

Se trata de un gran bloque rodado, de unas 2 toneladas con abundante pirita, calcopirita y cuarzo, que al parecer proviene de un viejo derrumbe en las vecindades del sitio.

**Afloramiento Sitio López.**— Ubicado en una cañada afluente del río San Juan, en cercanías del sitio Las Peñas del Olvido, camino Santa Cecilia - La Playa de Oro, municipio de Tadó. Se presenta en fisuras dentro de rocas del Batolito de Mandé, el cual intruye en el área rocas volcánicas, tales como aglomerado y metabasaltos porfiríticos. El relleno de fisura mayor presenta cuarzo lechoso, pirita, calcopirita y minerales secundarios de ésta y tiene un espesor de 5-10 cm; el porcentaje máximo de cobre es 1-2%; el ancho total de la zona mineralizada es de 0,80 m.

**Mina El Roble.**— 4 km al N del Carmen de Atrato. Actualmente en explotación. La mineralización consiste en pirita, calcopirita y pirrotina en ganga de cuarzo y carbonatos. El cuerpo mineralizado está encajado en **cherta** y asociados con diques andesíticos. Secuencia geológica regional: sedimentos detríticos, diabasas, **cherta**, calizas y conglomerados del Gru-

po Cañasgordas, e intrusiones andesíticas posiblemente relacionadas con el Batolito de Mande (GARCIA, 1977).

En el informe "Geología y Geoquímica de la Plancha 163, Carmen de Atrato", Calle y Salinas, 1986, reseñan esta mineralización concordando de una manera general con la descripción anterior y manifestando que sin ser concluyente, por la forma en que se encuentra la mineralización, los minerales presentes, las rocas que lo contienen y la asociación litológica, permiten postular un origen volcánogénico para este depósito de sulfuro masivo.

Un programa de exploración y evaluación de reservas se llevó a cabo en el área, llegando a la conclusión que es posible un desarrollo más tecnificado de la mina. Para efectuar este desarrollo, según comunicación verbal, actualmente se adelanta ante las entidades del gobierno, las gestiones necesarias para la creación de una compañía denominada "El Roble Exploración y Explotación S.A. (EREESA)" de la cual serán accionistas Minas El Roble Ltda, por parte de Colombia y las Compañías Japonesas Nittetsu Mining Co. Ltd. y C. Itoh y Co., con una participación de 51%, 44,1% y 4,9% respectivamente.

Las reservas estimadas son del orden de 990.113 toneladas métricas, con tenores promedios de 4,71% de Cu, 3,11 g/t de Au y 9,81 g/t de Ag, que permitirán durante un periodo de 9 años un programa de beneficio diario de 300 toneladas de mena que producirán 44 toneladas de concentrados. La mina será manejada conjuntamente por personal colombiano y japonés según acuerdos.

*Prospecto La Equis.* - (Datos tomados de CALLE y SALINAS, 1986). Está localizado en el cerro Capoteros, comprendido entre los ríos Ichó y Cantugadó, al este del corregimiento de Tutunendó, municipio de Quibdó. Inicialmente (periodo 1920-1923), fue explotada para oro, pero debido a los resultados poco positivos fue abandonada. En la década del 70 empresarios extranjeros iniciaron una exploración sistemática, orientada a la identificación y cuantificación de la mineralización y posibilidades de explotación. La etapa de exploración incluyó la perforación de pozos y la construcción de un túnel de 160 m de longitud, además de cartografía regional y detallada y prospección geoquímica con base en sedimentos activos y suelos. Actualmente se gestiona la consecución del permiso de explotación.

La mineralización está confinada a una secuencia volcánica de edad pre-Eoceno de composición intermedia a ácida, que aflora en la vertiente oeste de la Cordillera Occidental y la cual se ha denominado como Rocas Volcánicas de La Equis. Esta unidad está en contacto al este con el Batolito de Mande, y al oeste infrayace rocas sedimentarias del Oligoceno. Las rocas receptoras de la mineralización son de composición ácida a intermedia. En el área de la mina se han definido 2 zonas de fractura mineralizadas de rumbo N-NW, denominadas Veta El Progreso y Capoteros; asimismo, aparentemente existe una relación muy estrecha en esta zona, entre eventos volcánicos, intrusiones, actividad hidrotermal y la tectónica. La mineralogía establecida para la Veta El Progreso es la siguiente: pirita, calcopirita, galena, esfalerita, cuarzo lechoso, además de oro y plata; minerales secundarios formados por oxidación y procesos supergénicos (limolita, hematita, pirolusita) calcoina y covelina. La ganga está constituida por cuarzo-barita (?); observaciones en la Veta El Progreso permiten presumir la existencia de dos asociaciones mineralógicas: una de metales básicos

cos y minerales de ganga, y la otra de minerales de ganga y metales preciosos. En cuanto a la génesis del depósito, los autores plantean dos posibilidades: hidrotermal, correspondiente a venas de cuarzo auríferas con polisulfuros, relacionadas con el Batolito de Mandé o exhalativa submarina siendo una manifestación incompleta de un depósito tipo "Kuroko". Las perforaciones y túneles de exploración realizadas por la empresa exploradora indican unas reservas probadas de 120.000 toneladas con los siguientes tenores: Zn (0,8-12%), Pb (0,8-1,5%), Au (12-15 gr/t), Ag (10-12 gr/t); las reservas indicadas se calculan en 1'500.000 toneladas.

*Mina Santa Anita.* - (MAZO y GUTIERREZ, 1971). Situada sobre el flanco occidental de la Cordillera Occidental, margen derecha del río Hábita, paraje El Seis sobre la carretera Medellín-Quibdó, municipio del Carmen de Atrato. Las rocas en el Área están constituidas por derrames diabásicos con intercalaciones de shales, grauvacas, cherts, conglomerados y calizas litográficas. La mina se encuentra ubicada en una amplia zona de cizalladura de dirección N-S en las rocas diabásicas. La mineralización se presenta asociada a la zona de falla, varía en dimensión y forma desde pocos metros hasta 10 o más metros. La asociación mineral consiste principalmente de calcopirita, pirita, cuarzo y calcita:

Contenido promedio de Cu	26%
Reservas probadas	65.000 Tons
Reservas probables	150.000 Tons.
Reservas posibles	500.000 Tons.

Todo el concentrado producido en esta mina fue producto de exportación. Desde 1976 está paralizada por problemas laborales.

Otros sitios con minerales de cobre se mencionan en el Chocó y son los siguientes: Municipio de Bagadó entre La Sierra y Piedrahonda; en el río Andágueda y sus afluentes Dojurá, Cuajandó, Anquedé, Cuchadó, El Salado y otros. Municipio del Carmen de Atrato en el límite de este municipio con el de Salgar (Antioquia) se encuentra la mina El Plateado, explotada anteriormente para oro; parece contener gran porcentaje de cobre. Municipio de Baudó, minerales de cobre, en la Cordillera Cagucho - río Dubaré en las cabeceras del Docampadó; Cerro Guini - Guini; y en el río Misará. Municipio de Nóvita en las cabeceras del río Sipí en el Cerro Torrá corregimiento de Garrapatas. Municipio de Quibdó en las quebradas Tres Marías afluentes del río San Pablo que vierte al Bebaramá. Municipio de Niquí, se mencionan minerales de cobre en la región de Bahía Solano.

## CUNDINAMARCA

*Cerro del Cobre.* - La mina se encuentra ubicada aproximadamente a 7 km al NE de Gachalá. Su explotación es esporádica, pero en una ocasión se excavaron 18 galerías (McLAUGHLIN y ARCE, 1971); aparentemente la mineralización se debe a reemplazamiento metasomático de calcopirita diseminada y en venas en calizas cristalinas. La zona mineralizada presenta 10 m de espesor; 12 muestras analizadas dieron un contenido de cobre que fluctúa entre 0 y 3,36%, con un valor promedio de 1,19% Cu. Una misión japonesa que visitó la región en 1966 estimó las reservas del material cuprífero en 1.620.000 toneladas, sin dar datos sobre el contenido promedio de cobre.

*Parallones de Medina.*— (McLAUGHLIN y ARCE, 1971). Se conoce la existencia de calcopirita en el área de Farallones al SE de Gachalá. En 1966 una misión japonesa visitó esta región y en el sitio Las Palmas, 28 km al SE de Gachalá, encontraron un risco de unos 20 m de altura y 50 de longitud, compuesto por lodolita calcárea y arenisca (del Grupo Farallones). Junto a la arenisca como la lodolita están mineralizadas por pirita, calcopirita, covelina y cuarzo a lo largo de una zona de falla; la mineralización presenta un espesor de 1,5 m. Los análisis indican un promedio de 1,45% de Cu.

Otros afloramientos mineralizados similares al anterior, se presentan al noreste de Alto Bojacá a unos 9 km de Gachalá. El contenido de cobre reportado es menor del 1%. A unos 60 km al SW del Cerro del Cobre en el municipio de Quetame existe una mina abandonada, en la cual los minerales son calcopirita, malaquita y azurita en venillas dentro de un filón de cuarzo y calcita que atraviesa cuarcitas y esquistos del Grupo Quetame.

*Mina La Colonia.*— Localizada a 20 km al E de Gachalá por carretable. Fue descubierta en 1926 por el suizo Peter Alig. Se ha trabajado intermitentemente desde esa época. Calizas y pizarras afloran en el área de la mina; allí el contacto es fallado y la mineralización se ha depositado en la zona de cizalladura reemplazando las paredes de las rocas. La parte superior presenta minerales de oxidación y un contenido de cobre de 5-6%; la parte inferior ha sido intruida por abundantes venillas de cuarzo, calcita, calcopirita, bornita y pirita; el tenor del cobre es del orden de 3%. Las reservas estimadas para la parte superior son de 360 toneladas; para la parte inferior se estiman 1.000 toneladas (GOVERNMENT of JAPAN, 1965).

## GUAJIRA

*Serranía de Perijá.*— En esta región localizada al NE de Colombia, sobre la Cordillera Oriental se presenta una serie de mineralizaciones de cobre alineadas NE-SW, las cuales fueron visitadas por una misión japonesa (GOVERNMENT of JAPAN, 1965), de cuyo informe se ha extraído esta información.

*Mineralizaciones El Cerrito y El Ojo:* Localizada al E a 40 minutos por carretable desde Barrancas. En el área afloran areniscas interestratificadas con limolitas y conglomerados, intruidos por diques riolíticos. Los diques varían desde pocos metros hasta unos 10 m de ancho y con extensiones variables de 10 a 150 m; estas rocas presentan tonalidades verde-amarillentas como resultado de intensa silificación y epidotización, en las cuales aún se observan relictos de fenocristales de cuarzo. En El Cerrito los afloramientos mineralizados no son continuos, se presentan como parches distantes varias docenas de metros, cada parche de unos 10 m de longitud generalmente siguiendo los planos de estratificación en areniscas o limolitas; consiste en malaquita, azurita y calcosina; el tenor es del orden de 0,8% Cu. En el área de El Ojo la mineralización se presenta en los diques riolíticos y consiste en pequeñas cantidades de malaquita y bornita; el tenor es del orden de 0,2 - 0,3% Cu.

*Área de Río Dulce:* Localizada a 11 km al SE de Barrancas. En el sitio afloran rocas volcánicas (basaltos, tobas) intercalados con conglomerados que contienen bloques y fragmentos de areniscas, de pórfidos y de pizarras; el conjunto tiene una dirección de N20-30°E y buza 20-30°E; están intruidas a su vez

por diques riolíticos. Los óxidos de cobre ocurren como películas en fracturas dentro de las areniscas. La mineralización ocurre en un área de 2x1 m, siguiendo la estratificación. En los sitios El Salado y Los Portales, Carbonalito, La Botella (con dos túneles abandonados), y otros en las vecindades de los ya descritos, se presentan minerales de cobre (GOVERNMENT of JAPAN, 1966). Otras zonas mineralizadas en las regiones de Villanueva - Urumita - San Diego, límites con el Departamento del Cesar son los prospectos de: Loma de Corazón, Portachuelo, Gallinazo, Plancito, Magueyal, Oveja, El Rincón, Seno, La Riga, Zeppelin y San José. De estos prospectos el del Rincón es el más promisorio; la mineralización se presenta en venas (unas 10) desde 15 cm hasta 3 m de ancho, dispuestas en *echelon* en arenisca roja; la extensión total del área mineralizada es de unos 400 m; la misión japonesa estima unas 43.000 toneladas de mena con un promedio de 1,4% Cu, y 40 gr de plata por tonelada.

#### MULLA

*Área Cerro Neiva.* - Está situada en el municipio de Neiva. Se trata de una mineralización cuprífera asociada a rocas sedimentarias y volcánicas pertenecientes a las formaciones Payandé y Post-Payandé (Jura-Triásico) las cuales fueron intrudidas aparentemente por rocas cuarzomonzoníticas. Parece ser que la mineralización se manifiesta conjuntamente en *skarns* en disseminaciones y en venillas. Los minerales más abundantes son: especularita, magnetita, calcopirita y blenda.

El afloramiento principal conocido como Las Palmitas en Cerro Neiva (BUIRAGO et al., 1976), fue explotado mediante 7 socavones exploratorios por mineros que trataron de beneficiar sin éxito el material de hierro (especularita) existente como ganga.

El afloramiento mineralizado quedó posteriormente sepultado por los deslizamientos y actualmente no hay acceso a los socavones. Otras localidades mineralizadas con características geológicas similares se encuentran 10 km al norte, en el corregimiento de San Antonio, municipio de Neiva, con el nombre de El Suspiro y también 30 km al sur en el municipio de Hobo, con el nombre de El Hobo (BUIRAGO, et al., 1976). Es evidente que el pie del monte occidental de la Cordillera Oriental entre las localidades de San Antonio, Cerro Neiva y Hobo es promisorio para hallar mineralizaciones del tipo pórfido cuprífero.

*Área de El Salado - Blanco.* - Está situada en el municipio de El Salado - Blanco. Se trata de un *skarn* cuprífero asociado a cuarzodiorita del Batolito de Ibagué, cerca del río Granates y conocido como prospecto Granates (BUIRAGO et al., 1976). Aproximadamente 8 km al sur existe otro afloramiento filoniano de Plomo-Zinc conocido como Morelia, los cuales podrían estar relacionados entre sí. Es un Área promisorio para cobre que ha sido muy poco explorado.

#### NARIÑO

*Municipios de Puerres y Córdoba.* - En estos municipios existen varios prospectos de cobre descubiertos por geólogos de las compañías Texas Petroleum y Colombian Gulf Oil en el año de 1968. Estos prospectos son: Monopamba, Alisales, Blanca, Afiladores y Los Cedros; la principal vía de acceso es el sistema carretable construido por esas compañías para la ins-

talación y conservación del Oleoducto Transandino, que de la estación de bombeo Alisales va hasta la carretera Panamericana. En los años de 1972 y 1973 la Texas realizó estudios geológicos para conocer más detalladamente la zona.

Los resultados de estos trabajos están resumidos en el escrito de Escorce (1979) y no se volverá a insistir sobre ellos; en su lugar se describirán las labores realizadas por el INGEOMINAS y las conclusiones que se se presentan en el documento de Marín y Sillitoe (1985). Teniendo en cuenta que la Texas entregó todas las licencias de exploración y explotación del Área en agosto de 1982, el INGEOMINAS, con el fin de comprobar la existencia de un Distrito Minero en el sur occidente colombiano, con el propósito de incrementar las reservas del Proyecto Mocoa y reducir los costos de inversión en su infraestructura, programó en 1984, trabajos de exploración con base en geología y geoquímica regional, para detectar Áreas anómalas para metales básicos y preciosos en general; igualmente se diseñó para los Alisales un plan de estudios geológicos más detallados para conocer exactamente su importancia económica. La primera actividad a desarrollar en el prospecto Los Alisales consistió en el destape de los "filones" para su observación directa y la iniciación de estudio geológico y geoquímico regional de las cuencas hidrográficas de los ríos Afiladores y río Sucio componentes principales del río Putumayo.

El Área de Alisales está localizada en la ladera sureste del Cerro Precipicio y al oeste de la Quebrada Blanca, sobre rocas pertenecientes al Complejo Migmatítico de Nariño. Geológicamente la zona mineralizada está ubicada muy cerca al contacto entre un plutón muy orientado y una serie suprayacente de rocas de un alto grado de metamorfismo; este contacto, regionalmente, presenta un rumbo N-S con buzamiento muy suave hacia el oeste. El Plutón presenta una composición esencialmente cuarzo diorítica a tonalítica, de grano medio a grueso, hipidiomórfico, equigranular altamente foliado. La secuencia metamórfica de alto grado está compuesta predominantemente por neises cuarzofeldespáticos con zonas muy ricas en biotita y anfibolitas, cuya composición consiste principalmente en hornblenda y plagioclasa; de color gris verde a verde oscuro, grano fino, textura nematoblástica, localmente exhiben estructuras augen ptimáticas de unos pocos milímetros hasta 2 cm de tamaño. La zona mineralizada se encuentra afectada por diques hipobásales de composición andesítica de color gris a un verde grisáceo, grano fino a medio, y algunos de textura porfirítica; estos diques son claramente post-evento metamórfico y post-mineralización. La foliación observada tanto en la secuencia metamórfica como en el plutón cuarzodiorítico es perfectamente concordante o paralela al contacto ígneo-metamórfico; este rasgo geológico sugiere que el emplazamiento del plutón cuarzodiorítico fue anterior o ligeramente contemporáneo con el evento metamórfico principal. A estas unidades litológicas se les asignó una edad correspondiente a la Base del Proterozoico superior y pueden corresponder a la extensión más sur del Macizo de Garzón.

En los alrededores del caserío de Monopamba, en las zonas de contacto entre la secuencia metasedimentaria y el plutón de cuarzodiorita se presentan mineralizaciones de cobre, siendo las más destacados las de El Cobre y El Derrumbe por ser ellas el fundamento principal del proyecto Los Alisales. Inicialmente se pensó en la posibilidad de que fueran filones hidrotermales, pero al establecer su continuidad horizontal, muy limitada y su composición pegmatítica, incluyendo deformación del

cuarzo, se llegó a la conclusión que no se trata de filones, sino de segregaciones metamórficas pegmatíticas con un origen distinto al hidrotermal predeterminado. Su extensión vertical, también es muy limitada, 3-4 m como máximo. En un afloramiento sobre un afluente sur de la quebrada Escalera se observan las relaciones existentes entre las dos litologías foliadas y entre la roca encajante, ígnea o metamórfica, y los lentes pegmatíticos.

Los lentes pegmatíticos son muy ricos en cuarzo con cantidades subordinadas de feldespato potásico y trazas de biotita, de parcialmente mordorizada a totalmente baueritizada. La mineralización primaria en pequeñas concentraciones irregulares, diseminada o rellenando fracturas consiste en bornita y en menor proporción calcopirita, scheelita, molibdenita y calcosina; asimismo se presenta malaquita y en menor proporción azurita, pitchlimonita y cuproscheelita como minerales secundarios provenientes de la oxidación supergénica de los minerales primarios en un ambiente escaso de pirita; en cuanto a la cuproscheelita este es el primer sitio en Colombia donde se ha observado este mineral secundario.

La exploración geoquímica regional se inició con la toma de finos seleccionados en los principales afluentes de los ríos Afiladores y Suclo; los resultados del análisis espectrográfico, muestran contenidos promedios normales para estos tipos de rocas. Inclusive se tomaron muestras en los drenajes que cortan las zonas mineralizadas y no hubo un incremento llamativo de ningún elemento en estos análisis.

Las conclusiones del informe de Marín y Sillotoe (1985) son:

1. La mineralización en los Alisales no tiene ningún interés económico aunque sí científico y no se recomienda ningún tipo adicional de exploración en este prospecto. Sin embargo, si existiera la infraestructura necesaria se podría pensar en la concentración manual de unas pocas toneladas de material con un buen contenido de cobre.
2. La mineralización no es del tipo filoniano y es la primera vez que se reportan minerales de tungsteno en este prospecto.
3. Se comprobó por primera vez la presencia de cuproscheelita como producto del reemplazamiento pseudomórfico del Ca por Cu en scheelita en un medio básico. Igualmente se constató la existencia de una metalogénesis Precámbrica muy similar a la del Fanerozoico existente en los Andes Colombianos (SILLIOTOE et al, 1982). Estas rocas en general han sido menospreciadas como receptoras o portadoras de mineralización en cualquier prospección geoquímica regional.

Otros sitios con minerales de cobre en el departamento (MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, 1973) son: Municipio de Barbacoas, cabeceras del río Telembí; confluencias del Telembí y Vargas; Buenasaca: Paraje Tambillo; en Bolívar, sitio derrumbe La Seciliana; El Tambo: Paraje San Pedro; La Unión: ribera del Mayo carretera a Popayán; Mallema: Vereda Parracual; vecindades de la mina Bomboná; Samaniego: Vereda San Pablo, en la quebrada San Pablo y Murciélagos; Santa Cruz: mina El Diamante; mina Niño de Praga y Santo Domingo.

## NORTE DE SANTANDER

Durante la elaboración del Mapa Minero de Norte de Santander se obtuvo información de la existencia de minerales de cobre en 50 localidades, de las que se visitaron las de mayor interés (OTERO, 1971). Las mineralizaciones se concentran en la parte sur-central y en la norte occidental del departamento las cuales se pueden agrupar en cuatro categorías:

Tipo I. Incluye mineralizaciones asociadas con rocas hipobasales, como pórfidos andesíticos y dacíticos, que atraviesan rocas metamórficas paleozoicas y sedimentos del Girón. Las intrusiones se presentan a manera de diques de los que se proyectan filones, con calcopirita y bornita hacia las rocas encajantes. Mineralizaciones de este tipo se presentan en los municipios de Cáchira y El Carmen;

Tipo II. Incluye las mineralizaciones de cobre que se encuentran en diques básicos asociados con pirita y pirrotina. La extensión y espesor de los diques es poca, lo que hace que su importancia económica disminuya;

Tipo III. Incluye las mineralizaciones de cobre asociadas con cuerpos lenticulares ricos en epidoto, la composición mineral es muy heterogénea, cobre nativo, tenorita, cuprita, cuarzo, calcita, epidoto, con minerales secundarios como malaquita y azurita. Están localizados dentro de rocas volcánicas que alternan como limolitas arenosas del Girón. Las lentes rara vez exceden 1 m de longitud y pocos centímetros de espesor. Se encuentran esporádicamente en los municipios de Hacari, San Calixto y La Playa;

Tipo IV. Comprende las mineralizaciones de cobre encontradas dentro de limolitas o areniscas del Girón y que tienen como mineral principal la calcosina. La dispersión de este tipo de mineralización es muy amplia; se mencionan varios sitios en el departamento. Hasta el presente no se ha encontrado calcosina en cantidades significativas, pero mediante la prospección química en áreas con numerosas manifestaciones es posible delimitar alguna zona de interés. En la cañada El Tuto, municipio de Silos, sobre la carretera Berlín - Baraya, y en una arenisca arkósica del Girón se presentan 4 manifestaciones de cobre, la mayor de las cuales se extiende por 135 m a lo largo del rumbo de un estrato de 5,4 m de espesor. Igual caso ocurre en el caño Cascajales, municipio de Silos; la mineralización se puede seguir por 250 m a lo largo del rumbo (WARD y GOLOSMITH, 1970).

## RISARALDA

*Área de Belén de Umbria.* - Está situada en el corregimiento de Colombia, municipio de Belén de Umbria. Se trata de numerosas vetillas con material feldespático y sulfuros cupríferos, alojadas en rocas verdes (basaltos-dibasas?) formando localmente concentraciones tipo en enrejado en un área aproximada de  $1/2 \text{ km}^2$  (GUARIN, 1971). Un reconocimiento geológico de los alrededores indicó que la mineralización no se extendió lateralmente.

## SANTANDER

La región de California ha sido un centro de explotación de yacimientos de oro y plata, pero localmente y en especial en el sector de La Baja se encuentran zinc, plomo y cobre que

merecen interés como subproductos aparte del uranio (BUENO, 1955). En el sector de La Baja los filones de Las Animas y el de San Cristóbal contienen una mineralización cuprífera apreciable, en cambio el filón San Celestino presenta un tenor promedio de 0,1% Cu.

En los municipios de Bolívar y Vélez se encuentran numerosos hilos y filoncitos de calcopirita y siderita en la región divisoria entre los ríos Carare y Suárez (Filo de la Serranía y Valle de Cuevas). En 1953 se utilizaron en el pueblo de California los residuos de la extracción de oro de la mina La Entrada (WOKITTEL, 1960) que tenía 4.7% Cu, para la fabricación de sulfato de cobre. En Coromoro existe un yacimiento metasomático de calizas, cuyo principal mineral es galena, y contiene además calcopirita y esfalerita.

## TOLIMA

*Area de Mina Vieja - El Sapo.* - La mineralización de Mina Vieja - El Sapo, está situada en el municipio de San Luis, corregimiento de Payandé. Se trata de una zona de skarn cuprífero formado a lo largo del contacto entre calizas de la Formación Payandé (Triásico) y los cuerpos granodioríticos de Payandé y El Sapo (Jurásico superior?). El cuerpo mineralizado consiste en masas de skarn aparentemente dispersas y pequeñas en un trazo de casi 15 km de largo. El mayor de estos cuerpos mineralizados fue estudiado detalladamente por la Empresa Boliden Minera de Colombia S.A., que logró establecer las reservas probadas que se presentan en la Tabla No.3.

TAB.3: Tenor y reservas probadas en el depósito cuprífero de Mina Vieja. Tomado de Boliden Minera de Colombia (1971).

Posibilidad	Tenor Mínimo% (Cut off grade)	Oro g/ton	Plata g/ton	Cobre %	Reservas ton
A	1	1,1	39	2,05	300.000
B	0,75	0,9	33	1,7	456.000

La roca mineralizada está compuesta por magnetita, granate, calcopirita, epidota, hematita, blenda, pirita, calcita y solubdenita. Este material, que corresponde al sector de reservas probadas está siendo explotado actualmente a una tasa de 150 toneladas/día las cuales son procesadas para obtener concentrados de sulfuros polimetálicos exportables.

*Area Los Guayabos.* - La mineralización cuprífera de Los Guayabos está situada en el municipio de San Antonio, muy cerca a la unión de las carreteras que de San Antonio y Roncesvalles conducen a Playa Rica y Rovira. Se trata de una mineralización por reemplazamiento metasomático consistente en un skarn sidero-cuprífero desarrollado sobre una porción de mármol, aparentemente aislada, la cual fue invadida por rocas asociadas al Batolito de Ibaqué, especialmente de pórfidos dacíticos y otras rocas de dique.

El skarn aflora discontinuamente en una extensión de 40 por 100 m con los siguientes minerales metálicos: magnetita, pirita y pequeñas cantidades de calcopirita, blenda, bornita y galena. Además de los minerales propios de skarn, existen abundantes minerales supergénicos de cobre y hierro como malaquita, azurita, limonita, goetita, alunita y otros. El con-

nido de cobre determinado en muestras ocasionales tan alta, llega a 1.000 ppm.

La mineralización está ubicada cerca al contacto entre la cuarzodiorita del Batolito de Ibagué y un cinturón de rocas volcánico-sedimentarias de la Formación post-Payandé (Jurásico) orientado regionalmente N-NE. El cuerpo de mármol que facilitó la mineralización puede corresponder a relictos de la Formación Payandé o a xenolitos metamórficos (pre-cámbricos) muy frecuentes en el área. Lo que se conoce hasta ahora de la mineralización en superficie indica que su magnitud es pequeña, y falta conocer sus características en profundidad.

*Cobre de Puerto Saldaña.*— La mineralización cuprífera de Puerto Saldaña está situada junto al caserío del mismo nombre, en el municipio de Río Blanco. Se trata de una área sobre el Batolito de Ibagué de 2 km de largo por 70 m de ancho, donde existen 14 filones y numerosas vetillas con cuarzo, pirita y algo de calcopirita, molibdenita y bornita. La roca huésped es cuarzodiorita biotítica-hornbléndica con ocasionales xenolitos metamórficos (pre-cámbrico?) y pequeños skarns asociados (BUENAVENTURA, 1976).

La mineralización está restringida a los filones y sus respaldos, los cuales en promedio tienen menos de 60 cm de espesor neto y están dispersos en el área. La alteración hidrotermal en la roca huésped está relacionada con los filones. La mineralización de Puerto Saldaña consiste en un relleno hidrotermal de cavidades con algo de reemplazamiento metasomático aparentemente relacionada con una falla regional paralela al río Saldaña.

*Area de San Antonio - Río Tetudn.*— Está situada en el municipio de San Antonio de Calarcá. Se trata de vetillas piritosas con algo de galena, blenda y calcopirita, alojadas dentro de cuarzodiorita del Batolito de Ibagué en su borde oriental. Las vetillas están muy dispersas y de acuerdo con las exploraciones geoquímicas realizadas hay muy poca disseminación cuprífera en la roca (BUENAVENTURA, 1976).

*Area de La Marina - San Fernando.*— Se presentan numerosas vetillas de cuarzo y pirita y algo de calcopirita y bornita alojadas dentro de granodiorita perteneciente al Batolito de Ibagué. La mineralización aparentemente está restringida a zonas de fracturamiento con silificación, visibles a trechos en una longitud de 500 m (BUENAVENTURA, 1976). Existen dos socavones exploratorios abandonados de 20 y 15 m de longitud, hechos por mineros de la región que pretendieron hacer una explotación selectiva en el año de 1970. La información minera existente hace suponer que la magnitud de la mineralización cuprífera de La Marina sea mayor de lo que actualmente se conoce.

Además de las mineralizaciones descritas, que aparecen como las más importantes de las conocidas en el Tolima, Wokittel (1960) cita otras mineralizaciones de cobre al este de Natagaima, La Alpujarra, Ataco, Cajamarca, Libano, Falan, Fresno, entre otras.

## VALLE

*Area de El Dovio.*— Situada en el municipio de El Dovio. Se trata de vetillas de sulfuros cupríferos dentro de diabasas y basaltos del Grupo Dagua (Cretáceo) visibles en un tramo de

300 m de longitud (GUARIN, 1971). Se mencionan minerales de cobre en los municipios de Buga, Dagua, Andalucía, Sevilla y Cali (WOKITTEL, 1960).

## PERSPECTIVAS

### SUSTITUCION Y POSIBLES NUEVOS MERCADOS DEL COBRE

La posición del cobre en el campo de la competición de materiales es única. Hasta la fecha en muy pocas oportunidades ha sido reemplazado por razones técnicas o mecánicas, y en la mayoría de los casos la sustitución del elemento ha sido por falta de disponibilidad, por costos de producción o por una mezcla de los dos factores. Inclusive, en las dos últimas décadas los problemas que más han afectado el uso del cobre han sido: incertidumbre en la entrega, problemas de transporte, huelgas y problemas políticos. La participación del cobre en los usos tradicionales, está limitada teóricamente por la disponibilidad. Además, sus atractivos son muy grandes, precisamente, en las áreas de la tecnología moderna, donde el crecimiento ha sido muy rápido: generación y distribución de electricidad, transporte, plomería, calefacción, refrigeración y distribución de electricidad, aire acondicionado y construcción. Claramente, los recursos mundiales del cobre y particularmente los medios de explotación, no le permitieron al metal mantener su liderazgo y el cobre tuvo que ceder ante sus competidores en algunos de sus usos donde el precio jugó un papel muy importante.

Actualmente, su competidor más importante es el aluminio. En una investigación llevada a cabo hace pocos años se detectó que la pérdida en producción del cobre había sido sustituida en un 54% por aluminio, 8% en plásticos, 5% en aceros inoxidables y un 18% en otros metales no ferrosos, el 15% restante fue atribuido a cambios en los diseños, algunos de ellos eliminando totalmente el cobre. Según las tendencias actuales, esta misma situación prevalecerá por el resto del Siglo.

Analizando el futuro de la industria mundial del cobre a mediano y largo plazo, todo indica que el precio del cobre no se recuperará, o lo hará en forma muy moderada; no obstante, sus productores están trabajando a grandes velocidades, tal como fue informado en una conferencia en Santiago (Chile), del Instituto de Minería y Metalurgia, para incrementar la producción del cobre en los primeros meses de 1990 en el mundo entero. Para poder equilibrar este incremento en la producción se están buscando nuevos mercados para el cobre. Igualmente, es bien conocido que en los países industrializados, la expansión de la industria del cobre está muy limitada. Asimismo, la ergonomía y la miniaturización electrónica han reemplazado parcialmente al cobre por fibras ópticas, reduciendo su consumo sustancialmente. En consecuencia, un incremento en el consumo del cobre tiene que ser buscado en alguna parte. En una reunión de países productores (COMECON, 1986) se llegó a la conclusión de que los países subdesarrollados podrían ser los consumidores de la sobreproducción. Generalmente, el consumo de cobre por persona, en los países industrializados es de 5-10 kg, mientras que en los países subdesarrollados es únicamente de 0.1 - 0.2 kg, y es en estos países donde se asienta la mayor población mundial. Estas estadísticas nos demuestran que los países subdesarrollados son un gran potencial dentro del mercado del cobre, esencialmente en sus usos tradiciona-

les, mejorando la infraestructura para proporcionar electricidad, agua, sanidad, comunicaciones, obras de ingeniería y partes simples en electrodomésticos.

En cuanto a Colombia se refiere, teniendo en cuenta su posición dentro del Cinturón Metalogénico Circumpacífico, la probabilidad de ubicar depósitos importantes de cobre es relativamente alta. La exploración regional, sin duda, debe tener dentro de sus objetivos, la identificación de dichos depósitos. Sin embargo, su evaluación detallada y posible desarrollo, etapas que implican inversiones elevadas, sólo deben acometerse siguiendo un estricto orden de prioridades y dentro del marco universal de la oferta y demanda de minerales.

### BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, G. E., PARRA, P. E., CABALLERO, A. H., NUGTEREN, H., 1983.- Estudio para la justificación de la prefactibilidad en el prospecto de pórfido cuprífero de Pantanos - Pegadorcito, Departamento de Antioquia. Ingeominas, p. 172. Medellín.
- BARRERO, L.D., 1969.- Petrografía del stock de Payandé y Metamorfitas asociadas. Bol. Geol. XVII (1-3): 144. Bogotá.
- BARRERO, L.D. y VESGA, C.J., 1976.- Mapa geológico del Cuadrángulo K-9 (Armero), y parte sur del J-9 (La Dorada). Esc. 1:100.000 Elaboración Cartográfica, Ingeominas. Bogotá.
- BATEMAN, A.M., 1968.- Yacimientos minerales de rendimiento económico. Edic. Omega.
- BOLIDEN MINERA DE COLOMBIA, S.A., 1971.- Mina Vieja geological report. Department of Geology, 7 p. Bogotá.
- BOTERO, G.R., 1946.- Yacimiento de cobre El Tascón, municipio de Anserma, Caldas. Comp. Est. Geol. Of. en Col. 1000 VII, Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- BUENAVENTURA, J., 1976.- Ocurrencias minerales en las regiones sur y oriental del Departamento del Tolima. Inf. 1694. Ingeominas. Bogotá.
- BUENO, J., 1955.- Yacimientos de uranio y otros metales en la región de La Baja, municipio de California, Departamento de Santander. Bol. Geol. III (3). Bogotá.
- BUITRAGO, C., BUENAVENTURA, J.A., PEREZ, H.S., 1976.- Ocurrencias minerales en el Departamento del Huila. Inf. 1698, Part II. Ingeominas.
- CALLE, B., SALINAS, R., 1986.- Geología y geoquímica de la Plancha 165 Carmen de Atrato. Inf. 1987. Ingeominas, p. 140. Bogotá.
- COX, D.P. et al. 1973.- Copper. In: Brobst, D.A., Pratt, W.F. eds., United States Mineral Resources, Geological Survey Professional Paper 820, p. 163-190.
- DANA-HURLBUT., 1960.- Manual de Mineralogía. Editorial Reverte, S.A.

- ESCORCE, E.B., 1962.- Ocurrencias Minerales en el Departamento del Chocó. Inf. No. 1620. Ingeominas.
- , 1976.- Porphyry copper type deposits in diorite rocks. Ingeominas. Bogotá.
- , 1977.- Mineralización tipo pórfido cuprífero, Área Mocos (Putumayo). Ingeominas, Inf. Anual de Labores 1977.
- , 1978.- Cobre en: Recursos Minerales de Colombia. Ingeominas, Pub. Geol. Esp. (1):137-163. Bogotá.
- GARCIA, A.C., 1977.- Estudio geológico de la mineralización cuprífera de El Roble (Cámen de Atrato, Chocó). Proyecto de Grado 1: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín.
- GOLDSCHMIDT, V.M., 1954.- Geochemistry. Oxford, at the clarendon Press.
- GOVERNMENT OF JAPAN, 1965.- Report of the investigation of ore deposits in Colombia. Ingeominas. Bogotá.
- , 1966.- Report of the second investigation of Ore deposits in Colombia. Ingeominas. Bogotá.
- GUARIN, G.C., 1971.- Ocurrencias minerales en el departamento de Risaralda. Inf. No. 1636. Ingeominas. Bogotá.
- GUARIN, G.C., y ALVAREZ, E.G., 1977.- Geología y geoquímica de los prospectos de pórfidos cupríferos en el área de Murindó, municipio de Riosucio, Departamento del Chocó. Inf. 1738. Ingeominas. Bogotá.
- HALL R.B., et al., 1970.- Recursos minerales de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas. Ingeominas Bol. Geol. v. XVIII (2): 90. Bogotá.
- HOLLISTER, V.F., 1975.- An appraisal of the nature and sources of Porphyry copper deposits. Minerals Sci., Ing. v.7.(3).
- HUTCHISON, CH. S., 1983.- Economic deposits and their tectonic setting. A Wiley-Interscience Publication, Wiley and Sons p. 365. New York.
- INGEOMINAS, 1977.- Informe anual de labores del año 1976.
- , 1978.- Informe Anual de Labores del año 1977.
- JICA-MMAJ-INGEOMINAS, 1983.- Report on Geological Survey of Piedrancha Area, Phase III. Ingeominas, p. 53. Bogotá.
- , 1983.- Report on Geological Survey of Piedrancha Area, Consolidated. Ingeominas, p. 46. Bogotá.
- , 1984.- Estudio Preliminar de Factibilidad del Desarrollo del Área El Diamante - Paraíso - Bombona, Dpto. de Mariño. Ingeominas, p. 191. Bogotá.
- , 1985.- Informe sobre exploración de minerales del Área de Almaguer, Dpto. del Cauca, República de Colombia, Fase I. Ingeominas, p. 57. Bogotá.

- , 1986.- Informe sobre exploración de minerales del área de Almaquer, Depto. de Cauca República de Colombia, Fase II. Ingeominas, p. 37. Bogotá.
- JARAMILLO, L., ESCOBAR, R., 1980.- Cinturones de Pórfidos en las Cordilleras Colombianas, en: *Metalogénesis en Latinoamérica*: Publ. IUGS, No. 5: 75-99. México, D.F.
- LEON, L.A., y PADILLA, L.E., 1971.- Exploración Minera en el Depto. del Cauca. Ingeominas, Bogotá.
- LEPELTIER, C., 1969.- A Simplified Treatment of Geochemical Data by Graphical Representation. *Econ. Geol.*, v.(64): 538-550.
- LOWELL, J.D., AND GUILBERT, J.M., 1970.- Lateral and Vertical Alteration Mineralization zoning in Porphyry Ore Deposits. *Econ. Geol.*, v.(65):373-408.
- MARIN, P., SILLITOE, R., 1985.- Mineralización de cobre-tungsteno-molibdeno en Pegmatitas de probable Edad Proterozoico en los Alisales, Nariño. D-199, Ingeominas, p. 23. Bogotá.
- MARULANDA, N., 1976.- Geología y geoquímica del área de Piedrasentada, municipio del Bordo, Depto. del Cauca. Inf. 1703. Ingeominas. Bogotá.
- MAZO, J. y GUTIERREZ, N., 1971.- Estudio geológico y de beneficio de mineral de cobre de la mina Santa Anita - Cerezo de Atrato (Chocó). Min. Minas y Pet., División Nat. de Minas. Zona Minera de Medellín.
- McLAUGHLIN, D.E., y ARCE, H.M., 1971.- Recursos minerales de parte de los Deptos. de Cundinamarca, Boyacá y Meta. *Bol. Geol.*, v. XIX. (1).
- MENDOZA, F.H., JARAMILLO, C.L., 1979.- Geología y geoquímica del área de California, Santander: Inf. 1687. Ingeominas. *Bol. Geol.*, v. XXII (2). p.1-98. Bogotá.
- MHAJ-JICA-INGEOMINAS, 1981.- Report on geological survey of Piedrancha area, Phase I. Ingeominas, p. 95. Bogotá.
- , 1982.- Report on geological survey of Piedrancha area II. Ingeominas, p. 76. Bogotá.
- MINING ANNUAL REVIEW, 1986.- Published by Mining Journal. p. 544. London.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, 1978.- Archivos. Sección de Fiscalización e Interventoría. Bogotá.
- MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, 1973.- La industria del cobre en Colombia. Bogotá.
- MURIKOWSKY, Z., 1963.- Recursos minerales de Boyacá.
- MUTIS, J.V., 1954.- El cobre en Colombia. Boletín de Minas, año I, (7).
- NACIONES UNIDAS, 1976.- Base metal project in the Central and Western Cordilleras. Inf. de las Naciones Unidas, Col/72/002, p. 272. New York.

- , 1981.- Mineralización del tipo pórfido cuprífero en el área de El Infierno, Depto. del Tolima. Inf. Técnico, Col/76/030/2, p. 132. Bogotá.
- , 1981.- Mineralización en la zona del Patascoy, Intendencia de Putumayo. Inf. Técnico, Col/76/030/3, p. 25. Bogotá.
- , 1982.- Las empresas transnacionales en la industria del cobre. Pub. de las Naciones Unidas. ST/CTC/21, p. 75. New York.
- NACIONES UNIDAS, INGEOMINAS, 1982.- Mineralización del cobre-molibdeno en el municipio de Acandí, Depto. del Chocó. Inf. Técnico, Col/76/030/1, p. 165. Bogotá.
- NACIONES UNIDAS, INGEOMINAS, ECOMINAS, 1983.- Depósito de cobre y molibdeno de Mocoa, Putumayo, Colombia: Inf. Técnico Interno, Col/76/030/4, p. 191, 6 anexos. Bogotá.
- , 1984.- Depósito de cobre y molibdeno de Mocoa, Putumayo, Colombia. Inf. preliminar de factibilidad, Col/76/030/05, p. 173, 6 anexos. Bogotá.
- ORREGO, A.L., 1977.- Geología y geoquímica del área mineralizada El Plano, Silvia (Cauca): Ingeominas. Bogotá.
- OTERO, A.J., 1971.- Tipo de mineralizaciones de cobre en el Depto. de Norte de Santander. Características y posibilidades Económicas. Ingeominas. Bogotá.
- PEELE, R., 1956.- Mining engineers handbook v. 1, Third Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- PULIDO, O., VESGA, C., LOZANO, H., MOSQUERA, D., 1976.- Mineralizaciones de molibdeno y cobre en la vereda Andes, Municipio de Rovira, Tolima; Inf. Preliminar, Carta Técnica No. 49, Ingeominas, p. 37. Bogotá.
- PULIDO, O., 1978.- Mineralizaciones de molibdeno y cobre en la vereda Andes, Municipio de Rovira, Tolima - Perforaciones, Inf. 1748. Ingeominas, p. 27. Bogotá.
- RAMIREZ, O. y ARIAS, A., 1973.- Estudio geológico en el área de Pantanos-Pegadorcito, Municipios de Frontino y Dabeiba Depto. de Antioquia. Inf. 1633. Ingeominas. Medellín.
- ROSENKRANZ, R.D., BOYLE, E., H., PORTER, K., E., 1983.- Copper Availability-market economy countries. A Minerals Availability Program Appraisal. Bureau of mines, I.C. 8930, p. 30.
- SILLITOE, R., H., 1972.- A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Econ. Geol. v. 67: 184-197.
- SILLITOE, R.H., et al, 1982.- Setting, characteristics and age of the andean porphyry copper belt in Colombia. Econ. Geol. v. 77 (8): p. 1837-1850.
- SILLITOE, R., H., JARAMILLO, L., CASTRO, H., 1984.- Geologic exploration of a molybdenum-rich porphyry copper deposits at Mocoa, Colombia. Econ. Geol., v. 79 (1): 106-123.

- TITLEY, R.S., y MICKS, C.L., 1971.- Geology of the porphyry copper deposits southwestern North America.
- WARD, D., y GOLDSMITH, R., 1970.- Recursos minerales de parte de los Deptos. de Norte de Santander y Santander. Bol. Geol. Ingeominas XVIII (3): 140. Bogotá.
- WHITE, H., 1941.- La minería en Antioquia. Revista Dyna, v. 1, Epoca III, No. 6.
- WARHURST, A.C., 1984.- The application of biotechnology in developing countries. The case of mineral leaching with particular reference to the Andean Pact Copper Project. UNIDO, IS 450, v. 84, p. 160.
- WOKITTEL, R., 1957.- La formación cuprífera en la Serranía de Perijá (Guajira, Magdalena). Bol. Geol. Ingeominas, I (3):10. Bogotá.
- , 1960.- Recursos Minerales de Colombia. Comp. Est. Geol. Of. Col., Tomo X.

## MINERALES DE CROMO

JAIRO ALVAREZ A.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	185
Introducción .....	186
Usos .....	186
Ambiente geológico .....	187
Geoquímica .....	187
Química y mineralogía .....	188
Tipos de depósitos .....	189
Técnicas de prospección .....	189
Minería .....	191
Beneficio .....	191
Situación mundial .....	191
Recursos y reservas .....	191
Producción .....	192
Precios .....	193
El Cromo en Colombia .....	194
Depósitos .....	194
Reservas y producción .....	196
Comercio .....	197
Perspectivas .....	197
Bibliografía .....	198

## RESUMEN

La cromita es el único mineral de cromo metálico y el elemento es utilizado ampliamente en industrias química, cerámica y refractaria. Es además, uno de los más importantes materiales estratégicos. El cromo y la cromita tienen muchos usos que afectan, directa o indirectamente, grandes sectores de la industria actual. Las más importantes son probablemente las aplicaciones industriales, donde el cromo es un componente de aleaciones resistentes a la oxidación, corrosión, abrasión y al calor; además se utiliza en aleaciones de alta resistencia. Los aceros inoxidable ocupan el primer lugar en las aleaciones que contienen cromo. En la industria química el cromo se emplea en la fabricación de pigmentos para pinturas, en curtiembres, tintas, fotografía, productos farmacéuticos, plateado de metales, y para muchos otros fines. La cromita es un constituyente indispensable en la fabricación de refractarios básicos y para hornos en la producción de acero, cobre, cemento y vidrio (MIKAMI, 1983).

La cromita proviene de depósitos estratificados asociados con complejos ultramáficos y de depósitos podiformes en ofiolitas. En Colombia sólo se conoce un depósito del segundo tipo, actualmente agotado; pero existen varias decenas de cuerpos ultramáficos que es necesario prospectar para cromita.

Las importaciones colombianas de dicho mineral durante 1983, según el DANE, fueron de una tonelada métrica.

La producción mundial estimada de cromita en 1984 ascendió a 8'119.000 toneladas. Los cinco principales productores en el mundo fueron: URSS (30%), Sur Africa (27%), Albania (11%), Zimbabwe (15%) y Turquía (5%) (COOPE, 1984).

## INTRODUCCION

El geoquímico francés Louis Vauguelin, fue el primero en identificar el elemento cromo en 1797 y aunque este elemento se encuentra en varios minerales, la cromita es la única fuente comercial del mismo.

A finales del Siglo XVIII la cromita de los Montes Urales en la Unión Soviética fue la fuente principal de abastecimiento del mundo. En 1827 dicho mineral fue descubierto en Maryland (EU) y en 1869 grandes depósitos fueron desarrollados en Turquía.

Al principio la cromita se usó esencialmente en la fabricación de productos químicos, pero a partir de 1900 se ha venido utilizando ampliamente en la manufactura de productos refractarios y metalúrgicos (MORNING, 1975). Con amplia utilización del cromo en aceros inoxidables, este elemento se convirtió en uno de los metales más buscados haciendo obvia su naturaleza estratégica (MIKAMI, 1983).

## USOS

El cromo es uno de los elementos esenciales y versátiles de la industria moderna y aunque existen sustitutos para el metal en muchos usos, tales como titanio y aluminio para aceros inoxidables y magnetita en vez de cromita en refractarios, en algunas aplicaciones no se han encontrado reemplazos adecuados. El cromo tiene un uso amplio en la industria metalúrgica, química y de refractarios.

Desde el punto de vista de su composición y uso existen tres divisiones generales para los minerales de cromo (THAYER, 1973; MIKAMI, 1983), a saber:

- Cromita alta en cromo (grado metalúrgico). Contiene 46% o más de  $Cr_2O_3$  y una relación Cr:Fe de 2:1 ó más. Una composición estándar tiene 48%  $Cr_2O_3$  y una razón Cr:Fe de 3:1.
- Cromita alta en hierro (grado químico). Contiene 40% a 46% (promedio  $\geq 44\%$ ) de  $Cr_2O_3$ , una relación Cr: Fe menor de 2:1 (generalmente 1.5) y sílice menor de 3.5%.
- Cromita alta en aluminio (grado refractario). Contiene de 30 a 40% de  $Cr_2O_3$ , 25 a 32% de  $Al_2O_3$  y una relación Cr:Fe que varía de 2.0-2.5:1. El hierro total como FeO es menor de 15%.

Menas de muy alto tenor son a menudo mezcladas con menas de tenores más bajos, incluyendo las de grado químico. En algunas aleaciones de ferrocromo, se usan adiciones de cromita grado refractario como acondicionadoras de escoria para facilitar la fusión, además el material contribuye también con valores de cromo. El ferrocromo de grado más bajo, se ha convertido en la variedad predominante en la actualidad para fabricar aleaciones de acero con cromo. Este mate-

rial puede tener contenidos tan bajos en cromo como 50% y ser fabricado de mena de grado químico con 44%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y una relación Cr:Fe de 1.5:1. Esto fue posible mediante procesos de decarburización con oxígeno-argón (DOA) y de decarburización con oxígeno al vacío (DOV).

El cromo es usado en la industria metalúrgica porque da a las aleaciones resistencia a la oxidación, corrosión, abrasión, ataque químico y al calor (JENSEN y BATEMAN, 1981). Según Papp (1984), el uso principal del cromo es en la producción de acero inoxidable. Este material se puede obtener en una variedad de composiciones y estructuras, que presentan un amplio rango de propiedades mecánicas las cuales se combinan con una excelente resistencia a la oxidación y corrosión. Por lo tanto, el acero inoxidable es usado en una multitud de productos industriales y de consumo. El cromo es también un constituyente de una variedad de aleaciones ferrosas y no ferrosas de amplia utilización. Las aleaciones de cromo se emplean en misiles, barcos, submarinos, aviones y armas. Las superaleaciones de cromo se utilizan en motores de turbina a gas de uso militar, puesto que permiten muy altas temperaturas de operación y mayor eficiencia. Aleaciones que contienen cromo se emplean en aplicaciones industriales como maquinaria pesada, procesamiento químico y producción de energía. En la industria química el cromo se emplea principalmente en la fabricación de pigmentos para pinturas, curtiembres y tintas. Además se usa en la producción de ácido crómico, como catalizador en galvanoplastia y en la industria textil (PAPP, 1984).

El Cromo en la forma de cromita se utiliza en la industria de refractarios, los cuales sirven para revestir hornos usados en vidriería, metalurgia y en industrias de cemento y cal.

### AMBIENTE GEOLOGICO

El cromo se encuentra en la cromita, el cual es el único mineral de mena para este elemento. Dicho mineral se presenta en concentraciones económicas en rocas ultramáficas de complejos estratificados y ofiolíticos. Los primeros fueron emplazados en terrenos continentales cratónicos estables, como magma toleítico que sufrió procesos de diferenciación por asentamiento gravitatorio (WAGER & BROWN, 1967); y los segundos representan fragmentos aóctonos generados en dorsales de cuencas oceánicas mayores o marginales y transportados tectónicamente a fajas montañosas móviles de márgenes continentales y arcos insulares. Con las rocas encajantes, los depósitos de cromita son considerados como un residuo refractario resultante de fusión parcial (COLEMAN, 1971; 1977) o son producto de sedimentación magmática (THAYER, 1964; COLEMAN, 1977), ambos procesos en el manto superior.

### GEOQUIMICA

El cromo es un elemento litófilo que se presenta íntimamente asociado con el níquel y el magnesio en las rocas ultramáficas. Estas rocas contienen un promedio que fluctúa de 1000 a 3000 ppm de cromo, concentraciones altas comparadas con 200 ppm aproximadamente para gabro y 5 ppm para granito (JENSEN y BATEMAN, 1981). La cromita es el único mineral primario de cromo y no existe ningún mineral secundario de este elemento. Ti, V, Mn y Ni se presentan desde trazas hasta 1% en muchas cromitas (MIKAMI, 1983).

## QUIMICA Y MINERALOGIA

La cromita ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), variedad de la serie isomorfa del grupo espinel, contiene teóricamente 67.9% (en peso) de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y varía composicionalmente dentro de amplios límites por las fórmulas  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) (\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$ . La composición también puede generalizarse como  $\text{R}^{2+}\text{D} \cdot \text{R}^{3+}_2\text{O}_3$ . Los óxidos en la cromita pueden variar en la forma siguiente:

FeO	6-18%	peso,
MgO	0-16%	peso,
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0-30%	peso,
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	25-60%	peso,
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0-30%	peso.

En la Figura 1, se representa la composición de la cromita por un prisma de seis miembros extremos teóricos. [ ] volumen señalado dentro del prisma corresponde a las cromitas naturales.

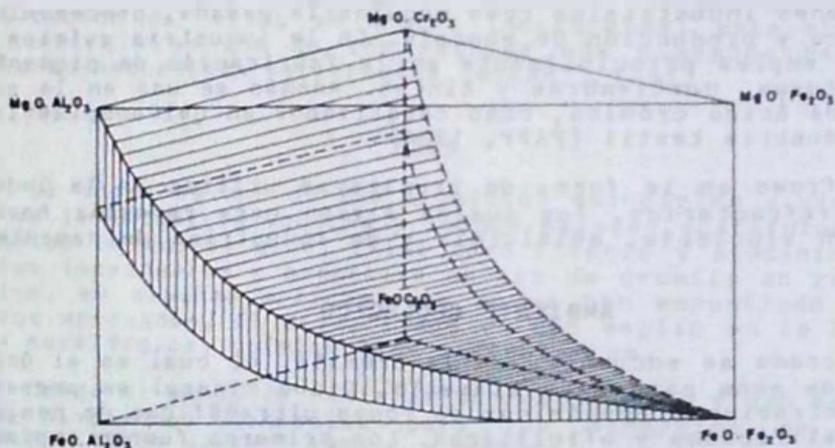


FIG.1: Prisma que representa las composiciones moleculares de cromita en términos de seis componentes extremos. La zona rayada delimita la composición de muchas cromitas naturales. (Tomado de MIKAMI, 1983).

Las cromititas de interés económico tienen un contenido de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  que varía de 25 a 65%, estando libres de ganga; sin embargo, ésta se encuentra siempre presente y consiste principalmente en silicatos (MIKAMI, 1983).

Físicamente la cromita es negra grisosa oscura, con un lustre que puede ser vítreo brillante, resinoso y opaco. Su dureza varía de 5,5 a 6,5 y la gravedad específica 4.1 a 4.7.

La mena de cromo ocurre generalmente como agregados masivos de granos de cromita de 0.05 a 30 mm, más frecuentemente de 1 a 5 mm. Cuando se incrementa el material de ganga, la mena de cromo grada de masiva a diseminada. Los granos de cromita varían de euhedrales a anhedrales redondeados o irregulares.

## TIPOS DE DEPOSITOS

## DEPOSITOS PRIMARIOS

Los depósitos primarios de cromita ocurren en dos grandes grupos, a saber: depósitos estratiformes y depósitos podiformes (THAYER, 1964).

*Depósitos estratiformes.*— Forman capas en las zonas inferiores de los complejos ultramáficos estratificados. Se caracterizan por su gran extensión, frecuentemente de muchos kilómetros, gran tonelaje (centenas a miles de millones de toneladas de cromita), uniformidad lateral y posición estratigráfica consistente dentro de la secuencia litológica, características que facilitan la prospección minera. Poseen además estratificación rítmica y críptica y se encuentran asociados principalmente con piroxenita y peridotita, aunque también se presentan con norita o anortosita.

De los depósitos estratificados se obtiene más del 96% de la cromita alta en hierro explotada en el mundo.

Las capas de cromita son tabulares y paralelas a la estratificación magmática y pueden estar acompañadas de sulfuros básicos con metales preciosos y minerales del grupo del platino. La mena de cromita tiene textura de cúmulus (asentamiento gravitatorio de cristales) y es masiva y/o diseminada.

En el mundo los complejos estratificados con depósitos de cromita se formaron durante todo el tiempo geológico, pero son más importantes en el Precámbrico (JACKSON and THAYER, 1972). Su génesis fue probablemente por sedimentación magmática con la influencia en mayor o menor grado de corrientes de convección (WAGER and BROWN, 1967).

*Depósitos podiformes.*— Las cromitas podiformes o depósitos de cromita tipo alpino, son principalmente lenticulares, irregulares, en forma de lápiz o tabulares (THAYER, 1964), en general, son de pequeñas dimensiones, y varían de unas pocas toneladas a algunos millones de toneladas de cromita de alto cromo o cromita de alto aluminio. Las masas no son continuas y se encuentran frecuentemente al azar dentro de harzburgitas o dunitas, pertenecientes a complejos ofiolíticos. La mena de cromita es masiva o diseminada, a veces con textura orbicular, nodular, néisica, y cúmulus presentando lineación y/o foliación.

Eventualmente las cromitas podrían haber sido sedimentadas como cúmulus, es decir por asentamiento de cristales por gravedad. En razón a su emplazamiento tectónico en estado sólido, los cuerpos ofiolíticos originales sufrieron, en general, desmembramiento tectónico y adquirieron características metamórficas. La edad de los depósitos es Paleozoica o más joven.

## TECNICAS DE PROSPECCION

La ubicación de depósitos de cromita en las zonas inferiores de complejos básicos estratificados y en las rocas ultramáficas peridotíticas pertenecientes a la base de las asociaciones ofiolíticas, limita considerablemente las áreas a prospectar.

La prospección de cromita por métodos geoquímicos es una tarea difícil a causa del alto contenido de cromita accesorio en todas las peridotitas (ALVAREZ, 1980). La cromita, como mineral resistente a la meteorización, forma en la superficie prominencias o se conserva como granos o pequeños fragmentos en el suelo residual, cuando las rocas ultramáficas son sometidas a procesos de intemperización. Este hecho puede ser utilizado como guía de ocurrencias de cromita dependiendo de la abundancia y concentración de granos y fragmentos.

Asimismo, a causa de la acción erosiva de los agentes degradantes del relieve, es transportada por las aguas como material sólido y depositada conjuntamente con otros minerales pesados. De esta manera, la anomalía geoquímica es definida por granos detríticos o fragmentos de cromita, ya sea por observación visual directa en los cauces de las corrientes o utilizando la concentración del material aluvial por bateo, lo que facilita la inspección visual o microscópica de los granos (ALVAREZ, 1980). Para el área de Santa Elena, Alvarez y Muñoz (1981) concluyeron que dicho método es una herramienta útil y mediante ella encontraron áreas anómalas. Thayer (1969) considera los métodos geoquímicos como inaplicables y le asigna una gran importancia a la cartografía geológica. Además dice que la prospección de cromita en depósitos podiformes ha sido exitosa. Aunque la primera afirmación es discutible, la segunda parece ser muy importante en algunos casos.

La prospección y estimación de reservas en los complejos estratiformes están sujetas a cartografía geológica convencional, porque existe una base genética para explicar y predecir la distribución de las capas de cromita. Este tipo de depósitos, una vez encontrados, son comparativamente fáciles de explorar y desarrollar, por ejemplo en el Complejo Bushveld en Suráfrica, donde las capas de cromita tienen decenas de kilómetros en longitud y se extienden considerablemente sin sufrir perturbaciones mayores en profundidad. Sin embargo, el hallazgo de nuevas ocurrencias de mena, no aflorante, como prolongaciones del cuerpo principal, requieren de la experiencia y del conocimiento geológico que se tenga del cuerpo. Las capas podrían acuñarse o ser más numerosas en una región con respecto a otra y aunque el conocimiento geológico aumentaría las posibilidades de éxitos en hallarlas, se requerirá de perforaciones, trincheras, apertura de túneles, etc., antes de tener seguridad de su existencia y localización (HEILIGMAN and MIKAMI, 1960).

Los depósitos podiformes, como se anotó en una sección anterior, presentan características drásticamente diferentes de los estratiformes en cuanto a tamaño, forma, arreglo espacial y distribución (MIKAMI, 1983). Esta última puede ser errática, al azar o impredecible si se cumple la hipótesis petrogenética de Thayer (1969), mediante la cual los depósitos podiformes son remanentes dislocados de depósitos estratiformes originales. No obstante, algunos depósitos parecen estar concentrados en peridotita cerca al contacto con gabbro. Así, mediante el estudio geológico en detalle en Cuba y Filipinas, se encontró que los cuerpos de mena son tabulares o lenticulares, ubicados paralelos al bandeamiento de la roca encajante y situados a unos cientos de metros del contacto peridotita-gabbro (FLINT et al, 1948; BRYNER, 1969). Por lo tanto, la relación estructural y los rasgos texturales de los depósitos de cromita con relación a los de la roca hués-

pod, sirven de indicio en algunas partes para la localización de otros cuerpos, contribuyendo sustancialmente a eliminar el número de perforaciones para encontrar la mena. En resumen, los métodos estratigráficos tienen una mayor aplicación en depósitos estratiformes durante la prospección y exploración.

En cuanto a los métodos geofísicos, la gravimetría ha tenido un éxito limitado en algunos casos (MIKAMI, 1983). En Cuba y Yugoslavia fue utilizada con éxito bajo condiciones ideales de bajo relieve (IHAYER, 1969). En Santa Elena (Antioquia), medidas gravimétricas dieron un buen resultado en la delimitación de ocurrencias de cromita en una zona de topografía ondulada (GEOMINAS, 1973, 1975). La magnetometría ha sido, en general, poco utilizada. Perforaciones, túneles o trincheras cerca a cuerpos conocidos, son los métodos más corrientes para descubrir nuevos cuerpos (MIKAMI, 1983).

## MINERIA

La cromita se explota por métodos subterráneos o a cielo abierto. En el primer caso, el tamaño, forma y posición de los cuerpos hace algunas veces indispensable este tipo de explotación. Por ejemplo, en el Complejo Bushveld donde los cuerpos explotables buzan  $10^\circ$  a  $20^\circ$  y su espesor es aproximadamente de 1,50 m, el mineral se ha extraído por varias centenas de metros en el sentido del rumbo. En este caso, las limitaciones en la explotación son únicamente de índole económica (MIKAMI, 1983).

La mayor parte de los cuerpos de cromita podiforme se explotan por sistemas subterráneos, como depósitos de Guleman-Soridag en Turquía y Camagüey en Cuba. Si los cuerpos de cromita son relativamente grandes y están cerca a la superficie, de tal manera que el descapote sea económicamente factible, el método de explotación a cielo abierto se podrá usar. Este es el caso del depósito Coto en Luzon (Filipinas).

## BENEFICIO

Aunque en muchas partes del mundo la cromita no es beneficiada para aumentar su concentración, cuando este proceso se efectúa los métodos utilizados son de carácter físico, los cuales incluyen flotación, mesas vibratorias, espirales, hidrociclones, separaciones electromagnéticas y electrostáticas (KUROCHIN, en MIKAMI, 1983).

Existen además, varios métodos químicos que enriquecen la cromita en  $Cr_2O_3$  reduciendo el hierro y aumentando, por lo tanto, la relación Cr:Fe, lo cual ha sido importante para el empleo metalúrgico.

## SITUACION MUNDIAL

### RECURSOS Y RESERVAS

Los recursos totales del mundo en cromita comerciable son de 36 billones de toneladas aproximadamente, de los cuales el 99% se encuentran en el Complejo de Bushveld y en el Gran Di-que de Zimbabwe situados en la zona sur de Africa (PAPP, 1984). La información que trae Mikami (1983), obtenida de varios autores, sobre las reservas estimadas y recursos potenciales de cromita en los países de mayor producción de este mineral, es la siguiente (Tab. 1):

TAB.1: Recursos mundiales de cromita (millones de ton. cortas)

País	Reservas Estimadas	Reservas Potenciales
República de Suráfrica*	2.000	20.000
Zimbabwe*	> 1.000	71.000
URSS		100
Irán		52
Finlandia		37
Filipinas		16
Albania		5-10
Turquía	15	5
India	20-25	5
Madagascar		3-4
Brasil	15	
Estados Unidos	10	
Canadá	9	
Groenlandia	Varios millones	
Cuba	> 1	

\* Papp (1984) reporta como recursos de cromita 26 billones de toneladas para la República de Suráfrica y 11 billones de toneladas para Zimbabwe.

## PRODUCCION

En la Figura 2 se muestra la producción anual mundial de cromita para el periodo 1892-1980; en ella se nota un crecimiento particularmente fuerte desde 1932. En el periodo de 60 años, desde 1900 a 1980 ha ocurrido un aumento de casi 200 veces en la producción anual (EADIE, 1984).

La distribución de la producción en el mundo por países sobre una base anual promedio y para cada década, desde 1900 a 1979, se indica en la Tabla 2 (EADIE, 1984). Para la última década 1970-1979, los países se colocaron siguiendo un orden descendente según la producción de cromita. En ella, Suráfrica y la Unión Soviética fueron los principales productores. En la Tabla se ve cual ha sido la tendencia de producción de cada país; se observa que Nueva Caledonia, Zimbabwe, Turquía, La Unión Soviética y Suráfrica, han conservado el liderazgo a la vez que Albania, Filipinas y Finlandia han surgido como nuevos productores.

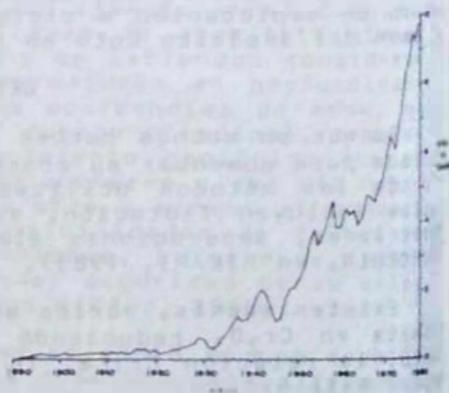


FIG. 2: Producción Mundial de Cromita (1892 a 1980). (Tomado de EADIE, 1984).

En años recientes la industria de químicos del cromo ha permanecido más o menos constante; los refractarios bajaron un 7% del total y la competencia del zirconio redujo el mercado del cromo para arena de fundición en un 5 a 8% (COOPE, 1984).

La producción mundial total de cromita vendible durante 1983, se estimó en 8'119.000 toneladas, representando un aumento de 2.5% con respecto a 1982 pero disminuyendo en relación

TAB. 2: Producción mundial anual promedio de cromita por países para cada década entre 1900-1979. Miles de toneladas.

PAIS	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970
	1909	1919	1929	1939	1949	1959	1969	1979
Sur Africa	-	-	15	92	240	613	973	2207
Unión Soviética	21	4	18	148	358	647	1343	2022
Albania	-	-	-	-	6	119	315	735
Zimbabwé	6	54	138	130	245	420	439	574
Turquía	11	8	10	122	199	672	445	525
Filipinas	-	-	-	28	144	519	528	504
India	4	15	41	38	39	57	100	334
Finlandia	-	-	-	-	-	-	11	256
Irán	-	-	-	-	-	27	105	177
Brasil	-	2	1	1	3	4	15	159
Madagascar	-	-	-	-	-	-	13	155
Grecia	9	7	15	31	12	41	38	28
Sudán	-	-	-	-	-	-	16	25
Chipre	-	-	1	2	5	10	13	25
Japón	-	4	6	27	38	41	46	22
Cuba	-	2	21	44	177	71	15	21
Pakistán*	-	-	-	-	6	21	21	15
Yugoeslavia	-	-	10	51	51	116	75	12
Nueva Caledonia	32	51	40	57	57	74	9	4
Estados Unidos	-	19	-	1	33	94	17	-
Sierra Leona	-	-	-	1	13	18	2	-
Canadá	5	10	2	1	8	-	-	-
Otros	1	3	-	1	1	3	-	9
<b>TOTAL</b>	<b>89</b>	<b>179</b>	<b>318</b>	<b>775</b>	<b>1635</b>	<b>3567</b>	<b>4539</b>	<b>7809</b>

\* Antes de 1947 Pakistán incluye a la India.

ción con 1979, 1980 y 1981. La declinación en la producción de Suráfrica de 1980 a 1983 fue una respuesta a la caída de la demanda, la cual mejoró ligeramente en 1983, hecho que influyó en la producción total.

En la Tabla 3 se presenta la producción mundial de cromita por países y la total entre los años de 1979 y 1983 (COOPE, 1984). En ella se observa que Europa Oriental, la URSS y Albania producen el 41% del total y la zona sur de Africa (Suráfrica y Zimbabwé) el 33%; los siguen en producción Finlandia, Turquía, Brasil, Filipinas e India, países que conjuntamente alcanzan un 23% del total. Las exportaciones de los diversos países consisten principalmente en concentrados, mena esterada y ferrocromo (COOPE, 1984). En Colombia en los últimos 10 años no se reporta producción de cromita.

## PRECIOS

En la Figura 3 se indican los precios F.O.B de tres tipos principales de mena de cromo en el lapso 1974-1980.

Desde finales de la Segunda Guerra Mundial la situación de abastecimiento ha sido generalmente favorable. Los precios fueron relativamente estables hasta 1974 cuando se incrementaron considerablemente, entre otras cosas, por el aumento del precio del petróleo.

TAB. 3: Producción mundial de cromita (miles de toneladas). Tomado de Coope, 1984.

	1979	1980	1981	1982	1983
Finlandia	435	341	412	345	370
Turquía	454	399	423	312	408
Grecia	44	43	43	42	48
Chipre	16	17	11	3	-
<b>Total Europa Occidental</b>	<b>949</b>	<b>800</b>	<b>889</b>	<b>702</b>	<b>826</b>
URRS	2.400	2.450	2.400	2.450	2.470
Albania	673	726	752	792	898
<b>Total Europa Oriental</b>	<b>3.073</b>	<b>3.176</b>	<b>3.152</b>	<b>3.242</b>	<b>3.368</b>
Brasil	340	287	410	420	410
Cuba	28	28	21	27	25
<b>Total Américas</b>	<b>368</b>	<b>315</b>	<b>431</b>	<b>447</b>	<b>435</b>
Filipinas	556	496	439	355	280
India	310	321	336	323	363
Irán	136	80	30	40	30
Vietnam	14	16	16	16	15
Japón	9	10	9	11	10
Pakistán	2	3	1	3	3
<b>Total Asia</b>	<b>1.027</b>	<b>926</b>	<b>831</b>	<b>748</b>	<b>701</b>
Sur Africa	3.297	3.414	2.870	2.164	2.230
Zimbabue	542	552	536	432	410
Madagascar	128	147	100	52	65
Sudán	28	26	26	19	20
<b>Total Africa</b>	<b>3.995</b>	<b>4.139</b>	<b>3.532</b>	<b>2.667</b>	<b>2.725</b>
Nueva Caledonia	12	2	-	50	64
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>9.424</b>	<b>9.358</b>	<b>8.835</b>	<b>7.856</b>	<b>8.119</b>

## EL CROMO EN COLOMBIA

## DEPOSITOS

En Colombia existen tres fajas de rocas máficas-ultramáficas, que según Alvarez (1983, 1985) son: El Cinturón Ophiolítico Romeral (COR), El Cinturón Ultramáfico Atrato (CUA) y el Cinturón Ophiolítico Caribe (COC). Los cuerpos que lo constituyen son numerosos en el COR y el CUA, pero sólo en dos de ellos, tectonitas dunitas de Medellín y serpentinitas de Parahí, Guajira (Fig. 4), se conocen ocurrencias de cromita (ALVAREZ, 1983), aunque de naturaleza económica, únicamente en el primero de los nombrados.

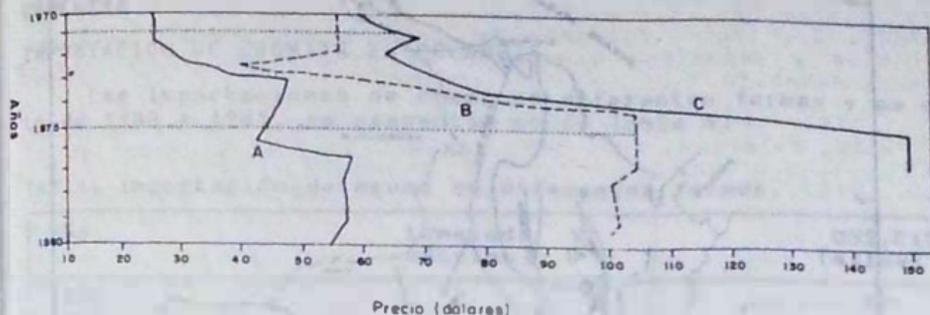


FIG.3: Precios nominales de mena de cromo. A=44%, Suráfrica, Transvaal. B=48%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , relación Cr:Fe de 3: 1, Turquía. C = 54-56%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , relación Cr:Fe de 4:1, URSS. A y B: Precios F.O.B para toneladas largas secas a partir de 1975. C: Precios F.O.B. en toneladas métricas a partir de 1971. (Tomado de MIKAMI, 1983).

#### CROMITAS DE MEDELLIN

Se encuentran situadas en la localidad de Santa Elena, al este de la ciudad del mismo nombre, encajadas dentro de rocas ultrabásicas con diversos grados de serpentización (JARAMILLO, et al, 1974; ALVAREZ, 1982).

Los depósitos son del tipo podiforme de Thayer (1964), se encuentran dispersos y son pequeñas dimensiones. Consisten en cuerpos lenticulares, bolsadas de forma irregular y cuerpos toscamente tabulares, hallados en su mayor parte mediante estudios geofísicos (magnetometría, gravimetría) y exploraciones superficiales realizadas en la porción sur del cuerpo de tectonitas dunitas, aunque algunos se conocían con anterioridad por la existencia de bloques residuales de cromita.

El depósito más grande, actualmente agotado, es el de Patio Bonito. El cuerpo de cromita tenía forma lenticular, con rumbo  $\text{N}10^\circ\text{W}$  e inclinación media de  $52^\circ\text{E}$ . La longitud máxima y la profundidad eran más o menos de 25 y 30 m respectivamente (GEOMINAS, 1973-1975). Se explotaron cerca de 30.000 toneladas de mena de bajo grado, la cual se beneficiaba mediante concentración por gravedad en la planta instalada en la Zona Minera de Medellín, obteniéndose un concentrado con 48 a 52% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

La cromita, en las diversas ocurrencias, era masiva a diseminada, con gradaciones entre ambas y tenía además ligera estructura néctica (ALVAREZ, 1983).

La cromita era de alto contenido en aluminio (grado refractario) con la siguiente composición promedio (ALVAREZ, 1978):  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  32 a 36%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  20 a 23%;  $\text{FeO}$  11 a 14%;  $\text{MgO}$  21 a 25% y  $\text{SiO}_2$  5 a 8%.

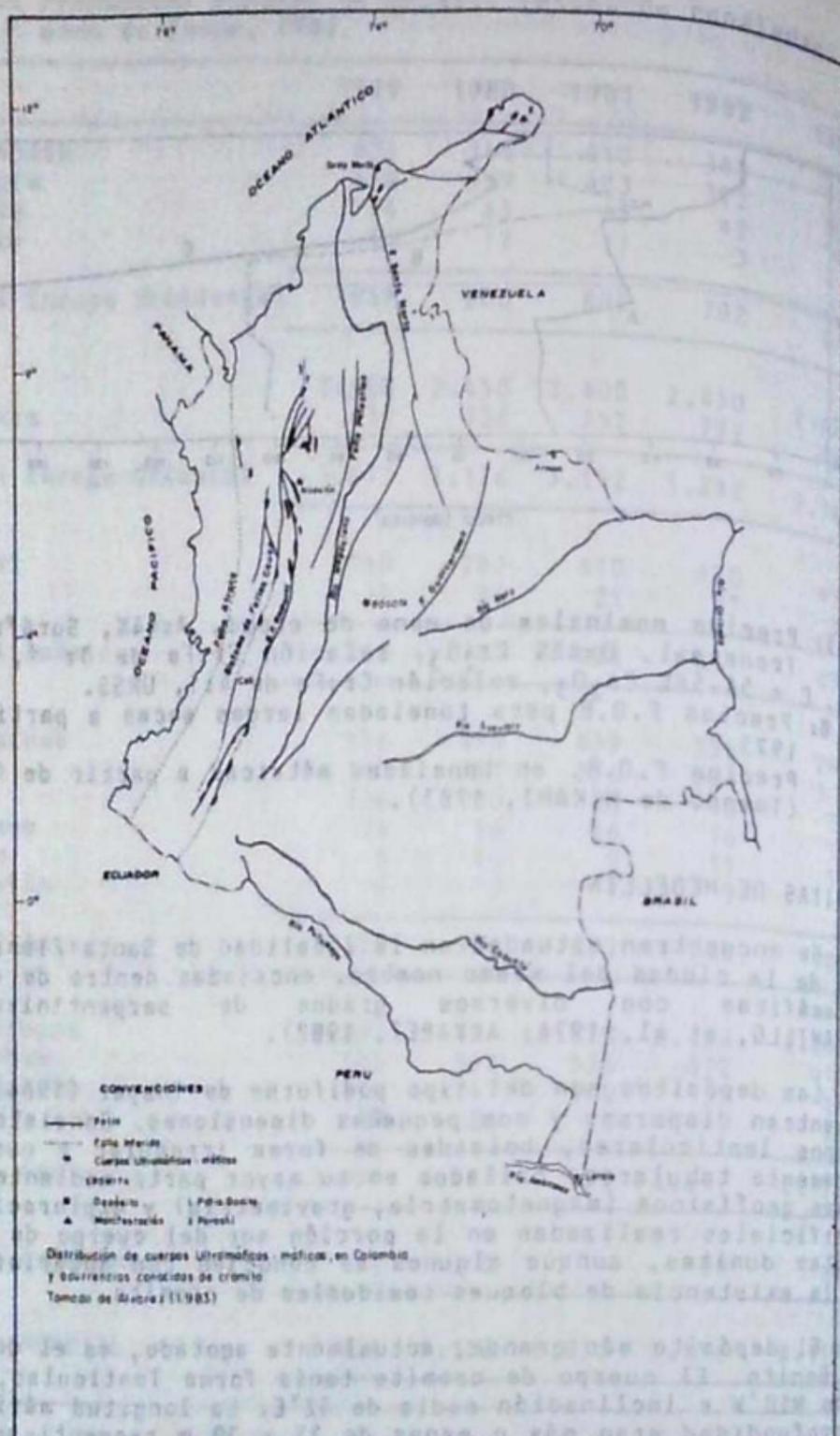


FIG. 4: Cromo en Colombia.

## RESERVAS Y PRODUCCION

Las únicas reservas identificadas en el país han sido las de Santa Elena (calculadas por GEOMINAS Ltda.) que en 1975 ascendían a 20.000 toneladas probadas, ya extraídas. Las posibilidades de encontrar nuevos depósitos se circunscriben a las zonas de rocas máficas-ultramáficas en el occidente de Colombia (Fig. 4), y en el Cinturón Ophiolítico del Caribe (en la costa norte del país). En Colombia no hay producción actual.

sente, por lo cual el cromo que se consume proviene de importaciones.

## COMERCIO

### IMPORTACION DE CROMITA EN COLOMBIA

Las importaciones de cromo en diferentes formas y su costo de 1980 a 1985, se presentan en la Tabla 4.

TAB.4: Importación de cromo en diferentes formas.

Año	tonelada métrica	US\$.CIF (miles)
1980	1	42
1981	1	67
1982	1	20
1983	1	20
1984	5	63
1985	51	75

Fuente: DANE, 1986.

## PERSPECTIVAS

Según Mikami (1983), los adelantos tecnológicos actuales han hecho posible la utilización de menas de grado químico en aceros inoxidable, lo cual ha incrementado las posibilidades de las grandes reservas Surafricanas. También se han abierto posibilidades de utilización a menas finas de cromo o concentrados mediante la elaboración de briquetas y otros medios, lo que aumenta el suministro de estos materiales.

La producción y exportación de ferrocromo por los países productores continúa creciendo a causa de un mayor beneficio económico obtenido con este producto en comparación con la mena de cromo.

Los Estados Unidos están investigando, como futura fuente doméstica, rocas ultramáficas con contenidos bajos en cromita (2-10%) de las cuales existen billones de toneladas en dicho país.

En Estados Unidos y probablemente en el resto del mundo, el consumo de mena de cromo grado refractario seguirá su tendencia descendente, con relación a otros usos, a causa de problemas técnicos o económicos de diversa índole.

Los productos químicos del cromo continuarán con un crecimiento lento porque ellos no están sujetos a fluctuaciones tan severas como el uso del cromo en refractarios y aceros.

Por otra parte, las posibilidades de sustitución del cromo en algunos usos incluyen al níquel para plateado, hierro para pigmentos y boro para aleaciones. La magnesita puede reemplazar a la cromita en refractarios (PAPP, 1984).

## BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, E., 1978.- Cromo. en: Recursos Minerales de Colombia, Ingeominas. Pub. Geol. Esp. 1: 165-171. Bogotá.
- ALVAREZ, J., 1980.- Proyecto de investigación sobre petroquímica y depósitos minerales en ofiolitas. Ingeominas, 1 p. Medellín.
- , 1982.- Tectonitas dunitas de Medellín, Depto. de Antioquia, Colombia. Inf. 1896. Ingeominas, 62 p. Medellín.
- , 1983.- Rocas ultramáficas, en Colombia y depósitos minerales asociados. Ingeominas, Inf. preliminar. 67 p. Medellín.
- , 1985.- Ofiolitas y evolución tectónica del occidente colombiano. Ingeominas, Inf. interno, 30 p. Medellín.
- ALVAREZ, J.; MUÑOZ, R., 1981.- Distribución de cromo, níquel y cobalto en la seapolita y en los concentrados de sedimentos fluviales derivados de las dunitas de Medellín Inf. 1841. Ingeominas, 46 p. Medellín.
- BRYNER, L., 1969.- Ore deposits of the Philippines. An Introduction to their geology. Econ. Geol. 64, 644-666 p.
- COLEMAN, R.G., 1971.- Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. Jour. Geophys. Res. 76: 1212-1222.
- , 1977.- Ophiolites. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin.
- COOPE, B. M., 1984.- Chromite. Mining Annual Review. Londres.
- DANE, 1983.- Estadísticas. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Bogotá.
- EADIE, E. N., 1984.- International trade in chromite an historical perspective. Chromium Review, No. 2, p. 1-4. Bogotá.
- FLINT, D.E. ALBEAR, J.F. and GUILD, P.W. 1948.- Geology and Chromite deposits of Camaguey district, Camaguey Province Cuba. U.S. Geol. Surv. Bull. V.054-B:39-63 p. Washington.
- INGEOMINAS LTDA., 1973.- Proyecto Cromitas. Exploración Geológica. Primera etapa. 45 p. Bogotá.
- , 1975.- Proyecto Cromitas. Inf. final. 39 p.
- HEILIGMAN, H.A. and MIKAMI, H.M., 1960.- Chromite. Industrial Minerals and rocks-3 ed., J.L. Gillson, ed., AIME, p.243-258. New York.
- JACKSON, E.D., and THAYER, T. P., 1972.- Some criteria for distinguishing between stratiform, concentric and Alpine peridotite-gabbro complexes. In: Petrology, section 2, Proceedings, 24 International Geological Congress. P. 289-296.
- JARAMILLO, J.M.; POSADA, J.M.; SERNA, R., 1974.- Serpentinitas que afloran en la parte oriental del valle de Medellín y sus minerales asociados. tesis de grado. Fac. de Minas. Univ. Nacional de Medellín. Inéd.

- JENSEN, M.L.; BATEMAN, A.M., 1981.- **Economic mineral deposits.** John Wiley and Sons. p. 423-431. New York.
- MIKAMI, A.M., 1983.- **Chromite.** In: **Industrial minerals and rocks.** American Inst. Mining, Metallug. and Petrol. Eng. V.1. 567-584 p. New York.
- MORNING, J.L., 1975.- **Chromium.** In: **Mineral Fact and Problems,** Bureau of Mines. U. S. Department Int. Bull. 667: 211-252 Washington
- PAPP, J.F., 1984.- **Chromium.** Mineral commodity summaries. Bureau of Mines. U.S. Department Interior. 32-33 p. Washington.
- THAYER, T.P., 1964.- **Principal features and origin of podiform chromite deposits and some observations on the Guleman-Sodidag District, Turkey.** Econ. Geol. 59: 1492-1524.
- 1969.- **Gravity Differentiation and magmatic replacement of Podiform Chromite deposits, Magmatic ore Deposits.** H. D.B. Wilson, ed., Monograph 4, Economic Geol.: 132-146 p.
- , 1973.- **Chromium.** In: **United States Mineral Resources,** U.S. Geol.Survey, Prof. Paper B20: 111-120. Washington.
- VACER, L.R. and BROWN, G.M., 1967.- **Layered igneous rocks.** W.H. Freeman and Company. 588 p. San Francisco.

## MINERALES DE ESTAÑO

HEYLEY VERGARA S.

## CONTENIDO

	Página
Resumen .....	201
Introducción .....	201
Usos .....	201
Ambiente Geológico .....	201
Distribución .....	202
Geoquímica .....	203
Mineralogía .....	203
Tipos de Depósitos .....	204
Prospección .....	208
Explotación .....	209
Beneficio y Metalurgia .....	209
Situación Mundial .....	210
Producción .....	210
Consumo .....	211
Precios .....	212
Reservas .....	212
El Estaño en Colombia .....	212
Principales Manifestaciones .....	213
Prospección del Estaño .....	214
Producción .....	214
Comercio .....	214
Perspectivas .....	217
Bibliografía .....	217

## RESUMEN

El estaño (Sn) es un elemento no tóxico, funde con facilidad, es dúctil y maleable, posee un bajo coeficiente de fricción y excelentes características de revestimiento, propiedades aprovechadas para ser empleado en la fabricación de placa de estaño, soldaduras, metal antifricción, revestimiento de envases para la conservación de alimentos, productos químicos y en abrasivos.

El principal mineral de estaño es la casiterita ( $\text{SnO}_2$ ), que además de poseer una gravedad específica elevada, es resistente a la abrasión y ataque por agentes atmosféricos. Dicho mineral se presenta, generalmente, en asociación con tungsteno, columbita, tantalita, plata y sulfuros.

Los depósitos primarios de estaño están asociados con rocas ígneas ácidas (granitos, cuarzomonzonitas, adamellititas, etc.), en forma de pórfidos de estaño, filones, pegmatitas, zonas de greisen y skarna, y ambientes geológicos de límite de convergencia y divergencia de placas y de colisión. La mayor parte de la producción de estaño se explota a partir de depósitos aluviales, siendo importantes los yacimientos del sureste asiático, Bolivia, China, Australia, Brasil y Rusia. En Colombia no se conocen yacimientos económicos de este metal, ni ha sido prospectado; sólo se conocen algunas manifestaciones de poco valor minero en Santander, Caquetá, Putumayo, Nariño, Cauca, Chocó y Vichada, asociadas a plutonismo intermedio-ácido y a rocas precámbricas de macizos y escudos continentales.

La producción y el consumo de estaño han disminuido en los últimos años, situación ocasionada por restricción a importaciones, reciclaje y a sustitutos. Sin embargo se puede presentar un déficit de estaño a largo plazo, debido al agotamiento de los depósitos existentes y a los pocos esfuerzos exploratorios del metal, en especial en regiones inexploradas de escudos y márgenes continentales para el caso de depósitos primarios de bajo tenor y alto tonelaje.

### INTRODUCCION

El estaño es conocido y empleado por el hombre desde tiempos muy remotos; en estado puro fue utilizado en Egipto, en el año 400 a.c., y en aleación en forma de bronce, posiblemente 3.200 a 3.500 a.c. (HEINDL, 1970).

El estaño metálico existe en tres modificaciones alotrópicas: **estaño gris** de simetría cúbica y 5,75 de gravedad específica, **estaño blanco** de simetría tetragonal y 7,28 de gravedad específica y **estaño blanco** de simetría rómica y 6,56 de gravedad específica (BABOR e IBARZ, 1963). Es un metal no tóxico que funde a 232°C; es dúctil y maleable a temperaturas de 100°C, quebradizo a temperatura de 200°C y posee un bajo coeficiente de fricción. Su uso como galvanizante, se debe a que es inerte a la acción de ácidos débiles, aire y otros agentes corrosivos, formando una película delgada de óxido de estaño.

Una propiedad importante es su extrema fluidez en estado fundido, a lo cual debe su gran facilidad para alearse con otros metales; por su fluidez y su excelente característica de revestimiento, es utilizado como placa de estaño, para lo cual se destina gran parte de la producción mundial.

Aunque este metal se explota a partir de depósitos primarios, la mayor parte de la producción proviene de placeres, en donde la casiterita ( $\text{SnO}_2$ ) se concentra, en virtud de su elevada gravedad específica y su resistencia a la abrasión y ataque por agentes físicos y químicos atmosféricos.

### USOS

Cerca del 80% de la producción mundial de estaño se utiliza en: 1) placa de estaño (recubrimiento protector del hierro y el acero); 2) aleación con el plomo para la fabricación de soldadura; 3) producción de metal blanco, metal babbit (metal antifricción); 4) fabricación de aleaciones de bajo punto de fusión y resistentes a la oxidación (con el cobre, el zinc y el plomo para obtener latón); 5) estañado de vasijas de cobre (BETEJYIN, 1977).

Otros usos del estaño son: en cerámica, esmaltes y pinturas, para la producción de sustancias químicas organoestañíferas, utilizables en la fabricación de pesticidas, fungicidas y preservadores de maderas (MURILLO, 1978) y como recubridor de envases para la conservación de bebidas. El óxido de estaño artificial se emplea como polvo para pulir (DANA-HURLBUT, 1960).

### AMBIENTE GEOLOGICO

La mayoría de depósitos primarios de estaño del mundo están relacionados, en tiempo y espacio, con rocas graníticas. Estos depósitos se encuentran localizados en zonas definidas,

de extensión limitada, denominadas provincias estañíferas, que pueden presentar depósitos de diferentes edades, unos junto a otros o superpuestos (LEHMANN, 1982). Desde el punto de vista de tectónica de placas, el estaño se asocia con alguno de los siguientes ambientes (Figura 1) a) límite de convergencia de placas; b) límite de divergencia de placas y, c) ambiente de colisión (SAWKINS, 1984).

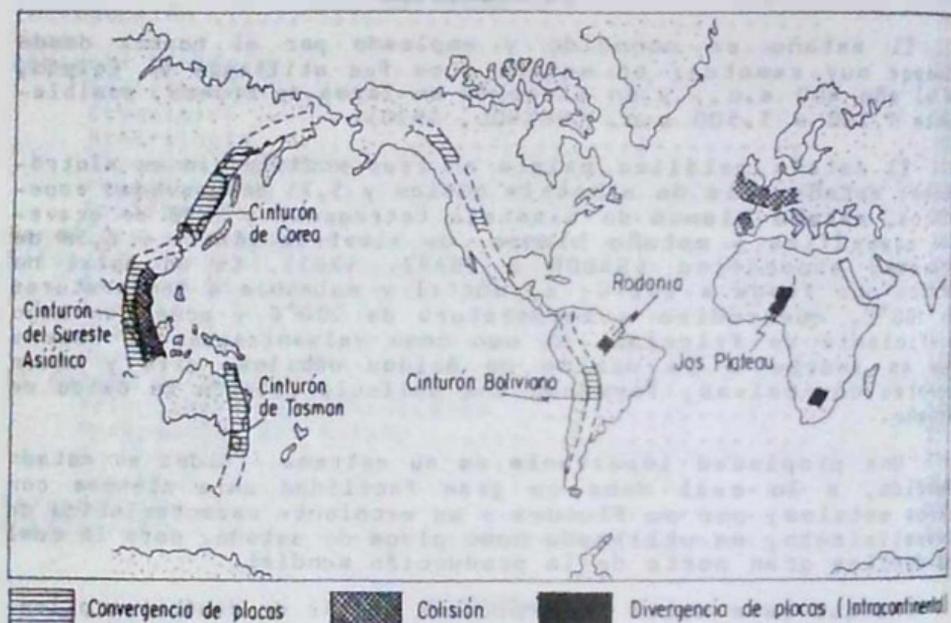


FIG.1: Distritos y cinturones estañíferos del mundo.

Con la excepción de los depósitos de estaño del tipo pórfido, que se presentan principalmente en ambientes de convergencia de placas (simática-asiática) y de colisión (ensialica), todos los demás tipos de depósitos primarios de estaño se pueden formar en cualquiera de los tres ambientes geológicos nombrados. Los depósitos de placeres y residuales son importantes en las zonas tropicales, donde imperan condiciones apropiadas de meteorización tropical profunda.

## DISTRIBUCION

Los yacimientos de límite de convergencia de placas, localizados en la región circumpacífica, comprenden el cinturón estañífero boliviano, de 900 km de longitud, el Cinturón Occidental del sureste asiático, de 2.200 km, el Cinturón de Tasmania que se desplaza desde la Antártica hasta Australia; otros de menor importancia se ubican en México, Estados Unidos, Canadá y Alaska. La asociación mineralógica en los depósitos del sureste Asiático es casiterita-wolframita, en venas y venillas de cuarzo, diques pegmatíticos y greisen, y estaño-tungsteno y estaño-plata, en venas y diseminado, en el distrito boliviano.

Los de límite de divergencia de placas se presentan en granitos de ambiente intracratónico estable, como es el caso de los depósitos de Nigeria y Níger, al oeste de África, Rodonia en Brasil y otros de menor importancia en el norte de África, Mongolia, Suráfrica, Rusia y Finlandia. En Nigeria y Níger la asociación es casiterita-tantalio, en forma diseminada, venas y greisen; en el Brasil es casiterita y casiterita-wolframita, en venas de cuarzo.

En el ambiente de colisión los depósitos de estaño se presentan asociados a granitos anatéticos. Se localizan en los Montes Himalaya y Apalaches, y en el oeste de Europa; el distrito más importante es el cinturón estañífero central del sureste asiático (Malasia, Tailandia, Laos), que suministra cerca de la mitad de la producción de estaño del mundo occidental (SANKINS, 1984). La principal asociación mineralógica es de casiterita-wolframita, relacionada con cantidades variables de sulfuros, en venas y greisen.

## GEOQUÍMICA

El estaño (Sn) es un elemento químico del grupo IVA de la Tabla Periódica, de número atómico 50 y peso atómico 118.69. Presenta los isótopos  $\text{Sn}^{112}$  (0.95%),  $\text{Sn}^{114}$  (0.65%),  $\text{Sn}^{115}$  (0.34%),  $\text{Sn}^{116}$  (14.24%),  $\text{Sn}^{117}$  (7.57%),  $\text{Sn}^{118}$  (24.01%),  $\text{Sn}^{119}$  (8.58%),  $\text{Sn}^{120}$  (32.97%),  $\text{Sn}^{122}$  (4.71%) y  $\text{Sn}^{124}$  (5.98%); ésta es una de las composiciones isotópicas más complejas (MURILLO, 1978). El estaño es un elemento anfotérico, tanto en los componentes estañosos como en los estañicos, y ocurre como un constituyente subordinado en los sulfuros, aunque no es un elemento predominantemente calcófilo (GOLDSMICHDI, 1958). Rara vez se presenta en la naturaleza en estado nativo; casi siempre se halla formando componentes en forma de  $\text{Sn}^{+84}$  (radio iónico 0.93Å).

A causa de la similitud del estaño, con otros iones metálicos, puede reemplazar a éstos en varios minerales; así, el estaño puede hallarse disperso en minerales de hierro, titanio o calcio, tales como biotita o andradita ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_2$ ). Puede sustituir algunos elementos como es el caso de la walayita ( $\text{CaSnSiO}_2$ ), donde el estaño sustituye al titanio de la esfena ( $\text{CaTiSiO}_5$ ) (MURILLO, 1978).

La abundancia del estaño, en la corteza terrestre, es de 2 a 3 ppm. En la Tabla 1, donde se presentan los contenidos de estaño en varias clases de roca, es notoria la alta concentración de estaño en shales y en rocas ígneas alcalinas. Con relación a los shales, algunas de estas rocas contienen tanto estaño como los granitos ricos en este elemento; sin embargo, ningún sedimento de este tipo, aparece enriquecido en grado tal que se aproxime a una mena de carácter comercial (MURILLO, 1978).

Las rocas ígneas alcalinas asociadas a depósitos primarios de estaño, muestran un enriquecimiento tanto en Sn, como en otros elementos incompatibles como F, Li, B, Cs, Rb, Th (EHMANN, 1982). Algunos estudios sobre concentración de estaño, en granitos estériles y granitos relacionados con depósitos de estaño, en el norte de Nigeria (OLADE, 1980) y en Yabania (SOLOMON, 1981), indican que en los primeros la concentración es alrededor de 10 ppm, mientras que en los segundos es del orden de 25 ppm; en el complejo granítico de Afu (Nigeria), la concentración de estaño en granitos mineralizados, es

tres veces mayor que en los granitos estériles (IMEOKPARIA, 1983).

TAB.1: Rango y contenido de estaño en varios tipos de rocas (SAINSBURY y REED, 1973, en MURILLO, 1978).

Tipo de Roca	Rango (ppm)	Promedio (ppm)
Rocas ultramáficas	0,1 - 1,3	0,6
Rocas básicas	0 - 8	1,1
Rocas intermedias	0 - 10	1,4
Rocas silíceas	1 - 15	3,5
Rocas alcalinas	8 - 39	-
Calizas	-	0,2
Areniscas	-	0,4
Shales y arcillolitas	1 - 20	6,0
Fosforitas	0 - 15	-
Greisens	780 - 7.800	-

### CICLO GEOQUIMICO

El estaño es concentrado durante las etapas finales de ciclo igneo, en rocas calco-alcalinas, reflejándose su concentración en biotita, hornblenda, mafesa, ilmenita ( $FeTiO_3$ ), magnetita ( $Fe_3O_4$ ) (LEHMANN, 1982).

Mediante intrusiones graníticas, o a través de migración de soluciones pegmatíticas, hidrotermales y metasomatismo, se pueden originar concentraciones primarias de estaño en la corteza terrestre; también se puede concentrar como resultado de procesos de meteorización (depósitos residuales), erosión y depósitos de aluviones (placers).

### ALTERACION DE LA ROCA ENCAJANTE

Los tipos de alteración hidrotermal varían de acuerdo a las características físicas y químicas de la roca intrusiva, a la composición, texturas y estructuras de la roca encajante; la magnitud varía dentro de límites muy amplios.

La diferenciación magmática da origen a un producto final de fluidos magmáticos, que al reaccionar con la roca encajante producen en ésta cambios texturales, composicionales y de coloración. Las alteraciones más típicas de las rocas magmáticas intermedias ácidas y alcalinas, son la albitización, feldspatización, greisenización, silicificación, cloritización, sericitización y argilización (SMIRNOV, 1982).

**Pórfidos de estaño.**— La alteración hidrotermal de estos depósitos es bastante simple: consiste esencialmente de una alteración sericitica en los márgenes del intrusivo, rodeado por un halo de alteración propilitica. A veces, como en Potosí (Bolivia), la alteración sericitica grade a una zona más externa de silicificación causada por lixiviación acuosa; en Chorolque (Bolivia) se presenta un núcleo de cuarzo-turmalina dentro de la brecha hidrotermal (SILLITOE et al., 1975).

**Skarns.**— La intrusión del magma produce una aureola de metamorfismo de contacto que, aunque estéril, sirve para fracturar la roca, lo que facilita la circulación de los fluidos hidrotermales. En las etapas iniciales estos fluidos son levemente alcalinos.

La intracción de los fluidos hidrotermales con dolomitas, producen una asociación clásica de skarns magnesianos: espinela ( $MgAl_2O_4$ ), piroxeno (fassaíta) ( $Ca(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$ ) fosterita ( $Mg_2SiO_4$ ) ( $\pm$  calcita); en estados más avanzados de alteración, aparecen minerales que contienen boro y estaño. La zona más interna se altera a flogopita, magnetita, boratos magnesianos y de estaño. Durante las etapas finales del ataque ácido, los fluidos hidrotermales liberan estaño de los boratos y depositan casiterita, fluoborita ( $Mg_3(BO_3)(F, OH)_3$ ), magnetita y micas (EINAUDI et al., 1981).

En el estado inicial de alteración de los skarns cálcicos, se desarrollan asociaciones ricas en Ca, andradita-wollastonita ( $CaSiO_3$ ) o idocrasa-magnetita-flogopita. Puede ocurrir piroxeno (hedenbergita) y granates (generalmente andradita); el estaño está en la andradita, axinita, magnetita o anfíboles. En las etapas finales de alteración hidrotermal, el estaño se puede depositar como malayita (principalmente en skarns ricos en wollastonita), además de pirrotina, arsenopirita; raramente esfalerita y bornita (EINAUDI et al., 1981).

**Greisens.**— La albitización metasomática alcalina, en los ápices de macizos de rocas hiposilíceas ácidas y alcalinas, trae como consecuencia la fijación, a lo largo de contacto de los granitos con las rocas encajantes, del exceso de potasio (zona de greisen). La masa principal de los greisens se forma en los salientes apicales y en las rocas encajantes aluminosilicatadas (areniscas, arcillolitas, rocas efusivas y tobas). La alteración hidrotermal consta de un agregado de mica fácilmente desintegrable (muscovita, biotita, zinnwaldita) y cuarzo; a veces turmalina, lepidolita, berilio, microclina, topacio, fluorita y minerales minerales metálicos como casiterita, wolframita y molibdenita (SMIRNOV, 1982).

**Pegmatitas.**— Las zonas de contacto alrededor de pegmatitas, pueden ser angostas y tajantes o anchas y gradacionales. Presentan una variedad única de productos de alteración y cerca de las pegmatitas: berilio, monacita, esfena, tantalita-columbita, micas de litio, topacio, zircón, fluorita y allanita, además de casiterita; sin embargo, los minerales más dispersos y diseminados son los feldespatos, micas, granate y turmalina (en PARK and MacDIARMID, 1970). En general las zonas de alteración alrededor de las pegmatitas, son delgadas y de poco valor en prospección.

## MINERALOGIA

En la naturaleza se presenta una gran variedad de minerales de estaño, que pertenecen principalmente a las clases conformadas por sulfuros, óxidos, silicatos y boratos. Aunque cantidades pequeñas de estaño son recuperadas de sulfuros complejos (estannina, cilindrita, teallita) el único mineral de importancia comercial es la casiterita (Tab. 2).

La casiterita cristaliza en el sistema tetragonal, tiene gravedad específica entre 6,8 y 7,1 y dureza entre 6 y 7; normalmente es de color café oscuro a negro y presenta un lustre adamantino (BETEJTIN, 1977). La casiterita pura contiene un 78.8% de Sn, pero generalmente contiene impurezas, sobre todo las variedades que provienen de pegmatitas, donde se observa  $Fe_2O_3$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO_2$ ,  $FeO$ , a veces  $ZrO_2$  y  $WO_3$ ; todos estos óxidos, de diferente valencia, se encuentran en la casiterita como mezclas isomorfas o como producto de desintegración de soluciones sólidas (HEINOLD, 1970). En los depósitos

TAB. 2: Principales minerales de estaño (sin incluir estaño nativo).

Nombre	Composición Química	Localización
Arandisita	$3SnSiO_4 \cdot SnO_2 \cdot 4H_2O$	Nigeria, Níger
Asbecasita	$(Sn, Ti) Ca_3As_6Bi_2Be_2O_{20}$	
Berndita	$SnS_2$	
Cassiterita	$SnO_2$	Distribución mundial
Canfieldita	$SnAg_8S_6$	Bolivia, Tasmania
Cilindrita	$Sn_4Pb_3Sb_2FeS_{14}$	Distribución mundial
Colusita	$Cu_3(As, Sn, V)S_4$	
Estannina	$SnCu_2FeS_4$	Distribución mundial
Estokesita	$SnCaSi_2O_9 \cdot H_2O$	Cornwall
Franckeita	$Sn_3Pb_5Sb_2S_{14}$	
Herzenbergita	$SnS$	Bolivia
Hielmита	$A(Nb, Ta, Sn, W)O_6$	Suecia
Hochschildita	$SnO_3Pb \cdot nH_2O$	Bolivia
Kulaite	$(Fe^{+2}, Sn)(Fe^{+2}, Mg)BO_5$	Alaska
Malayita	$SnCaSiO_5$	Malasia
Mawsonita	$SnCu_7Fe_2S_{10}$	Tasmania
Nigerita	$(Zn, Mn, Fe^{+2})(Sn, Zn)_2(Al_2Fe_3)_{12}O_{22}(OH)_2$	Níger, Nigeria
Nordeskiöldina	$SnCaB_2O_6$	Noruega, Nigeria
Ottewanita	$Sn_2S_3$	Bolivia
Soronsenita	$SnNa_4Be_2Si_6O_{16}(OH)_4$	Groelandia
Sukulaita	$Sn_7Ta_2O_7$	Noruega
Teallita	$SnPbS_2$	Bolivia
Toralita	$SnTa_2O_7$	Congo
Verlamofita	$(Sn, Fe)(O, OH)_2$	

de placer la cassiterita está relativamente libre de impurezas, lo que contrasta con depósitos filonianos de estaño en donde se presenta en asociación con otros minerales, principalmente sulfuros, que contienen Sb, As, Bi, Cb (Nb), Cu, Pb, Ag, Ta, o Zn (HEINDL, 1970). Los minerales más comunes de estaño se presentan en la Tabla 2.

## TIPOS DE DEPOSITOS

Siguiendo la clasificación de depósitos minerales utilizada por Smirnov (1982), los yacimientos de estaño pertenecen a los siguientes tipos: hidrotermales, skarns, greisens, pegmatitas, placeres y meteorización.

### HIDROTERRMALES

Comprenden los depósitos de venas, reemplazamiento, fumarólico y pórfidos de estaño, en los cuales los fluidos hidrotermales originados en una fuente granítica subyacente, se reemplazan en la roca encajante, por mecanismo de relleno de fisuras, reemplazo de horizontes favorables, relleno de brechas y metasomatismo.

## Ministerio de Minas y Energía

## BIBLIOTECA

SKARN

Estos depósitos se presentan a través de un amplio rango de ambientes geológicos, aunque la gran mayoría de yacimientos de importancia económica, son relativamente jóvenes y se relacionan con plutonismo granítico de cinturones orogénicos (EINAUDI, 1982). Como la mayoría de los depósitos primarios de estaño, los skarna de estaño se asocian con granitos que contienen más sílice y potasio que los granitos promedios, y presentan una serie de elementos comunes (F, Rb, Li, Sn, Be, W y Mo). En general, estos depósitos son de interés económico menor, debido a su tamaño pequeño y baja ley; además, gran parte del estaño ocurre en silicatos, lo que hace que no sea recuperable económicamente (EINAUDI et al., 1981).

Los skarna de estaño se pueden presentar calizas, dolomitas y otras rocas calcáreas; pueden tener concentraciones metálicas de Sn, W, Be, Zn, Pb, Cu y Ag, y estar asociados con skarn de W, greisens, venas y pórfidos de estaño (COX, 1983).

GREISENS

Se relacionan con los ápices de rocas hiposabisales ácidas que han experimentado una metasomatosis alcalina postmagmática, donde el Sn se acumula a lo largo del límite entre granitos y rocas encajantes, cerca del techo de los intrusivos. Se forman en los estados medio y tardío del levantamiento de cadenas montañosas, y durante la actividad magmática de las plataformas antiguas (SMIRNOV, 1982).

Los metales típicos de los greisens son el Be, Li, Sn y W, los cuales se originan, principalmente, a partir de granitos biotíticos y de granitos de dos micas. Entre los depósitos de greisens rara vez se encuentran yacimientos muy grandes, pero a menudo contienen una mena rica en forma diseminada, en stock, venas, fisuras y filones pequeños; en ellos el estaño se presenta en forma de casiterita, ya sea monometálica (Sn) o polimetálica (Sn-W), con cuarzo, muscovita, turmalina, fluorita, topacio, microclina, biotita, berilo, molibdenita y lepidocrita (SMIRNOV, 1982).

PEGMATITAS

Las pegmatitas y sus minerales integrantes, son formalmente magmáticas tardías, originadas en las etapas finales de la solidificación de macizos intrusivos. En ellas, el estaño se acumula en forma de casiterita y se acompaña generalmente por wolframita, uranio, toraita, columbita, tantalita, monacita, zircón y otros componentes de metales raros; estos yacimientos, lo mismo que los greisens, raras veces forman depósitos considerables; su utilidad radica en que sirven con fuente para la formación de placeres y depósitos residuales (SMIRNOV, 1982).

PLACERES

Se forman como consecuencia de la concentración de minerales valiosos, a través de la destrucción y depositación de material rocoso y yacimientos minerales. Según la época de formación pueden ser jóvenes o antiguos (fósiles) y según las condiciones del yacimiento, pueden ser abiertos o sepultados. Como subtipos de placeres pueden mencionarse los depósitos fluviales, aluviales y laterales; éstos últimos se forman a lo largo de costas de lagos, mares y océanos.

## METEORIZACION

En la formación de estos yacimientos juega un papel primordial la meteorización tropical profunda. La acumulación del mineral valioso se puede realizar por: 1) lixiviación de los materiales sin valor económico, lo que conlleva a un enriquecimiento del residuo (depósitos residuales); 2) lixiviación de los materiales valiosos, y redepositación de éstos en la parte inferior de la superficie de meteorización (depósitos de infiltración). Dadas las características físicas y químicas de la casiterita, los únicos depósitos estañíferos de meteorización, de importancia, son los residuales.

Los depósitos residuales se localizan sobre las rocas con casiterita o sobre yacimientos de estaño, que han estado sometidos a procesos de meteorización tropical. En un verdadero placer residual, la zona enriquecida contiene minerales pesados y resistentes a los procesos químicos, tales como la casiterita y la columbita-tantalita  $(\text{Nb}_1\text{Ta})_2\text{O}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ , además de minerales livianos pero resistentes, como el berilo. Se exploran depósitos residuales de casiterita en el Congo, Indonesia, Brasil (SMIRNOV, 1982).

## PROSPECCION

Para la prospección de estaño, es importante analizar los ambientes geológicos favorables en que estos depósitos se forman. Los rasgos geotectónicos a considerar son las grandes cadenas montañosas, relacionadas con límite de convergencia de placas y ambientes de colisión y las cuencas intracratónicas.

Lo anterior debe ser complementado con estudios geológicos y petroquímicos, con el objeto de seleccionar áreas en donde se presenten intrusivos graníticos, en especial granitos, riolitas, cuarzomonzonitas y adamellititas, de composición más ácida que el promedio normal de estas rocas. La presencia de muscovita, biotita y turmalina en cantidades notables y la existencia de concentraciones altas de Sn, Fe, Li, B, Th, Bi, Rb, es un buen indicio para la selección de áreas de interés estañífero.

Históricamente, en la prospección de estaño se han empleado los métodos de batea y perforación principalmente; cuando los depósitos se agotan, la prospección requiere métodos más sofisticados. Técnicas geoquímicas y geofísicas se han empleado para cubrir grandes áreas rápidamente, aislando zonas de posibilidades de depósitos de estaño, de tal manera que la perforación pueda ser más efectiva y menos costosa (CARLIN, Jr, 1980).

En la prospección geoquímica del estaño, se emplea preferencialmente las técnicas del concentrado en batea, en razón de que la casiterita posee una gravedad específica elevada, tiene gran dureza (6.8 - 7.1) y es químicamente estable, lo que hace que tienda a concentrarse en la fracción pesada. En dicha fracción la casiterita se presenta generalmente, asociada a minerales que tienen propiedades similares; en concentrados provenientes de depósitos de pegmatitas, la casiterita se puede presentar con columbita  $\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ , tantalita  $\text{Ta}_2\text{O}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ , wolframita  $\text{WO}_4(\text{Fe},\text{Mn})$ , zircón  $\text{SiO}_2\text{Zr}$  y magnetita, lo mismo que con otros minerales, de menor densidad, pero igualmente duros y resistentes químicamente, como el berilo, la turmalina y el topacio.

En la geoquímica de sedimentos fluviales activos, se pueden presentar buenos elementos indicadores de mineralizaciones de estaño, en especial en aquellos sedimentos provenientes de depósitos de venas, reemplazamiento y pórfidos de estaño, pues en ellos la casiterita se asocia con minerales de sulfuros que contienen Sb, Bi, Cb, Cu, Pb, Ag, Ta, W o Zn. En prospección geoquímica, los estudios de suelos pueden ser de gran utilidad debido a que la estannina, en condiciones superficiales, se descompone a varlamofita (Tab.2).

## EXPLOTACION

La explotación de los yacimientos de estaño se realiza generalmente a cielo abierto, en especial los depósitos de placer, en los cuales se utilizan además dragado o bombeo hidráulico. En los depósitos de venas o diseminado, se utilizan métodos similares a los empleados en minería de roca dura, de minerales no ferrosos; dependiendo de la posición del depósito, el mineral puede ser extraído por minería a cielo abierto o subterránea.

## BENEFICIO Y METALURGIA

### BENEFICIO

En los depósitos de placer, la casiterita es seleccionada en mesas de concentración, por métodos de separación magnética o electrostática, donde se obtiene un concentrado de más del 75% de Sn.

En los depósitos primarios, el mineral se selecciona por lavado, previa molienda y pulverización y se concentra posteriormente por gravedad, el concentrado es usualmente de más bajo grado (40-60% de Sn) que los concentrados de placer. Los minerales de sulfuros son reducidos por flotación o separación magnética (HEINDL, 1970).

En las fracciones finas, la recuperación de Sn es baja, tanto en placer como en venas, debido a que la casiterita fina es difícil de recuperar.

### METALURGIA

La casiterita es reducida a estaño por calentamiento con carbón a temperatura entre 1.200 y 1.300°C. El concentrado proveniente de placeres; es casi casiterita pura, por lo que es fundida directamente. El mineral de otros depósitos, como los de venas, contiene impurezas que deben ser removidas antes de la fundición, lo cual se hace generalmente por calcinación del concentrado de estaño, seguido por una lixiviación ácida. Durante la calcinación, la mayoría del azufre y el arsénico son removidos como óxidos; los óxidos de bismuto, cobre, hierro y zinc se remueven por lixiviación del concentrado calcinado, con dilución en ácido clorhídrico. Luego del enfriamiento y la solidificación, la escoria contiene hasta un 25% de Sn, la cual es nuevamente fundida (HEINDL, 1970).

La mayoría del estaño producido en el fundido y en la escoria, contiene varias impurezas metálicas que deben ser removidas; dicha refinación se puede realizar por medio de tratamientos térmicos o por procesos electrolíticos (HEINDL, 1970).

## SITUACION MUNDIAL

## PRODUCCION

La mayor parte de la producción mundial de estaño, proviene de Bolivia, Indonesia, Tailandia, Malasia, Australia, China, Rusia y Brasil; en menor proporción Zaire y Nigeria. Otros productores, a menor escala, son Canadá, Burma, Perú, Gran Bretaña.

La producción minera de estaño ha declinado en los últimos años, estimándose para 1984 y 1985 en 156.000 y 150.000 toneladas métricas respectivamente, sin contar con la producción estimada (52.000 tm) de la URSS y China (MUHAMAD, 1985). El descenso de la producción parece atribuirse a la imposición de medidas de restricción a las importaciones, a recortes en la producción, a la salida al mercado de grandes cantidades de estaño almacenado y al reciclaje (MUHAMAD, 1984).

En la Tabla 3 se presentan las estadísticas sobre la producción de estaño, por países, de los años 1979 a 1983.

TAB.3: Producción minera de estaño, por países (Minerals Year book, 1983; Tabla 13, pag. 872).

País	1980	1981	1982	1983	1984
	(en toneladas métricas)				
Argentina	351	413	304	338	300
Australia	11.588	12.267	12.126	9.700	9.300
Bolivia	27.291	29.830	26.773	24.400	21.100
Brasil	6.930	8.297	9.100	12.000	16.021
Burma	1.290	1.438	1.681	1.642	2.050
Canadá	264	239	135	141	217
China*	14.600	15.000	15.000	15.000	15.000
Checoslovaquia*	322	433	443	400	400
RDA*	1.800	1.600	1.700	1.700	1.800
Indonesia	32.527	35.392	33.806	27.000	21.530
Japón	549	561	529	599	485
Laos	290	200	225	200	315
Malasia	61.404	59.938	52.330	42.000	41.307
Namibia	1.070	1.228	1.326	1.400	1.400
Nigeria	2.569	2.300	1.240	1.060	1.700
Perú	1.077	1.519	1.672	2.368	2.993
Portugal	274	506	410	400	358
Rwanda	2.069	1.790	1.655	1.520	1.100
Suráfrica	2.913	2.811	3.035	2.668	2.200
España	437	564	518	503	450
Tailandia	33.685	31.474	26.109	19.941	21.290
URSS*	36.000	36.000	37.000	37.000	36.000
Reino Unido	2.982	3.869	4.208	4.100	4.600
Vietnam	370	380	580	590	500
Zaire	3.159	3.321	3.144	3.200	3.000
Zimbabwe*	1.300	1.600	1.600	1.600	1.700
Estados Unidos	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Otros	179	143	127	129	s.d.
TOTAL	247.290	264.113	236.776	211.599	197.003

\* Estimada. s.d. = Sin datos disponibles (nota del editor).

## CONSUMO

El consumo de estaño primario en los países del mundo libre, ha declinado desde alrededor de 185.000 toneladas, en 1979

período 1977-1979 a 157.100 toneladas en 1982 y 155.000 toneladas en 1983; se estima un consumo de 161.000 toneladas métricas para 1984 y 167.000 para 1985. Los bajos niveles de consumo, se atribuyen a varios factores: 1) exceso de producción durante los 5 años inmediatamente anteriores; 2) recesión económica; 3) cambios tecnológicos en la manufactura de hojalata y envases a base de estaño; 4) competencia de productos en plástico y aluminio; 5) el uso cada vez menor de soldadura por parte de la industria electrónica, causada por la miniaturización y empleo de circuitos más integrados (INTERNATIONAL TIN COUNCIL, 1984).

Las Tablas 4 y 5 muestran las estadísticas sobre el consumo de estaño, por países y de acuerdo al uso, respectivamente.

#### PRECIOS

Aunque el estaño continúa siendo el metal más vulnerable a las fluctuaciones del precio, éstos han sido relativamente altos, alcanzando el mejor promedio entre 1970 y 1973; esto último se le atribuye a la efectividad de las medidas de control de precios (MINING JOURNAL, 1984a; 1984b). Los precios, durante el año de 1983, tuvieron un ligero incremento, con relación al año anterior, aunque ello no significa una mejoría, en términos reales, si se tiene en cuenta el problema inflacionario.

TAB.4: Consumo mundial de estaño primario, por países seleccionados, en toneladas (INTERNATIONAL TIN COUNCIL, 1984).

País	1978	1981	1982	1983
USA	48.400	40.200	36.100	40.400
Japón	29.600	30.500	28.700	30.500
Alemania Federal	13.500	13.300	13.200	13.800
Francia	9.900	9.000	8.200	7.600
Reino Unido	12.200	7.100	7.000	5.700
Holanda	4.800	5.100	5.100	4.400
España	4.500	4.400	4.400	4.400
Italia	5.800	4.300	4.200	4.200
Otros	56.300	49.300	50.200	49.200
<b>TOTAL</b>	<b>185.000</b>	<b>163.200</b>	<b>157.100</b>	<b>160.200</b>

TAB.5: Consumo de estaño, en toneladas de acuerdo al uso (países: Brasil, Canadá, USA, India, Japón, Australia, Francia, Alemania Federal, Italia, Reino Unido, Suiza) (INTERNATIONAL TIN COUNCIL, 1984).

Uso	1973	1976	1979	1980	1981	1982
Hojalata	65.000	61.000	55.200	51.200	44.400	41.900
Estaño	7.000	6.100	6.200	6.300	5.800	5.200
Soldadura Met. babbitt	45.800	37.900	35.300	33.900	33.800	29.400
antifric- ción	15.700	13.900	13.800	12.500	10.800	10.600
Bronce/ latón	13.100	10.900	10.700	9.800	9.300	7.500
Otros	26.400	24.500	23.000	21.400	21.100	23.500
<b>TOTAL</b>	<b>173.000</b>	<b>154.300</b>	<b>144.200</b>	<b>135.100</b>	<b>125.200</b>	<b>118.100</b>

## RESERVAS

Los incrementos de estaño en el mundo, se presentan en la Tabla 6. Las reservas de estaño, presentadas en dicha tabla, no parecen haber tenido modificaciones importantes, si se tiene en cuenta que son muy pocos los depósitos nuevos que se han encontrado en los últimos 30 años, según estudios realizados por la Australian Mineral Economics.

TAB.6: Recursos mundiales de estaño (en CARLIN, Jr 1980; Tab. 3, p. 950).

País	Reservas	Recursos Potenciales en miles de toneladas métricas	Totales
USA	50	150	200
Canadá	20	220	240
México	10	40	50
Argentina	5	5	10
Bolivia	980	1.750	2.730
Brasil	400	3.740	4.140
España y Portugal	30	900	930
URSS	1.000	1.900	2.900
Reino Unido	260	1.020	1.280
Nigeria	280	600	880
Zaire	200	2.000	2.200
Burma	500	500	1.000
China Oriental	1.500	4.000	5.500
Indonesia	1.550	1.080	2.630
Malasia	1.200	3.500	4.700
Tailandia	1.200	4.360	5.560
Australia	350	570	920
Otros	340	460	800
<b>TOTAL</b>	<b>9.875</b>	<b>26.795</b>	<b>36.670</b>

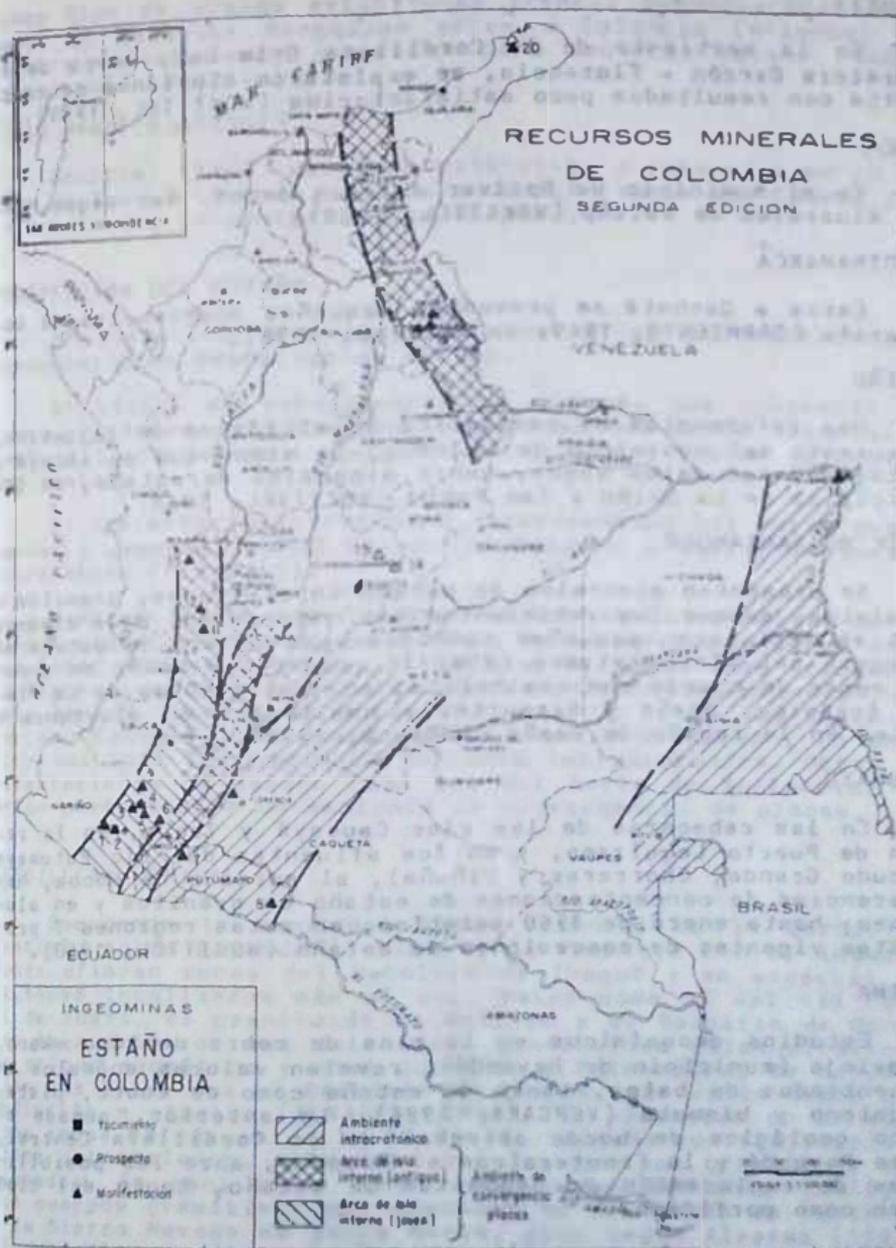
## EL ESTAÑO EN COLOMBIA

Aunque en Colombia son conocidas varias manifestaciones de estaño, éstas carecen de adecuada información geológica para poder inferir el ambiente geológico a que pertenecen; sin embargo, la posición geológica en que se presentan permite deducir que se relacionan con rocas graníticas, generadas en un ambiente de límite de convergencia de placas y ambiente intracratónico (Fig. 2).

A pesar de que nunca se han realizado estudios de prospección de este metal, las perspectivas revisten interés, habida cuenta de los dos ambientes geológicos que se presentan en el país.

## PRINCIPALES MANIFESTACIONES

A continuación se hará una descripción de las localidades con manifestaciones de estaño, de acuerdo con la división política de Colombia (Fig. 2)



- |                     |                     |                             |
|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1. Anceps           | 8. Pto. Lequirimo   | 15. Gachalá                 |
| 2. Paeto            | 9. Bolívar (Cauca)  | 16. Pto. Carraño            |
| 3. La Unión         | 10. Florencia       | 17. Ocaña                   |
| 4. San Pablo        | 11. Tuluá           | 18. La Playa-Aspésica       |
| 5. La Cruz          | 12. Bolívar (Valle) | 19. Alto Catatumbo          |
| 6. Páramo Tajumbina | 13. Tamoné          | 20. Serranía del Carpintero |
| 7. Mocos            | 14. Gachalá         |                             |

FIG. 2. Estaño en Colombia, ambientes geológicos favorables.

## CAQUETA

En la vertiente de la Cordillera Oriental, cerca de la carretera Garzón - Florencia, se explotaron aluviones de casiterita con resultados poco satisfactorios (WOKITTEL, 1960).

## CAUCA

En el municipio de Bolívar existen datos, muy vagos, sobre minerales de estaño (WOKITTEL, 1960).

## CUNDINAMARCA

Cerca a Gachetá se presentan pequeñas ocurrencias de casiterita (SARMIENTO, 1949; en MURILLO, 1978).

## NARIÑO

Hay referencias de casiterita en el Páramo de Tajuabina, al sureste del municipio de La Cruz, lo mismo que en Ancuyá y Paeto; existen datos vagos, sobre minerales de estaño, en los municipios de La Unión y San Pablo (WOKITTEL, 1960).

## NORTE DE SANTANDER

Se presentan minerales de estaño en aluviones, granitos y esquistas, aunque los yacimientos son muy pobres. Hace algunos años se explotaron pequeñas cantidades de madera de estaño en el cauce del río Catatumbo (WOKITTEL, 1960). También se conocen venas de cuarzo con casiterita, en las regiones de La Playa, Aspésica, Ocaña y Ricaurte, y casiterita en aluviones y shales en la región de Ocaña (MURILLO, 1978).

## PUTUMAYO

En las cabeceras de los ríos Caucaiyá y Tagua, en la región de Puerto Lequízamo, y en los afluentes del río Putumayo (Picudo Grande, Chorreras y Piñuña), al sureste de Mocoa, hay referencias de concentraciones de estaño en granitos y en aluviones; hasta enero de 1960 existían, en estas regiones 7 propuestas vigentes de concesiones de estaño (WOKITTEL, 1960).

## TOLIMA

Estudios geoquímicos en la mina de cobre de tipo skarn, Minavieja (municipio de Payandé), revelan valores anómalos de concentrados de bates, tanto de estaño como de cobre, plata, tungsteno y bismuto (VERGARA, 1986). Lo anterior, sumado al marco geológico de borde oriental de la Cordillera Central, entre Payandé y la frontera con el Ecuador, abre las posibilidades de exploración de depósitos de estaño, tanto del tipo skarn como porfídico.

## VICHADA

En los llanos de Venezuela, inmediatamente al este de Puerto Carreño, se detectaron concentraciones aluviales ricas en estaño, esencialmente casiterita en asociación con columbita-tantalita y uranio; estos yacimientos muestran rasgos de poco transporte y provienen, posiblemente, de diques pegmatíticos de dirección oeste-este emplazados en el Escudo Guayanés. Hay indicios que permiten suponer que los diques se prolongan hasta territorio colombiano; además, algunas referencias indican que en la región de Puerto Carreño se presenta el

Este tipo de arenas estañíferas (PEREZ, comunicación personal). El Batolito Perquazan entra a Colombia (Orinoco) con textura rapakivi muy propicias para contener estaño (MARIN, comunicación escrita).

#### OTRAS MANIFESTACIONES

Wokittel (1960) menciona casiterita y estannina en la región de Tamañá (Chocó), estaño en Tuluá (Valle del Cauca) y en la Sierra del Carpintero (Alta Guajira).

#### PROSPECCION DEL ESTAÑO

Se presentan dos ambientes geológicos principales para prospección de depósitos de estaño:

1) Límite de convergencia de placas, que comprende las rocas plutónicas y subvolcánicas ácidas del borde oriental de la Cordillera Central y algunas de las Cordilleras Oriental y Occidental.

2) Ambiente intracratónico, representado por rocas granitoides y pegmatitas del Escudo de Guayana y Macizo de Garzón, entre otros (Figura 2).

Comparando las manifestaciones de estaño conocidas con el Mapa Geológico de Colombia (1976), se observa que éstas parecen estar relacionadas con rocas cratónicas de edad precámbrica (intrusivos de composición cuarzomonzonítica, principalmente); las de Vichada se relacionan con el Escudo de Guayana y las del Caquetá y Putumayo con el Macizo de Garzón. Lo anterior nos está indicando un ambiente intracratónico. Otras manifestaciones de estaño como las del Norte de Santander, podrían pertenecer a un ambiente de convergencia de placas.

#### CORDILLERA CENTRAL

Comprende la zona del borde oriental de la Cordillera Central, entre Payandé (Tolima) y la frontera con el Ecuador, donde afloran rocas del Batolito de Ibagué y en especial los plutones localizados más al sur, tales como el del río Pérez, el de Suaza, el granitoide de Gallego y el Batolito de Mocoa. Los tres primeros son intrusivos granitoides calco-alcalinos, de origen magmático y edad Jurásica a Paleozoica, de composición más ácida que el Batolito de Ibagué, que varía desde granodiorita a granito (ALVAREZ, 1983). Se presentan en la misma zona rocas calcáreas de la Formación Saldaña con flujos riolíticos intercalados, intruidas por los cuerpos graníticos mencionados. Se consideran dentro del mismo ambiente geológico los cuerpos graníticos que aparecen en el Macizo de Santander y la Sierra Nevada de Santa Marta, pues según Alvarez (1983), el episodio magmático triásico-jurásico de la Cordillera Central se extendió hasta estas zonas.

Los principales tipos de depósitos de estaño, que se pueden presentar, son en venas, skarn y pórfidos, los cuales se asocian con minerales de sulfuros.

#### ESCUDO DE GUAYANA

En la orinoquía y amazonía colombianas en la frontera con Venezuela y el Brasil, se presenta el complejo migmatítico

de Mitú que incluye, entre otros, el granófiro de Iijerato, granitos anafécticos. Análisis químicos de algunas de estas rocas, muestran altos contenidos en potasio y sílice, dos de ellas con valores de estaño de 20 y 10 ppm; pegmatitas de poca espesor con turmalina rellenando fracturas, se presentan cerca del caserío de Yavarate (bajo Vaupés) y en los ríos Negro, Guainía (GALVIS et al, 1979). Por comparación con los yacimientos brasileños y los prospectos venezolanos, los depósitos de estaño de posible ocurrencia son de tipo aluvial, meteorización, greisen, pegmatítico y placeres fósiles, estos últimos en las rocas sedimentarias de la Formación Roraima.

#### CORDILLERA OCCIDENTAL

La asociación de estas mineralizaciones (Nariño, Cauca, Valle y Chocó) con un ambiente geológico determinado no es muy clara. Sin embargo, se podría pensar que se relacionan con el arco de isla interno, más joven que el de la Cordillera Central.

#### PRODUCCION

Con excepción de algunas pequeñas explotaciones rudimentarias de aluviones de estaño (casiterita) en el Caquetá y sudeste de estaño en el Norte de Santander, hace algunos años, no se conocen minas de este metal susceptibles de ser económicamente explotadas. Por lo tanto no existen datos sobre producción nacional.

#### COMERCIO

Colombia importó en los años 1979 y 1980, 356 y 435 toneladas métricas de estaño, respectivamente (HYDE, 1981).

En la Tabla 7 se presentan las importaciones entre los años de 1980 y 1985

TAB. 7: Importaciones de estaño entre 1980 y 1985.

Año	Toneladas métricas	U.S. \$ CIF (miles)
1980	436	7.172
1981	400	5.902
1982	420	5.865
1983	267	3.878
1984	365	5.120
1985	335	4.702

Fuente: DANE, 1986

#### PERSPECTIVAS

A pesar de los factores que han intervenido en la declinación del consumo de estaño, el efecto ha sido enmascarado en parte, por la alta tasa de crecimiento de la industria electrónica en los años recientes.

Los precios del producto no han experimentado cambios sustanciales; no obstante, existe una tendencia a la baja en el consumo y por ende en la producción de estaño.

A pesar de la aparente tendencia declinatoria de la industria del estaño, lo mismo que la actual abundancia del producto, se plantea una crisis a largo plazo. Lo anterior fue la conclusión de los estudios realizados por la Australian Mineral Economics (en MINING JOURNAL, 1984a); para llegar a la anterior conclusión se hicieron los siguientes análisis: 1) los depósitos primarios de estaño, en Bolivia, y los, aparentemente ilimitados depósitos aluviales del sureste asiático, están mostrando signos de agotamiento; 2) en otros países, los depósitos de posible explotación requieren grandes inversiones de capital, no disponible en el presente; 3) los esfuerzos exploratorios encaminados a encontrar nuevos yacimientos han sido aminorados.

Para tratar de hacer frente a la crisis planteada, estamos en el momento oportuno de iniciar proyectos relacionados con la búsqueda de estaño, en especial depósitos primarios de bajo tenor y alto tonelaje (MINING JOURNAL, 1984a). En países como Colombia, puede ser importante también la exploración de las áreas localizadas en el Escudo Guayanés, ya que son potencialmente aptas para localizar aluviones estañíferos, además de ser zonas totalmente inexploradas.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, A.J. 1983. Geología de la Cordillera Central y el occidente colombiano y Petroquímica de los Intrusivos Granitoidea Mesozoicos. Ingeominas. Bol. Geol. 26 (2): 175 p. Bogotá.
- BABOR, J.A. e IBARZ, J., 1963.- Química general moderna. 7a ed. Manuel Marín y Cía. p. 763-766. Barcelona.
- BETEJTIN, A., 1977.- Curso de mineralogía. 3a. ed. MIR, 635 p. Moscú.
- CARLIN F., Jr., 1980.- Tin. Mineral Facts and Problems, Bureau of Mines. U. S. Department of Interior, Bull. 671: 947-959. Washington.
- COLLINS, P.L., 1981.- The geology and genesis of Cleveland Tin deposits, western Tasmania: Fluid inclusion and stable isotope studies. Econ. Geol. 76 (2): 365-392.
- COX, D., 1983.- Mineral resource assessment of Colombia: Ore deposit models vs. Geological Survey. Ingeominas-Menlo Park, California, Open File Report 83-423. Dennis P. Cox, editor, p. 16.
- DANA-HURBULT., 1960.- Manual de Mineralogía. 2a ed. Reverté, S.A. 600 p. Barcelona.
- EINAUDI, M.T., 1982.- Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposits. Econ. Geol. 77 (4): 745-754.
- EINAUDI, M.T., MEINERT, L.D. and NEWBERRY, R., 1981.- Skarn deposits. Econ. Geol. 75th Anniversary volume, p.717-391.
- GALVIS, J., HUGUETT, A. y RUGE, P., 1979.- Geología de la Amazonia Colombiana. Ingeominas, Bol. Geol. 22 (3): 3-96. Bogotá.

- GOLDSCHMIDT, V.W., 1958.- *Geochemistry*. Oxford, at the Clarendon Press. 730 p.
- HEINDL, R.A. 1970.- *Tin. Mineral Facts and Problems*. Bureau of Mines. Bull. 650: U.S. Depart. Inter., p. 759-771. Washington.
- HYDE, D.M., 1981.- *The mineral industry of Colombia*. *Minerals Yearbook*, Vol. III, p. 257.
- IMEDKPARIA, E., 1983.- *Lithogeochemical dispersion associated with Ririwai Zinc-Tin lode, Northern Nigeria*. *Jour. Geoch. Explor. Special Issue*. G.R. Parslow, ed. Vol. 19: 643-661.
- INTERNATIONAL TIN COUNCIL, 1984.- *Tin. Mining Annual Review* Londres.
- LEHMANN, B., 1982.- *Metallogeny of Tin. Magmatic differentiation Versus Geochemical Heritage*. *Econ. Geol.* 77 (1): 54-59.
- MINING JOURNAL., 1984a.- *Tin turns the Corner?* Vol. 301 (7762): 346-347. Londres.
- , 1984b.- *Tin; Brazilian Output Continues to Rise*. Vol. 303 (7790): 393. Londres.
- MUHAMAD, N.M., 1984.- *Tin: Non-ITC Trade Compounds a Problem with Surplus Supplies*. *Engineering and Mining Journal*. Vol. 185 (3): 58-66. Londres.
- , 1985.- *Tin: world glut continues to exacerbate Producers' woes*. *Engineering and Mining Journal*, Vol. 186 (3): 88-93. Londres.
- MURILLO, A., 1978.- *Estadío. Recursos minerales de Colombia*. *Pub. Geol. Esp. Ingeominas* (1): 193-205. Bogotá.
- OLADE, M.A., 1980.- *Geochemical characteristics of Tin-Bearing and Tin-Barran Granites, Northern Nigeria*. *Econ. Geol.* 75, (1) p. 71-82.
- PARK, CH. Jr. MacDIARMID., 1970.- *Ore deposits*. 2a. ed., v.l. Freeman and Company. 522 p. San Francisco.
- PATTERSON, D.J., OHMOTO, H and SOLOMON, M., 1981.- *Geological setting and genesis of cassiterite-sulfide mineralization at Renison Bell, western Tasmania*. *Econ. Geol.* 76 (2): 393-428.
- ROUTHIER, P., 1976.- *A new approach to metallogenic provinces: the example of Europe*. *Econ. Geol.* 71, p. 803-811.
- , 1980.- *Les provinces métalliques: Essai de métallogénie globale. Ou sont les Métaux pour l'avenir?* Mémoire de BRGM, No. 105, 410 p.
- SAWKINS, F.J., 1984.- *Metal deposits in relation to plate tectonics*. Springer-Verlag, 235 p. Berlin.
- SCHNEIDER, H.J. and LEHMANN, B., 1977.- *Contribution a metallogenetical concept on the Bolivian Tin Province. Tin and strata-bound ore deposits*. Springer-Verlag, p. 153-158 Berlin.

- ILLOTOE, R., HALLS, C. and GRANT, J.N., 1975.- **Porphyry tin deposits in Bolivia.** *Econ. Geol.* 70, p. 913-927.
- MIRNOV, V.I., 1982.- **Geología de yacimientos minerales.** MIR, 654 p. Moscú.
- SOLOMON, M., 1981.- **An introduction to the geology and metallic ore deposits of Tasmania.** *Econ. Geol.* 76 (2):194-208.
- MERCARA, H., 1986.- **Estudio de orientación geoquímica en el área de Payandé, Departamento del Tolima.** Ingeominas, Informe en elaboración. Ibagué.
- MOKITEL R., 1960.- **Recursos minerales de Colombia.** Serv.Geol. Nal. Comp. Est. Geol. Of. Col., Tomo X, 392 p. Bogotá.

## MINERALES DE HIERRO

CARLOS ULLOA MELO

## CONTENIDO

	<i>Página</i>
Resumen .....	220
Introducción .....	221
Usos .....	222
Ambiente Geológico .....	222
Mineralogía .....	222
Tipos de Depósitos .....	223
Exploración .....	229
Metalurgia .....	230
Situación Mundial .....	230
Producción .....	230
El Hierro en Colombia .....	234
Coprodutos y Subproductos .....	234
Depósitos .....	238
Reservas .....	245
Producción, Importación y Exportación de Acero en Colombia .....	245
Comercio .....	245
Perspectivas .....	246
Bibliografía .....	246

## RESUMEN

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre y uno de los metales más empleados actualmente en la industria moderna; su producción en el mundo ha tenido un incremento considerable en el presente siglo.

La producción de hierro y acero en Colombia, en forma industrial, solamente se inició en la década del 50 en el presente siglo, con la explotación y beneficio de los yacimientos de hierro oolítico de Paz de Río. Sin embargo, la producción no es suficiente para el consumo interno, por lo cual el país tiene que importar chatarra de acero y algunos productos semielaborados.

Los depósitos económicamente explotables se han formado por segregación magmática, reemplazamiento hidrotermal, sedimentación directa y diagénesis y por procesos de meteorización en la superficie o en el subsuelo.

En el presente trabajo se han clasificado los depósitos de hierro en cuatro categorías así: I) Depósitos sedimentarios bandeados; II) Depósitos relacionados directamente con actividad ígnea; III) Depósitos formados por soluciones hidrotermales; IV) Depósitos producidos por enriquecimiento en superficie o cerca de ella.

El estimativo de las reservas medidas de hierro en Colombia, son actualmente del orden de 195 millones de toneladas de las cuales un 77% corresponden a Paz de Río, 20,5% a Cerro Matoso y 2,5% a depósitos menores.

## INTRODUCCION

El hierro ha desempeñado un papel muy importante en el desarrollo de la humanidad; se le conoció 4.000 años a.c. aproximadamente y se emplea desde 800 años a.c. Su utilización en forma industrial comenzó solamente en la mitad del siglo pasado con la introducción del alto horno y del coque como combustible.

En la actual era atómica, el hierro continúa siendo la columna vertebral de la industria moderna, debido a su abundancia, a la gran tecnología para su explotación y beneficio, y a sus características favorables para ser combinado con otros elementos para la producción de aceros.

El desarrollo industrial de los países depende en gran parte de la producción de hierro y acero; es así como países altamente desarrollados tales como Estados Unidos, Rusia, Reino Unido, Alemania, Japón, Suecia, China, Canadá, Francia, etc., presentan los índices más altos en la producción y consumo del hierro y el acero.

La explotación de hierro en Colombia se remonta al Siglo pasado, cuando el alemán Jacobo Mierner, estableció en Pacho (Cundinamarca), una incipiente ferrería en 1823, la cual produjo pequeñas cantidades de hierro hasta la mitad de ese siglo.

Técnicos ingleses que trabajaron en Pacho, fundaron y construyeron altos hornos rudimentarios en las localidades de Samacá (Boyacá) y La Pradera (Cundinamarca), produciendo pequeñas cantidades de hierro en las décadas del 50 y 60 del Siglo XIX.

En 1880 en el caserío de La Pradera, una compañía nacional montó un alto horno con capacidad de 8 toneladas diarias, lo cual dio buenos resultados. Posteriormente la compañía se ensanchó y adquirió un horno importado de Inglaterra, con capacidad de 40 toneladas diarias. La compañía nacional procesó mineral de hierro hasta las postrimerías del Siglo.

A principios de este Siglo se inició en Amagá (Antioquia) la metalurgia del hierro, aprovechando un pequeño yacimiento de mineral de hierro localizado en dicha población.

En 1923 se fundó la compañía Colombo Americana, la cual trató de aprovechar los yacimientos de La Calera (Cundinamarca), pero debido a la calidad y cantidad de mineral de hierro la compañía fracasó.

En la década del 40, el señor Corradine fundó la Ferrería de Pacho (Cundinamarca), aprovechando los yacimientos de esta localidad y procesando además chatarra de hierro; la Ferrería funcionó hasta principios de la década del 80.

La producción de hierro y acero en el país en forma industrial comenzó con la creación de la Empresa Siderúrgica de Paz de Río, la cual principió a producir aceros en la década del 50. Esta siderúrgica se abastece de los yacimientos de hierro oolítico descubierto en 1942, el carbón de Paz de Río (Mina de La Chapa) y Samacá y las calizas de Belencito.

Hasta hace pocos años la ferrería de Pacho y la Compañía Colar (Cundinamarca), procesaron pequeñas cantidades de

mineral de hierro proveniente de Pacho, Pericos y pequeños yacimientos en la región del Guavio (Cundinamarca).

Las siderúrgicas de Simesa (Medellín), Fundiciones Técnicas (FUTECH) Medellín, Metalúrgica de Boyacá (METALBOYACA), Siderúrgica del Muña (SIMUÑA), Metalúrgica del Norte (SIDUNOR), Acerías Bogotá y Siderúrgica del Pacífico (SIDELPA), procesan chatarra de hierro y acero.

### USOS

El hierro tiene múltiples usos y actualmente se constituye en uno de los principales pilares de la industria moderna. Su empleo es inmensurable; basta mencionar los aparatos de uso doméstico, del campo y de las ciudades (máquinas, automóviles, ferrocarriles, buques, ornamentos, aviones, cohetes, etc.).

El hierro y el acero por tener la cualidad de poderse alejar con otras sustancias, se puede emplear en diversos campos y la enumeración de sus usos se haría interminable; se puede afirmar que en la actualidad es la base de la industria moderna.

### AMBIENTE GEOLOGICO

El hierro es uno de los elementos más abundantes y comunes en la corteza terrestre. Generalmente las rocas sedimentarias contienen 2 a 3% de hierro, y los basaltos y gabros contienen cerca de 8,5%; el promedio del contenido de la corteza terrestre está cerca del 5%; las rocas explotadas económicamente tienen un rango de contenido de hierro entre 20 y un 69%.

La facultad del hierro de existir en más de una valencia, sumada a su gran abundancia, cuenta para la presencia de mineral de hierro en depósitos de características y asociaciones diferentes.

El ciclo geoquímico del hierro es complejo, pero es razonablemente bien conocido, lo cual ha permitido que su prospección se haga lógica y de esta manera se encuentren concentraciones abundantes, de diferentes características y asociaciones.

Los depósitos económicamente explotables pertenecen a las siguientes clases: segregación magmática, reemplazamiento hidrotermal, sedimentación directa y diagénesis y procesos de meteorización en la superficie y en el subsuelo (KLEMIC, et al, 1973).

### MINERALOGIA

Cerca de 300 minerales contienen hierro como componente esencial, pero solamente 6 de éstos pueden presentarse en yacimientos minerales; solamente los óxidos magnetita, hematita y goetita (limolita) son los de mayor importancia (CROSS, 1965; JONES, 1966; UNITED NATIONS, 1970; en KLEMIC, et al, 1973). Siderita (carbonato de hierro) y chamosita (un silicato de hierro) son explotados localmente, pero depósitos de estos minerales son en el presente de menor significado económico. Ilmenita, el óxido de hierro titanífero es un recurso potencial de subproductos de hierro, pero éste comúnmente está clasificado al mismo tiempo como un yacimiento de mineral de hierro.

Los principales minerales de los yacimientos de hierro son los siguientes:

- **MAGNETITA** ( $Fe_3O_4$ ): oscura, fuertemente magnética. Su contenido de hierro es de 72,4%. Los principales yacimientos de este mineral están en el Precámbrico, en las formaciones bandeadas, explotadas como taconita; asociados con cuarzo y generalmente en menor cantidad con carbonatos y silicatos de hierro. Los principales yacimientos de hierro originados por reemplazamiento están asociados con gran variedad de minerales, pero los más comunes incluyen especularita, pirita, pirrotina y silicatos como granate y actinolita.
- **GOETITA** ( $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ): Amarillo a castaño oscuro, comúnmente blando y terroso, puede ser duro y brillante; no magnética. Con un contenido de hierro cerca del 60%. Limolita es el término generalmente a la parte terrosa impura de la goetita. Es el principal constituyente de los yacimientos originados en los procesos de superficie o cerca de ella.
- **HEMATITA** ( $Fe_2O_3$ ): Negra si el tamaño del grano es grueso o rojo si es fino; virtualmente no magnética. El contenido de hierro es del 70%. Como especularita es frecuente y localmente constituye yacimiento mineral, asociado con magnetita y taconita en depósitos de reemplazamiento. Como óxido de hierro rojo, es un constituyente principal de depósitos secundarios precámbricos de formaciones de hierro (Iron Formations) asociados con goetita (limolita), y en capas sedimentarias jóvenes, asociados con goetita, calcita y cuarzo clástico.
- **PIRITA** ( $FeS_2$ ) y **PIRROTINA** ( $Fe_{1-x}S$ ): Amarilla, con lustre metálico; la pirrotina es débilmente magnética. La pirita es explotada como yacimiento de hierro en Norte América, solamente en el distrito de Michipoten de Ontario. Cuerpos con superficies de oxidación de pirita y pirrotina dan lugar a depósitos de óxidos de Fe que pueden ser explotados localmente.
- **CHAMOSITA** ( $Mg, Fe, Al$ )<sub>6</sub> ( $SiAl$ )<sub>4</sub>  $O_{13}$  ( $OH$ )<sub>8</sub>: Verdusca, grano fino, no magnética. El mayor constituyente de las capas de hierro oolítico, localmente explotada como yacimiento en Europa, asociada con siderita y goetita.
- **SIDERITA** ( $CO_3Fe$ ): Blanca amarillenta, gris verdusca. Contenido de hierro 48.3% con cierta proporción de  $CO_3Mg$  y  $CO_3Ca$ . Se presenta en gran cantidad de yacimientos de origen hidrotermal y sedimentario. En la zona de oxidación se transforma, completa y rápidamente en limolita.

## TIPOS DE DEPOSITOS

En el presente artículo se ha escogido la clasificación de Jones (en KLEMIC, et al., 1973), debido a que ésta presenta aspectos geológicos relacionados con su génesis y teniendo en cuenta también los aspectos económicos, tales como características mineralógicas, factor de tonelajes, forma y proyección en profundidad, lo cual es de gran importancia para asumir reservas potenciales.

En este informe se hace una ligera modificación de Jones, en los depósitos hidrotermales. Para mayor entendimiento, en los párrafos siguientes se da una lista las cuatro categorías y sus subdivisiones, las cuales se discutirán detalladamente y luego en el capítulo del Hierro en Colombia, de acuerdo con

prospectos y manifestaciones de hierro, con un listado y un mapa de Colombia con su localización aproximada.

#### I. Depósitos sedimentarios bandeados:

- a) Formaciones de hierro bandeado (Iron Formation), son exclusivamente del Precámbrico.
- b) Capas de hierro oolítico principalmente post-Precámbricos (en Colombia Terciarios).
- c) Depósitos sedimentarios misceláneos incluyendo "black-board", siderita, hierro de pantanos y acumulaciones clásticas.

#### II. Depósitos relacionados directamente con actividad ígnea:

- a) Segregación magnética.
- b) Depósitos pirometasomáticos.

#### III. Depósitos formados por soluciones hidrotermales:

- a) Depósitos de reemplazamiento metasomático.
- b) Relleno de cavidades.

#### IV. Depósitos producidos por enriquecimiento en superficies cerca de ellas:

- a) Lateritas.
- b) Enriquecimiento de yacimientos de bajo grado.

### DEPOSITOS SEDIMENTARIOS BANDEADOS

Las principales mineralizaciones de hierro en la corteza terrestre son producto de concentración química, la cual ha sido modificada por oleaje y acción concurrente, lo mismo que por reacciones y cambios mineralógicos que tuvieron lugar bajo la interfase deposicional (diagénesis) y por cambios mineralógicos producidos por alta presión en los procesos de enterramiento (KLEMIC, et al, 1973).

**Formaciones bandeadas de hierro.**— Las formaciones bandeadas de hierro ocurren como unidades sedimentarias de rocas precámbricas en varias partes del mundo. Ellas constituyen los principales recursos de hierro que actualmente son explotadas, ya que contienen los porcentajes potenciales más grandes. Estas rocas se definen como: una sedimentación química, típicamente en bandas o láminas, que contienen 15% o más de hierro de origen sedimentario (comúnmente pero no necesariamente contienen láminas de chert). En algunas bandas, el hierro se encuentra en la forma de carbonato (siderita, con un apreciable contenido de manganeso, magnesio y calcio) o silicatos (granulita, minnesotita, silomelana), y raramente ocurre en forma de sulfuros (pirita). Los más distintivos y económicamente más significativos tipos de roca, consisten en óxidos de hierro (magnetita o hematita) y chert (o sus equivalentes recristalizados) en alternancia con delgadas láminas, con un contenido de hierro comúnmente entre 25 y 40%.

Muchas formaciones de hierro han estado bajo condiciones de alta temperatura y presión (metamorfismo) que han cambiado

los minerales preexistentes en silicatos, tales como grunerita, piroxeno y olivino, en asociación con magnetita y hematita. Los óxidos de las facies de formaciones de hierro que han sido de tal modo metamorfoseadas son los más convenientes como yacimientos de bajo tenor (taconita), debido a que dichos óxidos son más fácilmente concentrados en la molienda. En contraste, los carbonatos más débilmente metamorfoseados y las facies de silicatos, que generalmente no son usados en la actualidad en los Estados Unidos como yacimientos de bajo tenor, son más susceptibles a alterarse en superficie, y por aguas metedricas comúnmente se convierten en yacimientos de cuerpos blandos de limolita y hematita y estos depósitos se clasifican en el Lago Superior como yacimientos lavados o semitaconita (DUTTON, 1955; UNITED NATIONS, 1970; en KLEMIC, et al, 1973).

Químicamente las formaciones de hierro están caracterizadas por tener un bajo contenido de aluminio, sodio, potasio y elementos menores. El hierro y la sílice son los dominantes pero en algunos distritos como el de Cuyana en Minnesota, el manganeso tiene un porcentaje alto (DUTTON, 1955; en KLEMIC, et al, 1973).

Las formaciones de hierro bandeado se presentan unas veces en rocas con fuertes plegamientos y buzamientos y en tal caso el mineral se extiende hasta profundidades de 900 a 1200 m; en los casos en que el buzamiento es suave, el mineral se concentra en grandes extensiones y en profundidades de pocos metros, lo cual facilita su explotación. Ejemplo de formaciones de hierro bandeado se presentan en la región del Lago Superior de los Estados Unidos, Mesabi, Guyana, Gogebi, Marquette y Menominee; en Canadá en Michipicota, Lago Albanet, Mistassiní y distrito de Labrador; en Brasil en el cuadrilátero ferrífero; en Krivoi Roy y Kursk, distritos de Rusia y en Hamarsly Range de Austria (JONES, 1966, en KLEMIC, et al, 1973). En los cuadriláteros ferríferos de Bolívar, San Isidro y Paz en Venezuela; en los estados de Minas de Gerais, Mato Grosso, territorio de Amapá en Brasil (CRUZ, 1971).

**Estratos de hierro oolítico.**— El hierro oolítico se presenta en forma de capas sedimentarias intercaladas con diferentes tipos litológicos tales como calizas, areniscas, pizarras, etc. La edad de las capas de oolitos de hierro por lo general es más joven que las formaciones bandeadas de hierro (iron formations); en Europa se han explotado capas del Jurásico, en Estados Unidos del Ordoviciano y Siluriano, y en Colombia del Terciario.

El contenido de hierro en los estratos sedimentarios oolíticos tiene un rango entre 20 y 60%; en Paz de Río (Boyacá) es de un 46%, en Sabanalarga (Casanare) un 30%, y en Mitú 53%. En Estados Unidos el promedio es de 50 a 60% para las áreas enriquecidas y un 35 a 38% en áreas sin enriquecimiento. Los estratos de hierro oolítico tienen gran variedad en su composición y en su forma, pero en general son macizos y contienen pequeños gránulos (oolitos) de limolita, hematita o calcita. El núcleo de los oolitos por lo general está formado por cuarzo detrítico o fragmentos de fósiles.

La explotabilidad de las rocas con oolitos de hierro depende principalmente de la cantidad de hierro, cuarzo y calcita, del espesor de los estratos y de la extensión de los mismos. En general la extensión de los estratos con hierro oolíticos es grande.

Los estratos de hierro oolítico son originalmente el resultado de una sedimentación química, pero los oolitos de hierro económicamente más importantes pudieron haber sido modificados por la acción de las olas, y transporte, de tal manera que resultan formas químicamente muy heterogéneas de limolita (hematita, chamosita) y siderita principalmente (KLEMIC, et al, 1973).

Las regiones más importantes donde se han explotado estratos de hierro oolítico han sido el norte de Europa, Inglaterra, Francia, Luxemburgo, Alemania y Colombia.

**Depósitos misceláneos de hierro.**— En esta categoría se clasifican los depósitos de acumulaciones de hierro en pantanos, áreas de glaciación y depósitos aluviales recientes. Estos depósitos por lo general son de pequeña magnitud y de formas irregulares. En las áreas de pantanos se depositan generalmente óxidos de hierro, y en los aluviones arenas negras titaníferas.

#### DEPOSITOS RELACIONADOS CON ACTIVIDAD IGNEA

El hierro se puede formar, durante la cristalización del magma, de muchas maneras: 1) Como un constituyente de los minerales formados tempranamente, como la ilmenita que puede fijarse en la base de la cámara magmática. 2) Como una fracción de un estado magmático tardío, en que los minerales de hierro son precipitados después de que muchos otros constituyentes hayan cristalizado. 3) Como un constituyente de fluidos (gases y líquidos acuosos) que escaparon de la cámara magmática y depositaron minerales de hierro en las rocas de los alrededores (JONES, 1966; en KLEMIC, et al., 1973). Los dos primeros constituyen la categoría de segregación magmática y el tercero pirometasomático.

**Segregación magmática.**— Los depósitos por segregación se presentan como láminas delgadas, macizas, masas irregulares, lentes, diques, etc., dentro de diferentes tipos de rocas.

Uno de los depósitos más importantes de este tipo en el mundo es el de Kiruna, Suecia, el cual está constituido por una masa de magnetita con dimensiones entre 30 y 150 m de espesor en una extensión de 2,8 km de longitud por 380 m de ancho. El contenido de Fe es de 50 a 71% (BATEMAN, 1957). Los depósitos de hierro de Suecia ocurren dentro de pórfidos sieníticos y pórfidos cuarzosos del Precámbrico.

**Depósitos pirometasomáticos.**— Los depósitos pirometasomáticos o depósitos de metamorfismo de contacto, se presentan comúnmente en calizas, cerca al contacto con la roca ígnea (KLEMIC, et al, 1973).

Un ejemplo típico es el depósito de Cornwall (Pensilvania, Estados Unidos), en donde cuerpos de diabasa reemplazan calizas cámbricas. Las formas de los cuerpos son musas tubulares de cerca de 35 m de espesor, 1600 m de longitud y 800 m de ancho. El yacimiento contiene cerca de 40% de hierro como magnetita asociada con sulfuros, esencialmente pirita y calcopirita, y actinolita y clorita como minerales de ganga. Cobre, plata, oro y cobalto son recuperados como subproductos (KLEMIC, et al, 1973).

## DEPOSITOS FORMADOS POR SOLUCIONES HIDROTERMALES

Muchos depósitos de hierro son de origen hidrotermal, los cuales fueron depositados por fluidos acuosos calientes. Estos fluidos pudieron originarse a una distancia relativa del magma cristalizado, o pueden representar aguas de muchos orígenes que circularon a profundidades hasta adquirir la temperatura necesaria; similarmente el hierro puede ser de origen primario de un magma o puede también provenir de soluciones que se filtraron atravesando las rocas (KLEMIC, et al, 1973).

Las soluciones hidrotermales pueden perder su contenido mineral por depositación en los distintos poros o en las aberturas de las rocas formando depósitos de relleno de cavidades, o por sustitución metasomática de las rocas, formando depósitos de sustitución (BATEMAN, 1957).

Los depósitos de hierro que se han precipitado por medio de los procesos mencionados anteriormente, se pueden dividir en: 1) Depósitos de relleno de cavidades, y 2) Depósitos metasomáticos.

**Depósitos de relleno de cavidades.**— Estos depósitos hidrotermales son por lo general de tamaño pequeño a mediano. Ocurren como venas, diques, lentes, etc., rellenando las fisuras; el relleno consiste en depositación de minerales a partir de soluciones, debido a cambios de temperatura, de presión y químicos de las soluciones mineralizadas.

**Reemplazamiento metasomático.**— Los depósitos de hierro de origen metasomático son el producto de un proceso de solución y depositación capilar esencialmente simultáneo, por medio del cual uno o varios minerales de la roca original son sustituidos por uno o varios minerales nuevos, aportados por soluciones hidrotermales. Las rocas más susceptibles de ser reemplazadas son las carbonatadas, debido a su fácil solubilidad; por tal razón, la mayoría de los depósitos de hierro metasomático se encuentran en áreas con este tipo de roca. La forma y el volumen de este tipo de depósitos son muy variables, ya que están controlados por las características sedimentarias de los cuerpos reemplazados y por los rasgos estructurales que afectan el área reemplazada (BATEMAN, 1957).

**Depósitos producidos por enriquecimiento superficial o cerca de la superficie.**— Muchos depósitos de hierro tienen su origen por enriquecimiento superficial, o cerca a la superficie, de rocas de menor contenido de hierro. Rocas preexistentes que contienen minerales de hierro son atacadas superficialmente por aguas meteóricas, y el hierro es alterado a limonita y hematita; frecuentemente pierden otros elementos por solución. En áreas donde la superficie de erosión es menor o donde la oxidación ocurre bajo la superficie, el resultado es una progresiva concentración de óxidos de hierro. Muchos de estos depósitos residuales han sido explotados en el pasado y algunos que son potencialmente económicos permanecen sin explotar.

Estos depósitos se pueden dividir en dos grupos: lateritas, que están caracterizadas por productos de alteración en climas húmedos tropicales y los de enriquecimiento de hierro residual de bajo grado.

**Lateritas:** El Proceso de laterización es el ataque químico profundo, bajo condiciones tropicales donde alternan esta-

ciones húmedas y secas. La naturaleza del producto depende de las rocas atacadas; la bauxita, por ejemplo, es producida por la laterización de rocas con contenido relativamente alto en óxidos de aluminio, cuarzo y hierro. Las lateritas ricas en hierro con frecuencia son derivadas de serpentinas, como en Cuba y en las islas filipinas (DUTTON, 1955; UNITED NATIONS, 1970; en KLEMIC, et al, 1973). El material es poroso y costoso y puede acumularse a cientos de pies de profundidad. Los yacimientos pueden medir varios kilómetros cuadrados y su tonelaje es muy grande. El mineral dominante es limonita impura (goethita impura) y el contenido de hierro en la roca es comúnmente de 40 a 50%; el níquel, cobalto y cromo, también están concentrados en las lateritas. La Mayor impureza es la arcilla, que junto con cromo, cobalto y níquel impiden el uso de las lateritas para extraer hierro.

Muchas lateritas ricas en hierro son explotadas en la actualidad para níquel solamente, pero para un futuro, con nuevas técnicas metalúrgicas podrán ser explotadas para hierro, junto con el níquel, el cobalto y posiblemente el cromo.

Enriquecimiento residual de yacimientos con bajo contenido de hierro: Muchos yacimientos preexistentes, tales como formaciones de capas de hierro y reemplazamiento metasomático han sufrido meteorización dando origen a concentraciones de hierro residual cerca a la superficie.

En Estados Unidos, en la región del lago Superior muchas formaciones de capas de hierro, han sido atacadas por meteorización la cual ha servido para enriquecer estos depósitos. En España, los depósitos de Bilbao consisten en masas de limonita y hematita derivadas de cuerpos preexistentes de siderita (UNITED NATIONS, 1970; en KLEMIC, et al, 1973).

## EXPLORACION

La exploración del hierro difiere según la clase de yacimiento que se esté buscando; si es de tipo magnético del Precámbrico (formaciones de estratos de hierro), se emplea por lo general aeromagnetismo, debido a que las áreas potenciales ricas en hierro pueden ser cubiertas rápidamente y su estudio complementado con cartografía geológica y perforaciones.

Los depósitos de hierro magnético, de tipo magnético y pirometasomático y de relleno de cavidades, debido a sus formaciones irregulares de tamaño y forma, si bien pueden ser detectados por medios aeromagnéticos, requieren técnicas que permitan dar la forma del cuerpo en sus tres dimensiones y un muestreo sistemático para saber su tenor.

En los depósitos de tipo sedimentario se requieren estudios con trabajos de campo, en donde se detalle el estrato mineral de hierro.

En Colombia, la exploración de hierro se podría efectuar por métodos aeromagnéticos en la zona del Escudo Guayanés, para la búsqueda de formaciones de estratos de hierro del Cámbrico (Banded Iron Formations) y en las áreas de rocas ígneas para los yacimientos de hierro magnético y pirometasomático. La exploración de hierro oolítico se puede adelantar siguiendo la guía estratigráfica de la región de Paz de Río y Sabanalarga, por medio de cartografía geológica sistemática.

## METALURGIA

El hierro como producto utilizable, debe pasar de mineral de hierro a lingote o hierro esponja y posteriormente a hierro colado, hierro forjado o acero.

El mineral de hierro se puede fundir con coque o gas como elementos reductores y como combustible, y se utiliza la caliza para la eliminación de sílice, alúmina y otras impurezas.

En Colombia la industria siderúrgica emplea los procesos integrado y semi-integrado. Acerías Paz del Río emplea el sistema integrado o de sinterización, teniendo en cuenta la calidad del mineral de hierro, la reducción en el consumo de coque y la caliza. Por este sistema se aprovechan por aglomeración los finos del mineral de hierro, carbón y caliza.

Posteriormente se carga la mezcla constituida por el sinter, la caliza, el carbón y el hierro, en el alto horno (al cual funciona con el sistema de inyección de oxígeno y fuel oil) y por reacciones químicas se reducen el oxígeno del hierro y otras impurezas, obteniéndose el arrabio bruto y la escoria.

El arrabio líquido al salir del alto horno se transporta a un mezclador y se vierte en convertidores en donde se le adiciona cal y ferrosaleaciones para eliminar impurezas y producir diferentes tipos de aceros. El acero líquido se vierte posteriormente para obtener lingotes de sección rectangular y sección cuadrada, para producir aceros planos y no planos.

El proceso semi-integrado es utilizado por Simesa, Futec, Metelboyacá, Simuña, Sidonor y Sidelpa. Dichas empresas funden la chatarra en hornos eléctricos añadiéndole ferromanganeso, ferrosilíceo, ferromolibdeno y ferrosilicomanganeso para la obtención de diferentes clases de aceros, especialmente barras redondas, platinas, varillas corrugadas, perfiles livianos, ángulos, cuadrados, perfiles y alambros.

## SITUACION MUNDIAL

## PRODUCCION

La producción mundial de concentrados y aglomerados de hierro, lingotes de hierro y acero crudo, tuvo un incremento constante durante las décadas de 1950 y 1960, hasta el año de 1965, cuando llegó a su tope más alto, declinando luego de 1976 a 1978, recuperándose en 1979 para tener posteriormente una declinación constante hasta 1983 (tablas 1 y 2; fig. 1).

La declinación en la producción de los concentrados y aglomerados de hierro y acero posiblemente se deba a varios factores, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: a) Recesión económica mundial iniciada en 1974; b) la declinación de la producción de hierro y acero en los Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea, debido en gran parte al equipo y tecnología en desuso en grandes centros siderúrgicos de dichos países, y a la aparición en los mercados del hierro y el acero de países con nueva tecnología y gran capacidad de competencia como Brasil, Sudafrica, Corea del Sur, España, Taiwan, China y Venezuela. c) Reducción en la demanda de acero en las industrias metalmeánica, automotriz y de la construcción.

TAB. 1: Producción mundial de concentrados y aglomerados de mineral de hierro. (Miles de toneladas largas).

Año	Peso Bruto	Contenido Metálico
1974	883.834	507.877
1975	887.389	512.844
1976	868.789	492.623
1977	827.270	469.663
1978	841.027	473.933
1979	888.789	511.385
1980	876.894	505.990
1981	841.579	485.545
1982	767.149	439.534
1983	729.642	416.274

Fuente: Mineral Yearbook 1976, 1978, 1979, 1981, 1983, 1984.

TAB. 2: Producción mundial de lingotes de hierro y acero crudo. (Miles de toneladas cortas).

Año	Lingotes de Hierro	Acero crudo
1974	564.188	780.432
1975	528.861	712.556
1976	541.177	742.061
1977	537.698	783.415
1978	558.352	783.415
1979	586.300	821.091
1980	564.800	786.831
1981	551.900	776.905
1982	502.000	707.081
1983	505.000	724.480

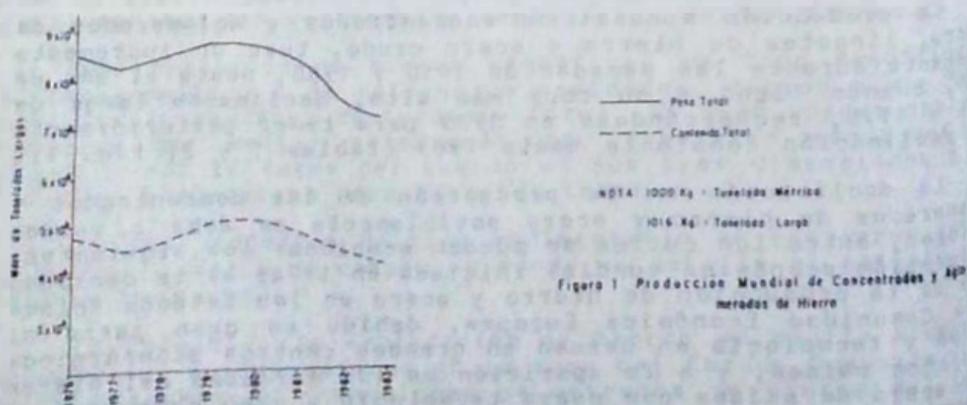
Fuente: Mineral Yearbook 1976, 1978, 1979, 1981, 1983, 1984.  
Equivalencias: ton. métr. = 1000 Kg; ton. larga = 1016 kg; ton. corta = 907 kg.

FIG. 1: Producción mundial de concentrados y aglomerados de hierro.

## PRODUCCION LATINDAMERICANA

La producción de hierro y acero en Latinoamérica también se ha visto afectada seriamente por la recesión económica internacional, pero en menor proporción que en los países de la Comunidad Económica Europea y los Estados Unidos, tal como se puede apreciar en las Tablas 3 y 4.

El fenómeno anterior en parte se puede deber a la tecnología de las siderúrgicas de Brasil, Venezuela y México y a la mano de obra barata en dichos países, comparada con los países europeos y norteamérica. El consumo de hierro y chatarra de acero para siderúrgicas semi-integradas, ha tenido un comportamiento similar al del acero producido en acerías integradas con un aumento hasta el año de 1979 y un descenso hasta 1983 (Tabla 5); las causas pueden corresponder en gran parte a la recesión económica.

En lo que respecta al consumo de acero en Latinoamérica (Tab. 6), se pueden considerar muy bajo a excepción de Brasil, Argentina y México, al compararlo con los países europeos. El factor anterior debe ser tenido muy en cuenta en las políticas económicas del área si se quiere salir del estancamiento socioeconómico, ya que la industria siderúrgica y metalmeccánica contribuyen en gran parte a dar trabajo y comodidades a los habitantes de los países subdesarrollados donde los aspectos anteriores se desarrollan con mayor intensidad.

## EL HIERRO EN COLOMBIA

## COPRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

Los depósitos relacionados con actividad ígnea, algunos de los formados por enriquecimiento en superficie o cerca de ella y los depósitos de placeres ricos en hierro, comúnmente contienen materiales recuperables o potencialmente recuperables como coproductos en adición al hierro (OUTTON, 1955, UNITED NATIONS, 1970; en KLEMIC, et al, 1973). Estos son: oro, plata, cobre, cobalto, titanio, estaño, manganeso, cromo, níquel, vanadio, zinc, sulfuros, fosfatos, tierras raras, aluminio, fluorita, barita, uranio, torio y zirconio.

En Colombia se recuperan subproductos de las Acerías de Paz de Río, como abonos fosfóricos, escorias para fabricación de cemento, alquitranes, brea, sulfato de amonio, ácido sulfúrico, naftalina y benceno.

## DEPOSITOS

De acuerdo con la clasificación presentada en el capítulo de tipos de depósitos se describen a continuación los lugares del país donde se presentan mineralizaciones de hierro. (Ver Fig. 2).

No se han encontrado formaciones bandeadas de hierro (depósitos sedimentarios bandeados), pero es posible que se presenten en la zona del Ercudo de Guayana en el extremo oriental del país.

En cuanto a estratos de hierro oolítico, se presentan en Paz de Río con una longitud de unos 20 km, en Sabanalarga se extienden por 15 km y en Mitú sobrepasan los 10 km. El espesor de los depósitos es variable; en Paz de Río varía entre 0,40 y 0,80 m, en Sabanalarga entre 2,5 y 4 m y en Mitú es de 2 a 3 m.

TAB. 3: Producción Latinoamericana de Concentrados y Aglomerados de Mineral de Hierro (miles de toneladas largas).

PAIS		1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
ARGENTINA	t	408	260	345	1.014	895	601	430	392	578	619
	m	209	119	157	545	482	323	231	245	361	387
BOLIVIA	t	-	31	-	7	55	25	6	6	8	13
	m	-	19	-	4	35	16	4	4	5	8
BRASIL	t	74.309	88.474	90.360	80.706	83.643	94.594	112.920	96.315	93.500	87.594
	m	48.301	57.508	59.640	52.459	54.368	61.486	73.398	63.960	60.725	56.936
CHILE	t	10.109	10.875	10.225	7.537	6.695	7.006	8.138	7.621	5.714	5.880
	m	6.369	6.851	6.255	4.596	4.267	4.561	5.203	4.695	3.520	3.545
COLOMBIA	t	437	529	540	497	489	391	498	412	463	443
	m	188	227	233	229	224	180	229	190	184	177
MEXICO	t	4.928	4.974	5.380	5.296	5.249	5.965	7.510	7.893	8.026	7.913
	m	3.286	3.316	3.587	3.530	3.500	3.977	5.007	5.209	5.297	5.222
PERU	t	9.375	7.630	4.701	6.184	4.844	5.358	5.614	5.973	5.638	4.278
	m	6.121	4.987	3.040	4.000	3.148	3.565	3.735	3.508	3.750	2.824
VENEZUELA	t	26.007	24.381	17.910	13.476	13.302	15.019	15.848	15.286	11.023	9.562
	m	16.124	15.116	11.110	8.349	8.247	9.312	9.826	9.477	6.834	5.928
TOTAL	t	125.573	137.154	129.461	114.717	115.172	128.959	150.964	133.898	124.950	116.302
	m	80.598	88.143	84.022	74.712	74.271	83.420	97.633	87.288	80.726	74.927

t= Peso total

m= Contenido metálico

Fuente: Minerals Yearbook 1976, 1978, 1979, 1981, 1982, 1983.

TAB. 4: Producción Latinoamericana de Acero Crudo (miles de toneladas cortas).

PAIS	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
ARGENTINA	2.595	2.500	2.657	2.958	3.071	3.530	2.978	2.780	3.211	3.230
BRASIL	8.275	9.158	10.135	12.306	13.346	15.314	16.908	14.584	14.319	16.159
CHILE	700	538	531	604	658	724	776	710	537	680
CUBA	265	265	275	364	357	362	335	364	332	390
COLOMBIA	700	538	531	364	431	399	446	435	491	489
EL SALVADOR	11	12	12	15	15	15	15	11		
MEXICO	5.663	5.812	5.840	6.174	7.469	7.845	7.883	8.383	7.769	7.625
PERU	496	476	397	418	412	481	493	401	302	320
TRINIDAD TOBAGO							3	58	188	241
URUGUAY	16	18	12	15	15	15	18	15	22	32
VENEZUELA	1.166	1.185	1.033	972	948	1.625	1.967	2.003	2.531	2.476
TOTAL	19.887	20.502	21.423	24.190	26.722	30.310	31.822	29.744	29.702	31.642

TAB. 5: Consumo de Hierro y Chatarra de Acero en Latinoamérica (miles de toneladas cortas).

PAIS	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Argentina	1.657	1.892	1.523	1.629	1.320	1.230	1.428
Brasil	4.644	5.044	5.806	6.497	7.170	6.190	6.083
Chile	186	227	177	204	209	220	140
Colombia	229	250	183	261	211	205	218
México	3.406	2.960	3.097	2.705	2.345	2.490	2.310
Perú	185	184	150	230	178	130	90
Uruguay	34	55	57	55	24	20	38
Venezuela	499	503	602	1.050	1.068	1.090	1.500
América Central	67	57	61	1.280	54	50	50
Total	10.907	11.172	11.656	13.911	12.579	11.625	11.830

Tomado de Mineral Yearbook 1978, 1981.

TAB. 6: Consumo per capita de Acero Crudo en Latinoamérica

Año	Brasil	Argen- tina	México	Venez.	Chile	Perú	Colom- bia	Prom. Latia
1974	114	162	105	220	69	43	34	99
1975	108	184	108	220	54	48	30	94
1976	101	121	100	207	43	38	29	85
1977	102	117	96					
1978	112	106	113	173	51	29	32	87
1979	121	139	129	212	59	29	31	93
1980	122	152	155	214	72	30	30	109
1981	98	114	164	209	67	49	30	100
1982	90	112	125	210	34	30	35	86
1983	81	195	86	185	55	17	37	75
Total	1.049	1.402	1.181	1.850	504	313	288	

Fuente: Ilafa 1984.

En la actualidad sólo se explotan los depósitos de Paz de Río en forma subterráneas. En un futuro, cuando se mejoren las técnicas metalúrgicas o aparezcan nuevas, el yacimiento de Sabanalarga podría ser explotado con rendimiento económico aceptable. En cuanto a los yacimientos de Mitú (Vaupés), sólo después de estudiar las condiciones de los depósitos del área y de tener una infraestructura adecuada, se podrían explotar. (ULLOA, 1979). (Ver Tabla 7).

En relación con depósitos misceláneos de hierro, en el país se han encontrado pequeñas manifestaciones de hierro en depósitos glaciares y pequeñas capas de hierro hematítico, intercalado con arcillas (en el Cretáceo Superior) y arenas titaníferas en depósitos coluviales, en las inmediaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (Fig. 2, Tabla 8). Estos depósitos se manifiestan por la presencia de magnetita e ilmenita, que por oxidación pasan a limonita y hematita; el contenido de hierro es por lo general alto y los cuerpos son de poco espesor y extensión. En el país se han explotado, para uso local, algunas manifestaciones en el Departamento del Tolima.

En Colombia (Tabla 8), los depósitos de tipo pirometamórfico no son comunes, solamente se reporta en el Área de Hobe

(Huila) un depósito de bloques rodados de magnetita, que posiblemente corresponden a una roca de skarns mineralizada en rocas intrusivas cuarzomonzónicas, afectando a rocas del post-Payandé.

**Depósitos de relleno de cavidades** se presentan en las áreas cercanas a rocas ígneas (Tabla 9) en la Cordillera Central (Batolito de Ibagué), en el complejo ígneo de Santander, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en la Serranía de San Lucas y en rocas sedimentarias de las cuencas de Cundinamarca, Boyacá y Santander (Figura 2). Las mineralizaciones se presentan emplazadas en rocas ígneas-metamórficas en mayor proporción que en rocas sedimentarias; los principales minerales son: pirita, pirrotina, magnetita y especlarita, los cuales alteran a limonita y hematita. En las áreas de rocas sedimentarias de la Cordillera Oriental, las mineralizaciones se encuentran emplazadas en calizas y lutitas del Cretáceo y los minerales son principalmente especlarita y siderita que alteran a limonita y hematita. El contenido de hierro de estos depósitos es alto, pero debido a su tamaño y extensión no son económicamente explotables.

Los depósitos de reemplazamiento metasomático (Tabla 9) se han encontrado en Colombia especialmente en las formaciones con niveles calcáreos de la Cordillera Oriental. En la región del Guavio (Cundinamarca) el contacto discordante entre calizas de la Formación Calizas del Guavio con el Grupo Farallones ha servido de trampa para el depósito de hierro en forma de siderita. En dicha región se han encontrado los depósitos de las Mercedes y Ubalá, en donde las calizas de la formación de Calizas del Guavio, fueron reemplazadas por siderita, la cual por procesos de meteorización ha dado origen a concentraciones residuales de limonita y hematita (CAMACHO et al, 1972 y CRUZ, 1971). En el área de Manta - Ibirita, se han encontrado pequeñas manifestaciones de siderita, como resultado del reemplazamiento de los niveles calcáreos de la formación Fomeque.

En Pacho, Guasca, La Pradera, Zipaquirá, Nemocón, El Peñón, se reportan pequeños yacimientos de hierro, los cuales se originaron por reemplazamiento de niveles calcáreos del Grupo Villeta y Grupo Caqueza (Fig. 2). Los depósitos antes mencionados también pueden corresponder a depósitos sedimentarios de siderita los cuales posteriormente fueron lixiviados a limonita, goetita, hematita (RENZONI, 1971).

En cuanto a **Depósitos por enriquecimiento superficial**, en Colombia (Tabla 10) se presentan **depósitos de lateritas ricas en hierro**, principalmente en las rocas metamórficas de las cordilleras Occidental y Central. En la Cordillera Central, en Cerro Matoso (Monte Líbano), Medellín y Amagá, hay depósitos de lateritas; en la Cordillera Occidental, en Dagua.

Hasta el momento las lateritas para Fe en el país no se han explotado; es posible que en Cerro Matoso, además del Níquel se explote el hierro en el futuro; es el prospecto de mayor interés en la actualidad, que puede ser aprovechado cuando nuevas técnicas metalúrgicas lo permitan.

**Yacimientos de enriquecimiento residual** a partir de depósitos de bajo contenido de hierro, se presentan en el país en pequeña escala, especialmente en los depósitos y manifestaciones por reemplazamiento en las áreas de la Cordillera Oriental, como en "Manizales" (Ubalá) y Pericos (Guasca), donde la

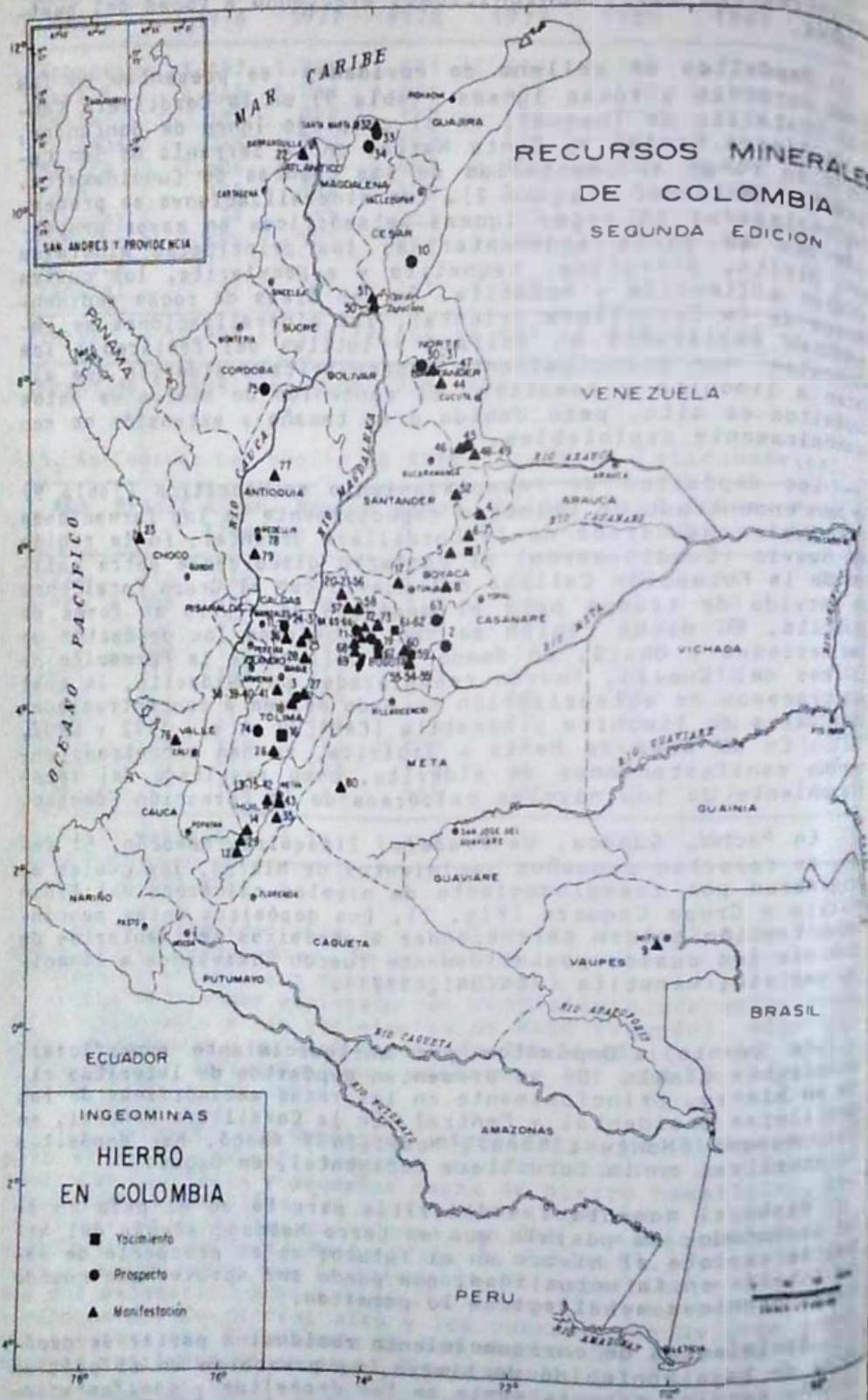


FIG. 2: El Hierro en Colombia.

LISTADO DE YACIMIENTOS, PROSPECTOS Y MANIFESTACIONES  
DE HIERRO EN COLOMBIA  
(Figura 2)

1. Paz de Río, Boyacá.
2. Sabanalarga, Casanare.
3. Valle de San Juan y San Luis, Tolima.
4. Boavita, Boyacá.
5. Belencito, Boyacá.
6. Jericó, Boyacá.
7. San Mateo, Boyacá.
8. Pesca, Boyacá.
9. Mitú, Vaupés.
10. Jagua de Ibérico, Cesar.
11. Mina Alegrías, Casabianca, Tolima.
12. Manifestación El Tabor, Agrado, Huila.
13. Manifestación El Cardozo, Palermo, Huila.
14. Manifestación El Hatillo, Tesalia, Huila.
15. Manifestación El Jovito, Palermo, Huila.
16. Mina activa Mal Nombre, Coyaima, Tol.
17. La Capilla, Villa de Leiva, Boyacá.
18. Manifestación Chipalo, San Luis, Tolima.
19. Cueva de Los Chulos, Guatavita, Cund.
20. Quebrada Muchipay, Yacopí, Cund.
21. La Capilla, Yacopí, Cundinamarca.
22. Pto. Colombia, Ciénaga y Galerazamba (Magdalena-Atlántico), Acandí (Chocó).
23. Bahía Solano.
24. Manifestación Los Colorados, Lérida, Tolima.
25. Manifestación Tiemblanalga, Rioblanco, Tolima.
26. Manifestación El Horizonte, Ataco, Tolima.
27. Manifestación El Imán, Valle de San Juan Tolima.
28. Manifestación Alto El Balso, Venadillo, Tolima.
29. Manifestación El Imán, La Plata, Huila.
30. Manifestación Los Cristales, Ocaña, Norte de Santander.
31. Manifestación Piedra Imán, Ocaña, Norte de Santander.
32. Pico La Reina, Buriticá, Magdalena.
33. Depósito Quebrada El Hierro, Buriticá, Magdalena.
34. Mocoa (Espíritu Santo), Sevilla, Magdalena.
35. Manifestación El Palmar, Hobo, Huila.
36. Manifestación El Reposo, Líbano, Tol.
37. Manifestación Guacolda, Lérida, Tol.
38. Manifestación El Achlote, Rovira, Tol.
39. Manifestación San Roque, Rovira, Tol.
40. Manifestación Los Balsos, Rovira, Tol.
41. Manifestación La Miranda, Rovira, Tol.
42. Manifestación Paraguay, Palermo, Huila.
43. Manifestación El Meral, Neiva, Huila.
44. La Curva, Bucarasica, N. de Santander.
45. Cuchilla de Palencia, Silos, Norte de Santander.
46. Hacienda Tomita, Silos, Norte de Santander.
47. El Imán, La Playa, Norte de Santander.
48. Quebrada Payandé, Pajaritos, Norte de Santander.
49. Loma Samaria, Chipatá, Norte de Santander.
50. Alto del Rosario, Magdalena.
51. Atloramiento Palanquito, El Banco, Magdalena.
52. Agua Colorada, San José de Miranda Santander.
53. Manifestación Tominejas, Gachalá, Cund.
54. Manifestación Algodones, Gachalá, Cundinamarca.
55. Manifestación Montecristo, Gachalá, Cundinamarca.
56. Manifestación Quebrada La Mina, Yacopí, Cundinamarca.
57. Manifestación Yacopí Grande, Topaipí, Cundinamarca.
58. Manifestación Alto de La Mina, Paimé Cundinamarca.
59. Yacimiento Las Mercedes, Ubalá, Cund.
60. Ubalá, Cundinamarca.
61. Tibirita, Cundinamarca.
62. Manta Cundinamarca.
63. Quebrada Barrera, San Eduardo, Boyacá.
64. Quebrada Barro Blanco, Pacho, Cund.
65. Algodonales, Pacho, Cundinamarca.
66. El Cedro, Pacho, Cundinamarca.
67. Pericos, Guasca, Cundinamarca.
68. El Salltre, La Pradera, Cundinamarca.
69. Quesero, Tabio, Cundinamarca.
70. Cerro Montenegro, Sopó, Cundinamarca.
71. Alto de La Caldera, Zipaquirá, Cund.
72. El Volador, Nemocón, Cundinamarca.
73. Sesquillé, Cundinamarca.
74. Prospecto Guadualito, San Antonio, Tolima.
75. Cerro Matoso, Monte Líbano, Córdoba.
76. Dagua, Valle.
77. Campamento Antioquia - Morro Pelao.
78. Medellín, Antioquia.
79. Amagá, Antioquia.
80. Sierra de La Macarena, Meta.

TABLA No. 7

DEPOSITOS SEDIMENTARIOS BANDEADOS  
Formaciones de Capas de Hierro (Iron Formation)

Minerales Principales: magnetita, hematita, siderita y silicatos de hierro

No.	Unidad Geológica	Forma de Explotación	Reservas (en tons.) Probadas Probables		Localidad	Informe
	Escudo Precambriano				No se ha encontrado este tipo de depósito. Posiblemente se encuentre en la zona del Escudo Guayanés al oriente del país.	
Estratos de Capas de Hierro Minerales Principales: limonita, hematita						
1 □	Terciario de Paz de Río (Formación Concentración)	Subterránea	8.361.670	18.885.000	Paz de Río, Boyacá, mina activa X = 1.155.000, Y = 1.146.000	Alvarado, 1944. Hubach, 1952. Mariño, 1976.
2 ○	Terciario Bordo Llanero (Arenisca del Limbo)			17.000.000	Sabanalarga, Casanare, X = 1.030.000, Y = 1.119.000	Camacho, 1972.
3 ○	Cretáceo Valle del Magdalena			2.200.000	Valle de San Juan y San Luis (Tollma), X = 959.000, Y = 882.000	Buitrago, 1975.
4 △	Terciario de Paz de Río (Arenisca de Socha)				Hoavita, Boyacá, X = 1.205.000, Y = 1.167.000	Mariño, 1976.
5 △	Terciario de Paz de Río (Formación Concentración)				Belencito, Boyacá, X = 1.125.000, Y = 1.133.000	Mariño, 1976.
6 △	Terciario de Paz de Río				Jerico, Boyacá; Salivanorte, Boyacá. X = 1.178.000, Y = 1.164.000	Mariño, 1976.
7 △	Terciario de Paz de Río				San Mateo, Boyacá, X = 1.187.000, Y = 1.170.000	Mariño, 1976.
8 △	Terciario de Paz de Río (Formación Concentración)				Fosca, Boyacá X = 1.108.000, Y = 1.118.000	Mariño, 1976.
9 △	Terciario Vaupés				Miño	

10	Cuaternario		8.000.000	Cesar, Jaque de Ibirico. X = 1.551.000, Y = 1.067.000	Restrepo, 1959.
11			170.000	Comblanca, Tolima: mina Alejías X = 1.038.170, Y = 860.000	
12	△	Terciario		Agrado, Huila: Manifestación El Tabor X = 747.400, Y = 823.200	
13	△	Valle Alto del		Palermo, Huila: Manifestación El Cardoso X = 795.000, Y = 850.400	
14	△	Magdalena		Tesalia, Huila: Manifestación El Hatillo X = 771.600, Y = 832.000	Buñrago, 1975.
15	△			Palermo, Huila: Manifestación El Jovito X = 801.900, Y = 849.000	
16	□	Cretáceo Valle Medio Magdalena	Tajo abierto	Coyalma, Tolima: mina activa Mal Nombre. X = 905.610, Y = 867.560	Buenaventura 1975
17	△	Formación Arcabuco		Villa de Leiva, Boyacá: La Capilla X = 1.123.000, Y = 1.065.000	Ujasta, 1960.
18	△	Formación Gualanday		San Luis, Tolima: Manifestación Chipalo. X = 949.500, Y = 886.350	Buñrago, 1975.
19	△	Formación Arenisca de Cacho		Guatavita, Cundinamarca: Cueva de Los Chulos. X = 1.035.000, Y = 1.029.000	Hubach, 1953.
20	△	Formación Paipa		Yacopí, Cundinamarca: Qda. Muchipay X = 1.098.000, Y = 972.000	Gil, 1975.
21	△			Yacopí, Cundinamarca: La Capilla. X = 1.095.000, Y = 971.000	
22	△	Arenas de Playa Costa Atlántica		Ciénaga y Galerazamba, Puerto Colombia. (Magdalena Atlántico)	Tschaux, 1970.
23	△	Arenas de Playa Costa Pacífica		Bahía Solano	Galvis (Comunicación verbal)
		Aluvial		Meta, Río Guaviare	Vega, 1972.

□ Yacimientos

○ Proyectos

△ Manifestaciones

TABLA No. 8

## DEPOSITOS RELACIONADOS DIRECTAMENTE A ACTIVIDAD IGNEA

## Segregación Magmática

Minerales Principales: magnetita, ilmenita; por oxidación limonita y hematita Especularita

No.	Unidad Geológica	Forma de Explotación	Reservas (en ton.) Probadas Probables	Localidad	
24 △	Complejo Igneo Metamórfico Cordillera Central			Lerida, Tolima. Manifestación Los Colorados X = 1.028.000, Y = 902.000	Buenaventura, 1975.
25 △	Batolito de Ibagué			Rioblanco, Tolima. Manifestación Tiembianalga. X = 885.800, Y = 827.500	Buenaventura, 1975.
26 △	Batolito de Ibagué			Ataco, Tolima. Manifestación El Horizonte. X = 888.300, Y = 821.620	Buenaventura, 1975.
27 △	Batolito de Ibagué Formación Payandé v Post-Payandé		80.000	Valle de San Juan. Manifestación El Imán X = 987.740, Y = 875.400	Buitrago, 1975.
28 △	Batolito de Ibagué			Venadillo, Tolima. Manifestación. Alto El Balso. X = 1.013.760, Y = 900.280	Buitrago, 1975
29 △	Batolito de Ibagué			La Plata, Huila. Manifestación El Imán X = 782.860, Y = 798.800	Buitrago, 1976
30 O	Igneo de Santander			Ocaña, N. Santander. Manifestación Los Cristales. X = 1.414.850, Y = 1.080.850	Otero, 1975.
31 O	Igneo de Santander			Ocaña, N. Santander. Manifestación Piedra de Imán. X = 1.417.825, Y = 1.080.400	Otero, 1975.
32 △	Complejo Igneo Metamórfico			Huntes, Magdalena. Pico La Reina X = 1.050.000, Y = 1.689.000	Tschanz, 1970.
33 O			3.200.000	Huntes, Magdalena. Depósito Qda. El Hierro. X = 1.045.000, Y = 1.728.000	
34 O	Sierra Nevada de Santa Marta		8.000	Sevilla, Magdalena. Mocos (Espíritu Santo). Y = 1.000.000, X = 1.680.000	Tschanz, 1970. Mutis, 1943. Reymond, 1942
Pliometasomáticos					
Mineral Principal: Magnetita					
35	Contacto rocas ígneas Cordillera Central con Post-Payandé			Huilo, Huila. Manifestación El Palmar X = 771.700, Y = 860.700	Buitrago, 1976

Minerales Principales: magnetita, espicularita, pirrotina, calcopirita. Por alteración: hematita y limonita

No.	Unidad Geológica	Reservas (en ton.)		Localidad	Informe
		Probadas	Probables		
36 △	Complejo metamórfico Cordillera Central			Líbano, Tolima. Manifestación El Reposo: X = 1.029.100, Y = 887.500	Buenaventura, 1975
37 △	Complejo Igneo de Cordillera Central			Lérida, Tolima. Manifestación Guacolda: X = 1.026.100, Y = 902.780	Buenaventura, 1975
38 △	Batolito de Ibagué inyectado por diques			Rovira, Tolima. Manifestación El Achioté: X = 861.850, Y = 866.100	Buitrago, 1975
39 △	Batolito de Ibagué			Rovira, Tolima. Manifestación San Roque: X = 959.850, Y = 863.650	Buitrago, 1975
40 △	Batolito de Ibagué			Rovira, Tolima. Manifestación Los Balsos: X = 962.400, Y = 868.300	Buitrago, 1975
41 △	Batolito de Ibagué			Rovira, Tolima. Manifestación La Miranda: X = 950.000, Y = 859.000	Buitrago, 1975
42 △	Complejo Igneo meta- mórfico Cord. Central			Palermo, Huila. Manifestación Paraguay: X = 820.400, Y = 843.800	Buitrago, 1976
43 △	Complejo Igneo meta- mórfico Cord. Central			Neiva, Huila. Manifestación El Moral: X = 809.500, Y = 883.400	Buitrago, 1976
44 △				Bucaramanga, N. S. La Curva (diseminados) X = 1.391.425, Y = 1.123.225	Otero, 1975
45 △	Formación Bocas			Sijos, N.S., Cuchilla de Palencia: X = 1.279.500, Y = 1.135.375	
46 △				Sijos, N. S., Hacienda Tomita: X = 1.285.756, Y = 1.151.675	
47 △	Formación Sijará			La Playa, N. S., El Imán: X = 1.400.150, Y = 1.093.300	Otero, 1975
48 △				Pajaritos, N. S., Qda. Payandó: X = 1.279.500, Y = 1.146.475	
49 △	Neis de Bucaramanga			Chitagá, N. S., Loma Samaria: X = 1.274.725, Y = 1.157.550	Otero, 1975
50 △	Complejo Igneo metamor- fco Serranía de San Lucas			Alto del Rosario, Magdalena El Banco (Magdalena), afloramiento Palanquillo	Arce, 1951
51 △				San José de Miranda (Santander), Agua Colorada X = 1.224.950, Y = 1.145.075	Otero, 1975
52 △	Girón			Gachalá (Cund.), manifestación Tominejas: X = 1.018.000, Y = 1.078.000	Rodríguez, 1971; GU, 1976
53 △	Grupo Cáquesa			Gachalá (Cund.), manifestación Algodones: X = 1.013.000, Y = 1.078.000	Rodríguez, 1971
54 △	Grupo Farallones				

TABLA No. 9 (Cont.)

△ 55	Grupo Farallones			Gachalá (Cund.), manifestación Montecristo: X = 1.012.000, Y = 1.076.000.	Rodríguez, 1971
△ 56	Formación Pala			Yacopí (Cund.), manifestación Hda. La Mina:	GU, 1976
△ 57	Grupo Villota			Topalpi (Cund.), manifestación Yacopí Grande: X = 1.081.000, Y = 976.000.	GU, 1976
△ 58	Grupo Villota			Palme (Cund.), manifestación Alto de La Mina: X = 1.082.000, Y = 992.000.	GU, 1976
Reemplazamiento Minerales Principales: Siderita por alteración de limonita y hematita					
□ 59	Grupo Cáqueza	4.117.000	16.814.000	Ubalá, Cund., Yacimiento Las Mercedes: X = 1.020.000, Y = 1.068.000.	Cruz, 1971
○ 60	Grupo Cáqueza		9.800.000	Ubalá, Cund., X = 1.017.000, Y = 1.060.000	GU, 1976,
□ 61	Formación Pámezque		29.000	Tibirita, Cund., El Salitre: X = 1.048.000, Y = 1.045.000	Rodríguez, 1971; Man-
62			236.000	Manis, Cund., Las Minas: X = 1.045.000, Y = 1.062.000	Jarrés, 1958
○ 63	Grupo Cáqueza			San Eduardo, Boyacá, Qda. Barrera: X = 1.068.000, Y = 1.118.000	Camacho, 1972
○ 64				Pacho, Cund., Qda. Barro Blanco: X = 1.065.000, Y = 985.000	Hubach, 1952
○ 65	Grupo Villota			Pacho, Cund., Algodonales: X = 1.063.000, Y = 986.000	GU, 1976
○ 66				Pacho, Cund., El Cedro: X = 1.082.000, Y = 985.000	GU, 1976
□ 67	Formación Chipaque		600.000	Guaaca, Cund., Perleas: X = 1.020.000, Y = 1.020.000	Alvarado, 1943; McLaughlin, 1972, GU, 1976
△ 68	Chipaque			La Pradera, Cund., El Salitre: X = 1.048.000, Y = 992.000	Hubach, 1940; GU, 1976
△ 69	Guadalupe			Tabío, Cund., Quemero: X = 1.044.000, Y = 997.000	GU, 1976
○ 70	Chipaque		260.000	Supó, Cund., Cerro Montenegro: X = 1.032.000, Y = 1.016.000	GU, 1976
△ 71	Chipaque			Zipaquibá, Cund., Alto de La Caldera: X = 1.048.000, Y = 1.000.000	Hubach, 1952
○ 72	Chipaque		30.000	Nemecón, Cund., El Volador: X = 1.027.000, Y = 1.052.000	Alvarado, 1943
△ 73	Grupo Villota			Besquele, Cund., X = 1.047.000, Y = 1.036.000 El Peñón, Cund., Qda. Mellave: X = 1.076.000, Y = 978.000	GU, 1976

Lateritas  
Minerales Principales: limonita, goethita

No.	Unidad Geológica	Reservas (en tons.)		Localidad	Informe
		Probadas	Probables		
75 0	Lateritas, Cordillera Central		10.000.000	Monte Lisbano, Córdoba Cerro Matoso X = 1.360.000, Y = 835.000	Cruz, 1971
76 Δ	Lateritas, Cordillera Occidental			Dagua, Valle X = 895.000, Y = 677.000	Manjarrés, 1968
77 Δ	Lateritas, Cordillera Central			Campamento Antioquia, Morro Pelón X = 1.185.000, Y = 836.000	Alvarado, 1940
78 0	Lateritas, Cordillera Central			Medellín, Antioquia X = 1.185.000, Y = 835.000	Restrepo, 1969. Cock, 1962.
79 0	Lateritas, Cordillera Central			Amagá, Antioquia X = 1.167.000, Y = 820.000	Cock, 1962.
80 Δ	Sierra de La Macarena			Sierra de La Macarena, Meta.	Pérez, 1960.

## Enriquecimiento de Yacimientos con bajo contenido de Hierro

Se presentan en algunas áreas de la Cordillera Oriental  
en depósitos clasificados como de reemplazamiento.

siderita ha sido en algunas áreas meteorizada, dando lugar a limolita y hematita (Fig. 2)

## RESERVAS

Los datos obtenidos de las reservas medidas e indicadas se han tomado de informes publicados hace varios años y por lo tanto deben ser considerados como estimativos.

Las reservas de hierro en el país en lo referente a sedas corresponden principalmente a las de Paz de Río, Cerro Matoso y pequeños yacimientos. El tonelaje de reservas medidas se puede considerar en el orden de  $195 \times 10^6$  toneladas, de las cuales  $150.5 \times 10^6$  corresponden a Paz de Río,  $40 \times 10^6$  a Cerro Matoso y  $4.5 \times 10^6$  a depósitos menores, los cuales se pueden considerar de poca magnitud y calidad en comparación con los de países limítrofes como Venezuela y Brasil.

## PRODUCCION, IMPORTACION Y EXPORTACION DE ACERO EN COLOMBIA

La producción de acero en Colombia se debe principalmente a los productos elaborados por Acerías Paz del Río con el procesamiento integrado; corresponde a un 45% de la producción nacional y el resto a las siderúrgicas semiintegradas. La producción nacional de acero en lingotes y acero terminado de 1974 a 1983, ha tenido un incremento moderado; pasó de 343.200 toneladas en 1974 para lingotes a 544.100 en 1983 y para acero terminado de 281.200 a 420.400 toneladas en el mismo período. (Tablas 11 y 12). La producción nacional corresponde a aceros planos, no planos y especiales de los cuales se elaboran barras, alambros, perfiles medianos, rieles, tuberías, perfiles pequeños y flojos. Los productos antes mencionados son absorbidos por la industria de la construcción y metalmecánica.

## COMERCIO

La producción nacional no sufre la demanda y por tal razón las importaciones de aceros terminados desde 1974 a 1983 ha reemplazado la producción nacional, tal como se puede observar en la tabla 13. El fenómeno anterior probablemente se debe al menor costo y a la calidad de los aceros importados.

En cuanto a las exportaciones, éstas solamente corresponden a menos del 2% del consumo aparente del país la cual se puede deducir de la Tabla 14.

TAB. 11: Producción total Col. de acero en Lingote, 1974-1983 (miles de toneladas).

Año	Acerías Paz de Río	Acerías Semi-integradas	Total
1974	244.0	99.2	343.2
1975	266.6	123.6	390.2
1976	252.2	128.3	380.5
1977	211.9	142.7	354.6
1978	233.8	173.2	407.0
1979	223.8	166.2	390.0
1980	262.9	200.8	463.7
1981	222.5	223.2	445.7
1982	221.5	275.4	496.9
1983	275.8	268.3	544.1

TAB. 12: Composición de la producción total de acero terminado\*\* (Miles de toneladas)

Año	Aceros no planos	Acero plano	Aceros especiales	Total
1974	233.6	30.6	17.6	281.8
1975	277.0	12.0	13.5	302.5
1976	256.3	23.0	20.1	299.4
1977	249.6	23.9	13.6	287.1
1978	275.1	28.8	23.2	327.1
1979	260.6	23.4	23.0	307.0
1980	265.3	12.0	25.7	303.0
1981	262.0	11.6	25.3	298.9
1982	338.5	19.0	18.7	376.2
1983	378.5	28.3	13.6	420.4

\* Fuente: DASTUR Engineering Int y Empresas Siderúrgicas.

\*\* Fuente: ILFA Empresas Siderúrgicas, Ministerio de Desarrollo.

TAB. 13: Composición de las importaciones de acero terminado\* (Miles de toneladas)

Año	Acero no Plano	Aceros Especiales	Acero Plano Tuber. Semit.	Otros Semideter.
1974	16.3	23.9	286.2	58.5
1975	18.0	54.8	227.8	63.4
1976	31.0	49.5	225.1	55.1
1977	40.0	19.3	222.0	31.0
1978	58.7	63.4	319.0	17.3
1979	80.5	31.2	321.4	34.5
1980	71.7	37.2	336.3	16.7
1981	57.0	38.6	372.0	8.8
1982	106.7	18.3	451.2	22.2
1983	78.9	14.8	424.5	10.4

TAB. 14: Consumo aparente de acero terminado\* (Miles de toneladas).

Año	Producción Nacional	Importaciones	Exportaciones	Consumo Aparente
1974	281.8	384.9	5.7	661.0
1975	302.2	364.0	8.2	658.0
1976	299.4	361.0	16.7	643.7
1977	287.1	322.3	8.6	600.8
1978	327.1	458.4	7.2	778.3
1979	307.0	467.6	4.6	770.0
1980	303.0	461.9	8.8	756.1
1981	298.9	476.4	5.7	769.6
1982	376.2	598.4	7.2	967.4
1983	420.4	528.6	10.7	938.3

\* Fuente: DANE: Plan Indicativo, Incomex

\*\* Fuente: Departamento Nacional de Planeación, Incomex y DANE.

## PERSPECTIVAS

Al observar la Tabla 11 se puede deducir un mayor crecimiento de la producción de los aceros semi-integrados con respecto a los aceros por el proceso integrado; el fenómeno anterior se debe al menor costo en la inversión para la producción de aceros por el proceso semi-integrado.

Por otra parte para producir buenos aceros por la vía alto horno es necesario contar con depósitos de alta calidad, con los cuales no cuenta el país, en cambio por el proceso semi-integrado se pueden obtener con la importación de hierro de buena calidad o con chatarra de acero.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores es conveniente para un futuro próximo, intensificar la búsqueda de yacimientos de hierro de buena calidad o en su defecto estudiar la ubicación de una planta que procese hierro importado, chatarra de acero para suplir la demanda nacional y de esta forma no depender de las importaciones de aceros terminados.

## REFERENCIAS

- ACERIAS PAZ DEL RIO, 1980.- Ensayos en ejecución del IV Congreso Nacional de Minería. Bogotá.
- ALVARADO, B., 1940.- Informe sobre el yacimiento de Fe de Norro Pelón, Municipio de Campamento, Departamento de Antioquia. Informe 8. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1943.- Informe geológico general sobre los yacimientos de Hierro y Caliza de la región de la Pradera. Informe 432. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1943a.- Informe sobre los yacimientos de hierro y carbón de Nonoón. Informe 446. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1943b.- Informe geológico general sobre los yacimientos de Fe de la Calera, Municipio de Zipaquirá. Informe 457. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1943c.- Informe geológico general sobre los yacimientos de Hierro y Carbón de Guaca. Informe 458. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1944.- Informe Geológico general sobre yacimientos de Hierro, Carbón y Caliza de la región de Paz de Río. Boyacá. Informe 468.
- \_\_\_\_\_, 1949.- Yacimientos de Hierro en Colombia. Informe 722. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- ARCE, M., 1951.- Hierro de la región del Alto El Rosario, departamento de Bolívar. Informe 732.
- BATEMAN, A. M., 1957.- Yacimientos minerales de Rendimiento Económico. Ed. Omega, Barcelona.
- BUENAVENTURA, J., 1975.- Ocurrencias minerales en la región norte del departamento del Tolima. Informe 1688. Ingeominas. Bogotá.

- 1976.- Ocurrencias minerales en las regiones sur y oriental del departamento del Tolima. Informe 1694. Ingeominas. Bogotá.
- BULTRAGO, C.J., 1975.- Ocurrencias minerales en la región central del departamento del Tolima. Informe 1672. Ingeominas. Bogotá.
- 1976.- Ocurrencias minerales en el departamento del Huila. Informe 1698. Ingeominas. Bogotá.
- CAMACHO, R., NIGRINOS, R., ULLOA, C., 1972.- Investigación geológica del depósito de Hierro Oxidico del municipio de Sabanalarga, Boyacá. Informe 1618. Ingeominas. Bogotá.
- COCK, J., 1952.- Reseña sobre los minerales de Hierro del Valle de Medellín. Informe No. 1276. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- CRUZ, J., 1971.- Yacimientos de Hierro en Colombia y Depósitos de Fe en Sudamérica. Informe 1584. Ingeominas. Bogotá.
- DE LA ESPRIELLA, R., 1960.- Investigaciones Minerales en la región del Bajo Magdalena. Informe 1365. Bogotá.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADISTICA, DANE, 1971.- Boletín Mensual de Estadística. Nos. 240-241. Bogotá.
- 1978.- Yacimiento de Hierro de Ubalá. Ingeominas.
- COMEZ, H., 1943.- Informe sobre los yacimientos de Hierro del municipio de Pacho, Cundinamarca. Informe 456. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- HUBACH, E., 1929.- El Carbón y el Hierro de la Hacienda "El Carrizal", Municipio de Zipaquirá. Informe 173. Bogotá.
- 1940.- Exploración Geológica del Yacimiento de Hierro de El Codito, Hacienda de La Pradera, Municipio de Subachoque. Informe 439. Bogotá.
- 1951.- Informe sobre la Empresa "Siderúrgica Corradine" y sobre el Yacimiento de Hierro de Guayoque, Pacho, Departamento de Cundinamarca. Informe 751. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- 1952.- Yacimiento de Mineral de Hierro, Carbón y de Caliza en Colombia, como base de la Industria Siderúrgica. Informe 874. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- 1953.- El Yacimiento de Limonita de "Cueva de Chulos", Municipio de Guatavita, Departamento de Cundinamarca. Informe 909. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- INSTITUTO LATINOAMERICANO DEL FIERRO Y EL ACERO, 1974.- Anuario Estadístico de Siderúrgica y Minería del Hierro de América Latina.
- 1975.- Anuario Estadístico de Siderúrgica y Minería del Hierro de América Latina.

- \_\_\_\_\_, 1984.- **Panorama de la Siderúrgica Latinoamericana y Mundial** No. 288.
- KLEMIC, H., JAMES, H.L., EBERLEIN, G. D., 1973.- **United States Mineral Resources. Iron** U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 820. pp. 291-306.
- KLINGER, F.L., 1974.- **Mineral Yearbook. Vol.1**, p.674.
- \_\_\_\_\_, 1981.- **Iron Ore. Mineral Yearbook. Vol.1, Metals and Minerals.** pp. 425-440. Washington.
- \_\_\_\_\_, 1982.- **Iron Ore. Mineral Yearbook. Vol.1, Metals and Minerals.** p. 429-450. Washington.
- \_\_\_\_\_, 1983.- **Iron Ore. Mineral Yearbook. Vol.1. Metals and Minerals.** pp. 447-470. Washington.
- \_\_\_\_\_, 1984.- **Iron Ore. Mineral Yearbook. Vol.1. Metals and Minerals.** pp. 475-996. Washington.
- KLINGER, F.L. and COLLINS, C.F., 1976.- **Iron Ore. Mineral Yearbook. Vol. 1, Metals and Minerals.** pp. 647-672. Washington.
- MANJARRES, G., 1958.- **Minerales de Hierro en "Cerros Chancos", Municipio de Dagua, Departamento del Valle. Informe 1285.** Ingeominas. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1966.- **Yacimiento de Hierro de Ibirita, Departamento de Cundinamarca. Informe 1346.** Inv. Min. Nal. Bogotá.
- MARINÓ, J., 1976.- **Ocurrencias Minerales en el Departamento de Boyacá. Informe 1710.** Ingeominas. Bogotá.
- McLAUGHLIN, D.H., 1972.- **Recursos Minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta.** Ingeominas Bol. Geol. tomo IV. Bogotá.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. 1977.- **Boletín de Minas y Energía. 2a. época. Vol. 1, No. 3.** Bogotá.
- MUJIS, V., 1943.- **El Yacimiento de Hierro del "Espíritu Santo" en el corregimiento de Sevilla. Informe 269.** Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- NICHOLLS, E., 1969.- **Estudios de Geología General y Yacimientos Minerales de la región de Acandía, Departamento del Chocó. Informe 1357.** Inv. Min. Nal. Bogotá.
- OSPINA, C., 1967.- **Análisis actualizados sobre los Yacimientos de Hierro de La Pradera, La Caldera, Nemocón, Porras, Ibirita y vereda Ospina Pérez, departamento de Cundinamarca. Informe 1523.** Inv. Min. Nal. Bogotá.
- OTERO, A., 1975.- **Ocurrencias Minerales en el departamento de Norte de Santander. Informe 1685.** Ingeominas, Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1975.- **Ocurrencias Minerales en el departamento de Santander del Sur. Informe 1686.** Ingeominas. Bogotá.
- PABA, F., 1950.- **Yacimientos de Hierro de Rovira y el Valle, departamento del Tolima. Informe 629.** Serv. Geol. Nal. Bogotá.

- 1959.- Sobre la geología de la parte sur de La Macarena, Intendencia del Meta. Informe 1321. Bogotá.
- PÉREZ, H., 1971.- Manifestaciones de Hierro en los alrededores del Nevado del Ruiz. Informe 1598. Bogotá.
- PETERSON, E.C. and COLLINS, C.T., 1978-1979.- Iron Ore. Mineral Yearbook. Vol. 1. Metals and Minerals. pp.433-456.
- CORENZONI, G., 1971.- Los Minerales de Hierro de Pericos (Guasca, Cundinamarca). Informe DM-76. Instituto de Fomento Industrial. Bogotá.
- RESIREPO, H., 1959.- Mineral de Hierro (Lateritas) al norte de Medellín, departamento de Antioquia. Informe 1329. Inv. Min. Nal. Bogotá.
- 1967.- "Moco de Fierro" en la Jagua de Ibirico, Departamento del Cesar. Informe 1539. Inv. Min. Nal. Bogotá.
- BEYMOND, E., 1942.- Yacimientos de Magnetita de Espíritu Santo, corregimiento de Servilla, Ciénaga, Magdalena. Informe 293. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- RODRIGUEZ, E., 1971.- Ocurrencias Minerales en el Cuadrángulo K-12 y parte del K-11. Informe 1581. Ingeominas. Bogotá.
- 1972.- Ocurrencias Minerales en los Cuadrángulos J-11, J-12, J-13 y parte de los Cuadrángulos J-10 y K-10. Informe 1617. Ingeominas. Bogotá.
- SCHNEIBC, R., 1921.- Yacimientos de hierro en Colombia. Informe 451. Bogotá.
- SUÁREZ, H. V., 1942.- Informe Geológico sobre los Yacimientos de Hierro en la región de Nemocón, departamento de Cundinamarca. Informe 392. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- TSCHANZ, CH. M., 1970.- Recursos Minerales de la Sierra Nevada de Santa Marta. Ingeominas, Bol. Geol. Vol. 18(1):38-45.
- UJETA, G., 1960.- Yacimientos Minerales de Villa de Leiva, departamento de Boyacá. Informe 1363. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- ULLOA, C., 1979.- Hierro Oolítico en el Norte de Suramérica. Memorias del IV Congreso Latinoamericano de Geología.
- VESGA, C.J., 1972.- Reconocimiento Geológico y Geoquímico Preliminar del río Guaviare. Informe 1631. Ingeominas, Bogotá.
- VONITIEL, R., 1960.- Recursos Minerales de Colombia. Comp.Est. Geol. Of. de Colombia. Tomo X. Bogotá.

## MINERALES DE MANGANESO

BERNARDO CALLE Z. y GILBERTO ZAPATA G.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen.....	250
Introducción .....	251
Usos .....	252
Ambiente Geológico .....	253
Geoquímica .....	253
Mineralogía .....	253
Tipos de Depósitos .....	257
Técnicas de Prospección .....	261
Problemas en la exploración, explotación y beneficio .....	262
Beneficio .....	262
Situación Mundial .....	264
Reservas .....	264
Producción .....	264
Consumo y Precios .....	265
El Manganeso en Colombia .....	267
Depósitos .....	267
Producción .....	271
Reservas .....	271
Comercio .....	272
Impacto Ambiental .....	272
Perspectivas .....	272
Bibliografía .....	273

## RESUMEN

En el año de 1774, el químico sueco C.W. Schule identificó por primera vez el manganeso como elemento y en el mismo año J.G. Gahn, lo aisló como tal. Su utilización se remonta a tiempos antiguos cuando los egipcios y romanos lo utilizaron para controlar el color del vidrio, pero fue en el año de 1839 cuando se inició su empleo en la manufactura de hierros y aceros, mientras su uso en la manufactura de baterías data de 1866. El manganeso tiene aplicaciones principales en la siderúrgica, en la construcción de baterías y en la industria química.

Básicamente el manganeso se genera en las dorsales oceánicas o por meteorización de las rocas preexistentes, acumulándose en el primer caso bajo el fondo oceánico o sobre ese mismo fondo, bien en forma hidrógenica o diagenética. En el segundo caso el manganeso se deposita en regiones plataformas, en los fondos oceánicos o en lagos y ciénagas y sólo suele contener aporte terrígeno o una mezcla de este y material volcánico.

Las principales menas de manganeso son la hausmanita, pilolusita, manganita, braunita, rodocrosita, rodonita, alabandina, tefroita y polianita, aunque existen muchos otros minerales de manganeso que localmente pueden ser menos importantes.

Los principales depósitos de manganeso se pueden clasificar como sedimentarios, hidrotermales o de concentración resi-

dual. Entre los primeros sobresalen los nódulos de manganeso por su alto contenido de Cu, Co y Ni.

Hasta el presente, en Colombia sólo hay pequeños yacimientos pero hace falta un programa de prospección específico que delimite nuestras posibilidades reales. Los principales depósitos de manganeso en explotación son los de Vallesi (Dabeiba, Antioquia), La Sombra (Apía, Risaralda) y Piedroncha (Nariño). El dato más reciente sobre producción nacional es de 1981, año en el cual se produjeron 20.300 toneladas.

Las reservas mundiales están estimadas en 3746 millones de toneladas, de las cuales cerca del 80% están localizadas en Suráfrica y la URSS.

Los principales productores de manganeso en el mundo son la URSS, Sudáfrica, Gabon, China, Brasil y Australia.

La producción mundial en el año de 1983 alcanzó un total estimado de 22'291.000 toneladas.

## INTRODUCCION

Desde la antigüedad hasta las postrimerías del Siglo XVIII, el óxido de manganeso fue considerado como una variedad del hierro y sólo fue hasta el año de 1774, que C.W. Schule, un químico sueco, reconoció inicialmente el manganeso como elemento, y en el mismo año J.G. Gahn aisló el elemento manganeso por primera vez (JACOBY, 1983).

En tiempos remotos los egipcios y romanos utilizaron el óxido de manganeso para controlar el color del vidrio y de los productos de la alfarería. Después del Siglo XVIII, hasta el año de 1855, las menas de manganeso se utilizaron extensivamente en la manufactura del cloro. Hacia la mitad del Siglo XVIII se utilizó una mezcla de manganeso y óxidos de hierro como secante para aceites.

El uso del manganeso en la manufactura del hierro y acero data de 1839, cuando Heath demostró que él mejoraba la maleabilidad del producto. En 1856, se anunció el proceso Bessemer para la manufactura de los aceros pero no fue exitoso hasta cuando Robert Mushot introdujo el manganeso en forma de spiegel-eisen. Desde entonces creció su importancia comercial.

En 1865, Herdenson produjo por primera vez ferromanganeso con un contenido entre 25-30% de Mn. Luego Prieger produjo una aleación con 75% de Mn, proceso que fue mejorado por The Terre Noire Company.

Georges Lionel Leclanché, en junio de 1866, patentó su batería de celdas secas compuestas por dióxido de manganeso, cloruro de amonio y zinc (DE HUFF y JONES, 1980).

En Colombia no hay todavía una explotación minera de manganeso en forma organizada, sin embargo, la actividad exploratoria se remonta a la década del cuarenta cuando la comisión geológica de Caldas investigó por vez primera los depósitos de manganeso de Apía y Viterbo, departamento de Caldas, y Botero (1945), describió el depósito de Santa Bárbara.

## USOS

Las aplicaciones del manganeso se pueden dividir en tres grupos generales: usos metalúrgicos, usos para baterías y usos químicos.

El uso principal del manganeso está en la fabricación de los hierros y aceros, donde además de sus efectos como desulfurante, desoxidante y acondicionador, imparte a los aceros resistencia, dureza, tenacidad y durabilidad. Sus aplicaciones más importantes son en forma de ferromanganeso, silico-manganeso (DE HUFF, 1975).

El manganeso imparte resistencia, dureza y rigidez al aluminio, y dureza, rigidez y resistencia a la corrosión al magnesio. La adición de manganeso al aluminio se hace en la forma de briquetas de manganeso-aluminio, aleaciones maestras de manganeso-aluminio o como metal electrolítico.

El manganeso se agrega al magnesio en forma de flujo cuyo constituyente esencial usualmente es cloruro de manganeso. También se utiliza en aleaciones con cobre para la manufactura de bronce al manganeso utilizado en la fabricación de impulsores de barcos.

En la industria química, se emplea en forma de dióxido de manganeso como despolarizador en baterías de carga seca; la mena utilizada puede ser natural, sintética o una mezcla de ambos; su aplicación depende más de su gran contenido de oxígeno que del porcentaje de Mn.

Menas de óxidos de manganeso se usan también como oxidantes en la producción de la hidroquinona, en la lixiviación de menas de uranio y en la producción electrolítica del zinc. La hidroquinona se usa principalmente en los procesos fotográficos y en la producción de cauchos y plásticos.

Algunas menas de manganeso se utilizan para producir permanganato de potasio, sulfato de manganeso, óxido manganeso, cloruro de manganeso.

El permanganato de potasio es un potente oxidante usado en la purificación de los suministros de aguas públicas.

El sulfato de manganeso y el óxido de manganeso son las formas principales en las cuales el manganeso se adiciona, bien como elemento traza en los fertilizantes, o por aplicación directa a suelos pobres en manganeso.

El óxido manganeso es la forma preferida para la adición de manganeso a los alimentos de animales y aves, y tiene un uso muy importante en la manufactura de varillas de soldadura.

El cloruro de manganeso también se utiliza para producir compuestos organo-metálicos, usados como un aditivo en los aceites combustibles (fuel-oil), para inhibir la formación de "slag" y mejorar la combustión de motores. Menas de manganeso o los productos químicos obtenidos a partir de ellos se utilizan en la coloración de ladrillos, y en menor extensión para colorear o decolorar vidrios o artículos de cerámica. También en pinturas y barnices y en la producción de tintes, fungicidas y productos farmacéuticos.

## AMBIENTE GEOLOGICO

Según Bonatti (1978) uno de los resultados de la reciente revolución en la comprensión de la tierra por el hombre, que queda sintetizada en la teoría de la tectónica de placas, es la confirmación de que la mayoría de los yacimientos minerales metálicos, se originan en virtud de la intensa actividad físico-química que tiene lugar en los bordes existentes entre las inmensas placas en que se divide la litósfera.

Si el borde entre las placas es divergente, se separan debido a la ascensión de magma que procede del manto, el cual forma nueva corteza que se enfría y mueve hacia afuera en ambas direcciones; el lugar donde esto ocurre se llama un centro de expansión. Algunos yacimientos de manganeso se forman en dichos centros; unos se forman bajo el fondo oceánico, dentro de la corteza y el manto superior, mientras que otros se originan sobre el mismo fondo. La precipitación metálica sobre el fondo oceánico puede ser hidrogénica o diagenética.

En las zonas activas del fondo oceánico se han identificado yacimientos hidrotermales originados por precipitación de metales a partir de soluciones, ricas en sílice y metal, que salen del fondo oceánico debido a emanaciones hidrotermales.

Hay otros depósitos de manganeso, asociados con minerales de hierro, que se depositan en ciénagas y lagos. Son propios de regiones de tundras siendo más comunes en Rusia, Escandinavia y Canadá; forman cuerpos de aproximadamente 20 cm de espesor sobre el piso de los lagos, preferencialmente donde la profundidad del agua que los recubre está entre 1 y 3 m.

## GEOQUIMICA

Desde el punto de vista geoquímico, según Rankama y Sahama (1962), el manganeso es muy litófilo. En la litósfera superior el manganeso es oxifilo, con cierta tendencia calcófila, que se refleja en su comportamiento en los procesos metalúrgicos. El manganeso es, después del titanio, el oligoelemento más abundante de las rocas ígneas; constituye el 0.1% de la corteza terrestre. Por lo que respecta a su presentación en la tierra, el manganeso muestra también una tendencia biófila definida.

El comportamiento geoquímico del manganeso está controlado por el estado de oxidación del ambiente, siendo más común en la naturaleza en forma de iones  $Mn^{2+}$ ;  $Mn^{4+}$ ; con frecuencia se presentan juntos en un mismo mineral o en agregados minerales estrechamente intercrecidos, dando una serie continua de estados de oxidación.

En rocas ígneas se encuentra casi exclusivamente en forma de iones  $Mn^{2+}$ , mientras que en forma tetravalente predomina en los sedimentos y en las rocas sedimentarias; también se encuentra en ellas  $Mn^{3+}$ . Durante la meteorización del manganeso, éste se disuelve en forma de bicarbonato  $Mn(HCO_3)_2$  y se comporta como el hierro.

Los minerales de manganeso no hacen parte de los componentes primarios de las rocas ígneas. La mayor parte del manganeso que existe en estas rocas está oculto en las estructuras de los minerales petrográficos acompañando principalmente al hierro.

La dimensión iónica del manganeso  $Mn^{2+}$  es muy similar a la de  $Fe^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ , y por esto se facilita el reemplazo diadórico de  $Mn^{2+}$  por  $Ca^{2+}$  y por  $Fe^{2+}$ .

Cuando dos átomos o iones existentes en un mineral son capaces de sustituirse mutuamente en la estructura del mineral, ocupando cada uno la posición del otro se dice que son diadóricos (RANKAMA y SAHAMA, 1962).

A causa de cambios metamórficos se producen silicatos de manganeso. La temperatura de formación de los óxidos de manganeso es realmente baja por esto se descomponen con facilidad.

"Según Pettersson, la adsorción del manganeso por el polvo volcánico es más importante que su precipitación biológica o el plancton o que su precipitación inorgánica. El manganeso batial no puede, en su totalidad o en gran parte, proceder del agua del mar. Las erupciones volcánicas submarinas constituyen la fuente principal del manganeso depositado en el fondo oceánico, quedando en libertad el metal por la meteorización submarina, activada por la producción de ácido clorhídrico que disuelve más manganeso que hierro de las lavas submarinas" (RANKAMA y SAHAMA, 1962).

El manganeso es un elemento vital tanto para las plantas como para los animales y es factor de crecimiento de estos, encontrándose en mayor concentración en las especies marinas.

Como en el hierro, la geoquímica del manganeso en ambientes sedimentarios está gobernada por la oxidación-reducción. Las relaciones Eh y pH, presentan un campo de estabilidad relativamente grande para el  $Mn^{+2}$  disuelto (Fig. 1). En el pH del agua del mar (8) o de aguas superficiales dulces (5-7), el manganeso podría ser soluble solo bajo fuertes condiciones oxidantes.

La inclusión de azufre al sistema no cambia el cuadro general, pero la adición de carbonatos crea una gran región de las especies de Mn sólido son estables bajo condiciones reductoras (Fig. 2). Así, el comportamiento del Mn a bajo Eh está controlado por minerales de carbonato, en contraste con el Fe, el cual está más controlado por los sulfuros.

En ambientes de agua dulce, el pH es normalmente demasiado bajo para la precipitación de rodocrosita, pero en el mar, un ligero incremento en la cantidad de  $CO_3^{2-}$  podría facilitar la formación de rodocrosita si hay adición de manganeso.

Debido a que muchos sedimentos están en ambientes reductores a pocos centímetros por debajo de la interfase sedimento-agua puede haber una movilización de  $Mn^{+2}$  dentro del agua de los poros, mientras el hierro permanece fijo como un óxido o hidróxido.

En condiciones de bajo Eh y alto contenido de azufre, tales como en sedimentos marinos de ambiente reductor, el manganeso podría ser fijado como un sulfuro. Este Mn disuelto se esparce hacia arriba, bien para ser precipitado en la interfase por el oxígeno en el fondo del agua, o bien para dispersarse dentro del agua suprayacente y ser conducido a las partes más profundas de la cuenca (Fig. 3), dependiendo del contenido de oxígeno del agua (YEATS et al, 1979 en: MAYNARD, 1983).

Este último proceso es uno de los mecanismos por los cuales el Mn llega a ser enriquecido en arcillas pelágicas; otro es la alteración de basaltos en dorsales centro oceánicas.

El reflujó hidrotermal del agua del mar a través de la corteza oceánica en las dorsales, libera grandes cantidades de hierro y manganeso en el fondo oceánico; la mayor parte del hierro se precipita cerca a las fracturas, algunas veces con sulfuros de cobre, pero el Mn demuestra una mayor dispersión (LUPTON et al, 1980 en: MAYNARD, 1983), lo cual puede usarse como un indicador geoquímico para ciertos tipos de depósitos de mena (CRONAN, 1980, en: MAYNARD, 1983).

Tales diagramas pueden también usarse para explicar el enriquecimiento supergénico de menas ferromanganesas. La movilidad del Mn lo llevará con tendencia a moverse hacia abajo en los perfiles de suelo, dejando atrás una corteza rica en hierro. Si el Mn no es desprendido del suelo del todo, su movimiento hacia abajo puede producir enriquecimientos significativos.

Para la mayor parte de los óxidos de manganeso, la precipitación envuelve la oxidación del  $Mn^{+2}$  en solución a  $Mn^{+4}$ . Esta precipitación está favorecida por la presencia de una superficie de óxidos de manganeso o cuando no existe, de óxidos de hierro. Estas superficies de óxidos tienen una gran capacidad de adsorción de iones desde las soluciones, particularmente los cationes de metales de transición.

La alta capacidad de los óxidos de manganeso para la adsorción de cationes conlleva a un enriquecimiento en un número de metales de transición de interés económico, particularmente Fe, Ni y Co.

La comprensión de la influencia de microorganismos es otro problema en la geoquímica del manganeso. Las bacterias catalizan la oxidación del  $Fe^{+2}$  (STUMM y MORGAN, 1970, en: MAYNARD, 1983), particularmente a bajos pH donde la reacción abiótica es lenta, y ciertas especies de bacterias están asociadas con óxidos de Mn, pero actualmente se debate el papel que ellos puedan jugar en la precipitación del manganeso. Algunos estudios sugieren un papel muy importante en la nucleación de los nódulos de manganeso o una acción catalítica.

## MINERALOGIA

Hay más de cien minerales que contienen manganeso; los principales aparecen en la Tabla 1, según Jacoby (1983).

Para sus estadísticas locales el U.S. Bureau of Mines ha usado los términos: mena de manganeso para aquellas con un contenido del 35% o más de manganeso; mena de manganeso ferruginoso para aquellas con un porcentaje entre 10-35% de manganeso y mena de hierro manganesífero para las que contienen entre 5 y 10% de manganeso. El material reportado como mena puede haber sido concentrado, o tratarse de nódulos, sinter, o mena sintética (DE HUFF y JONES, 1980). El término general mena manganesífero es empleado por el U.S. Bureau of Mines para definir cualquier mena importante de manganeso con su contenido mayor del 35% de Mn pero no inferior al 5%.

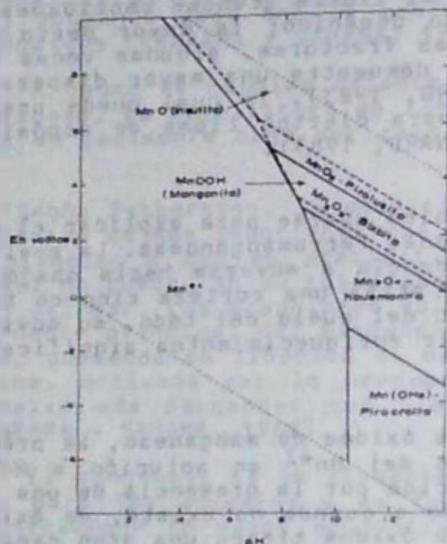


FIG.1: Diagrama Eh-pH para óxidos de Mn disueltos.

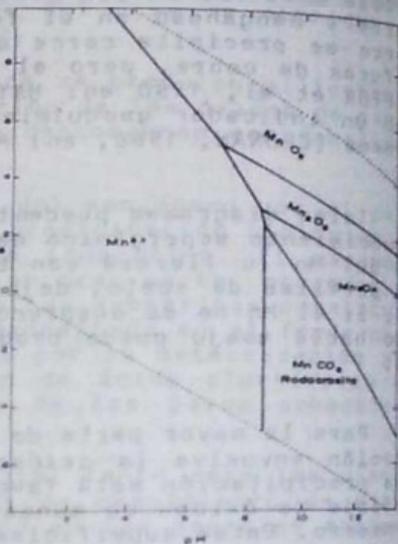


FIG.2: Diagrama Eh-pH para óxidos de Mn y carbonatos.

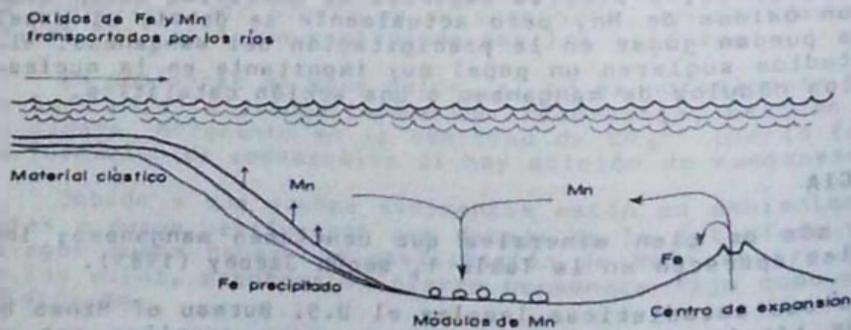


FIG. 3: Transferencia del Mn desde sedimentos clásticos de aguas someras y desde basaltos generados en centros de expansión de aguas profundas.

TAB. 1: Principales minerales de manganeso.

Mineral	Composición Química	% de Mn
Hausmanita	$Mn_2O_4$	72
Polianita	$MnO_2$	63.1
Pirolusita	$MnO_2$	60-63
Criptomelana	$KR_{2-16}O_{16}R$ (R=Mn)	variable
Pailomelana	$BaMnMn_8O_{16}(OH)_4$	45-60
Coronadita	$PbR_{2-16}O_{16}R$ (R=Mn)	variable
Hollandita	$BaR_8O_{16}$	variable
Manganita	$Mn_2O_3 \cdot H_2O$	62
Braunita	$3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$	62
Tefroita	$2MnO \cdot SiO_2$	54.3
Rodocrosita	$MnCO_3$	47
Rodonita	$MnSiO_3$	42
Spesartita	$3MnO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$	33.3
Wad	Oxidos de Mn Hidratados	variable
Franklinita	$(Fe, Mn, Zn)O$ $(Fe, Mn)_2O_3$	variable
Asbolan	Wad cobaltífero	variable
Alabandita	$MnS$	63.14

## TIPOS DE DEPOSITOS

Existen diversos tipos de depósitos de manganeso según los ambientes geológicos en que ellos se generan. Entre éstos se destacan por su importancia los generados en dorsales centro-oceánicas (hidrotermales), los que se acumulan en los lechos marinos o en lagos y ciénagas (sedimentarios) y aquellos productos de concentración residual. Los mejores ejemplos de éstos, según Jacoby (1983), se encuentran en las vetas metamorfizadas de Madhya, Prodesh, India y los depósitos lateríticos de Orissa y Bihar, India; nódulos en las arcillas residuales en las Filipinas, al sureste de los Apalaches y Arkansas (E.U.), Ghana y Brasil.

## DEPOSITOS SEDIMENTARIOS

Entre estos depósitos cabe distinguir aquellos que sólo tienen aporte terrígeno, volcánico o una mezcla de ambos. Bonatti (1978) diferencia los depósitos hidrogénicos y los diagenéticos.

**Depósitos hidrogénicos.**— El término hidrogénico significa originado a partir del agua. Se forman por acumulación lenta, sobre el fondo oceánico, de elementos metálicos procedentes del agua del mar. Estos llegan a él acarreados, en parte, por los ríos a los cuales han sido incorporados a raíz de la meteorización y la descomposición de las rocas continentales.

El manganeso, generalmente junto con el hierro, se separa del agua del mar a través de reacciones inorgánicas por las que dichos metales disueltos son oxidados (por oxígeno disuelto en el agua marina, según BONATTI, 1978), formando óxidos e hidróxidos insolubles.

Separados de esta forma, los metales se depositan en el fondo oceánico a modo de diminutas partículas o como películas y costras sobre cualquier tipo de material sólido que aflore en el suelo del mar.

Los yacimientos hidrogénicos entre los que se encuentran los nódulos de manganeso, se encuentran particularmente bien

desarrollados en aquellas regiones de las cuencas oceánicas que reciben un aporte mínimo de materiales procedentes de las tierras emergidas (las plataformas abisales, elevaciones submarinas y los bancos aislados y profundos).

Según Mitchell y Garson (1981), los nódulos de ferromanganeso y las incrustaciones se presentan ambos cubriendo lavas basálticas en dorsales oceánicas de expansión, donde son considerados como depósitos hidrotermales, y cubriendo sedimentos lejos de las crestas de las dorsales donde se consideran como de origen hidrogénico o autigénico.

Los depósitos hidrogénicos se pueden distinguir por su relación Fe/Mn de valor aproximado 1, alto contenido de metales traza (Ni, Co, Cu), altos valores de torio y bajas relaciones U/Th que se considera reflejan su lenta tasa de acumulación (BONATTI, et al., 1976b; en: MITCHELL y GARSON, 1981). Ellos también se diferencian de los depósitos hidrotermales por sus fuertes anomalías positivas de Ce y en la distribución normalizada de chondrita de los elementos de tierras raras.

Los nódulos se presentan en una gran variedad de marcas sobre la superficie del piso oceánico. Son más abundantes, localmente excediendo  $5 \text{ kg/m}^2$ , en áreas donde las fuertes corrientes de los fondos oceánicos evitan la acumulación de sedimentos no químicos y pueden haber generado una superficie de erosión. Así ellos han sido reportados desde las cimas y flancos de las elevaciones submarinas y desde las llanuras oceánicas pero son especialmente importantes en áreas de las cuencas oceánicas profundas. Allí están cubiertos por arcillas rojas, aunque algunos reposan sobre carbonatos. Los nódulos son de interés económico por su contenido de Cu, Ni, Co, además del Mg.

**Depósitos diagenéticos.**— Según Bonatti (1978) otra fuente que origina yacimientos metálicos en los fondos oceánicos es el agua existente entre los intersticios del sedimento, dando lugar a los depósitos diagenéticos. El término deriva de la palabra diagénesis, que define todas las reacciones físico-químicas (compactación y recristalización incluidos) que se dan en un sedimento una vez depositado.

Estos yacimientos se forman en las zonas del fondo oceánico, donde se incorporan al sedimento notables cantidades de materia orgánica; tales zonas suelen ubicarse bajo masas de agua con vida abundante.

La oxidación y descomposición gradual de la materia orgánica del sedimento empobrecen en oxígeno disuelto el agua existente en los intersticios y crean unas condiciones reductoras hasta cierto nivel por debajo del fondo marino. Cuando las partículas de hierro y manganeso que se formaron hidrogénicamente llegan a ese nivel, se disuelven conforme se van enterrando gradualmente en el sedimento.

El hierro y el manganeso pasan a tener entonces concentraciones muy elevadas en la solución existente entre los intersticios del sedimento. Luego, vuelven a la zona oxidada del sedimento y allí precipitan de nuevo en forma de partículas sólidas.

Cuando el límite entre la zona oxidada y reducida, se halla cerca de la interfase sedimento-agua, las concreciones

las costas metálicas pueden formarse sobre el fondo oceánico en virtud de ese proceso.

Los depósitos diagenéticos tienen una composición distinta a la que evidencian los hidrogénicos. Por ejemplo la relación hierro/manganeso es menor. El hierro es menos móvil que el manganeso en sedimentos reducidos, lo cual se debe en parte, a que puede separarse fácilmente de la solución por combinación con el azufre para dar partículas de sulfuro de hierro. Según Jacoby (1983) los depósitos sedimentarios típicos están representados por los depósitos de Nikopol y Chiatura en la URSS.

#### DEPOSITOS HIDROTHERMALES

Según Mitchell y Garson (1981), hay algunos depósitos metalíferos ricos en manganeso del tipo hidrotermal que han sido identificados en complejos ofiolíticos sobre o dentro de los continentes, como en el Cinturón de los Apeninos de Italia (BONATTI, et al, 1976b, en: MITCHELL y GARSON, 1981), y en Complejos de roca verde-chert del noroeste de USA (SNYDER, 1978, en MITCHELL y GARSON, 1981). En los Apeninos, depósitos de manganeso bandeados y masivos han sido explotados en cherts depositado en la base de una secuencia sedimentaria sobre basaltos no vesiculares; los depósitos bandeados consisten de capas con más de 1 m de espesor, extendiéndose lateralmente por cientos de metros, mientras los depósitos masivos ocurren como lentes desde pocos metros hasta 20 m de grueso con una extensión lateral de 10-200 m.

La mayoría de los depósitos consisten en mezclas de cuarzo y braunita con pequeñas cantidades de otros minerales incluyendo magnetita, pirolusita, calcita, rodocrosita, barita y piemontita. La braunita, que no se encuentra en los depósitos de manganeso presentes actualmente en el piso oceánico, probablemente se formó durante un metamorfismo de bajo grado. En el noroeste de USA, complejos de rocas verdes-chert de edad Paleozoica y Mesozoica, incluyendo sedimentos manganesíferos interestratificados con chert abundante en radiolarios. Los depósitos contienen carbonatos impregnados de manganeso y ópalos acompañados por braunita, bementita y ocasionalmente por hausmanita y barita en menor porcentaje (SNYDER, 1979, en MITCHELL y GARSON, 1981); los minerales originales fueron probablemente capas singénicas de carbonatos impregnados de manganeso, sílice amorfa y óxidos de manganeso, posteriormente afectados por alteración hidrotermal; los lentes, superiores de 250 m de largo y 25 m de grueso se consideran formados desde fuentes termales sobre el piso de los océanos.

Otros ejemplos de depósitos probablemente hidrotermales, incluyen los yacimientos de edad Proterozoica como el caso de Lengban en Suecia, consistentes en su mayor parte en menas de hausmanita, braunita y hematita y los de Franklin Furnace y Sterling Hill en USA (MITCHELL y GARSON, 1981).

Según Bonatti (1978), estos depósitos se generan al penetrar el agua del mar por las fracturas del basalto de la corteza que se halla cerca de un centro de expansión, hasta una profundidad de varios kilómetros alcanzando temperaturas de cientos de grados centígrados. El agua caliente extrae varios elementos del basalto, perdiendo también algunos. La convección térmica hace circular de nuevo el agua así enriquecida hacia el fondo oceánico, donde se descarga a través de surgencias termales. El hierro y el manganeso se oxidan, se separan

parcialmente y precipitan, junto con la sílice y otros elementos menores.

En los últimos 15 años se han reportado sedimentos químicos ricos en metales, localizados en centros de expansión recientes, a lo largo de las dorsales activas en los principales océanos y las regiones que se están convirtiendo en oceánicas, como el Mar Rojo, el Afar y el Golfo Aden.

La mayoría de los depósitos son ricos en hierro, pero al menos existe un sedimento rico en Mn y pobre en hierro.

Mientras estos depósitos probablemente tienen un origen similar, difieren en su significado de otros depósitos análogos en ofiolitas.

Los yacimientos hidrotermales de origen químico presentan notorias diferencias con respecto a los yacimientos hidrogénicos:

- Los yacimientos hidrotermales de origen químico presentan notorias diferencias con respecto a los yacimientos hidrogénicos.
- Los depósitos hidrotermales presentan menor concentración de metales traza (Ni, Cu, Co, Pb, Zn).
- El contenido de elementos denominados tierras raras es mayor en los hidrogénicos que en los hidrotermales.

#### DEPOSITOS DE CIENAGA Y LAGOS

Generalmente están asociados con depósitos de hierro y pueden ser de edad terciaria, más antiguos o en proceso de formación. Son propios de regiones de tundras y son más comunes en Rusia, Escandinavia y Canadá. Forman cuerpos de aproximadamente 20 cm de espesor sobre el piso de los lagos, preferencialmente donde la profundidad del agua que los recubre está entre 1 y 3 m; la mena está constituida generalmente por óxidos amorfos como criptomelana, psilomelana y pirolusita que se presentan como costras o masas pequeñas de forma oolítica o nodular. La Ley promedio de estos depósitos oscila entre 5 y 20% de Mn y 25 y 40% de Fe.

En estos casos el manganeso se deriva por solución y movimientos de  $Mn^{++}$  y  $Fe^{++}$ , como bicarbonatos y humatos a través de suelos cenagosos de bajo pH y Eh.

#### PRINCIPALES DEPOSITOS EN EL MUNDO

Según Maynard (1983), entre el 75 y el 80% de las actuales reservas de manganeso en el mundo están en los depósitos de Nikopol y Chiatura en la URSS de edad Oligoceno. La mena en el depósito de Nikopol se presenta en un solo nivel, de 2 a 3 m de grueso a través de una extensión de 25 km de ancho y de 150 km de largo. La secuencia vertical muestra que el depósito se formó durante transgresiones sobre el basamento cristalino. Localizado entre la mena y el basamento, en la mayoría de los sitios, hay un conjunto de areniscas glauconíticas que contienen acumulaciones de conchas (*Glycymeris* y *Cyprina*), indicando depositación sobre zonas costeras. (GRYZNOV y BARG, 1975, en MAYNARD, 1983). El techo del estrato manganesífero está marcado por la presencia de hidróxidos de hierro en las menas de

vididos y por glauconita en la mena de carbonatos, ya que la mena cambia de norte a sur de óxidos a carbonatos correspondiendo a un incremento en la profundidad del agua. Los sedimentos suprayacentes son predominantemente arcillas montmorilloníticas, gris verdosas de grano fino.

**Depósitos tipo Morocco.**- Según Varentsov, 1964, (en: MITNARD, 1983), en estos depósitos hay dos tipos de menas importantes: en venas y depósitos volcano-sedimentarios de edad precámbrico a paleozoico temprano, y depósitos singenéticos de bajo grado de edad mesozoica, en su mayoría Liásicos y Cenomaniaco-Turonianos. En un corte vertical la mena se coloca entre material clástico y carbonatos, aparentemente reflejando una posición intermedia entre una secuencia proximal-distal. Los clásticos son una secuencia gruesa de estratos rojos continentales a plataformales. Los carbonatos son en su mayoría dolomitas de grano fino, con algunas intercalaciones delgadas de chert y restos de ostras (*Exogyra Africana*), indicando condiciones agitadas someras. De la asociación estratos rojos y yeso, se puede inferir que el ambiente de depositación fue cerca a la línea de costa en un clima árido. Mineralógicamente, las menas consisten de pirolusita con psilomelana y coronadita.

### TECNICAS DE PROSPECCION

Aunque muchas ocurrencias de manganeso son conocidas, el tamaño limitado de estos depósitos los hace marginales a sub-marginales. De ahí que el primer paso en cualquier exploración sea la realización de la cartografía geológica y prospección geoquímica regional.

Ya que el manganeso tiene una relativa alta solubilidad, las técnicas geoquímicas pueden ser una herramienta efectiva en un programa de exploración, el cual puede adelantarse a escala regional mediante la recolección de sedimentos activos y, a escala local, mediante la toma de concentrados de batea y/o suelos. Según Jacoby (1983), donde los depósitos contienen hidróxidos de Mn hidratados) u óxidos blancos en arcillas, se puede emplear el muestreo de suelos; pero también opina que donde hay material residual o detrítico en arcillas, el tamaño de la partícula de la mineralización de manganeso varía de grandes boulders a material menor a malla 200, lo cual convierte el muestreo de suelos en un método difícil de emplear.

Determinado el objetivo mediante la cartografía y geoquímica regional y local, debe adelantarse un programa de exploración geofísica cuando las condiciones económicas así lo permiten, y calcular el posible tamaño del depósito, delimitándolo mediante los procedimientos anteriores.

El trabajo de exploración puede ser complementado en sus últimas etapas por un programa de perforación que puede suministrar datos muy valiosos relativos a la mineralización, tenores, reservas, etc.; el método rotatorio es el más empleado.

Las consideraciones básicas que deben tenerse en cuenta en la exploración se refieren al tamaño de los depósitos, su ley y a las impurezas asociadas con la mineralización de manganeso.

Debido a la diversidad y complejidad de las formaciones manganesíferas, las impurezas son numerosas y de naturaleza diversas. Según Jacoby (1983), la siguiente es una lista generalizada de los tipos de impurezas más frecuentes:

- **Impurezas metálicas:** Minerales de hierro, plomo, zinc, cobre, arsénico y plata
- **Impurezas no metálicas:** Minerales de azufre y fósforo
- **Ganga:** Sílice, alúmina, cal, magnesio y bario
- **Volátiles:** Agua, anhídrido carbónico y materias orgánicas

En la evaluación de los depósitos deben tenerse en cuenta otros factores importantes, referentes a la facilidad de beneficio de la mena y la proyección de los precios a través de la vida útil del proyecto. La necesidad de concentrar las menas obtenidas de los diferentes depósitos y de disminuir las impurezas ha incrementado los costos de beneficio, ya que para cada depósito de grandes dimensiones es necesario implementar plantas de molienda, procesos de concentración por gravedad y flotación, y en algunos casos, procesos de refinación.

### PROBLEMAS EN LA EXPLORACION, EXPLOTACION Y BENEFICIO

En el país no se han adelantado estudios de orientación que nos permitan disponer de métodos y técnicas de exploración apropiadas a nuestros ambientes geológicos, climatología y relieve. A lo anterior se agregan los escasos recursos económicos con que cuentan las entidades oficiales del sector minero para adelantar las actividades de prospección. Por ello, mientras el país no subsane los problemas tecnológicos y económicos seguirá ignorando su potencial minero y por consiguiente importando las materias primas minerales para su desarrollo.

- **Explotación:** La mayoría de los depósitos y manifestaciones conocidas se presentan encajados en secuencia volcánico-sedimentarias y metasedimentarias cuyo buzamiento es por los 40°, lo cual implica que su explotación tiene que ser mediante minería subterránea, a unos costos de operación mayores.
- **Beneficio:** En este aspecto tampoco el país tiene una tecnología apropiada para el tratamiento de las menas que conforman sus depósitos. Ensayos preliminares con menas del depósito La Sombra (Municipio de Apía), mostraron la ineficacia de los métodos de separación por gravedad y dificultades para aplicar las técnicas de flotación.

### BENEFICIO

Según el Instituto Geológico y Minero de España (1976), el método de concentración depende de las características del mineral. Cuando la mena es nodular, en arcilla fácilmente diagregable y los nódulos son de ley alta, el beneficio se hace por medio de lavadero de rodillos o de trommel.

En general, cuando hay silicatos y carbonatos los métodos empleados son concentración por gravedad, flotación y separación magnética. La separación por gravedad consiste en someter el material a un sistema de molienda convencional de varias etapas con un tamiz o criba a la cabeza de los trituradores primarios y secundarios. Dicha molienda se efectúa mediante la aplicación de trituradoras de mandíbulas, de conos y de molinos de rodillos. Después de molido el mineral, pasa a través de unas cribas hidráulicas obteniéndose el concentrado final.

la fracción de lodos se trata en un espesador de rastrillo hasta adecuarla para la flotación. Dicho espesador está diseñado para el tratamiento de tres clases de menas de manganeso: menas con una ganga de elevado contenido en calcita, menas con una ganga mezcla de sílice y calcita y menas con una ganga silíceas.

Las dos primeras requieren una preflotación para eliminar la calcita de la espuma, ya que de quedarse en el circuito de flotación, flotará con la mena de manganeso, dando un concentrado pobre en metal; los residuos de este proceso se someten luego a flotación para obtener el concentrado de manganeso. Las combinaciones de reactivos empleados con ácidos grasos, líquidos densos, utilizan silicato sódico como dispersante. En el circuito se emplean acondicionadores con agitadores para obtener la mezcla correcta de los reactivos en la pulpa, además de las celdas de preconcentración. Esto proporciona la mezcla adecuada para lograr la floculación esencial en la flotación de los concentrados.

#### CONCENTRACION DE MENAS DE BAJA LEY

Se ha desarrollado un gran número de procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos para el beneficio de menas de baja ley. Entre ellos están el proceso "Dean-Lente" del carbonato de amonio, utilizado en la mina de Cuyuna Ronge en Minesota (USA); consta de una tostación de mineral, seguida de la lixiviación con una solución amoniaca de carbonato de amonio para obtener un carbonato de alto grado y la reducción del carbonato al óxido.

En el proceso "Dangherty" de la Republic Steel Corp., las menas de baja ley se muelen y tratan con agua y anhídrido sulfuroso para dar  $MnSO_3$  y  $MnSO_4$ . La solución resultante se hierve por medio de una inyección de vapor a presión y finalmente se filtra y se tuesta en un horno giratorio para dar óxido de manganeso. De una forma similar el proceso "Welch" de Manganese Chemicals Corp. disuelve el manganeso de los menas de baja ley formando  $MnSO_4$ , que se lleva a una celda electrolítica, dando  $MnO_2$  de una buena calidad para baterías. Asimismo, el proceso "Bruce Williams" consiste en la tostación de las menas y el tratamiento con sales amoniaca para producir carbonato de amonio. El proceso "Nossen" emplea un sistema regenerativo de ácido nítrico para obtener dióxido de manganeso a partir de óxidos de manganeso de baja ley. El proceso "Sheer Korman" de la Vitro Corp. trata menas silíceas con un arco de alta densidad.

En el tratamiento de carbonatos de manganeso por el método Anaconda, se usan hornos rotatorios para producir óxidos en forma de nódulos a partir de los concentrados de la flotación. Algunas menas han sido tratadas por separación de medios densos mientras otras han sido sometidas a separación electro-magnética. La pérdida de lodos en el tratamiento de menas blandas tales como pirolusita y Wads es siempre alta y la recuperación del manganeso a partir de estos lodos ha sido abocada con espirales Humphreys y varios dosificadores.

## SITUACION MUNDIAL

## RESERVAS

Aunque el manganeso es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre, la distribución de los depósitos de tamaño económico, entendiendo como tales aquellos con un contenido mínimo del 35% de Mn, está restringida a unos pocos países. Cerca del 80% de las reservas estimadas están localizadas en Sudáfrica y la URSS, y el 95% del total mundial se produce en siete países. Sudáfrica tiene el 41% y la URSS el 37% de las reservas mundiales, estimadas según Jacoby (1983) en 700 millones de toneladas de Mn.

## PRODUCCION

La producción de manganeso está muy concentrada geográficamente como lo indica la Tabla 2. La URSS es el primer productor con el 46.7% en 1983, seguida de Sudáfrica con el 20.25%, pero su producción declinó en un 11% en 1983, debido a la recesión en el mercado, según O'Faircheallaigh (1985).

El manganeso juega un papel vital en la industria contemporánea, es indispensable en la producción de acero, pero en los últimos años se ha observado una disminución en su consumo habiendo rebajado la demanda, los precios y ganancias. La Tabla 3, muestra los mayores productores de ferromanganeso por país, durante 1960 y 1978, en porcentaje sobre la producción total.

No se han encontrado todavía sustitutos ideales para el manganeso como material aleatorio. Más del 90% se utiliza en la metalurgia, el resto en la fabricación de baterías secas (pilas), productos químicos, cerámica y aleaciones con otros metales. En los años 80 se incrementó fuertemente el uso con aplicaciones no metalúrgicas.

TAB. 2: Producción Mundial de Manganeso, 1982 y 1983 en miles de toneladas (Tomado de O'Faircheallaigh, 1985).

País	1982		1983		1984*	
	Total	%	Total	%	Total	%
Sudáfrica	5.216	21.8	2.885	12.9	4.000	17.3
URSS	9.821	41.0	10.400	46.7	10.100	43.7
Gabón	1.490	6.2	2.030	9.1	2.000	8.6
Australia	1.132	4.7	1.353	6.1	1.200	5.2
Brasil	2.225	9.3	1.898	8.5	1.700	7.4
China	1.500	6.3	1.500	6.7	1.500	6.5
India	1.470	6.1	1.260	5.7	1.400	6.1
Otros	1.101	4.6	965	4.3	1.200	5.2
Total	23.955	100.0	22.291	100.0	23.100	100.0

\*Tomado de Minería, Agosto 1985.

En 1983, los países socialistas de Europa Oriental suministraron alrededor del 50% de la mena de manganeso mundial. El MCE y Japón suministraron cada uno alrededor del 10% y los EE.UU., Sudáfrica, Noruega, India, Brasil, Australia y México el resto.

El crecimiento de la producción mundial durante 1984 mostró un ligero repunte con respecto a la producción de 1983.

aunque sin igualar el volumen de 23.9 millones de toneladas producidas en 1982.

TAB. 3: Mayores productores de Ferromanganeso por país en 1960 y 1978. (Tomado de O'Faircheallaigh, 1985).

País	1960	% del total	1978
Sudáfrica	4.0		11.5
URSS	22.5		21.0
Australia	0.2		1.7
Brasil	-		3.2
México	0.5		3.0
India	2.8		5.2
USA	27.8		5.9
Japón	5.4		10.9
Francia	9.6		9.3
R.F.A.	9.7		5.0
Reino Unido	6.4		1.6
Noruega	1.7		6.6
España	0.9		3.3
Otros	8.5		11.8

## CONSUMO Y PRECIOS

Basado en una tasa de crecimiento del 1.4% para la industria del acero en los EE.UU. la USBM estima que para el 2000 la demanda para el manganeso en dicho país será de 1.62 a 2.16 millones toneladas, con requerimientos para el resto del mundo entre 14.15 y 19.78 millones de toneladas, basado sobre un crecimiento anual para la industria del acero del 2.9% (MINING JOURNAL, 1984)

En 1978, según O' Faircheallaigh (1985), el consumo de ferromanganeso se distribuyó así: Europa Oriental el 27%, los EE.UU., 20.6%, el MCE 20% aproximadamente y el Japón 10.9%.

Los EE.UU., Japón y los países del Mercado Común Europeo (MCE) son completamente dependientes de las importaciones para satisfacer sus necesidades de manganeso, bien como mena o como ferroaleación, siendo ahora su principal abastecedor Sudáfrica.

Los precios de mineral de manganeso son establecidos en dólares por tonelada de mineral o por unidad de manganeso. En el último caso para obtener el precio de una tonelada de mineral con un contenido de 48% de manganeso, por ejemplo, se multiplica el precio unitario de la tabla 4 por 48. Las dos primeras columnas de la tabla 4 muestran datos de precios en dólares, corrientes y constantes de 1960 a 1982; la columna final indica precios F.O.B. (puesto en muelle), para los exportadores de GEMCO al Japón en el período para el cual se tiene disponible el dato, 1972-1984 (O'FAIRCHEALLAIGH, 1985).

Los precios de mineral de manganeso se han mantenido en los mismos niveles deprimidos de 1980, sin mostrar tendencia a recuperación.

## SUMINISTROS Y DEMANDAS

Después de la Segunda Guerra Mundial hubo una gran demanda de manganeso debido al crecimiento de la industria del acero y a la acumulación de un gran "stock" por parte de los Estados Unidos hasta el año de 1965. Entre el año de 1960, en que se consumieron 11.5 millones de toneladas, y el de 1975, con un consumo alrededor de 21 millones, hubo otro gran incremento debido al apogeo de la industria siderúrgica. Durante los años recientes la demanda ha disminuido debido a la depresión de la industria del acero y a la caída en el consumo de manganeso por unidad de acero producido, el cual varía de país a país entre 3 y 9 kgr por tonelada de acero.

Se presume según O'Faircheallaigh (1985), que la demanda tendrá una disminución adicional, cuando Brasil desarrolle su depósito de hierro Carajas, con alto contenido de manganeso.

El comportamiento en la producción de mena y ferromanganeso ha declinado significativamente durante los años recientes. La producción de mena disminuyó desde 26.0 millones de toneladas en 1976 a 22 millones en 1983, mientras la producción de ferromanganeso en EE.UU. disminuyó desde 288.000 toneladas en 1979 a menos de 100.000 en 1983, y la producción japonesa bajó de 643.000 a 376.000 toneladas en el mismo período.

TAB. 4: Promedio anual de precios de mena de manganeso en US dólares por tonelada larga. Unidad manganeso (tonada de O'Faircheallaigh, 1985).

Año	Precio actual	Basado en dólares comunes 1981	F.O.B. Precio actual
1960	0,94	2,65	
1961	0,94	2,63	
1962	0,91	2,50	
1963	0,81	2,19	
1964	0,69	1,84	
1965	0,73	1,90	
1966	0,76	1,92	
1967	0,67	1,64	
1968	0,60	1,41	
1969	0,50	1,12	
1970	0,54	1,14	
1971	0,60	1,21	
1972	0,60	1,16	
1973	0,65	1,19	52
1974	0,90	1,52	63
1975	1,38	2,13	80-1
1976	1,45	2,13	1,21
1977	1,48	2,05	1,32
1978	1,40	1,81	1,36
1979	1,40	1,67	1,22
1980	1,70	1,86	1,19
1981	1,72	1,72	1,36
1982	1,58	1,67	1,40
1983	1,44 - 1,47	-	1,32
1984	-	-	1,17

## EL MANGANESO EN COLOMBIA

## DEPOSITOS

Existe información dispersa y de difícil consecución sobre varios prospectos de manganeso, y por lo general solo se refiere a su localización y mineralogía. Las hipótesis planteadas sobre la génesis, marco geológico y tectónico no están acordes con los conocimientos actuales. Hay también incertidumbre en lo referente a los parámetros de reservas, mineralogía y paragénesis. Los depósitos más conocidos son (Fig. 4):

## MINA LA SOMBRA - MUNICIPIO DE APIA

Está localizada al noreste de Apía, en las cabeceras de la quebrada Honda, cerca de la carretera que de este municipio conduce a Belén de Umbria. Fetzer (1942) y Guarín (1971) efectuaron algunos estudios sobre este yacimiento. Aunque de forma todavía indefinida, se presenta encajado en una secuencia volcánico-sedimentaria, de edad cretácica, según las exploraciones adelantadas por los geólogos del INGEOMINAS, Medellín. Dicha secuencia se observa muy plegada mostrando una estructura de bloques fallados y está formada por limolitas silíceas, cherts de estratificación media a gruesa de color gris, tobas de tonalidad verdosa, basaltos y diabasas.

Análisis por difracción de Rayos X efectuados por INGEOMINAS, han mostrado la presencia de los siguientes minerales: rodocrosita, hausmanita, bementita y pirolusita. La mena está constituida por rodocrosita con tenores de 28 a 51% de Mn y pirolusita como producto de oxidación del carbonato con tenores hasta del 43% de Mn.

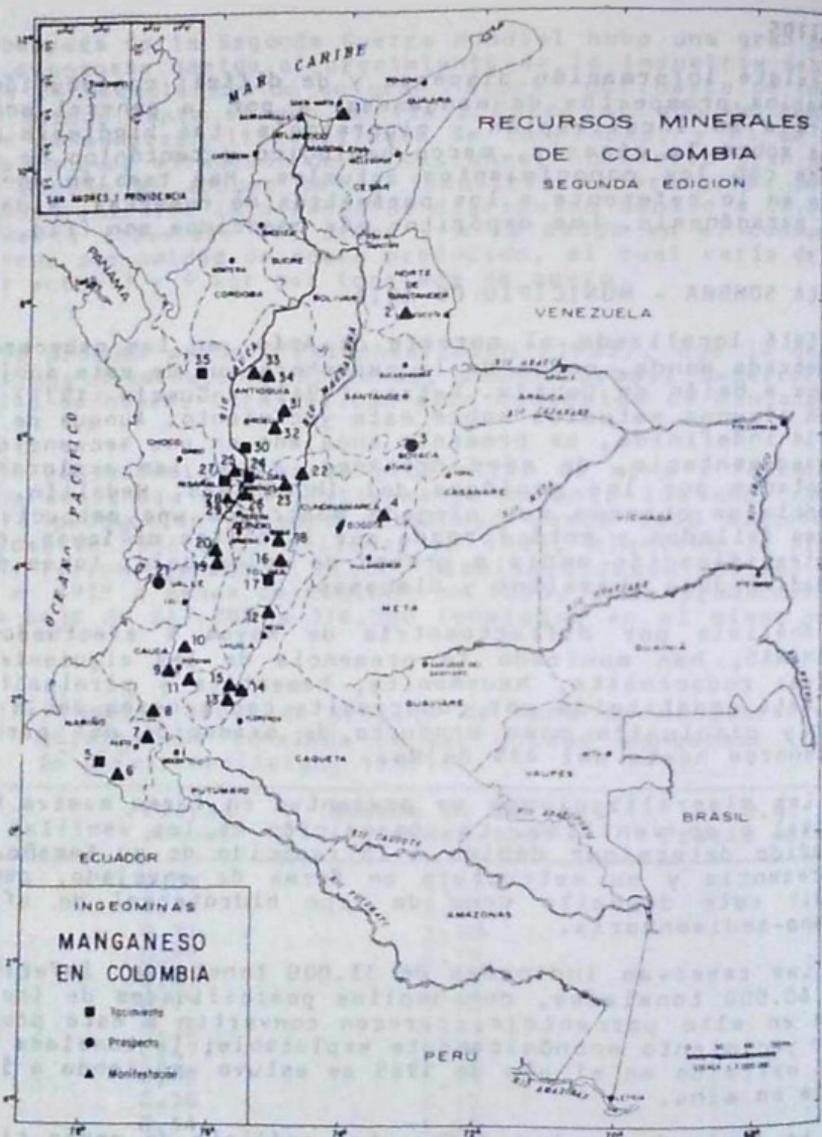
Las mineralizaciones se presentan en forma masiva (rodocrosita) o en venillas. La composición de las venillas no se ha podido determinar debido a lo reducido de su tamaño, pero su presencia y su estructura en forma de enrejado, permiten definir este depósito como de tipo hidrotermal de afinidad volcánico-sedimentaria.

Las reservas indicadas de 33.000 toneladas inferidas de unas 60.000 toneladas, con amplias posibilidades de incrementarse en alto porcentaje, parecen convertir a este prospecto en un yacimiento económicamente explotable; la tonelada de mineral extraída en el año de 1985 se estuvo vendiendo a \$12.000 puesta en mina.

La Tabla 5 muestra diferentes análisis de menas tipo rodocrosita y pirolusita de la Mina de Apía.

## MINA VALLESI (ANTIOQUIA)

Está ubicada en la quebrada del mismo nombre, al norte de la carretera Medellín - Turbo, a 20 km de la población de Dabeiba (Ant.). En la actualidad se trabaja sobre dos frentes, en una operación manual en la cual intervienen más de 30 obreros, orientados por un práctico en labores de arranque. La mena se presenta en forma de cuerpos estratiformes, lenticulares, con espesores hasta de 1 m. Se han identificado hasta tres niveles de manganeso; la posición de los estratos varía entre N20°W, 20°NE hasta N30°E, 35°NW.



- |                          |                 |                  |                       |
|--------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| 1. Ciénaga               | 10. Morelos     | 19. Tuluá        | 28. Viterbo           |
| 2. Abrego                | 11. Coconuco    | 20. Andalucía    | 29. Santuario         |
| 3. Santa Rosa de Viterbo | 12. Villa Vieja | 21. Buenaventura | 30. Sta. Bárbara      |
| 4. Gachalá-Ubalá         | 13. Altamira    | 22. La Dorada    | 31. El Peñal          |
| 5. Piedrancha (Mallama)  | 14. Agrado      | 23. Manzanares   | 32. Carmen de Viboral |
| 6. La Victoria           | 15. Garzón      | 24. San Félix    | 33. Ituncho           |
| 7. Russaco               | 16. Ortega      | 25. Riosucio     | 34. Yacumal           |
| 8. Bolívar               | 17. Chaparral   | 26. Mistraló     | 35. Vallejo           |
| 9. Tambo                 | 18. Rovire      | 27. Apía         |                       |

FIG. 4: Manganeso en Colombia.

TAB. 5: Análisis por Absorción Atómica. Mina La Sombra - Apía (CALLE y ZAPATA, 1986).

Nuestra IGM	Mena	Mn	Fe	Si
705405	Rodocrosita	27,7	9,4	17,5
705409	Rodocrosita (?)	10,3	20,5	24,0
705411	Pirolusita	11,8	15,5	24,2
705413	Pirolusita	26,0	12,8	14,0
705415	Pirolusita	19,0	13,7	18,0
705417	Pirolusita	16,8	7,8	23,5
705419	Rodocrosita	29,2	8,5	17,3
705421	Pirolusita	43,0	4,2	7,8
705553	Rodocrosita	38,0	2,4	18,0
705554	Pirolusita	16,2	5,3	26,3
705547	Pirolusita	28,5	3,1	26,5
705566	Pirolusita	38,7	5,9	-
705568	Pirolusita	18,8	4,8	-
705418	Rodocrosita	32,2	2,8	18,0
705422	Pirolusita	11,9	7,4	26,8
705424	Pirolusita	14,2	3,4	28,0
705426	Pirolusita	1,8	2,4	40,0
705557	Rodocrosita	34,6	1,9	19,3
705559	Rodocrosita	29,1	2,5	22,4
705546	Rodocrosita	32,4	4,0	18,0
705550	Pirolusita	22,8	3,8	23,8
705570	Pirolusita *	53,7	2,2	-

El miembro (?) manganesífero, compuesto además de los cuerpos de manganeso, por cherta gris oscuros, calizas, tobas y jaspes se encuentra encajado en una secuencia volcano-sedimentaria cuya edad todavía es incierta.

La mena está compuesta por pirolusita con un contenido de Mn variable de 28% hasta 43%; no hay datos disponibles sobre reservas pero se conoce que la empresa sueca Boliden, durante el año de 1963 adelantó un plan de exploración, incluyendo perforaciones, que le permitió cuantificarlas parcialmente. Actualmente se están extrayendo y vendiendo a la empresa Celanese 36 toneladas semanales, cada una a \$18.000 puestas en la ciudad de Barranquilla, según el encargado de la explotación.

#### PROSPECTO DE SAN FELIX (CALDAS)

En los nacimientos de la quebrada San Rafael, al noreste de San Félix, departamento de Caldas, se presenta un lente de manganeso, de color rosado, de 10 m de espesor, que en las superficies expuestas toma un color negro por formación de pirolusita. Tiene dirección N20°E, aproximadamente paralelo a la foliación de los metasedimentos (cuarcita), de edad paleozoica, que constituyen la roca encajante. Esporádicamente ha sido explotado, pero se desconoce su verdadero potencial. Actualmente existe un carretable que facilitaría su explotación.

#### DEPOSITO DE SANTA BARBARA (ANTIOQUIA)

Se encuentra localizado 4 km al noroeste de Santa Bárbara en la quebrada La Loma, que corre de norte a sur siguiendo la Falla de Minas, parte central de la zona de Falla de Romeral; la mineralización se presenta como lentes o bolsones, con su

dimensión mayor paralela a la estratificación de las lómitas de la Formación Quebradagrande, secuencia volcánico-sedimentaria de edad cretácea y ambiente marino. El espesor de los lentes varía entre 3 y 8 m. La gena está constituida por braunita con cubierta superficial de pirolusita y vernadita. Durango (1978), estimó unas reservas indicadas de 80.000 toneladas.

#### YACIMIENTO DE PIEDRANCHA (MALLAMA), NARIÑO

El yacimiento está ubicado en la región de Curcuel, municipio de Mallama (Piedrancha), y está asociado con esquistos altamente silíceos (BUENO, 1950).

Se conocen dos afloramientos: el primero está compuesto por una masa de carbonatos de manganeso: rodonita y rodocrosita, alterado parcialmente a óxidos como pirolusita y manganita.

Las muestras recogidas en este afloramiento tienen de 11.2 a 24.8% de manganeso y muy ocasionalmente llega hasta 61.5%. El otro afloramiento a corta distancia del anterior, está formado por óxidos de manganeso, pirolusita y psilomelana, principalmente en masas nodulares y reniformes. El mineral de este afloramiento tiene 47,2 a 52.6% de manganeso y 8.4 a 13% de  $\text{SiO}_2$ .

#### MINA LA TIGRERA o LOS LIMONES (TOLIMA)

Está localizada en el paraje La Tigra, departamento del Tolima, a una hora por camino de herradura desde Chaparral. El depósito consiste (BUENAVENTURA, 1976; en: ARBOLEDA, 1978), en un sistema de fracturas mineralizadas y distribuidas irregularmente dentro de rocas tipo granodiorita del Batolito de Ibagué; las fracturas no sobrepasan en superficie los 7 cm de espesor y donde se unen forman pequeños bolsones.

El único mineral hipogénico que se identificó microscópicamente fue manganita y como minerales supergénicos posiblemente derivados del primero, pirolusita y psilomelana.

La pirolusita se encuentra en fracturas dentro del intrusivo formando dendritas. La magnetita se presenta en masas, donde los cristales se agrupan radialmente. Esta mineralización es de origen hidrotermal y las posibilidades de una explotación rentable son escasas.

Se obtuvieron los siguientes resultados de los análisis químicos cuantitativos realizados por INGEOMINAS: Manganeso como  $\text{MnO}_2$  = 79.12%; hierro como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = 1.31% manganeso como  $\text{Mn}$  = 50.0%; hierro como  $\text{Fe}$  = 0.92%.

#### OTRAS MINERALIZACIONES

La siguiente es la relación por departamentos de algunas manifestaciones conocidas, según Mutis (1983).

**Antioquia:** Las yeguas (Abejorral), Amagá, Carmen de Viboral, Cocorná, El Peñol, Fredonia, Ituango, Marinilla, Montebello, Sonsón, Venecia y Yarumal.

**Boyacá:** Arcabuco, Guateque, La Floresta, San Eduardo, Santa Rosa de Viterbo, Tota, Tunja.

**Caldas:** La Dorada, Manzanares, Pensilvania, Marquetalia, Marulanda, Riosucio, Salamina, Viterbo.

**Cauca:** Bolívar, El Tambo, Morales, Puracé, Silvia, Cocunuco.

**Cundinamarca:** Cáqueza, Gachalá, Ubalá, Manta.

**Huila:** Agrado, Altamira, Garzón, Villavieja.

**Magdalena:** Ciénaga.

**Meta:** San Martín.

**Nariño:** Aricuyá, Buesaco, Ipiales, Linares, Los Andes (Sotomayor), Samaniego, Tumaco.

**Norte de Santander:** Abrego, Rosario.

**Quindío:** Génova.

**Risaralda:** Mistrató.

**Tolima:** Chaparral, Ortega, Rovira.

**Valle:** Buenaventura, Tuluá, Andalucía.

**Casanare:** Maní.

**Vaupés:** San José de Guaviare.

## PRODUCCION

Sobre la producción nacional existen datos aproximados, de poca confiabilidad, en parte suministrados por los dueños de las explotaciones, y en otras ocasiones por los consumidores de la materia prima. Las estadísticas oficiales suministradas por el DANE se dan en la Tabla 6.

El escaso consumo de manganeso como materia prima para la industria nacional se debe, ante todo, al desconocimiento geológico de los prospectos existentes, a la escasez de crédito, a la falta de asistencia minera a bajos costos y a la inexistencia de conductos de comunicación entre la actividad minera y la industria.

TAB. 6: Producción Nacional de Manganeso (Toneladas).

Año	1980	1981	1982	1983	1984
	21.400	20.300	-	-	-

## RESERVAS

En el país no se han efectuado estudios de prospección que permitan reportar unas reservas siquiera indicadas, salvo el depósito de Vallesf, Dabeiba (Ant.), donde se adelantó un plan de perforaciones por la compañía Boliden Minera de Colombia S.A. (1964), en colaboración con su similar de Suecia. Las reservas probadas de manganeso en el área estudiada por Boliden fueron de orden de 16.000 toneladas de mineral, (RODRIGUEZ y PERNET, 1983).

Durango (1978), reporta unas reservas inferidas de 80.000 toneladas para el depósito de Santa Bárbara (Ant.). Estudios recientes de Ingeominas en el depósito de manganeso localizado en el municipio de Apía, departamento de Risaralda, permitieron cuantificar unas reservas inferidas de 63.048 toneladas. Sobre los demás depósitos o prospectos conocidos no se tienen datos disponibles.

Las perspectivas del país en lo referente a este recurso están todavía en el campo de las posibilidades, ante todo por la carencia de un plan de prospección específico que determine el potencial real de los yacimientos existentes y adelante la exploración de las áreas con ambientes geológicos favorables a la acumulación del manganeso. Colombia posee ambientes favorables en sus tres cordilleras como lo demuestran las ocurrencias conocidas hasta el presente.

## COMERCIO

### IMPORTACIONES Y EXPORTACIONES

El país actualmente tiene que importar la mayor parte de los productos que tengan como materia prima el manganeso, tanto con destino a la industria siderúrgica como a la química. La producción actual del país, que no sobrepasa las 80 toneladas mensuales, es consumida en su mayor parte por la industria Celanese para el teñido de textiles y por otras industrias para la fabricación de sulfato de manganeso (Tabla 7).

La mayor parte de las importaciones se hacen como ferromanganeso, en forma individual para cada una de las principales siderúrgicas del país; por ejemplo Simesa importó en 1984, quinientas cincuenta toneladas y espera recibir en 1985, novecientas ochenta toneladas. El costo por tonelada de ferromanganeso alto en carbono y bajo en fósforo es de \$59.032.

TAB. 7: Importaciones de Manganeso. DANE, 1983.

Año	1980	1981	1982	1983	1984
Imn				1.471	
Costo				24.306	
Im n = Toneladas métricas netas Costo = \$ Col. x 1.000					

## IMPACTO AMBIENTAL

La mayoría de los prospectos conocidos están localizados en zonas rurales, de escasa población, y algunos como el de Vallesal (Dabeiba, Antioquia) y San Félix (Caldas), están en zonas semiselváticas a selváticas. Si a lo anterior se adiciona la por lo general reducida magnitud de sus dimensiones, según los datos disponibles, los problemas de contaminación por su explotación y beneficio son casi nulos.

## PERSPECTIVAS

Según O'Faircheallaigh (1985), casi el 50% de la producción de manganeso del mundo es suministrado por explotaciones

platales en Rusia, India, China y Gambia; la mayor parte del costo del manganeso que se comercializa es suministrado por cinco compañías: GEMCO (Australia), ICOMI (Brasil), COMILOG (Sudán), SAMANCOR y ASSOMAN (Sudáfrica).

Los Productos de manganeso han experimentado serias dificultades económicas durante los años recientes. La demanda por su productos está estacionaria o en declinación y está muy por debajo de la capacidad de la mina. En 1983 las cinco principales compañías tenían una capacidad de producción de 13.5 a 14.5 millones de ton./año de mena mientras su producción comunal fue solo 7 millones. Este exceso de capacidad ha desatado una guerra de precios entre productores, cada uno ansioso de mantener la capacidad de utilización a tan alto nivel como fuese posible originando un descenso en los precios y un incremento en los costos debido a la inflación y a la recesión económica.

Para evitar lo anterior, algunas empresas se han involucrado en la fabricación de ferrosaleaciones o han conformado sociedades con los mayores consumidores con el fin de asegurar el consumo de al menos parte del producido. Simultáneamente un gran número de firmas han salido de la industria.

Si el comportamiento de los años recientes continúa, la industria del manganeso en los países occidentales, en poco tiempo, consistirá en un grupo de grandes productores suministrando ferrosaleaciones a constructores de acero en economías desarrolladas.

#### BIBLIOGRAFIA

- ARBOLEDA, C., 1978.- Manganeso. En: Recursos Minerales de Colombia, Ingeominas. Pub. Geol. Esp. No.1, pp.309-324. Bogotá.
- BONATTI, E., 1978.- Yacimientos metálicos en la litosfera oceánica. Investigación y Ciencia. Ed. Prensa Científica, S.A. Barcelona. p.4-12.
- BOICERO, G., 1945.- Yacimientos de Manganeso de la quebrada de "La Loma". Comp. Est. Geol. Of. en Col. Tomo VI p. 307-319. Bogotá.
- BOICERO, J., 1950.- Informe sobre un yacimiento de manganeso en el Municipio de Malibá, departamento de Nariño. Informe 487. Serv. Geol. Nal. Bogotá.
- CALLE, B. y ZAPATA, G., 1986.- Yacimientos de manganeso "La Sombra", municipio de Apía, Risaralda. Ingeominas, Bogotá. (En prensa).
- DANE, 1983.- Estadísticas. Bogotá.
- DE HUFF, G.L., 1975.- Manganeso. United States Department of the Interior Bureau of Mines. Preprint from Bull. 667. 16 p.
- DE HUFF, G.L., & JONES, Th., 1980.- Manganeso. United States Department of Interior. Bureau of Mines Preprint from. Bul. 671. 14 p.

- DURANCO, J., 1978.- **Prospección Geoquímica de las quebradas La Loma y Fries, Santa Bárbara, Antioquia. Informe 1770.** Ingeominas. Bogotá.
- FETZER, W.G., 1942.- **Comisión Geológica de Caldas. Com. Est. Geol. Of. Col. Tomo V. 503-544 p.** Bogotá.
- GUARIN, G., 1971.- **Ocurrencias minerales del departamento de Risaralda. Informe 1336.** Ingeominas. Bogotá.
- INSTITUTO GEOLOGICO MINERO DE ESPAÑA, 1976.- **Monografías de Sustancias Minerales. Manganeso.** Serv. Publ. Ministerio de Industria. 98 p. Madrid.
- JACOBY, C.H., 1983.- **Manganese.** En: Lefond, S.J., ed. **Industrial Mineral and Rocks.** 5th Edition, V. 2, 897-908 p.
- MAYNARD, J.B., 1983.- **Geochemistry of Sedimentary Ore Deposits.** Springer-Verlag. 305 p. New York.
- MINERIA, 1985.- **Revista de la Cámara Minera de México.** Vol. V (10) 29 p.
- MINING JOURNAL, 1984.- **Manganese. Hostage Steel.** V.302 (7767) 433-434 p.
- MITCHELL & GARSON.- 1981.- **Mineral Deposits and Global tectonic Settings.** Academic Press. 405 p. London.
- MUTIS, J.V., 1983.- **Catálogo de los Yacimientos, Prospectos y Manifestaciones Minerales de Colombia.** Ingeominas. Pub. Geol. Esp. No. 13, pp.196--203. Bogotá.
- O'FAIRCHEALLIGH, C., 1985.- **The world Manganese Industry.** Mining Magazine pp. 374-380.
- RANKAMA, K.; SAHAMA, Th., G., 1962.- **Geoquímica.** México: Aguilar, 747 p.
- RODRIGUEZ, C.J., y PERNET A., 1983.- **Recursos Minerales de Antioquia.** Ingeominas. Bol. Geol. V.26(3):1-116. Bogotá.

## MINERALES DE MERCURIO

HERNANDO LOZANO QUIROGA

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	275
Introducción .....	276
Usos .....	276
Ambiente Geológico .....	278
Contenido normal en las rocas .....	278
Mineralogía .....	279
Yacimientos .....	279
Técnicas de Prospección .....	283
Situación Mundial .....	283
Precios .....	283
Producción .....	284
Reservas .....	284
Perspectivas .....	286
El Mercurio en Colombia .....	286
Minería y sus perspectivas .....	286
Zonas anómalas para Mercurio .....	289
Producción .....	291
Comercio .....	291
Problemas en la Investigación .....	292
Bibliografía .....	293

## RESUMEN

El mercurio tiene gran variedad de aplicaciones. La producción mundial se aproxima a las 300.000 botellas por año, de 76 libras cada una, las cuales son utilizadas en su mayor parte por los países más industrializados.

La producción en Colombia se limitó a las explotaciones de la mina Nueva Esperanza la cual fue cerrada hace aproximadamente 10 años; actualmente todo el mercurio que se utiliza en el país es importado.

Las perspectivas de encontrar nuevos yacimientos en Colombia parecen promisorias, teniendo en cuenta los primeros resultados del estudio de prospección adelantados por el INGEOMINAS en un sector del flanco occidental de la Cordillera Central, en el departamento de Caldas.

En los últimos años varias naciones preocupadas por la polución causada por el mercurio, se han visto precisadas a imponer restricciones legales para su uso, lo cual ha ocasionado disminución en su consumo, drásticas bajas en los precios y el cierre de algunas mines.

Para prevenir la polución son necesarias investigaciones adicionales, para determinar la cantidad y la forma como se asocia para producir compuestos orgánicos de alta toxicidad y saber, cuáles son los niveles de tolerancia, y cuales serían los mejores métodos para eliminar e inactivar el mercurio de áreas ya contaminadas. Otros estudios deben estar encaminados a obtener una eficiente recuperación del mercurio de las minas y de los desechos de las fábricas, para mejorar de esa manera las condiciones del medio ambiente e incrementar los recursos en el mundo.

## INTRODUCCION

El mercurio es el único elemento metálico que es fluido en la naturaleza a temperatura ambiente. Este elemento tiene muchos usos, especialmente aplicaciones en tecnología avanzada, por consiguiente tiene gran demanda en los países más industrializados como los Estados Unidos, la Unión Soviética, Japón y Alemania.

Los Estados Unidos aumentaron notoriamente la producción de mercurio con la explotación de la mina McDermitt localizada al norte del estado de Nevada y perteneciente a la Compañía Placer Amex. Esta mina inició trabajos a finales de 1975 y tiene una capacidad de producción de 20.000 botellas al año, con una recuperación del 95%.

La producción mundial de mercurio ha disminuido en los últimos años; tomamos al azar algunos de éstos como referencia:

1976	-	254.000	botellas
1979	-	174.500	botellas
1981	-	210.900	botellas
1983	-	188.500	botellas
1984	-	167.488	botellas

En los 12 últimos años (1975-1987) la demanda de mercurio ha descendido relativamente; esto se ha incidido en el precio de la botella (76 libras), el cual ha fluctuado en los EE.UU. entre US\$ 117 en noviembre de 1975 y US\$ 314 en marzo de 1985; el promedio anual es actualmente de US\$ 304. En Europa los precios fueron aún más bajos, en 1975 el promedio fue de US\$ 130 por botella y se reportó en los últimos meses el precio de US\$ 85. En agosto de 1985 los precios fueron de US\$ 290. En 1986 el promedio en Europa fue de US\$ 300.

La demanda en Colombia tuvo un descenso de 1.500 botellas en 1977 a 1.060 aproximadamente, en 1985; actualmente se importa todo el mercurio necesario para el consumo nacional.

## USOS

El mercurio, además de ser fluido a temperatura normal, posee una singular combinación de propiedades, tales como: tensión superficial alta, expansión termal lineal, buena conductividad eléctrica, alta densidad, habilidad para alearse fácilmente y tendencia a formar compuestos muy tóxicos. Estas características hacen que el mercurio tenga utilidad en gran cantidad de procesos y productos. En algunos usos, como en termómetros e interruptores se requieren cantidades pequeñas de mercurio para cada aparato, pero en otros, como en plantas de soda cáustica y cloro, se utilizan varias toneladas. El principal empleo es en aparatos eléctricos (especialmente baterías) y en catalizadores (manufacturas de cloro); estos renglones en los últimos años, utilizaron cerca del 50% del consumo de mercurio en USA. Otro 25% correspondió a los compuestos tóxicos del mercurio.

El mercurio metálico con pureza del 99,9% se obtiene generalmente por un proceso de destilación; se embotella y se vende directamente en envases de acero que contienen 76 libras (cerca de 2,5 litros) de metal líquido.

Para algunas aplicaciones especiales, el mercurio se destila para obtener mayor pureza y se distribuye en envases

de vidrio, plástico o loza que contienen de 4 a 10 libras. Los compuestos no se obtienen directamente en las minas, sino elaborados a partir del metal ya refinado.

Recientemente se han encontrado sustitutos para algunos usos tradicionales de mercurio; una cantidad pequeña de este elemento se utiliza actualmente en amalgamación (fue el mayor consumo en el siglo pasado), drogas antisifilíticas, municiones detonantes, manufacturas de felpa, moldes, manufacturas de papel, polvos rojos (bermellón), juegos artificiales y cosméticos. En otros empleos, los sustitutos podrían usarse, pero se sacrificarían la calidad del producto, la economía en la manufactura, o ambas. Por ejemplo, en la obtención de soda cáustica y cloro se puede utilizar una celda de diafragma en cambio de la celda de mercurio electrolítico, obteniéndose un producto de menor pureza y más costoso, que afectaría finalmente los precios del nylon, rayón, productos del petróleo, aluminio, detergentes y otros artículos de consumo. De otra parte, es indispensable el uso del mercurio en baterías, lámparas, interruptores de pared, termostatos, barómetros, manómetros, termómetros, calibradores de presión y en usos de laboratorio, pues la sustitución no es práctica.

En agricultura y en pinturas la utilización de los sustitutos del mercurio será práctica, siempre y cuando sean descubiertos germicidas no mercuriales y fungicidas de selectiva toxicidad.

#### EN LA INDUSTRIA

Debido a los problemas de contaminación ambiental ocasionados por el mercurio y principalmente por el compuesto orgánico metil-mercurio en el mundo, especialmente en la Bahía Minamata, Japón, en los campos agrícolas de Suecia, en el Lago Santa Claire en USA, y en la Bahía de Cartagena, Colombia, los servicios de Salud Pública de los Estados Unidos y de Rusia han propuesto como límites máximos para el agua de consumo humano, una concentración de 5,0 ppb (partes por billón) de mercurio. Para drogas y comidas, primordialmente pescado de mar, concentraciones superiores a 0,5 ppm se consideran peligrosas para el organismo humano (GREESON, 1970). Estos factores han originado una disminución drástica en el consumo de mercurio y por consiguiente en su precio. Varias minas pequeñas en el mundo han sido cerradas, mientras los grandes consorcios mineros han disminuido su producción para evitar un caos en el valor de mercurio en el mercado mundial.

La demanda de mercurio en los EE.UU. ha permanecido relativamente constante de 1975 con 51.600 botellas a 1985 con 52.513 botellas, aunque varios de los usos han aumentado como por ejemplo en enfriadores para las plantas de energía nuclear. Durante este periodo se han presentado sustitutos al mercurio y se han utilizado tratamientos para la recuperación de este elemento de los desechos de las fábricas, que son exigidos por la Ley Americana para evitar la contaminación de los ríos, mares y atmósfera (MINING ANNUAL REVIEW, 1986).

Las medidas de polución en el medio ambiente continúan controlando el uso del mercurio, especialmente en pinturas, agricultura, farmacia, fábricas de álcalis, etc. Sin embargo, no es posible reemplazar el mercurio en todos los casos; algunos sustitutos han sido eficientes como en la utilización del níquel/cadmio en baterías, aparatos eléctricos, compuestos orgánicos, pinturas y piezas sólidas para industria.

La mayor utilización del mercurio en el hemisferio occidental continúa siendo para las plantas de soda cáustica y de álcalis, principalmente en países como China, India y Europa Occidental; también se continúa usando importantes cantidades en odontología. La demanda de mercurio en el mundo en 1985 fue de 200.000 botellas (MINING ANNUAL REVIEW, 1986).

En Colombia las principales industrias que usan el mercurio son la planta de Sal de Zipaquirá, la planta de Alcalía de Cartagena, los laboratorios de procesamiento de metales preciosos y la industria minera de oro.

### AMBIENTE GEOLOGICO

#### CONTENIDO NORMAL EN LAS ROCAS

Cantidades pequeñas de mercurio ocurren en casi todas las sustancias naturales como rocas, suelos, agua, aire, animales y vegetales, pero las técnicas analíticas suficientemente sensibles para medir estas diminutas concentraciones, solamente han sido perfeccionadas recientemente. Aunque existen muchas variaciones, en la Tabla 1 se dan los contenidos típicos de mercurio en los diferentes materiales.

El contenido promedio de mercurio en rocas continentales ha sido calculado en cerca de 80 ppb (partes por billón); cifras similares fueron obtenidas para la corteza terrestre. Estudios más recientes sugieren que estos valores pueden ser un poco altos pero que realmente conservan el mismo orden de magnitud (BAYLEY, et al, 1973). De otra parte, el contenido de mercurio que debe tener una mineralización para que sea explotable debe ser por lo menos de 0.1% (1.000 ppm), el cual representa una concentración 10.000 veces más grande que el contenido normal de la mayoría de las rocas.

Para mayor información relacionada con la ocurrencia de los compuestos de mercurio en la naturaleza y su comportamiento durante el ciclo de meteorización véase TUNELL (1970).

TAB. 1: Contenido de mercurio en varias sustancias naturales. Tomado de Bailey, et al, 1973.

	Partes por billón	
<b>Rocas Igneas:</b>		
Peridotita, dunita, basalto,	5	- 200
Andesita, granito	15	- 100
<b>Rocas Sedimentarias:</b>		
Areniscas	20	- 75
Arcillolitas	100	- 1.000
Calizas	15	- 50
Carbón	10	- 1.000
<b>Rocas Metamórficas:</b>	20	- 200
<b>Suelos</b>	10	- 100
<b>Fluidos Naturales:</b>		
Agua lluvia	0.2	
Agua de ríos	0.1	
Petróleo	2.000	- 20.000
Aire	0.01	
<b>Organismos:</b>		
Plantas	500	
Peces	20	- 200
Mamíferos	20	-

## MINERALOGIA

Los minerales comerciales (menas) de mercurio son el cinabrio, la metacínabrita, el calomelano y el mercurio nativo (líquido a temperatura ambiente). El principal de ellos, el cinabrio, es insoluble en agua y contiene 86,2% de mercurio. Generalmente se encuentra masivo (rara vez en cristales) y su color es rojo escarlata, pardo rojizo, pardo a gris plomo.

La metacínabrita, variedad de color negro del cinabrio, es posiblemente un mineral secundario depositado por aguas descendentes (ALLEN y GRENSHAM, 1912).

Del sulfuro primario (cinabrio) se derivan también como minerales secundarios el calomel ( $\text{HgCl}_2$ ); la montroydita ( $\text{HgO}$ ) y otros oxiclорuros. La tetrahedrita mercurial no es rara y puede contener hasta un 17% de mercurio, aunque por lo general el porcentaje es mucho más bajo (LINDGREN, 1933).

En la Tabla 2 se presentan los principales minerales de mercurio.

TAB. 2: Principales minerales de mercurio. Tomado de Lindgren, 1933.

Minerales primarios	Minerales secundarios
Cinabrio, $\text{HgS}$	Metacínabrita, $\text{HgS}$
Tiemannita, $\text{HgSe}$	Calomel, $\text{HgCl}_2$
Onofrita, $\text{Hg}_2\text{SSe}$	Montroydita, $\text{HgO}$
	Terlinguaita, $\text{Hg}_2\text{ClO}$
	Eglestonita, $\text{Hg}_4\text{Cl}_2\text{O}$

## YACIMIENTOS

Todos los grandes yacimientos de mercurio en el mundo son explotados únicamente por el contenido de este elemento y todos contienen el sulfuro rojo de mercurio (cinabrio), como el principal mineral de mena.

El mercurio líquido y el sulfuro de mercurio de color negro (metacínabrio) presentan localmente alguna importancia económica. El sulfuro de mercurio y antimonio ( $\text{HgSb}_4\text{S}_9$ , levingtonita) ha sido el principal mineral explotado en algunas minas de tamaño medio. En el yacimiento de McDermitt, en Nevada, además de cinabrio se presenta corderoíta ( $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$ ) como mineral de mena.

Los restantes minerales de mercurio son relativamente raros y carecen de importancia como fuentes de este elemento.

En años pasados, el mercurio se obtuvo también como subproducto en la mina de cobre de Gortdrus, Irlanda (1.300 botellas al año), en la mina de zinc y cobre de Rudnany, Checoslovaquia (1.000 botellas al año), y en la mina de oro de Carlin en Nevada (60 botellas al año). El cinabrio ha sido identificado en todos estos depósitos, pero otros minerales, posiblemente contienen también pequeñas cantidades de mercurio. En la planta refinadora de minerales de St. Joe en Monaca (Pensilvania), se recuperaron 300 botellas de mercurio, de concentrados de zinc provenientes de depósitos de Nueva York, pero el mineral que contenía este elemento se desconoce.

Cuarzo y carbonatos son los minerales de ganga más comunes en las mineralizaciones de mercurio, pero pirita y marcasita pueden ser abundantes en depósitos formados en rocas que contengan hierro. Estibina es rara pero es más común que ordinarily. Otros metales como oro, plata o metales básicos están generalmente presente pero como elementos trazas. Una excepción es sin embargo, tetrahedrita, de la cual se ha recuperado mercurio en algunos sitios.

En estos yacimientos los minerales de mercurio y los de ganga, fueron depositados por soluciones a temperaturas entre 50 y 299°C; en consecuencia, corresponden a depósitos epitermales, de baja temperatura y formados a poca profundidad (WHITE, 1967; TUNELL, 1970). En USA, solamente unos cuantos yacimientos se han trabajado a profundidades mayores de 300 m. Aún en los yacimientos más grandes del mundo no se registran profundidades en explotación superiores a 600 m. Sin embargo, en la mina de Almadén en España por medio de perforaciones se han encontrado mineralizaciones a 900 m; la mayor profundidad a la cual se ha detectado cinabrio es a 1.800 m, en una perforación realizada en el área de los termales de Geyser, en Sonoma County, California (BAILEY et al, 1973).

Sin duda, los yacimientos de mercurio se han formado durante varias épocas geológicas, pero debido a su poca profundidad, han sido erodados o demasiado cubiertos a través del tiempo. En estas condiciones, las mineralizaciones más recientes que no han sido erodadas o muy cubiertas, son las que constituyen las actuales fuentes de mercurio. Como estas mineralizaciones son depositadas en rocas preexistentes, casi cualquier tipo de roca puede constituirse como huésped, aunque algunas poseen propiedades físicas o químicas más favorables. Sin embargo, la distribución de los depósitos de mercurio en el mundo está restringida a zonas de actividad volcánica tectónica, capaces de generar soluciones calientes que depositen mercurio, como ocurre solamente en algunos cinturones montañosos (BAILEY, et al, 1973). Un cinturón altamente productivo se extiende a todo lo largo del borde occidental de América, pasa por el centro de Alaska, sigue a través del Japón luego continúa en dirección oeste y cruza la zona central de La China y llega hasta la parte sur de la Unión Soviética. Europa. Otro cinturón más corto y mucho menos productivo se extiende desde Nueva Zelandia hasta Papua, Nueva Guinea y llega hasta el arco de Indonesia y Sumatra (ver Fig. 1). Aunque los depósitos están en los cinturones de actividad volcánica varios de los más grandes yacimientos de mercurio se encuentran alejados de rocas volcánicas recientes. Las seis minas distritos más importantes y su producción aproximada son las siguientes:

Almadén, España .....	7.500.000	botellas
Idria, Yugoslavia .....	3.000.000	"
Monte Amiata, Italia .....	2.000.000	"
Santa Bárbara, Perú .....	1.500.000	"
New Almadén, California .....	1.100.000	"
New Idria, California .....	600.000	"

Una breve descripción de la geología de los más importantes depósitos será de utilidad para conocer la diversidad de ocurrencias que caracterizan las mineralizaciones de mercurio.

La famosa mina de Almadén, que ha producido cerca de 1 del mercurio del mundo, está ubicada dentro de un paquete arcillolitas, calizas y cuarcitas plegadas y falladas de edad

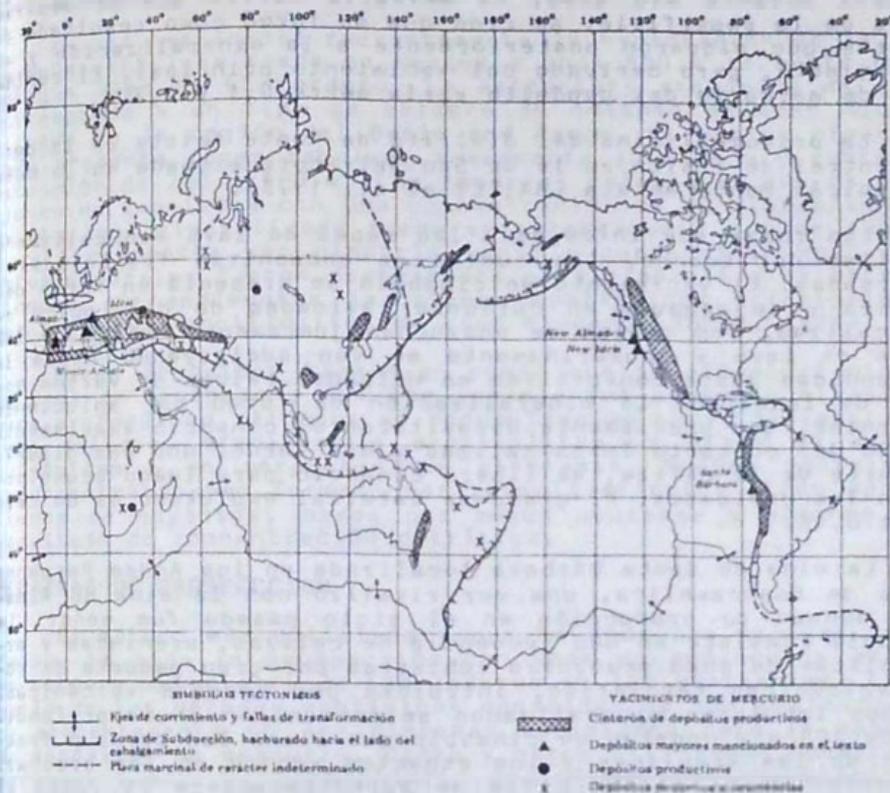


FIG. 1: Yacimientos de Mercurio en el mundo, relacionados a zonas de subducción post-Jurásicas.

Ordoviciano a Devoniano (BAILEY et al, 1973). En el área de la mina, las rocas ígneas están representadas por diques angostos de diabasas; a 25 km aflora un batolito de composición granítica; este es el cuerpo intrusivo mayor y más cercano al depósito. La mineralización se presenta en tres capas verticales de cuarcita, que desde la superficie hasta una profundidad de 750 m se encuentra intensamente reemplazada por cinabrio y localmente impregnada por mercurio nativo. La capa más productiva tiene un espesor de 10 m y la zona central de 3 m de ancho contiene en algunas partes, más del 10% de mercurio. La concentración promedio de la mineralización es aproximadamente de 2%.

La mina de Idria al noroeste de Yugoslavia, se encuentra en una gruesa secuencia de rocas sedimentarias con edades que van desde el Carbonífero hasta el Eoceno y ocurre en cuatro líneas superpuestas por fallas de cabalgamiento (BAILEY et al, 1973). La mayor parte de la mineralización está constituida por cinabrio, que ha reemplazado dolomitas de edad Permiano y Triásico, pero se encuentra también en arcillolitas y areniscas.

El yacimiento ha sido trabajado hasta una profundidad de 450 m. Recientemente una solución ingeniosa del problema de la

falla de cabalgamiento, llevó al descubrimiento del yacimiento mayor, el cual estaba distanciado 3 km del que había sido explotado durante 450 años. El mercurio nativo que se observa cerca de la superficie, se cree que se formó como resultado de vapores que migraron posteriormente a la mineralización y al fallamiento, pero derivado del yacimiento principal. El contenido de mercurio del depósito varía entre 0,1 y 0,2%.

La principal mina del distrito de Monte Amiata en la parte central de Italia es la de San Salvatore situada en la base del volcán Monte Amiata (BAILEY et al, 1973).

Las rocas que infrayacen las capas de lava son calizas y arcillas del Eoceno, las cuales se encuentran fracturadas y deformadas. El yacimiento de cinabrio se presenta en forma detrítica y se acumula en curiosas cavidades de disolución en las calizas, las cuales se ensanchan justamente debajo de las capas de lava y paulatinamente se van adelgazando hacia la profundidad hasta convertirse en delgadas raíces de varios metros de longitud. La mineralización se formó por soluciones calientes, que previamente depositaron el cinabrio exactamente debajo del contacto lavas-calizas y más tarde, una vez disuelta parte de la caliza, se liberó cinabrio para luego acumularse en las cavidades. El grado de material explotado es de cerca de 0,4%.

La mina de Santa Bárbara localizada en los Andes Peruanos cerca de Huancavelica, una vez rivalizó con la mina de Almadén, aunque su producción en el siglo pasado fue menor. La geología consiste en una secuencia de calizas, areniscas y arcillolitas de edad mesozoica cubiertas por gran paquete de rocas volcánicas terciarias, intruidas por brechas volcánicas. Cuerpos tabulares mineralizados se encuentran a una profundidad de 300 m y constan de cinabrio que llena los poros o fracturas de las areniscas y los espacios vacíos en las brechas. El contenido de mercurio fue de aproximadamente 2%, pero el material explotado recientemente es más estéril.

La mina de New Almadén en California (BAILEY et al, 1973) es la más importante productora de mercurio en USA., pero su rendimiento mayor fue anterior a la primera Guerra Mundial. En el área de la mina afloran rocas sedimentarias y volcánicas, plegadas y falladas, correspondientes a un eugeosinclinal de edad Mesozoico; estas rocas, en el Terciario fueron a su vez intruidas por cuerpos serpentinizados, las cuales se alteraron hacia sus márgenes a rocas sílico-carbonatadas. Las mineralizaciones ricas ocurren donde la roca sílico-carbonatada fue reemplazada por cinabrio a lo largo de fracturas paralelas y de pendiente fuerte. Mineralizaciones grandes se han encontrado desde la superficie hasta aproximadamente 600 m de profundidad. El tenor del depósito durante todo el tiempo de explotación fue de cerca de 4%. La mina de New Idria en la parte central de California (BAILEY et al, 1973), es la segunda en producción de mercurio en USA y fue la mayor hasta 1972. La mina está localizada cerca de la margen norte de una masa de serpentina que intruyó y arqué una secuencia cretácica gruesa formada por arcillolitas y areniscas. Las arcillolitas que muestran buzamientos fuertes cerca de la serpentina, han sido transformadas en rocas frágiles debido a un endurecimiento por calor con subsecuente fracturamiento. La mayor parte de la mineralización ocurre donde el cinabrio llena las fracturas y cubre las paredes de las rocas; algo de cinabrio y metacina-brio se presenta en venas de carbonatos. El depósito más grande en arcillolitas tiene 100 m de largo, 10 a 50 m de ancho y

aproximadamente 300 m de altura. El mineral al comienzo de su explotación tuvo 10% de cinabrio, pero en los últimos 30 años el contenido disminuyó al 1%.

En USA, se inició recientemente la explotación de la mina de McDermitt localizada en Nevada a unos 800 m al norte de la antigua mina de El Cordero. La estructura geológica del área corresponde a un tipo de caldera de colapso de edad Mioceno situada en la región del Basin and Range. El cuerpo mineralizado presenta forma tabular, suavemente inclinado y cubre una extensión de 700 x 800 m. Las reservas calculadas son de 3 millones de toneladas con una concentración de 10 libras/tonelada. La zona mineralizada tiene aproximadamente 6 m de espesor y está compuesta por cinabrio ( $HgS$ ) y corderoíta ( $Hg_2S_2Cl_2$ ); estos minerales fueron depositados paralelamente a la estratificación de sedimentos lacustres constituidos principalmente por tufitas y arcillolitas de edad Mioceno (ROPER, 1976).

Estos depósitos tienen en común que el principal mineral de mena es cinabrio y que los yacimientos están localizados a poca profundidad. Algunos se encuentran en rocas sedimentarias como calizas, areniscas o arcillolitas, y otros en brechas volcánicas o en serpentinitas alteradas. Muchos yacimientos importantes se han formado por reemplazamiento, otros por rellenos de espacios, otros por ambos procesos y algunos como resultado de concentración detrítica.

#### TECNICAS DE PROSPECCION

El método más utilizado y que ha dado los mejores resultados, ha sido la prospección con base en sedimentos activos en balsa y materiales de las laderas de las vertientes. La mayoría de los métodos geofísicos conocidos se han empleado, pero aparentemente no son sistemas apropiados para la búsqueda de depósitos de mercurio. Clark y otros utilizaron muestras de sedimentos activos; Schacklette empleó métodos geobotánicos y McCarty, Vaughn, Learned y Meuschke han demostrado que la detección de vapores de mercurio en suelos y en el aire son de utilidad para localizar yacimientos de mercurio y de otros metales básicos (BAYLEY et al, 1973). Recientes perfeccionamientos en los sistemas para medir cantidades muy pequeñas de mercurio, han hecho que la prospección con base en geoquímica sea la más confiable y útil (BAILEY et al, 1973).

#### SITUACION MUNDIAL

##### PRECIOS

Como se dijo anteriormente, el precio de la botella de mercurio en los mercados de Londres y New York ha fluctuado entre US\$117 en 1975 y US\$304 en 1985, pero en algunos meses se llegó hasta solo US\$80. Estas oscilaciones de los precios han repercutido sustancialmente en la producción, lo cual ha producido el cierre de varias minas.

A comienzos de 1975 los productores de mercurio se reunieron en Turquía, en un intento por estabilizar los precios que en ese momento se encontraban en US\$220. Estos países acordaron un precio mínimo de US\$350 para la botella de 76 libras, pero con las grandes cantidades de mercurio provenientes de la Unión Soviética y de La China que se encontraban ya en el mercado internacional, este precio mínimo no pudo ser sos-

tenido y a mediados del mes de junio el valor del mercurio había descendido a US\$150 en USA, y a US\$130 en Europa. En noviembre la botella alcanzó su más bajo nivel con US\$85 en Europa y con US\$117 en USA.

En estas condiciones muchos productores marginales abandonaron el mercado mundial. La Unión Soviética resolvió no vender mercurio en 1976 porque estimó que el bajo precio no reflejaba su verdadero valor. Sin embargo, los grandes productores no parecen afectados por las condiciones del mercado y esperan mantenerse en producción a los bajos precios actuales (RYAN, 1976). En Colombia, en los años 1974 y 1975, los precios oscilaron entre \$8.000 y \$9.000 por botella; en 1976 el valor disminuyó alrededor de \$6.000.

## PRODUCCION

La producción mundial de mercurio en este siglo ha variado de 65.000 botellas en 1933 a 188.000 en 1983. Posiblemente cerca de 1.000 minas en el mundo han producido más de 100 botellas de mercurio, pero las tres cuartas partes de la producción mundial se han obtenido de unas pocas minas o distritos mineros.

En USA, el mercurio proviene de unas 300 minas localizadas en 11 estados del oeste, pero aproximadamente el 75% del mercurio se obtiene de pocas minas entre las cuales figuran New Almadén, New Idria, Sulphur Bank y McDermitt, las tres primeras situadas en California y la última en Nevada.

Los países productores son actualmente España, China, Unión Soviética, Yugoslavia, Italia, Turquía, Argelia y EE. UU. Con las reservas conocidas el mundo tiene un abastecimiento en mercurio para un período que oscila entre 24 y 43 años. La Unión Soviética ha aumentado la producción aproximadamente un 40%; en el año de 1985 produjo 70.000 botellas las cuales fueron utilizadas para consumo interno, el cual incluye enfriamiento de plantas nucleares. España en este mismo año produjo alrededor de 50.000 botellas, China 20.000, Argelia entre 20 y 25.000, Yugoslavia 21.000 y EE.UU. 16.395 botellas; este país ha disminuido ostensiblemente su producción en los últimos 12 años.

Los países importadores de este elemento fueron en 1985: EE.UU. con 52.513 botellas, Gran Bretaña 8.600; otros países importadores fueron India y Paquistán con cantidades menores.

## RESERVAS

### RESERVAS PROBADAS

En la mayoría de las minas de mercurio no se han realizado estudios encaminados a conocer las reservas totales antes de iniciar la explotación del depósito; solamente en algunas se han calculado las reservas por bloques para unos pocos años de operación. Aún en los grandes yacimientos como el de Idria o Almadén se desconocen las reservas totales. En la Unión Soviética se han elaborado algunos estudios para determinar reservas, pero las cifras no han sido dadas a conocer. En estas condiciones, las reservas totales de mercurio de los grandes depósitos del mundo no han sido plenamente establecidas, y solamente se tienen algunos estimativos basados en datos de producción y en ciertas características geológicas de los yacimientos de mercurio. En la tabla 3, se encuentran los estima-

datos de las áreas conocidas, por países o por grupos de países.

TAB. 3: Recursos de Mercurio en el mundo. Tomado de Bailey et al. (1973). (Se da el precio de producción por botella y las reservas de los diferentes yacimientos en miles de botellas).

	US\$ 400	Botellas x 1000
Estados Unidos	170	490
Canadá	200	400
México	300	700
Suramericana	50	300
España	2.500	6.000
Italia	700	2.000
Yugoslavia	1.000	2.000
Checoslovaquia	15	30
Africa	30	60
Japón	60	200
Turquía	60	200
Filipinas	50	3.000
URSS	1.000	3.000
China Comunista	1.000	1.500
	<u>7.135</u>	<u>17.080</u>

#### RESERVAS PROBABLES

Masas de roca que contengan concentraciones de mercurio bastante altas y suficientemente grandes para que puedan constituirse en un yacimiento, son muy escasas. El área cubierta por depósitos de mercurio en el mundo es probablemente de unos 30 km<sup>2</sup>, lo cual representa solamente el 0,00003% de la superficie terrestre. Si consideramos que los nuevos yacimientos son de las dimensiones de los ya conocidos, será muy difícil localizarlos en el área que resta por investigar si no se conocen ciertas características de las mineralizaciones. El origen y las condiciones geológicas de los depósitos conocidos proporcionan la mejor guía para determinar y escoger áreas exploradas que se deben prospectar.

En el siglo pasado, los geólogos notaron que la distribución de los yacimientos de mercurio en el mundo se localizaba principalmente alrededor del Pacífico, con una bifurcación que se extiende en dirección oeste desde el sur de la China a través de Rusia, hasta el cordón montañoso de Los Alpes en Europa (BAILEY et al., 1973) y se correlacionaba, en términos generales, con la distribución de un cinturón volcánico de edad terciaria, conocido como el cinturón de fuego.

En los últimos años, los geólogos han reconocido las relaciones existentes entre el tectonismo mayor, el volcanismo y el movimiento de placas de la corteza terrestre, de donde se ha desarrollado la revolucionaria teoría de la nueva tectónica de la tierra (HEIRTZLER, et al., 1968; LE PICHON, 1968).

Comparando las ocurrencias de los depósitos de mercurio con estos nuevos elementos, se observa que la mayoría de las mineralizaciones de mercurio están situadas hacia la parte occidental de las zonas de subducción post-Jurásicas y principalmente localizadas donde la corteza oceánica y los materiales depositados en la fosa son absorbidos bajo las márgenes de los bloques de la corteza continental. Esto sugiere que el

mercurio, que estaba originalmente concentrado en los sedimentos marginales del eugeosinclinal, o en los materiales de la corteza oceánica, ha sido extraído de la placa inclinada y emplazado más alto, a temperatura más bajas, a lo largo de la zona de subducción. Investigaciones en áreas menos exploradas de la tierra y que se encuentran cercanas a zonas de subducción, como en Indonesia, Kamchatka, o en el cinturón de Papua Fiji, deben reflejar nuevos distritos con mineralizaciones de mercurio.

El cinturón mercurífero más importante de los Estados Unidos está situado a lo largo de las montañas costeras de California; ha producido el 85% del mercurio de este país y sus relaciones tectónicas coinciden notablemente con las de las otras regiones mercuríferas de la tierra. Los diferentes depósitos constituyen una guía para buscar nuevos yacimientos, aunque en los últimos 100 años esta zona ha sido tan explotada que el hallazgo de depósitos significativos no es muy factible.

La utilización de los criterios tectónicos ya señalados deben conducir al descubrimiento de nuevos yacimientos en el mundo, en cinturones apropiados. Pero se considera, que teniendo en cuenta la tasa de descubrimientos en los últimos 100 años y aún usando guías geológicas y mejoras técnicas de exploración, la cantidad de mercurio que se pueda descubrir en los nuevos depósitos será inferior a la ya extraída.

## PERSPECTIVAS

La minería del mercurio en el mundo en los próximos años, muestra un panorama un poco inestable, debido a los problemas de polución que han ocasionado la búsqueda de sustitutos, menor consumo y aumento considerable en la oferta. Como consecuencia de estos factores, los niveles de precios han disminuido en tal forma, que los propietarios de minas con tenores bajos no pueden entrar a competir en el mercado internacional. A esto se agrega, que las minas de los países mayores productores, como son España, Italia y Yugoslavia, son propiedad de sus respectivos estados; estos gobiernos rehúsan disminuir su producción para tratar de recuperar los precios internacionales por cuanto traería graves consecuencias políticas originadas por el desempleo.

En Colombia sin embargo, se debe estimular esta minería, con el fin de suplir por lo menos las necesidades del país. Esto se obtendría en parte restringiendo las importaciones, para alcanzar precios internos que incentiven la explotación de mercurio.

## EL MERCURIO EN COLOMBIA

### MINERÍA Y SUS PERSPECTIVAS

La minería del mercurio en Colombia ha sido en general reducida, y este elemento se ha extraído en forma comercial únicamente de la mina de La Nueva Esperanza (Caldas) actualmente cerrada. Sin embargo, los primeros resultados de los estudios de prospección realizados por el INGEOMINAS en parte del flanco occidental de la Cordillera Central, abren la posibilidad de encontrar nuevos yacimientos de mercurio en el sector comprendido entre los municipios de Aranzazu, Salamina y Pácora en el departamento de Caldas. Esto traería como conse-

cuencia una reiniciación en la producción, por lo menos para suplir las necesidades actuales del país.

La mayoría de las manifestaciones de mercurio en Colombia están localizada en la Cordillera Central en los departamentos de Nariño, Valle, Tolima, Quindío, Risaralda, Caldas y Antioquia; unas pocas manifestaciones se encuentran también en Córdoba, Santander, Boyacá y en la Costa del Pacífico en Nariño (ver Figura 2). Las localidades más importantes son la mina abandonada de El Cinabrio y la mina de La Nueva Esperanza.

La mina abandonada de El Cinabrio está situada en el departamento del Tolima a 12 km al W de la población de Guajarque, en las cabeceras de la quebrada Cristales afluente derecho del río Berrmellón a 3.090 m de altura sobre el nivel del mar.

La mineralización de El Cinabrio se conoce desde tiempos de la Colonia y está compuesta principalmente por venas de cuarzo con calcita y cinabrio. En 1884 se realizaron algunos estudios y por insinuación de R.H. White en 1908, una compañía inglesa inició trabajos de exploración y explotación del yacimiento, con resultados poco halagadores. Finalmente en 1923, la mina fue abandonada definitivamente (BUIRAGO y BUENAVENTURA, 1975).

El yacimiento de La Nueva Esperanza, fue descubierto en 1948 y se encuentra a 5,5 km al noroeste de la población de Aranzazu en el departamento de Caldas. La mineralización está formada principalmente por venas de cuarzo lechoso en calcita, mercurio nativo en forma de gotas o glóbulos, pirita localmente abundante y escaso cinabrio. La zona mineralizada está localizada en el contacto entre metagrauvas calcáreas y filonías, tiene una dirección de N30°E con inclinación fuerte al este y sigue aproximadamente el rumbo de las rocas encajantes. El espesor es muy variable; en algunos sectores alcanza 2 m y en corta distancia puede variar a unos pocos centímetros haciéndose vagamente definido. A diferencia de la mayoría de los depósitos de mercurio en el mundo, la fuente principal de producción en la mina de La Nueva Esperanza la constituye el mercurio nativo; el poco cinabrio presente es desechado. Información sobre producción se encuentra en la tabla 4.

TAB. 4: Producción de mercurio en la mina La Nueva Esperanza (Información suministrada por Américo Marán).

Años	Compañía Minera	Producción Libras
1948-1956	Roberto Botero, Consorcio Minero y Walter Rinquoski	60.000
1957	Borrero y Robledo	7.500
1958-1960	Chocó Pacífico	7.000
1963-1965 (Julio)	Merco	8.500
1965-1970 (Dic.)	Compañía Nueva Esperanza y Southern Union	81.000
1970-1971 (Dic.)	Américo Marán	16.000
1972 (Marzo)	Compañía Mercurífera de Caldas	20.000
1975 (Sept.)	<b>Sub-total</b>	<b>200.000</b>
	Producción de harequeros aproximadamente 10%	20.000
	<b>Total</b>	<b>220.000</b>

NOTA: Explotación en base de aproximadamente 100.000 toneladas de material. Tenor aprox. 0,1 kg por tonelada.

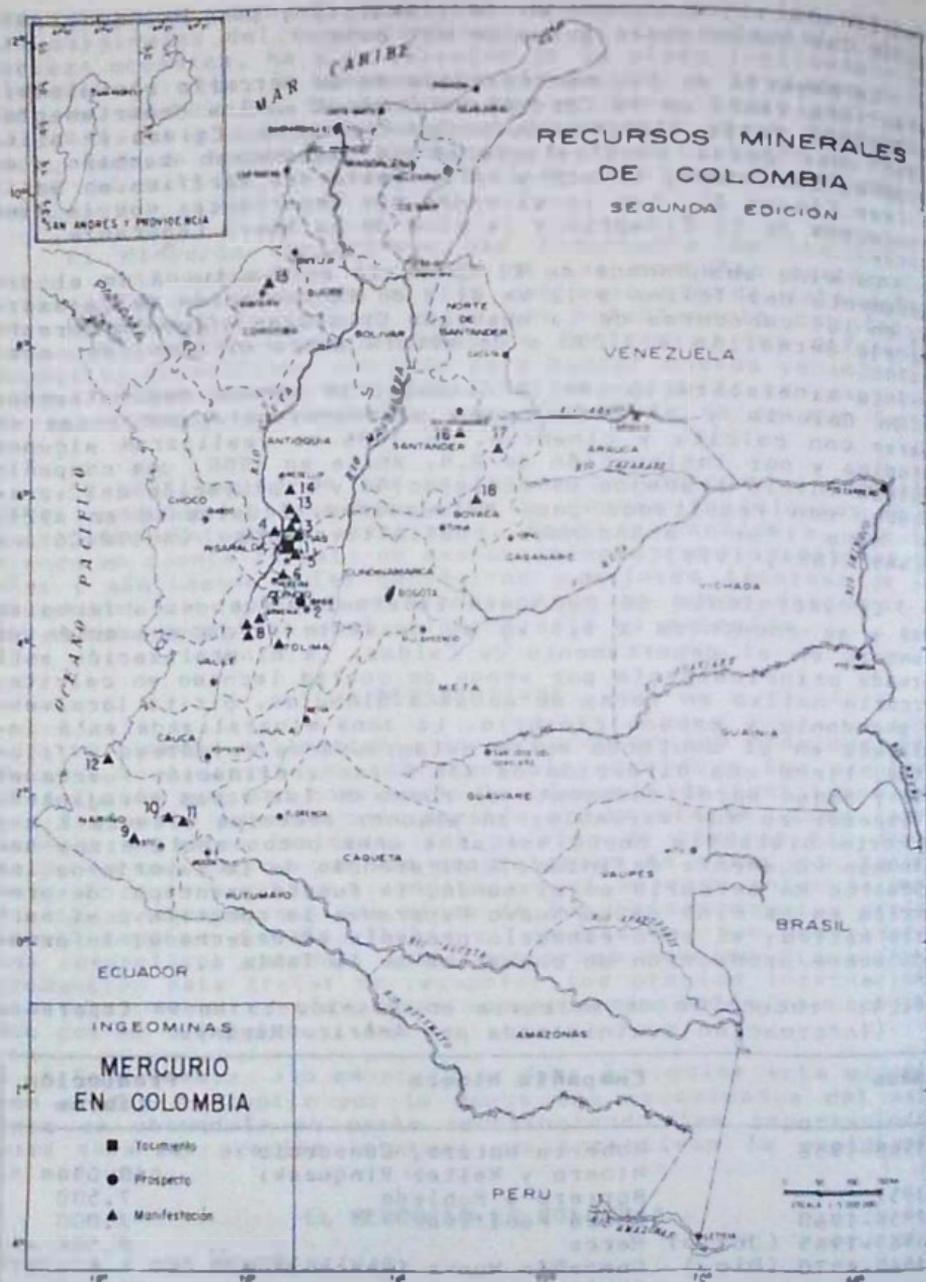


FIG. 2: Mercurio en Colombia.

## ZONAS ANÓMALAS PARA MERCURIO

Durante los años de 1975 y 1976, el INGEOMINAS ha adelantado un programa de prospección para mercurio en el área de los municipios de Aranzazu, Salamina y Pácora en el departamento de Caldas. Los objetivos principales de este estudio están encaminados a determinar zonas anómalas para mercurio que puedan indicar posibles yacimientos para ser evaluados en un futuro próximo.

Para alcanzar este propósito, la investigación se ha realizado en tres fases: a) Cartografía geológica y prospección geoquímica regional en 450 km<sup>2</sup>; b) Estudio geológico y geoquímico detallados en 270 km<sup>2</sup>; y c) Estudios geológicos y geoquímicos detallados en la mina de mercurio de La Nueva Esperanza. La interpretación geoquímica se ha basado primordialmente en cálculos estadísticos de los resultados de los análisis del contenido de mercurio en sedimentos activos, rocas y minerales. Como consecuencia de esta investigación, se han encontrado aproximadamente 10 zonas anómalas para mercurio, las cuales están alineadas dentro de una franja o cinturón de 1,5 km de ancho y 25 km de largo, que sigue una dirección nortee-sureste.

Las zonas anómalas se presentan continuas y sólo son interrumpidas y desplazadas ligeramente por fallas con dirección aproximada oeste-este (ver Figura 3).

En el extremo sur del cinturón anómalo está localizada la mina de mercurio de La Nueva Esperanza, lo que podría significar que algunas de las anomalías encontradas en esta prospección estén reflejando la existencia de nuevos depósitos de mercurio con dimensiones similares a los que se explotaron en la mina (LOZANO et al., 1978).

El área ha sido afectada por un intenso tectonismo al cual pertenece el sistema de fallas de Romeral que está localizado en el flanco occidental y a todo lo largo de la Cordillera Central de Colombia, siguiendo una dirección predominante norte-sur. Este sistema de fallas ha sufrido reactivaciones posteriores a su formación y es posiblemente el reflejo de una antigua zona de subducción, la cual a su vez, dió origen al Orogénesis del Complejo Ofiolítico del Río Cauca.

El Complejo Ofiolítico en el Área estudiada, está constituido en la siguiente forma: al oeste de la falla principal de Romeral, está representado por serpentinitas, gabros, diorita, talabazas, anfibolitas granatíferas y esquistos verdes y negros; mientras que al este de la falla está compuesto por intercalaciones de metasedimentos entre los cuales se encuentran lavas calcáreas, arcillolitas calcáreas, areniscas feldespáticas y cherts interestratificados con doleritas que en algunos sitios son intruidas, principalmente a través de brechas de fallas, por cuerpos andesíticos tabulares. El conjunto volcánico sedimentario se presenta altamente fracturado y circunscrito dando lugar localmente a la formación de filonitas; este sector, aparentemente representa una gran zona de melange. Las anomalías de mercurio se encuentran asociadas a este conjunto (ver preferencialmente la falla de Aranzazu - San Jerónimo ver Figura 3).

Inmediatamente al oriente del Complejo Ofiolítico afloran rocas metamórficas del Grupo Cajamarca de edad Paleozoica, intrusivos néisicos y rocas sedimentarias compuestas por congló-

DINAMICAS DE LAS ZONAS ANOMALAS PARA MERCURIO

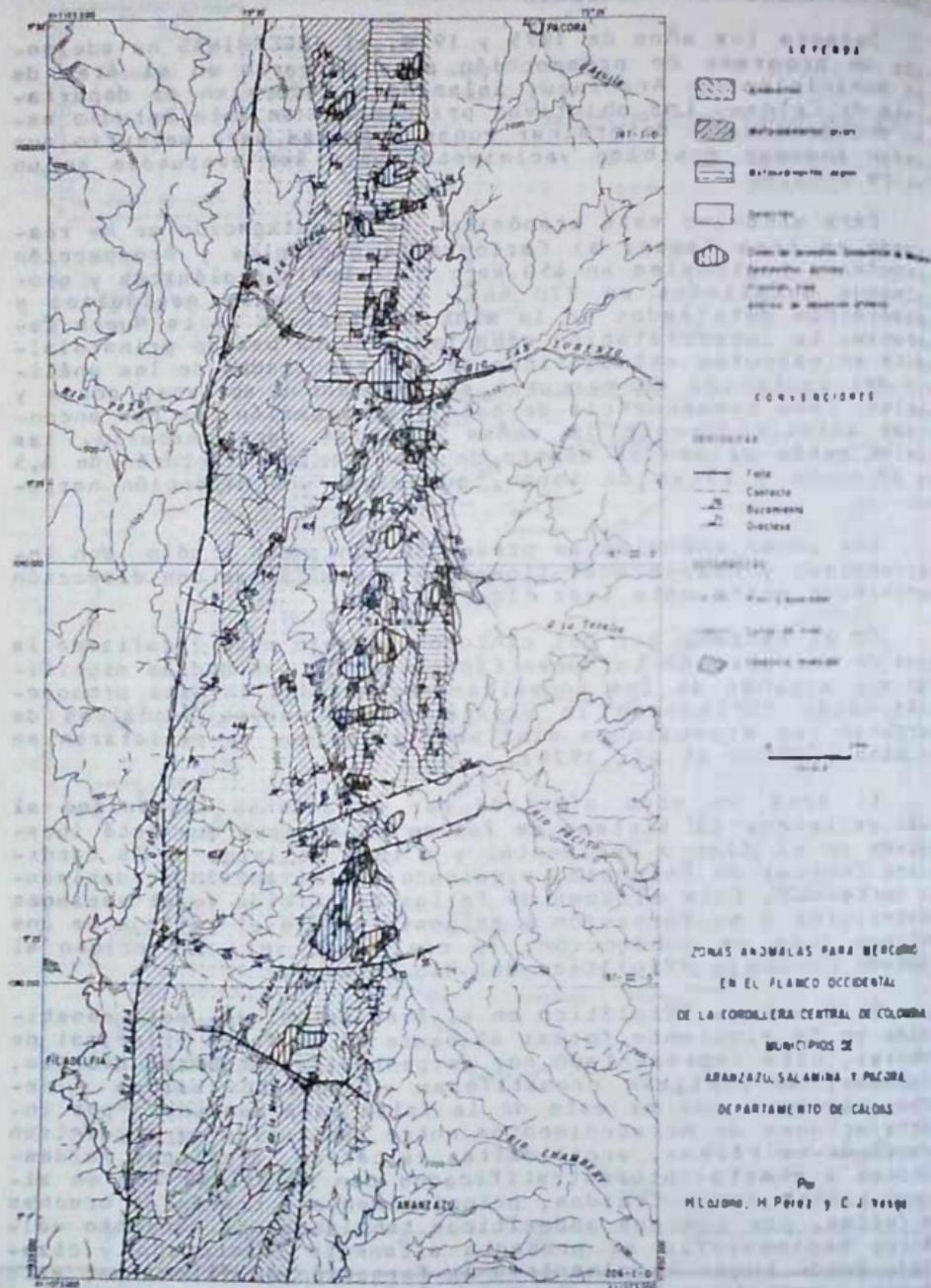


FIG. 3: Zonas anómalas para mercurio en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia. Municipios de Aranzazu, Salamina y Pácora, departamento de Caldas (LOZANO y VESGA).

areniscas y arcillolitas de edad jurásica y cretácica que corresponden a la placa continental. Los esquistos verdes y negros del Grupo Cajamarca están intruidos, a su vez, por el cuerpo ígneo de Manizales y por el Batolito de Sonsón de composición cuarzdiorítica.

Gran parte de la Cordillera Central y predominantemente el área de Manizales - Aranzazu - Salamina - Pácora, está cubierta por capas recientes de cenizas volcánicas.

## PRODUCCION

La producción de mercurio en Colombia en el presente siglo, salvo esporádicas explotaciones en la manifestación de El Cinabrio, también conocida como el Quindío o Berrmellón, localizada en el departamento del Tolima, se ha basado exclusivamente en la explotación del mercurio nativo de la mina La Nueva Esperanza. La mina fue descubierta en 1949 y está situada al norte del departamento de Caldas en el municipio de Aranzazu, pero desde hace más de 10 años se encuentra cerrada.

Los datos sobre producción de la mina de la Nueva Esperanza son incompletos y fragmentarios; sin embargo, existen algunas publicaciones y comunicaciones de personas que han estado vinculadas por mucho tiempo a esta explotación, las cuales resumiremos a continuación.

La producción en el año de 1955 fue de 2.700 libras de mercurio. En 1957 fue de 7.500 libras y la producción diaria en marzo de 1958 fue de 100 a 150 libras (WOKITTEL, 1958). En 1969 se molieron 4.600 toneladas métricas de material durante 260 días de operación y produjo 192,2 botellas de 76 libras; esto equivale a un tenor recuperable de 0,114 kg de mercurio por tonelada métrica de mineral (HALL et al, 1972). La producción desde diciembre 13 de 1970 hasta febrero 21 de 1971 fue de 936 libras 226,5 gramos, y la correspondiente al período comprendido entre el 5 de mayo y el 4 de noviembre de 1972 fue de 2.682 libras con 22 gramos.

Datos más correctos sobre producción y compañías que han explotado la mina de La Nueva Esperanza desde su descubrimiento, fueron suministrados por el señor Américo Marán (comunicación personal). Esta información se relaciona en la Tabla 3 (LOZANO et al, 1977).

## COMERCIO

Colombia ha sido permanentemente importador de mercurio debido a que la producción en el pasado no cubrió la demanda interna. A continuación se presentan las importaciones entre los años de 1980 y 1985 (Tabla 5).

Tab. 5: Importaciones de mercurio y sus compuestos (DANE).

Año	Kg Netos	U.S. \$(CIF)
1980	22.000	261.000
1981	47.000	620.000
1982	28.000	378.000
1983	55.000	583.000
1984	32.000	324.000
1985	36.000	385.000

## PROBLEMAS EN LA INVESTIGACION

Los actuales problemas que existen en la búsqueda de mercurio no son esencialmente de tipo geológico, sino ocasionados por efectos indeseables de polución que produce este elemento. En la mayoría de las investigaciones de mercurio es necesario establecer apropiadamente el grado de contaminación y sus efectos causados por industrialización.

El mercurio líquido y el vapor, así como la mayoría de los compuestos de mercurio, son tóxicos; afortunadamente los sulfuros de mercurio, principales componentes de los depósitos, constituyen la excepción. Desde hace mucho tiempo se ha reconocido la peligrosidad del mercurio y esto ha obataculizado su minería y su utilización en la industria.

Recientemente ha sido de público conocimiento, el deterioro del medio ambiente en algunos sectores, producido por concentraciones nocivas de mercurio. A esto se agrega el aumento del uso de germicidas mercuriales y los desechos resultantes especialmente de plantas de soda cáustica que convergen a lagos y ríos, lo cual ha traído como consecuencia el envenenamiento de aves, peces y de algunos seres humanos.

En la década de 1950, la población de aves en Suecia y Finlandia declinó grandemente debido al consumo de semillas que fueron tratadas con metil mercurio; reducciones similares se presentaron en la población de peces a causa de aguas contaminadas con el mismo compuesto. En 1966, Suecia prohibió el uso de compuestos químicos de mercurio en la conservación de las semillas y en 1967, impidió la venta de pescado de aproximadamente 40 lagos. En Irak (1956), Pakistán (1961) y Guatemala (1963) varias personas murieron por ingerir cereales tratados con fungicidas mercuriales.

En Japón, entre 1953 y 1960, 110 personas fueron tratadas por envenenamiento causado por el consumo de pescado proveniente de la Bahía de Minamata, la cual había sido contaminada con metil mercurio, producto de los desperdicios de una planta de plásticos; a consecuencia de esto, se reportaron 52 muertes. La pesca en la bahía fue vedada y se exigió a las fábricas la eliminación del mercurio de sus desperdicios. Nuevamente en 1965 en Nigata, Japón, murieron 5 personas de 26 casos de intoxicación por consumo de pescado en la dieta diaria que contenía hasta 20 ppm de mercurio.

En los Estados Unidos en 1969, varios miembros de una familia en Alamogordo, Nuevo México, se envenenaron por comer carne de cerdo que había sido alimentado con granos tratados con fungicidas que contenían mercurio.

En Canadá, 1970, en el Lago St. Clair se encontraron peces con concentraciones de mercurio de hasta 7 ppm. Este elemento provenía de los desechos de dos plantas de soda cáustica y cloro, una localizada en Sarnia, Ontario y la otra en Michigan; la pesca comercial en este lago fue prohibida.

En los Estados Unidos a finales de 1970, análisis elaborados sobre alimentos, revelaron que un tipo de pescado de mar tenía concentraciones entre 0.18 y 2.4 ppm de mercurio y en 138 muestras de atún enlatado los valores llegaron hasta 1.12 ppm. Ambos productos fueron retirados del mercado, aunque más tarde el atún (2,33 millones de latas) fue declarado apto para comer.

En 1975, el Comité de Protección Ambiental de la Bahía de Cartagena, Colombia descubrió que la planta de Alcalis de propiedad del Estado, estaba contaminado con mercurio la bahía. En sedimentos del caño Casimiro, que desemboca en la bahía se detectaron concentraciones de hasta 60 ppm de mercurio.

A mediados de 1972 en E.E. III., se prohibió la utilización de 92 pesticidas, se suspendieron 48 licencias de compuestos de mercurio y el uso de otros 750 compuestos fue provisionalmente cancelado. También se estableció un límite máximo de 5 litros de mercurio en 24 horas, para vapores que escapen a la atmósfera provenientes de plantas con hornos que procesen mercurio.

Es necesario todavía mayor investigación para establecer cuáles son las cantidades reales de mercurio en los diferentes ambientes, las reacciones de los minerales de mercurio en el ciclo de meteorización y transporte, la formación de compuestos orgánicos tóxicos que son fácilmente asimilados, la distribución del mercurio en la cadena alimenticia y los niveles de tolerancia humanos.

Otros estudios deben estar encaminados a investigar mejores técnicas de recuperación del mercurio, no solamente de los pecunios, sino también de los desperdicios industriales. Estas investigaciones servirán simultáneamente para mejorar las condiciones del medio ambiente y proveer del mercurio necesario a nuestra sociedad industrializada.

#### REFERENCIAS

- ALLEN E.T. and CREN SHAU J.L., 1972.- The sulphides of zinc, cadmium and mercury. Am. Jour. Sci. 4th Ser. 34, pp. 367-383.
- BATLEY, E. H., CLARRK, A. L., y SMITH, R.M., 1973.- Mercury, United States Mineral Resources: U.S. Geological Survey, Prof. Paper 820, p. 140-414.
- BUITRAGO, C. y BUENAVENTURA, J., 1975.- Ocurrencias Minerales en la Región Central del Departamento del Tolima. Inf. 1672, Ingeominas (Colombia). 479 p.
- BREESON, Ph. E., 1970.- Biological Factors in the Geochemistry of Mercury. Mercury in the Environment: U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 713, 33 p.
- HALL, R.B., ALVAREZ, J., y RICO, H., 1972.- Geology and Mineral Resources of Central Antioquia and Part of Caldes Department (Zona IIA). Colombia: Ingeominas (Colombia), p. 123-128.
- HEITZLER, J.R., DICKSON, G.O., HERRON, E.M., y PITTMAN, W.C. 1968.- Marine Magnetic Anomalies, Geomagnetic Field Reversals, and Motions of the Ocean floor and Continents: Jour. Geophys. Research, V. 73, No. 6. p. 2119-2136.
- LE PICHON, X., 1968.- Sea-Floor Spreading and Continental Drift: Jour. Geophys. Research, V. 73, No. 12, p. 3661-3697.
- ANDREWS W. 1933.- Mineral Deposits. McGraw-Hill, New York.

- LOZANO, H., PEREZ, H. y VESGA, C.J., 1977.- **Prospección geoquímica y génesis del Mercurio en el Flanco Occidental de la Cordillera Central. Municipios de Aranzazu, Salamina y Pácora, Departamento de Caldas. Ingeominas (Colombia).**
- ROPER, M.W., 1976.- **Hot Springs Mercury Deposition at McDermitt Mine, Humboldt County, Nevada. Sic. of Mining Eng. V. 750, 192 p.**
- MINING ANNUAL REVIEW 1986.- **Published by Mining Journal London.**
- RYAN, A.P., 1976.- **Mercury-Prices Nosedived to 25. Year Low in 75: Eng. and Mining Journ. V. 177. No. 3, p. 153-154.**
- TUNELL, G., 1970.- **Mercury. In: Handbook of Geochemistry. Springer-Verlag. V. 11/2, p. 80-B-1 to 80-M-5. Berlin.**
- WHITE, D.E., 1967.- **Mercury and Base-Metal Deposits with Associated Thermal and Mineral Waters. In: Barnes, H.L., ed., Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: New York, Holt, Rinehart and Winston, Inc., p. 575-631.**
- WOKITTEL, R., 1958.- **Situación del Mercurio en Colombia: Inf. 1288. Serv. Geol. Nal. 13 p.**

## MINERALES DE MOLIBDENO

OSCAR HERNANDO PULIDO U.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	295
Introducción .....	295
Historia .....	296
Entorno Geológico .....	296
Geoquímica .....	296
Mineralogía .....	297
Tipos de Depósitos .....	297
Prospección .....	299
Explotación .....	301
Beneficio y Metalurgia .....	301
Producción Mundial .....	301
Consumo .....	301
Producción, precios y perspectivas .....	301
Molibdeno en Colombia .....	303
Depósitos .....	303
Bibliografía .....	306

## RESUMEN

El molibdeno (Mo) es un metal de color gris plata, dúctil y muy resistente a los ácidos y a la oxidación. La molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), el mineral más importante de molibdeno, se encuentra comúnmente asociado con rocas ígneas de composición ácida a intermedia.

Más del 95% de molibdeno producido en el mundo se ha obtenido a partir de depósitos de pórfido de molibdeno (tipos skutterudita y cuarzomonzonita) y pórfido de cobre; Estados Unidos, Chile y Canadá son los principales países productores. El molibdeno se utiliza principalmente en la producción de aceros aleados y especiales, empleados preferencialmente en la industria energética.

De los prospectos de molibdeno conocidos en el territorio colombiano, el de Mocoa, Putumayo es, hasta la fecha, el único que ofrece posibilidades de convertirse en el primer depósito económico de este metal.

## INTRODUCCION

La molibdenita, principal mineral de molibdeno, fue identificada como un sulfuro de molibdeno por el químico sueco Carl Scheele en 1778. Cuatro años más tarde, Green, Bergmann y Wollaston lograron aislar de la molibdenita un metal que denominaron molibdeno (EZAMA, 1954).

La producción comercial de molibdeno, a pequeña escala, comenzó en los Estados Unidos a finales del siglo XIX. Con el aumento en producción de los depósitos norteamericanos de

ción con  $Fe^{3+}$  para formar ferrimolibdita a un pH entre 2,5 y 7,5, y (c) precipitación en ambientes ricos en carbonatos.

Químicamente, el molibdeno puede comportarse como metal y también como elemento no metálico. En shales, arcillas y fosforitas se presenta una relación directa entre el contenido de molibdeno y el contenido de carbón orgánico. Existe en las rocas oceánicas, de donde es precipitado en casi su totalidad con los minerales arcillosos y, menor cantidad, con los óxidos hidratados de manganeso.

## GENERALOGIA

El molibdeno no ocurre en la naturaleza en estado libre o nativo; se encuentra combinado con otros elementos tales como Pb, O, U, Fe, Mg, V, Bi, Mn y Ca. La molibdenita ( $MoS_2$ ), el principal mineral de donde se obtiene el molibdeno, cristaliza en el sistema hexagonal, presentándose comúnmente en forma de laminae análogas a las del grafito. Tiene color gris plomo y es untuosa al tacto, raya verdosa, dureza de 1,0 a 1,5 y peso específico de 4,5 a 4,7.

La wulfenita ( $PbMoO_4$ ) fue una fuente importante de molibdeno a comienzos del Siglo XX en los Estados Unidos, pero el desarrollo del depósito de Climax terminó con la producción a partir de este mineral. Otros minerales de molibdeno son: powellita ( $Ca(Mo,W)O_4$ ), ferrimolibdita ( $Fe_2O_3 \cdot 3MoO_3 \cdot 8H_2O$ ) y molibdenita u ocre ( $MoO_3$ ).

## TIPOS DE DEPOSITOS

Varias clasificaciones para los depósitos de molibdeno se han propuesto (STEVENSON, 1940; VOKES, 1963; KING et al, 1973). En este artículo se presenta la clasificación propuesta por GATE et al. (1981), considerada de amplia aceptación. Esta clasificación señala 8 clases principales de depósitos:

- I. Depósitos de pórfido de molibdeno (porphyry molybdenum).
  - a) Tipo Climax (granito).
  - b) Tipo cuarzomonzonita.
- II. Depósitos de pórfido de cobre (porphyry copper).
- III. Depósitos de metasomatismo de contacto (skarn).
- IV. Depósitos de filones y venas de cuarzo.
- V. Depósitos de greisen.
- VI. Depósitos en pegmatitas y aplitas.
- VII. Depósitos estratificados (en capas de carbón, de areniscas ligníticas, de areniscas uraníferas, de shales ricos en vanadio, de fosatos, y de shales negros).
- VIII. Depósitos oxidados de plomo-zinc.

De estas 8 clases de depósitos, los de tipo pórfido de molibdeno y pórfido de cobre son los más importantes y los que aportan más del 95% del molibdeno producido en el mundo.

Sawkins (1984) describe la relación existente entre los depósitos minerales y la tectónica de placas. Esta relación, entre los principales depósitos de molibdeno, puede ser resumida como sigue:

En límites de placas convergentes.

A) Arcos principales (Principal Arcs)

1 - Pórfido de molibdeno, pórfido de cobre  
ejem: Nevada Moly (U.S.A.); El Salvador (Chile)

- ii - Brechas en forma de tubo (Breccia Pipes) (Cu-Mo)  
ejem: Washington Pipe (México).
  - iii - Metasomatismo de contacto (Skarn)  
Montecristo (Nevada)
  - B) Arcos principales antiguos (?)
    - i - Pórfidos de cobre paleozoicos o más antiguos  
ejem: Kazakstan (U.R.S.S.).
  - C) Rifts relacionados a Arcos (Arc-Related Rifts)
    - i - Pórfido de molibdeno tipo Climax  
ejem: Climax, Henderson y Urad (U.S.A.)
- II. En límites de placa divergentes.
- A) Estados tempranos de rifting continental
    - i - Filones y venas (vein-type)
    - ii - Pórfido de cobre  
ejem: Bordvika (Noruega)

#### DEPOSITOS DE PORFIDO DE MOLIBDENO (PORPHYRY MOLYBDENUM)

Los depósitos de pórfido de molibdeno son la fuente más importante de molibdeno. Estos depósitos se han encontrado en Canadá, U.S.A., México, Groenlandia, Perú, U.R.S.S., Yugoslavia y China. Clark (1972), Soregaroli and Sutherland Brown (1976), Westra and Keith (1981) y White et al. (1981) son, entre otros, autores que tratan en detalle esta clase de depósitos, convirtiéndose en consulta obligada para el lector interesado en investigar más acerca de los depósitos en mención.

#### DEPOSITOS DE PORFIDO DE COBRE (PORPHYRY COPPER)

Como fuente de molibdeno, los depósitos de pórfido de cobre ocupan el segundo lugar en importancia, obteniéndose como subproducto. Los principales depósitos de esta clase se encuentran en U.S.A., Canadá, México, Chile, Perú y U.R.S.S.; el lector interesado encontrará en Tittley and Beane (1981) y en el capítulo del cobre, que aparece en este volumen, información y bibliografía suficientes.

Los depósitos de pórfido de cobre están relacionados especialmente a cuerpos intrusivos, generalmente porfiríticos, cuya composición varía entre granodiorita y cuarzomonzonita. Pirita, calcopirita y otros sulfuros primarios de cobre ocurren en forma diseminada y en estovercas (stockwork). Minerales de fluor, tungsteno, estaño y bismuto, casi siempre están ausentes o presentes tan sólo en cantidades insignificantes.

El depósito de pórfido de cobre y molibdeno de Mocoa (Putumayo, Colombia) es considerado por Sillitoe et al. (1980) como uno de los de relación molibdeno: cobre (0,15:1) más alta, de los conocidos en la Cordillera de los Andes, en Suramérica.

#### DEPOSITOS DE METASOMATISMO DE CONTACTO (SKARNS)

Einaudi et al. (1981), en un estudio detallado de las mineralizaciones de tipo skarn, presentan un breve pero completo resumen de los depósitos de skarn ricos en molibdeno. Los

principales depósitos, de esta clase, se encuentran en Australia, U.S.A., Canadá, México, U.R.S.S. y algunos países africanos.

Generalmente las facies intrusivas, relacionadas a esta clase de skarns, tienden a ser de tipo granítico, mientras que las correspondientes a skarns de cobre y tungsteno son más de tipo diorítico, granodiorítico o cuarzomonzonítico. Algunos de los skarns, ricos en molibdeno, también son explotados para tungsteno, cobre y bismuto. Plomo, zinc, estaño o uranio pueden ser de importancia local.

Aunque la mineralización de estos skarns polimetálicos no es bien conocida, parece estar caracterizada por hedenbergita (piroxeno), grandita (granate) y wollastonita. Los minerales explotables, principales, son molibdenita, sheelita, calcopirita, bismutinita, y algo de esfalerita y galena. Ejemplos importantes son Paradise Peak (Nevada, U.S.A.) y Clementis (Rumania).

#### DEPOSITOS DE FILONES Y VENAS DE CUARZO

Filones y venas de cuarzo, con algo de molibdenita, se encuentran distribuidos ampliamente a través del mundo. Las primeras explotaciones, de molibdeno, fueron en este tipo de depósito; un ejemplo lo constituye el depósito de Questa, Nuevo México, en donde solo hasta 1950 se descubrió la conexión de venas y filones con un depósito tipo pórfido. Esta clase de mineralización prácticamente carece de interés en la actualidad.

#### DEPOSITOS EN PEGMATITA Y APLITAS

Comúnmente, cuerpos pegmatíticos y diques aplíticos contienen molibdenita cristalizada, en forma de rosetas, distribuida en forma errática en la roca huésped. Aunque ocasionalmente han sido explotados, pocas veces son económicos, dado su bajo tonelaje y el carácter errático de la mineralización.

#### DEPOSITOS ESTRATIFICADOS

Si bien el molibdeno se concentra en carbones, shales y fosforitas, no se conocen depósitos económicos de esta clase. Coveney Jr and Martin (1983) en una investigación sobre shales, ricos en molibdeno y otros metales pesados, localizados en Illinois e Indiana (U.S.A.), concluyen que a pesar de existir yacimientos interesantes, el espesor de las capas mineralizadas (generalmente menor de 1,0 m) y lo disperso de la mineralización los hacen imposibles de explotar, al menos con las técnicas actuales.

#### PROSPECCION

La búsqueda de molibdeno se facilita dadas las propiedades físicas de la molibdenita así como las características químicas de este elemento. La molibdenita no se oxida fácilmente y por su color gris plata y su hábito hojoso puede identificarse rápidamente, pudiendo ser observada microscópicamente, en concentraciones del orden de 100 ppm, en rocas de color claro.

En ambientes ácidos, la molibdenita comúnmente es fijada en su sitio principalmente como ferrimolibdenita; también es común que sea fijada en minerales arcillosos ricos en hierro, en goetita y otros minerales limoníticos en los que no es fácil reconocerla. En ambientes químicos de menor acidez o en ambientes alcalinos, la molibdenita puede convertirse en ilsemanita ( $\text{Mo}_3\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), un mineral azul fluorescente y soluble en agua.

En la prospección de depósitos de molibdeno tipo pórfido, una vez detectado el ambiente geotectónico favorable, se puede adelantar un programa de exploración que, en términos generales, debe comprender los siguientes parámetros:

- 1 - Estudio de los principales yacimientos conocidos y afines
- 2 - En lo posible, un conocimiento geológico general del área
- 3 - Selección de un modelo de alteración-mineralización en el cual se pueda basar la exploración: por ejemplo, una zona muy fracturada y silicificada dentro o cerca de un intrusivo de composición ácida a intermedia.
- 4 - Trabajo de campo:
  - a) Reconocimiento geológico
    - . Prospección geoquímica regional (sedimentos activos principalmente)
    - . Delimitación de zonas específicas de interés (10 - 30 km<sup>2</sup>)
  - b) Mapa geológico y de alteración detallados
    - . Prospección geoquímica detallada (suelos, rocas)
    - . Polarización inducida
  - c) Perforación exploratoria en los sitios de mayor interés.

De acuerdo a Hodges et al. (1984), los yacimientos de molibdeno tipo pórfido se reconocen por la presencia de estovercas de cuarzo, alteración potásica y manchas de ferrimolibdenita. Rocas ígneas alteradas, junto con filones, venas y "brechas pipes" que contienen fluorita, rodocrosita, redonita y espersartita, son relativamente comunes en los alrededores de depósitos de molibdeno tipo Climax. Filones y venas con algo de sulfuros de metales básicos, oro, plata, tungsteno y bismuto, lo son en la periferia de depósitos de molibdeno pobres en fluor.

En la exploración neoquímica con sedimentos activos, se deben analizar molibdeno, tungsteno, fluor, bismuto, metales básicos y metales preciosos. Generalmente, valores de molibdeno iguales o mayores a 3 ppm en sedimentos activos, fracción arena -100, son considerados anómalos.

Las técnicas electromagnéticas, comúnmente usadas en la prospección de yacimientos de pórfido de cobre como métodos audio-magnetoteléuticos (AMT), polarización inducida (IP), polarización inducida espectral (SIP) y self-potencial (SP), también se usan en la prospección de depósitos de molibdeno tipo pórfido, aunque el contenido de pirita, en estos últimos, generalmente es menor.

## EXPLORACION

El molibdeno se obtiene principalmente de depósitos de pórfido de molibdeno y como subproducto en depósitos de pórfido de cobre; cantidades menores provienen de depósitos de hierro.

En la explotación de los depósitos de tipo pórfido, generalmente se utilizan técnicas masivas de extracción; el método del tajo abierto (open pit) es el más común, en condiciones normales. Cuando los métodos de extracción subterránea son necesarios para la explotación de depósitos tipo pórfido, el método de hundimiento de bloques (block caving) es uno de los más usados.

## BENEFICIO Y METALURGIA

Debido al bajo contenido de molibdeno, los depósitos de tipo pórfido de molibdeno y pórfido de cobre-molibdeno requieren de beneficio. Molienda y flotación son los principales procesos usados para obtener concentrados, hasta con 90% de molibdenita. La recuperación de la molibdenita, a partir de depósitos de pórfidos de cobre, generalmente se efectúa por un sistema de flotación selectiva, sometiendo el material a un tratamiento especial, que incluye el uso de varios reactivos y el control riguroso de pH a lo largo de todo el proceso. Generalmente, el porcentaje de molibdenita obtenido por este método, varía entre 80 y 85%.

Prácticamente todos los concentrados de molibdenita son sometidos a tostación, para obtener óxido molibdíco ( $\text{MoO}_3$ ), producto primario en la fabricación de la mayoría de los productos de molibdeno. Para algunos usos, el óxido molibdíco se purifica por medio de procesos de sublimación.

Ferromolibdeno se produce por la reducción de óxido molibdíco y óxido de hierro en un horno eléctrico; también por medio de un proceso de reducción aluminotérmica. Molibdeno en forma de polvo metálico, se produce al reducir molibdato de amonio u óxido molibdíco puro con hidrógeno. El polvo metálico es prensado para formar principalmente hojas y alambres.

## SITUACION MUNDIAL

## CONSUMO

Durante 1984, el consumo de molibdeno en los países no comunistas aumentó cerca del 18% con relación a 1983, pero fue 21% más bajo que el correspondiente a 1979 (SIOFF, Jr, 1985). La Tabla 1 presenta el consumo de molibdeno en los países no comunistas, entre 1978 y 1984. La Tabla 2 contiene información correspondiente al consumo de molibdeno según las principales categorías industriales, entre 1981 y 1984.

## PRODUCCION, PRECIOS Y PERSPECTIVAS MUNDIALES

Durante 1984, la producción en los países no comunistas superó la correspondiente a 1983 en aproximadamente 72 millones de libras (SIOFF, Jr., 1985). Este aumento se dio principalmente en los Estados Unidos, en donde minas como Nevada City, Thompson Creek y Goat Hill aumentaron su producción, al tiempo que Climax y Henderson reiniciaban su explotación.

TAB. 1: Consumo de molibdeno producido en los países no comunistas. Años 1978-1984. Valores en millones de libras de molibdeno\*.

	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Estados Unidos	70	71	60	58	34	30	39
Europa Occidental	72	76	65	59	55	53	62
Bloque Oriental	22	24	23	23	23	21	22
Japón	25	26	28	28	26	24	26
Otros	11	12	13	14	13	12	14
<b>Total</b>	<b>200</b>	<b>209</b>	<b>189</b>	<b>182</b>	<b>151</b>	<b>140</b>	<b>163</b>

\* Stott, Jr (1985)

TAB. 2: Consumo de molibdeno en los países no comunistas, según las principales categorías industriales. Años 1981-1984. Valores en porcentajes.

	1981*	1982*	1983**	1984**
Aceros especiales	45	44	44	44
Aceros inoxidables	21	23	22	22
Herramientas de acero	9	9	8	8
Hierro colado y tubos	6	7	6	6
Aleaciones super espec.	4	2	3	3
Molibdeno metálico	5	5	6	6
Productos químicos	9	9	10	10
Otros	1	1	1	1
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

\* Según Bilhorn (1984).

\*\* Según Stott, Jr. (1985).

A pesar de las dificultades políticas presentadas durante 1984 en Chile, la compañía estatal Codelco continuó operando a su máxima capacidad, manteniendo su producción. La Tabla 3 presenta la producción de molibdeno en los países no comunistas entre 1978 y 1984.

TAB. 3: Producción de molibdeno en los países no comunistas. Años 1978 - 1984. Valores en millones de libras de molibdeno.

	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Estados Unidos	132	143	151	137	90	33	102
Canadá	32	21	33	32	25	19	18
Chile	29	29	30	34	44	34	36
Otros	2	3	8	7	16	15	17
<b>Total</b>	<b>195</b>	<b>196</b>	<b>222</b>	<b>210</b>	<b>175</b>	<b>101</b>	<b>173</b>

\* Stott, Jr. (1985).

Aunque la demanda de molibdeno aumentó en 1984, la gran cantidad de mineral almacenado desde 1980 mantuvo los precios de este metal relativamente bajos. El precio promedio anual del óxido de molibdeno para 1984, de acuerdo con los reportes de la revista METALS WEEK, fue de 3,558 dólares/libra; el co-

correspondiente para 1983 fue de 3,640 dólares/libra (STOTT, Jr. 1985). Según los datos publicados en la revista *Engineering and Mining Journal*, para el último trimestre de 1985, el precio de la libra de óxido de molibdeno osciló entre 3,05 y 3,25 dólares.

El uso cada día mayor de molibdeno en la industria energética, tanto en aleaciones resistentes a la corrosión como en una variedad de formas químicas, repercutirá favorablemente en el consumo de este metal. En 1983 y 1984, el consumo de aceros especiales e inoxidable que contienen molibdeno fue de 15.000 toneladas cortas y, según Stott, Jr. (1985), se estima que esta cantidad se doblará en los próximos años.

## EL MOLIBDENO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Aunque en el territorio colombiano se conocen varias manifestaciones y prospectos de molibdeno, no se ha desarrollado aún la primera explotación para obtenerlo. El primer inventario de manifestaciones de molibdeno en Colombia lo realizó Sillitoe (1960).

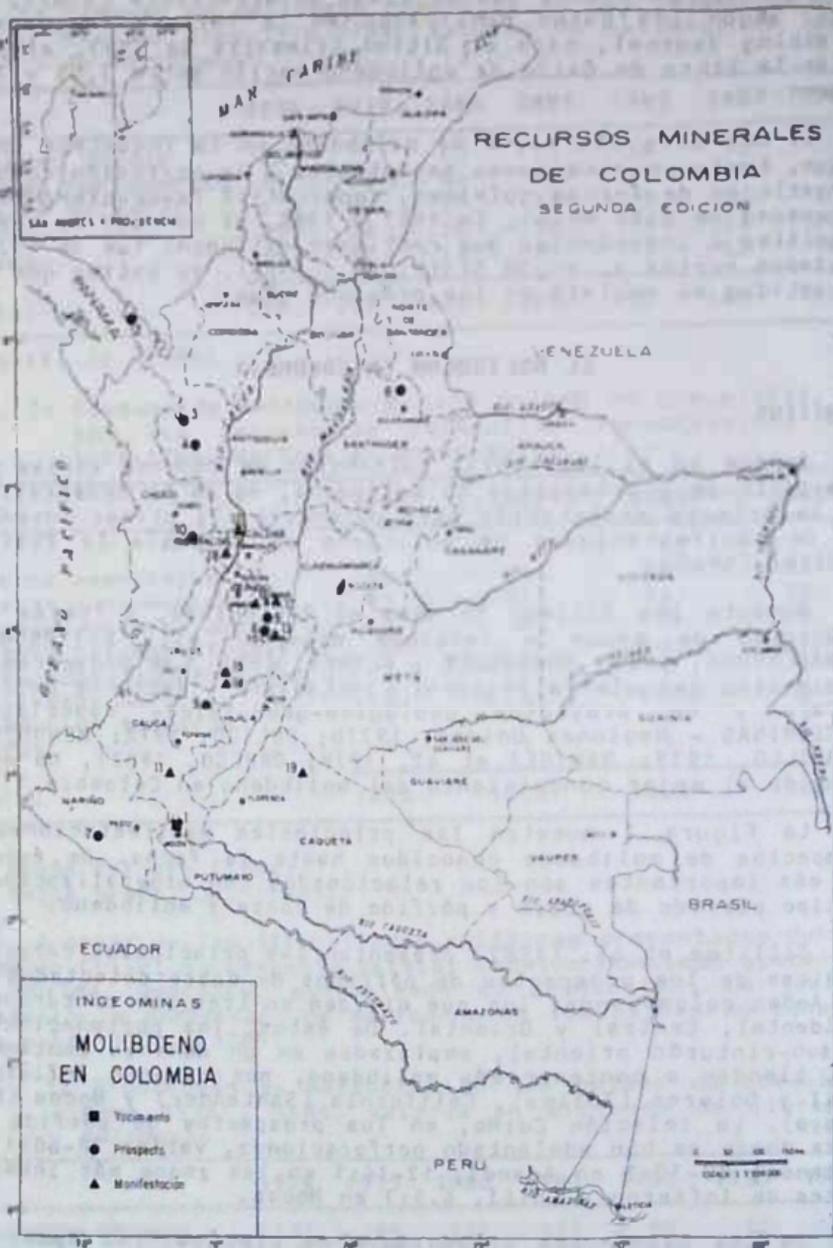
Durante los últimos 15 años el INGEOMINAS, a través del desarrollo de mapas e informes mineros (ej.: BUITRAGO y ROSCAVENTURA, 1975; RODRIGUEZ y PERNEF, 1983), de proyectos de prospección geoquímica regional (INGEOMINAS - Naciones Unidas, 1977a), y de proyectos geológico-geoquímicos específicos (INGEOMINAS - Naciones Unidas, 1977b; PUJLIDO, 1978; MENDOZA y JARAMILLO, 1979; RAMIREZ et al., 1979; ORREGO, 1982), ha contribuido al mejor conocimiento del molibdeno en Colombia.

La figura 1 muestra las principales manifestaciones y prospectos de molibdeno conocidos hasta la fecha. De éstos, los más importantes son los relacionados con mineralizaciones de tipo pórfido de cobre y pórfido de cobre y molibdeno.

Sillitoe et al. (1982) presentan las principales características de los prospectos de pórfidos de cobre detectados en los Andes colombianos, los que dividen en tres sub-cinturones: Recidental, Central y Oriental. De éstos, los pertenecientes al sub-cinturón oriental, emplazados en un dominio continental, tienden a contener más molibdeno, por ejemplo Infierno, Chili y Dolores (Tolima), California (Santander) y Mocoa (Putumayo). La relación Cu:Mo, en los prospectos de pórfido de cobre donde se han adelantado perforaciones, varía: 50-60:1 en Pantanos, 20-30:1 en Acandí, 12-16:1 en las zonas más interesantes de Infierno - Chili, 6,5:1 en Mocoa.

De los prospectos colombianos de tipo pórfido donde se han adelantado estudios en detalle, el de Mocoa es, hasta ahora, el único que ofrece posibilidades de convertirse en el primer depósito económico de molibdeno y cobre.

Sillitoe et al. (1984) presentan una amplia descripción de las principales características del depósito de Pórfido de Cobre y Molibdeno de Mocoa, localizado 10 km al norte de la ciudad de Mocoa, Putumayo, entre 1100 y 1850 m s.n.m. El primer indicio de mineralización allí, fue detectado por geoquímica de sedimentos activos; estudios adicionales condujeron al hallazgo de manifestaciones superficiales coincidentes con el actual depósito de Mocoa.



- |                         |                                |                   |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1. Mocos                | 8. California                  | 14. Cambrin       |
| 2. Acandí               | 9. El Piso                     | 15. El Oso        |
| 3. Murindó              | 10. Río Andágueda              | 16. Las Nevadas   |
| 4. Pantanos-Pegadorcito | 11. Dominical                  | 17. Alsacia       |
| 5. Andes                | 12. Marmato                    | 18. La Plumbajina |
| 6. Infierno-Chilí       | 13. Hato Viejo - Santo Domingo | 19. San Vicente   |
| 7. Piedrancha           |                                |                   |

FIG. 1: Principales ocurrencias de Molibdeno en Colombia.

El depósito de Mocoa está asociado con un stock de dacita porfirítica, emplazado durante el Jurásico temprano a medio. Las mejores tenores de molibdeno y cobre se concentran en varios cuerpos irregulares, de brechas hidrotermales, tanto en zonas de alteración potásica como de alteración sericitica.

En el programa de perforaciones adelantado por INGEOMINAS y Naciones Unidas en Mocoa se desarrollaron 31 pozos, para un total de 18.321 m perforados. La información obtenida permitió delimitar y ubicar el cuerpo mineralizado.

El estudio preliminar de factibilidad económica, para el depósito de cobre y molibdeno de Mocoa (INGEOMINAS, 1984), adelantado por Naciones Unidas, INGEOMINAS y ECOMINAS, estimó las siguientes reservas: 283'046.002 toneladas métricas con 0,37% Cu y 0,061% Mo (calculadas con una gravedad específica de 2,5 gr/cm<sup>3</sup>), y 305'689.680 toneladas métricas con 0,37% Cu y 0,061% Mo (calculadas con una gravedad específica de 2,7 gr/cm<sup>3</sup>). En este mismo estudio se señalan 3 alternativas de explotación: a) cielo abierto, b) subterráneo (hundimiento de bloques), y c) una combinación de los dos métodos anteriores.

Hodges et al. (1984), en el informe sobre Recursos Minerales de Colombia, describen 3 clases de depósito de molibdeno tipo pórfido, e indican los principales dominios, aparentemente favorables, para prospectarlos. En la Tabla 4 se indican estos dominios.

Tab. 4: Dominios favorables para prospectar depósitos de molibdeno, tipo pórfido, en el territorio colombiano. Incluye la ubicación de cada dominio en los terrenos geológicos definidos por Etayo et al. (1983). (Compilado de Hodges et al., 1984).

Tipo de depósito	Dominio	Terreno Geológicos
Pórfido de Mo tipo Urua	Cauca-Patía-Romeral	Cajamarca y Río Cauca - Romeral.
"	Santa Marta sureste	Sierra Nevada de Santa Marta
"	Macizo de Santander	Santander
Pórfido de Mo con bajo contenido de fluor	Cauca-Patía-Romeral	Cajamarca y Río Cauca - Romeral.
"	Cordillera Central sur	Cajamarca y Payandé
Pórfido de Cobre rico en Molibdeno	Cordillera Occidental	Dagua, Cañasgordas y río Cauca - Romeral
"	Cauca-Patía-Romeral Cordillera Central sur	Río Cauca - Romeral Cajamarca y Payandé
"	Valle Superior del Magdalena	Payandé
"	Guaquirá Norte	Alta Guajira
"	Macizo de Santander	Santander

## BIBLIOGRAFIA

- BILHORN, W., 1984.- **Molybdenum**. Engineering and Mining Journal v. 185 (3): p.52-53.
- BUIFRAGO, C.J. y BUENAVENTURA, J., 1975.- **Ocurrencias Minerales en la región central del Departamento del Tolima**. Informe 1672. Ingeominas. 837 p.
- CLARK, K. F., 1972.- **Stockwork Molybdenum Deposits in the Western Cordillera of North America**. Econ. Geol., v.67, p 731-758.
- COVENEY, R.M. Jr. and MARTIN, S.P., 1983.- **Molybdenum and other heavy metals of the Mecca Quarry and Logan Quarry shales**. Econ. Geol. v.78, p.132-149.
- EINAUDI, M.I., MEINERT, L.D. and NEWBERRY, J.R., 1981.- **Skarn deposits**. Econ. Geol., 75th Anniv. Vol., p.317-391.
- ETAYO, F. et al., 1983.- **Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia**. Ingeominas, Pub.Geol.Esp. No.14, edición preliminar. Bogotá.
- EZAMA, E., 1954.- **Duñica de los minerales**. Biblioteca Profesional y Técnica, Edit. Más Allá. 504 p. Barcelona.
- HODGES, C.A., et al, 1984.- **U.S. Geological Survey-INGEOMINAS Mineral Resources Assessment of Colombia**. Open-File Report 84-345, Menlo Park, California, 55 p.
- INGEOMINAS, 1984.- **Depósito de cobre y molibdeno de Mocoa, Putumayo, Colombia**. Resumen tomado del informe preliminar de factibilidad (con seis (6) anexos). Ingeominas. Pub. Geol. Esp. 16 p.
- INGEOMINAS - Naciones Unidas, 1977a.- **Proyecto de Metales Básicos en las cordilleras Central y Occidental**. Informe técnico: preparado para el gobierno de Colombia: New York Naciones Unidas, 82 p.
- \_\_\_\_\_, 1977b.- **Descubrimiento e investigación preliminar de mineralización de tipo pórfido cuprífero en la Serranía del Darién**. Proyecto de metales básicos en las Serranías del Darién y Baudó, Departamento del Chocó: Informe técnico: preparado para el gobierno de Colombia: New York, Naciones Unidas, 192 p.
- KING, R.U., SHANE, D.R. and MACKEVETI, E.M. Jr., 1973.- **Molybdenum**. In: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 820, p. 425-435.
- MENDOZA, H. y JARAMILLO, L., 1979.- **Geología y Geoquímica del Área de California, Santander**. Bol. Geol. 22 (2):3-52. Bogotá.
- ORREGO, A., 1982.- **Geología y Geoquímica del Área mineralizada El Pieno, Silvia (Cauca, Colombia)**. Ingeominas, Pub.Geol. Esp. No. 10:48-63. Bogotá.
- PULIDO, O.H., 1978.- **Mineralizaciones de molibdeno y cobre en la vereda Andes, municipio de Rovira, Tolima - Perforaciones**. Informe 1748. Ingeominas, 27 p. Ibagué.

- RAMIREZ, D., ALMINAS, H., ARIAS, A. y MOISER, E., 1979.- Estudio geoquímico en el área de Pantanos - Pegadorcito, Municipio de Frontino y Dabeiba, Antioquia. Ingeominas, Bol. Geol. 22 (2): 33-98. Bogotá.
- RODRIGUEZ, J.C. y PERNET, A., 1983.- Recursos minerales de Antioquia. Bol. Geol. 26(3): 116 p. Bogotá.
- ROSE, A.W., HAWKES, H.E. and WEBB, J.S., 1979.- Geochemistry. In: Mineral Exploration. Academic Press, 658 p. New York.
- SANKINS, F.J., 1984.- Metal deposits in relation to plate tectonics. Springer-Verlag, 325 p. Berlin.
- SHERIDAN, E.T., 1970.- Molybdenum. In: Mineral Facts and Problems, U.S. Bureau of Mines Bull. 680, p. 333-346.
- SILLITOE, R.H. et al, 1982.- Setting, characteristics, and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia. Econ. Geol., vol. 77, p.1837-1850.
- SILLITOE, R.H., JARAMILLO, L. and CASTRO, H., 1984.- Geologic exploration of a molybdenum-rich porphyry copper deposit at Mocoa, Colombia. Econ. Geol., v.79, p. 106-123.
- SOREGARDLI, A.E. & SUTHERLAND BROWN, A., 1976.- Characteristics of Canadian Cordilleran molybdenum deposits. Canadian Inst. Mining Metallurgy Spec. v.15, p. 417-431.
- STEVENSON, J.S., 1940.- Molybdenum Deposits of British Columbia. British Columbia Dept. Mines Bull. 9, 96 p.
- STOTT, C.E. Jr, 1985.- Molybdenum. In: Engineering and Mining Journal, v, 186, No. 3:72-73.
- TITLEY, S.R. and BEANE, R.E., 1981.- Porphyry Copper Deposits. Econ. Geol. 75th. Anniv. Vol., p. 214-269.
- TONES, F.M., 1963.- Molybdenum of Canada. Canadá Geol. Survey Econ. Geology Rept. 20, 332 p.
- WESTRA, G. and KEITH, S.B., 1981.- Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits. Econ. Geol., v. 76, p.844-873.
- WHITE, W.H., et al, 1981.- Character and genesis of Climax-type molybdenum deposits. Econ. Geol. 75th Anniv. vol. p. 270-316.
- WICKITTEL, R., 1960.- Recursos Minerales de Colombia. Comp. Est. Geol. de Col. Tomo X, p. 45. Bogotá.

## MINERALES DE NIOBIO Y TANTALIO

ALVARO MURILLO R.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	308
Introducción .....	308
Usos .....	309
Usos del Niobio .....	309
Usos del Tantalio .....	309
Ambiente Geológico .....	310
Geoquímica .....	310
Mineralogía .....	310
Tipos de depósitos .....	312
Técnicas de prospección .....	313
Beneficio y Metalurgia .....	315
Situación Mundial .....	316
Producción .....	318
Precios .....	319
Consumo .....	320
Sustitutos .....	321
Niobio y Tantalio en Colombia .....	322
Depósitos .....	322
Comercio Exterior .....	322
Perspectivas .....	322
Problemas para Investigar .....	324
Impacto Ambiental .....	325
Bibliografía .....	325

## RESUMEN

El niobio (Nb) y el tantalio (Ta), son elementos de gran importancia para la tecnología moderna debido a su amplio uso en la industria metalúrgica, electrónica (fabricación de computadores), química y nuclear. Estos metales ocurren en la naturaleza principalmente como isótopos simples, Nb-93 y Ta-181, y en la corteza terrestre, los contenidos promedios estimados (Clarke) para estos metales, son de 20 y 9 ppm respectivamente.

El Niobio y el tantalio tienen una gran afinidad geoquímica y ocurren simultáneamente, aunque en proporciones variables, en la mayoría de rocas y minerales. En las sienitas nefelínicas y carbonatitas el Nb es preponderante al Ta. Estos elementos se presentan en más de 90 minerales, principalmente óxidos, hidróxidos, algunos silicatos, y un borato.

Los yacimientos de Nb y Ta se encuentran en las rocas de los complejos alcalinos, carbonatitas, ciertos tipos de granitos, pegmatitas, placeres y depósitos residuales. La mayor parte de los recursos de estos dos metales aparecen en Brasil, Nigeria, Canadá, URSS, Tailandia, Malasia, Mozambique, Zaire y Australia. Se considera que las reservas de niobio hasta hoy conocidas son lo suficientemente adecuadas como para satisfacer la demanda futura, lo cual no acontece con el tantalio. Se requieren por lo tanto investigaciones geológicas para el hallazgo de nuevos yacimientos de este metal que permitan atender las necesidades futuras.

En 1984, la Comunidad Económica Europea y el Japón importaron el 100% de estos metales para cumplir con los procesos industriales en los cuales intervienen estos elementos; durante 1985, los Estados Unidos importaron el 100% de niobio y el 92% de tantalio para satisfacer su demanda.

## INTRODUCCION

El niobio (Nb) y el tantalio (Ta) son elementos de gran importancia económica debido a su amplio uso en la industria metalúrgica, electrónica, química y nuclear. La producción mundial de concentrados de Nb y Ta aumentó siete veces entre 1960 y 1970 y tres veces entre 1971 y 1980. En 1984, la Comunidad Económica Europea y el Japón importaron el 100% de estos metales para cumplir con sus necesidades industriales. Durante 1985 los Estados Unidos importaron el 100% de niobio y el 92% de tantalio para satisfacer su demanda.

Los usos de estos metales son diferentes. El Nb se emplea en la industria automotriz y del acero y el Ta tiene aplicaciones estratégicas en la fabricación de misiles, condensadores para computadores, equipos para plantas nucleares y algunos componentes de los vehículos aeroespaciales.

El niobio fue identificado por C. Hatchet en 1801 quien trabajó un nuevo óxido de un mineral presente en una de las minas del Estado de Connecticut (Estados Unidos) y lo llamó columbio (Columbium). M. Rose en 1844 propuso el nombre de niobio a ese elemento. Debido a la existencia de estos dos nombres, en 1950 la International Union of Pure and Applied Chemistry adoptó como nombre oficial el de niobio, que aún no ha sido aceptado en la metalurgia y en el mercado de los minerales algunos prefieren el término columbio.

El tantalio fue identificado por A.G. Ekeberg en 1802 en una mina de Suecia quien a su vez le dio ese nombre. Berzelius obtuvo Ta con impurezas en 1824 y M. Bolton logró la forma pura y dúctil en 1903.

## USOS

### USOS DEL NIOBIO

El niobio se utiliza principalmente en forma de aleaciones para la fabricación del acero (al carbón o inoxidable), superaleaciones y superconductores y en forma de óxidos o carburos.

El consumo de niobio por parte de la industria del acero tuvo un gran incremento al descubrirse que las propiedades mecánicas del acero se mejoran con la adición de Nb en cantidades tan bajas como el 0.1%. Este tipo de acero altamente resistente y con un porcentaje bajo de aleación (HSLA) se utiliza principalmente en la construcción de tuberías especiales (mineroductos, oleoductos o gasoductos) o estructuras de grandes edificios, y en la fabricación de equipos y estructuras livianas para los vehículos pequeños y de carga.

También se utilizan cantidades apreciables de niobio en la fabricación de superaleaciones con níquel, hierro o cobalto esenciales para la elaboración de algunos componentes de las turbinas (cuchillas, discos y hélices), partes de satélites, equipos resistentes a la combustión y el calor; y como material de construcción de los reactores nucleares debido a su

resistencia al ataque con aguas a altas temperaturas y al sodio líquido. La proporción de este metal en las superaleaciones inicialmente varía entre el 1% y el 5%.

En la fabricación de aleaciones superconductoras de niobio-tantalio y compuestos de niobio-estaño la demanda de Nb será cada vez mayor debido a su posible empleo en la generación y transmisión de la energía en el futuro. La manufactura de estos superconductores usualmente comprende un proceso complejo en el cual la compatibilidad y ductibilidad del niobio con el cobre ha resultado altamente ventajosa.

El óxido de niobio se utiliza principalmente en la fabricación de ferro-columbio de alta pureza, aleaciones de níquel-niobio, niobio puro y carburo de niobio. Este último producto se emplea en las cortadoras de acero recubiertas con carburo para modificar las propiedades del carburo de tungsteno-cobalto que se utiliza como material de base.

### USOS DEL TANTALIO

Aproximadamente el 66% del consumo de tantalio en 1979 se distribuyó entre la producción de componentes electrónicos, principalmente condensadores y rectificadores; el resto se utilizó en la producción de superaleaciones para equipos de vehículos aeroespaciales (8%), sometidos a altas temperaturas y resistentes a la corrosión, en la elaboración de carburo de tantalio para máquinas cortadoras de alta temperatura (17%) y en la fabricación de equipos químicos y contenedores líquido-metal (9%).

El consumo de tantalio en otros usos tales como reactores nucleares, vidrios ópticos, instrumental de laboratorio y equipos electroplateados fue menor que el 1% del consumo total.

### AMBIENTE GEOLOGICO

El niobio generalmente se encuentra en la naturaleza como óxido en asociación con otros metales y nunca en forma elemental o como sulfuro. Este elemento tiene una estrecha coherencia geoquímica con el tantalio; por tal motivo, se encuentran juntos en la mayoría de las rocas y minerales en los cuales ellos se presentan.

### GEOQUIMICA

El niobio es un elemento químico de número atómico 41, peso atómico 92,91 y símbolo Nb. Debido al nombre columbio se utiliza también como símbolo el de Cb. El tantalio tiene un número atómico de 73, peso atómico 180,95 y símbolo Ta. En la naturaleza estos dos elementos ocurren prácticamente siempre como isotópos simples, Nb-93, Ta-180 y Ta-181. Este último isótopo es tan sólo el 00.1% del elemento (EVANS et al, 1955, WHITE et al, 1955, STROMENGER et al, 1958, in: PARKER y ADAMS, 1973).

El niobio y el tantalio poseen una gran coherencia geoquímica debido a que tienen radios iónicos similares (0.69 y 0.68Å respectivamente) y estados de valencia idénticos (pentavalentes positivos) que son aparentemente los parámetros fundamentales que controlan el ingreso de los elementos en la estructura cristalina.

Las actuales estimaciones de la abundancia del niobio y el tantalio en la corteza de la tierra (Clarke) son de aproximadamente 20 y 2 ppm respectivamente (TAYLOR, 1964). Estas cifras sin embargo, son variables dentro de los miembros del mismo tipo de roca que afloran en diferentes localidades y entre las diversas variedades litológicas que existen en la naturaleza.

En las rocas ígneas en general, los valores más bajos de niobio y tantalio se encuentran en algunas ultramáficas no relacionadas con los complejos alcalinos mientras que algunos de los valores más altos aparecen en granitos alcalinos, sienitas con nefelina y ultramáficas relacionados, pegmatitas y carbonatitas. Los contenidos más altos de tantalio ocurren en granitos albitizados pegmatíticos que son diferenciados tardíos de los granitos batolíticos.

En las rocas ígneas la proporción Ta: Nb se encuentra entre 1:10 y 1:15 aún cuando en algunos complejos alcalinos ricos en niobio esta relación es totalmente diferente debido a los contenidos extremadamente bajos de tantalio (PARKER y FLEISCHER, 1968).

En las rocas sedimentarias los contenidos más altos de niobio se encuentran en los nódulos de manganeso y sedimentos oceánicos profundos y en las bauxitas. Los más altos del tantalio se encuentran en arcillas de origen marino.

Algunos minerales del niobio y tantalio física y químicamente resistentes, se acumulan localmente en placeres y se depositan junto con los materiales que forman las areniscas y conglomerados (PARKER y FLEISCHER, 1968).

El niobio y el tantalio en los meteoritos son tan sólo una fracción de los valores promedio de abundancia en la corteza terrestre, aunque en algunas tectitas el contenido de tantalio es próximo a ellos (PARKER y FLEISCHER, 1968).

El comportamiento geoquímico del niobio y del tantalio en las rocas graníticas depende de la paragénesis de los minerales de titanio y en el tipo de roca. Los granitos ricos en monazita y con ilmenita y rutilo suelen tener Nb y Ta en la biotita; mientras que, los granitos alunitíferos con esfena y magnetita los tienen concentrados en la esfena y subordinadamente en la biotita. En algunas rocas graníticas el Nb y el Ta aparecen en la hornblenda y ocasionalmente, como minerales accesorios discretos.

El niobio y tantalio generalmente se acumulan en los diferenciados tardíos durante la cristalización de los granitos y existe una tendencia para que el tantalio se concentre principalmente a expensas del niobio en algunas rocas albitizadas o greissen. La causa de este fenómeno se atribuye a los cambios en la relación de alcalinidad-acidez del medio cristalizante y a la formación de minerales complejos.

El Nb y el Ta disueltos durante el ciclo de la meteorización, tienden a concentrarse en los hidrolisatos. Sin embargo, una cantidad apreciable de niobio escapa al océano donde se precipita con arcillas y óxido de manganeso produciéndose un relativo enriquecimiento con relación al tantalio. Un fraccionamiento similar ocurre en las arcillas que tienen como fuente de suministro las regiones áridas y una cuenca de sedimentación marina.

## MINERALOGIA

En el glosario de minerales de niobio y tantalio preparado por Parker y Fleischer (1968) se encuentra que la mayoría de ellos son óxidos, óxidos múltiples, hidróxidos, silicatos y un borato. En estos minerales el Nb y el Ta se encuentran estrechamente asociados con titanio, estaño, zirconio, hafnio y tungsteno. Además se reconocen, uranio, torio, tierras raras (T.R.), bismuto y otros elementos.

Aproximadamente 90 especies y variedades minerales contienen Nb y Ta como constituyentes mayores, algunos de los cuales se enumeran en la Tabla 1.

TAB. 1: minerales de niobio y tantalio más importantes.

Risuntantalita	$Ri(Ta, Nb)_2O_4$	Ortorrómico	PG
Columbita-tantalita	$(Fe, Mn)(Nb, Ta)_2O_4$	Ortorrómico	G, PG
Entruberita	$(Ti, Ta, Nb, Fe)_2O_4$	Tetragonal	G, PG
Euxenita	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ti, Ta)_2O_6$	Ortorrómico	G, PG, P
Fergusonita	$(Y, Er, Ce, Fe)(Nb, Ta, Ti)_2O_4$	Tetragonal	PG
Fersmanita	$(Ca, Na)_2(Ti, Nb)SiO_5(O, OH)$	Monoclinico	PA
Ixiolita	$(Ta, Fe, Sn, Nb, Mn)_4O_3$	Ortorrómico	PG
Loparita	$(Na, Ca, Ca)(Ti, Nb)O_3$	Cúbico	PA
Microlita	$(Ca, Na)_2(Ta, Nb, Ti)_2(O, OH, F)_7$	Cúbico	PG
Murmanita	$Na_2(Ti, Nb)_2Si_2O_9 \cdot nH_2O$	Monoclinico	PA
Niocalita	$Ca_2NbSi_2O_{10}(OH, F)$	Monoclinico	C
Pandaite	$(Ba, Sr)_2(Nb, Ti, Ta)_2(O, OH, F)_7$	Cúbico	C
Policrosa	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	Ortorrómico	PG
Pirocloro	$(Na, Ca, Ce)_2(Nb, Ti, Ta)_2(O, OH, F)_7$	Cúbico	PA, C, G
Somersquita	$(Y, Fe, U)(Nb, Ti, Ta)_2(O, OH)_6$	Ortorrómico	PG
Tapiolita	$(Fe, Mn)(Ta, Nb)_2O_6$	Tetragonal	PG
Toralutia	$Sn(Ta, Nb)_2O_7$	Monoclinico	PE
Wodginita	$(Ta, Sn, Mn, Nb, Fe, Tr)_{16}O_{32}$	Monoclinico	PG
Occurrencias:	G: Granito		
	P: Placeres		
	C: Carbonatita		
	PG: Pegmatita granítica		
	PA: Pegmatita alcalina		
	PE: Pegmatita estañífera		

Los minerales de mena del niobio pertenecen al grupo del pirocloro, del cual existen 16 especies (HOGARTH, 1977). La columbita, variedad rica del niobio en la serie columbita-tantalita, es otra fuente importante de este elemento (JONES, 1980).

La mena de tantalio es la serie mineralógica microlita-pirocloro, euxenita y la serie tantalita-columbita. La entruberita es una fuente de bajo tenor del tantalio recuperable de

las colas que resultan de la explotación de las minas de esta-  
en el sureste del Asia (JONES, 1980).

## TIPOS DE DEPOSITOS

Los depósitos comerciales de Nb y Ta se encuentran en los  
diferentes tipos de rocas relacionadas con los complejos alcali-  
nos, tales como las sienitas con nefelina y carbonatitas,  
diferentes variedades de granitos, pegmatitas y en placeres. Al-  
gunos depósitos de bajo tenor, ampliamente diseminados y no  
explotados, ocurren en granitos con riebeckita y en las bauxi-  
tas derivadas de la sienita con nefelina (PARKER y ADAMS,  
1973).

## DEPOSITOS RELACIONADOS CON LOS COMPLEJOS DE ROCAS ALCALINAS

Las sienitas nefelínicas son rocas que pueden estar alta-  
mente enriquecidas en niobio y tantalio, particularmente sus  
productos finales de cristalización tales como pegmatitas, zo-  
nas albitizadas y algunas carbonatitas. De acuerdo con las ca-  
racterísticas químicas y mineralógicas aparecen dos tipos de  
sienitas con nefelina, las cuales se denominan "agpaítica" y  
"miasquítica" o común. La primera está caracterizada por un  
exceso de álcalis ( $K_2O + Na_2O$ ) en relación con alúmina, en  
contraste con la segunda.

De acuerdo con la mineralogía, la sienita agpaítica está  
caracterizada por la presencia de minerales con cloro o zirconio  
anfíboles y piroxenos sódicos, la ausencia general de calcita  
y el Nb y Ta asociados con minerales de titanio y zirconio.  
La sienita miasquítica, por el contrario, posee los tí-  
picos minerales formadores de roca (biotita, augita, hornblen-  
da, esfena, apatito), minerales discretos de niobio y tantalio  
pirocloro en los derivados post-magmáticos) y muy subordinada-  
mente los minerales raros de química compleja que aparecen  
en el tipo agpaítico (SORENSEN, 1974).

En general, los cuerpos de carbonatita que contienen los  
grandes recursos mundiales de niobio, se ubican en el in-  
terior de los complejos intrusivos alcalinos, constituidos por  
rocas que en su composición varían desde sienita con nefelina  
hasta gabro alcalino, y piroxenita. Muchos de estos complejos  
son circulares o elípticos en vista de planta (otros no) y las  
carbonatitas generalmente aparecen como masas en forma de ar-  
bol, radial o discordante irregular dentro del complejo. Esta  
frecuencia litológica sin embargo presenta grandes variaciones.  
En algunos complejos el núcleo es de carbonatita mientras que  
en otros es de sienita alcalina (DAWSON, 1974).

La mineralogía de estos complejos es muy variada y en mu-  
chos de ellos se han encontrado depósitos de uno o más de los  
siguientes metales o minerales de interés económico: Niobio,  
Hierros Raras, Cobre, Níquel, Titanio, Torio, Uranio, Vermicu-  
lita, fluorita, Zirconio, Barita y Estroncio. La composición  
de la carbonatita varía de carbonatos de hierro y magnesio a  
prácticamente calcita pura.

Las carbonatitas y rocas alcalinas encontradas en la  
cratiza de la tierra comprenden edades entre el Precámbrico y  
Holoceno, sin mostrar preferencia por algún período geoló-  
gico específico.

## DEPOSITOS EN ROCAS GRANITICAS

El Niobio y el tantalio están presentes en la mayoría de rocas graníticas en cantidades traza con minerales de hierro o estaño y algunas veces con zirconio. Algunos granitos raras contienen columbita, euxenita, fergusonita o pirocloro como minerales accesorios en un grado tal que concentraciones económicas de estos minerales pueden desarrollarse a través de la meteorización de estas rocas dando lugar a depósitos residuales o de placeres.

En los granitos peralcalinos y metaluminosos tipo encudo se han detectado contenidos de Nb y Ta altos (mayores que 2.000 y 100 ppm respectivamente) acompañados de otros elementos enriquecidos, tales como tierras raras, ytrio, torio y uranio (DRYSDALL et al, 1984).

## DEPOSITOS EN PEGMATITAS

Las pegmatitas fueron por muchos años la mayor fuente de Nb y Ta. Para el primer elemento, esta situación cambió a expensas de las carbonatitas, mientras que para el tantalio sigue cumpliéndose.

Columbita-tantalita y otros minerales de niobio-tantalio ocurren en las pegmatitas de todo el mundo, sin embargo, en muy pocas de ellas, los tenores son lo suficientemente altos como para ser explotados directamente; por tanto, son extraídos como coproducto o subproducto de las operaciones mineras montadas para la extracción de la mica, berilo, o casiterita. En los Estados Unidos recuperaciones intermitentes de minerales de Nb-Ta se obtienen prácticamente en todas las áreas donde se explotan las pegmatitas.

## DEPOSITOS DE PLACERES

Hasta 1961 la fuente principal de niobio y tantalio fue el concentrado de columbita recuperado como subproducto de los placeres de estaño en Malasia, Burma, Tailandia y Jos Plateau en Níger. La producción actual de esta fuente es aún competitiva con la proveniente de los complejos de sienita alcalina del Canadá y de los aluviones del Brasil (DAWSON, 1974). Los placeres se forman en áreas donde se combinan favorablemente rocas fuentes, el proceso de meteorización y el transporte por agua de los sedimentos. Las fuentes primarias de los minerales de niobio y tantalio son: los granitos tipo albito - biotita - columbita, albita - riebeckita - pirocloro y las pegmatitas de granito o sienita. Estos minerales pesados resistentes a la meteorización se acumulan inicialmente en la fuente y llegan a ser enriquecidos por la acción química y remoción física de otros minerales menos durables y de peso específico más bajo. Estas acumulaciones pueden constituirse en depósitos de placeres explotables mediante los métodos adecuados.

El transporte y la redepositación de los minerales de Nb y Ta por las corrientes de agua pueden formar placeres aluviales, encontrándose los más ricos en o muy cerca del área fuente, o en aquellos sitios donde la velocidad del agua es tan reducida que deposita la carga de minerales pesados. Esta reducción de velocidad puede deberse a muchos factores, principalmente aquellos relacionados con la historia geomorfológica del terreno geológico.

## TÉCNICAS DE PROSPECCIÓN

Las hipótesis geológicas continúan siendo los factores relevantes para el hallazgo de nuevos depósitos minerales. Estas permiten la escogencia de ambientes posibles en los cuales se puede adelantar la prospección y sirven además, como base para la interpretación de la variedad de resultados obtenidos mediante diferentes técnicas de búsqueda y como una guía para los trabajos posteriores de desarrollo y exploración. Un ejemplo de este principio lo encontramos en el niobio, donde la experiencia ha demostrado que los complejos de rocas alcalinas y carbonatitas asociadas son actualmente fuentes probables de los depósitos nuevos de niobio, que las pegmatitas son la fuente probable de los depósitos nuevos de tantalio y que los placeres radioactivos pueden ser la fuente de ambos metales (DAWSON, 1974; PARKER y ADAMS, 1973; KUSVARD y BOHMER, 1978).

El reconocimiento de los complejos alcalinos se basa inicialmente en la cartografía geológica y la prospección geofísica. El clima, la topografía y la localización influyen en los factores económicos y en los procedimientos de la búsqueda de los yacimientos.

La disposición circular y concéntrica en vista de planta de las rocas que forman los complejos alcalinos, es una valiosa guía de prospección que puede ser identificada mediante las técnicas convencionales de la cartografía geológica y de las fotografías aéreas. Cuando estas estructuras están cubiertas por rocas más jóvenes o materiales de cobertura, el contenido de magnetita puede ayudar a su detección. Tanto los estudios magnéticos a nivel del suelo como los aéreos, han sido empleados exitosamente en el reconocimiento de anomalías magnéticas, algunas de las cuales son causadas por carbonatitas con depósitos de niobio y tantalio como en Ontario y Quebec en el Canadá (DAWSON, 1974) o en Meponda-Mozambique (LULIN et al, 1985).

La asociación natural del niobio con el uranio y el torio, hace que los detectores de radiación sean herramientas útiles de prospección. En los complejos de Meponda (Mozambique) y de St-Honoré (Canadá), los estudios con centímetro permitieron delinear las anomalías producidas por los minerales radioactivos asociados con Nb-Ta.

Las técnicas gravimétricas y de prospección sísmica han demostrado ser útiles para obtener información de profundidad de la cobertura o información sobre las diferencias en densidades de las rocas subyacentes.

Geoquímica supergenética (LULIN et al, 1985; DRYSDALL et al, 1984) y prospección aluvional y aluvial (COSTA, 1973), han demostrado ser técnicas muy efectivas para la delimitación de las anomalías y la definición sin ambigüedades de la facies científico-alcalina del complejo.

Una vez identificado el prospecto, debe ser evaluado por medio de los procedimientos de exploración convencionales. Los minerales de niobio y tantalio, son difícilmente identificables y además, no son tan fácilmente detectables debido a su insolubilidad en la mayoría de soluciones y a su naturaleza refractaria.

Procedimientos químicos cuantitativos y cualitativos han sido desarrollados y usados en el campo para determinar la

condiciones puede ser necesarias antes de alcanzar el nivel de pureza requerido y la producción del lingote dúctil.

## TANTALIO

Los desarrollos mineros del tantalio son pequeños, a diferencia del niobio, y son relativamente operaciones costosas e intermitentes que dependen de la recuperación de los minerales coproductos para su viabilidad económica.

Los depósitos de tantalio y los placeres aluviales y residuales de estaño que contienen la, generalmente se explotan por métodos manuales, monitores hidráulicos, dragas o el método de cielo abierto mecanizado. La minería de los depósitos pegmatíticos se adelanta por explotación a cielo abierto o subterránea y se lleva a cabo mediante el empleo de explosivos. Los fragmentos que resulten se muelen para separar el mineral de mena y los minerales asociados, para su concentración por métodos gravitacionales húmedos. A continuación se separan estos minerales por medio de procesos gravimétricos electrostáticos y electromagnéticos.

El tantalio también se recupera a partir de las escorias producidas en las plantas fundidoras de estaño localizadas en el mundo. Las provenientes de Tailandia y Malasia aportan la mayor parte del Ta utilizado por la industria y durante los últimos años, han sido la fuente más importante de materias primas para las plantas procesadoras norteamericanas.

Los contenidos de tantalio en las escorias son muy variables dependiendo de la mena que se explota y del método empleado en la fundición. Las producidas a partir de los depósitos aluviales de Tailandia son de gran interés como fuente de Ta, mientras que las provenientes de las menas de Bolivia son de escaso valor comercial en este aspecto.

Una gran variedad de procesos han sido usados para la extracción del tantalio a partir de los concentrados y escorias. La tecnología moderna hace uso principalmente de la digestión con ácido hidrofluórico seguido de una extracción líquida-líquido con metil-isobutil-cetona (MIBK). La sustancia producida es una solución ácida fluotántálica de la cual se precipita fluoruro de tantalio y potasio por medio de la adición de cloruro o fluoruro de potasio; o pentóxido de tantalio, por la adición de amoníaco.

El tantalio metálico puede obtenerse por varios métodos siendo el más conocido y comercialmente estándar el de electrolisis de fluoruro de tantalio y potasio (sal de potasio). Para este procedimiento, la reacción se lleva a cabo en reatoras metálicas a temperaturas aproximadas a los 800°C. El producto obtenido es un polvo que se consolida por medio de una sucesión de compresión, incrustación al vacío y fundición.

El tantalio se recupera a partir de chatarra poco contaminada, por medio de la hidrurización hasta lograr hacer frágil el metal, el cual se muele y deshidruriza al vacío. La chatarra de los condensadores inicialmente se procesa para remover las impurezas metálicas y no metálicas antes de que sean reciclados. El polvo resultante se alimenta directamente al proceso o se mezcla con unido.

En general más de la mitad del tantalio producido en el mundo se obtiene a partir de materiales secundarios, especial-

mente, escorias. Sin embargo, esta fuente será insuficiente para satisfacer la demanda futura y por tanto, se requerirá la explotación de los depósitos primarios ricos en Ta y aquellos de bajo tenor-composición mineralógica compleja.

## SITUACION MUNDIAL

### NIOBIO (COLUMBIO)

Los recursos mundiales de niobio se estiman en unos 38.000 millones de libras, de los cuales solamente 9.000 millones son consideradas económicamente explotables y se clasifican como reservas (JONES, 1980). El país con mayores reservas de niobio es el Brasil donde se explotan depósitos de pirocloro con tenores promedio del 2% del  $Nb_2O_5$ .

La estimación canadiense de sus reservas en 2.700 millones de libras se considera muy moderada, debido a que numerosos depósitos de tenor bajo han sido encontrados recientemente sin haberse evaluado hasta ahora.

El depósito con pirocloro que actualmente se explota en el Canadá contiene aproximadamente 0.7% de  $Nb_2O_5$ .

La mayor parte de los recursos del niobio de la URSS son de un tenor bajo y subeconómicos de acuerdo con los costos estándar en el resto del mundo. Los recursos totales se estiman en 7.000 millones de libras de Nb, aún cuando estas cifras tienen un cuestionable grado de certeza.

En el Africa, la mayor parte de los recursos son antieconómicos actualmente debido a que poseen tenores relativamente bajos, son mineralógicamente complejos o por otras razones. La columbite es el mineral de niobio producido en cantidades significativas en el Africa.

Los recursos de columbio (Nb) en los Estados Unidos, son todos comparativamente bajos en tenor y no se conoce depósito alguno actualmente en explotación rentable. El depósito de niobio más grande en este país se localiza en Gunnison Country, Colorado, con reservas aproximadas a las 400.000 toneladas de  $Nb_2O_5$  y con un tenor aproximado de 0.06%. La recuperación de niobio depende de varios factores, tales como coproducción de torio y minerales de tierras raras. Otros recursos estadounidenses de Nb se localizan en Idaho (20 millones de libras); en las bauxitas, depósitos de titanio y plantas procesadoras de aluminio localizadas en Arkansas (118 millones de libras de Nb) y en un depósito de placeres en Oklahoma (10 millones de libras), Jones (1980).

### TANTALIO

Las reservas mundiales de tantalio son grandes con relación al consumo anual y totalizan aproximadamente 144 millones de libras. Estas reservas ocurren principalmente en Nigeria, Zaire, Tailandia, URSS, Malasia, Brasil, Australia y Canadá (JONES, 1980).

Los recursos mundiales identificados ascienden a un total de 560 millones de libras de tantalio.

## PRODUCCION

1980

La producción mundial de niobio ha venido en aumento en los últimos años después de la dramática caída del 4% sufrida en 1982. Una de las causas principales de este renovado impulso ha sido el incremento en la producción del acero (especialmente acero con carbón) y de automóviles (AG00S, 1984).

La producción mundial de niobio estimada en 1973, 1978 y 1983 fue de 27, 33 y 49 millones de libras (cifras redondeadas) respectivamente. En la Tabla 1 se presenta la producción por países, siendo Brasil el primer productor mundial (USBM, 1985a).

Tab. 1: Capacidad de producción estimada de niobio por países (miles de libras).

País	1973	1978	1983
Canadá	3.800	4.000	5.000
Brasil	18.000	25.000	40.000
URSS	1.950	1.950	2.000
Europa	80	80	60
Nigeria	2.430	800	400
Zaire	260	60	100
Resto de Africa	100	100	260
Malasia	100	300	200
Tailandia	30	450	600
Australia	100	70	150
Total Mundial (redondeado)	27.000	33.000	48.000

Fuente: USBM (1985a)

## TANTALIO

La producción mundial de tantalio aumentó entre un 10-15% por encima de los deprimidos niveles de 1982, pero aún sigue un 40% por debajo de los niveles más altos del período 1979-1980. Se atribuye este incremento a la extraordinaria demanda de los computadores personales y en general, a la recuperación de la industria electrónica (EMMERSON, 1984). La capacidad de producción mundial de tantalio estimada para los años de 1973, 1978 y 1983 fue de 2,8; 3,1 y 2,6 millones de libras respectivamente (USBM, 1985b).

En la tabla 2 se muestra la producción por países, siendo Tailandia el primer productor mundial.

TAB.2: Capacidad de producción estimada de tantalio por países (Miles de libras).

País	1973	1978	1983
Canadá	370	325	300
Braail	500	220	200
URSS	435	350	350
Europa	7	175	100
Mozambique	100	100	ND
Nigeria	250	400	100
Zaire	75	155	100
Resto de Africa	55	140	200
Malasia	25	520	200
Tailandia	750	550	800
Australia	200	125	200
<b>Total Mundial (redondeado)</b>	<b>2.800</b>	<b>3.100</b>	<b>2.600</b>
ND	: Sin datos		
Fuente: USBM (1985b)			

## PRECIOS

## NIOBIO (COLUMBIO)

El precio de los concentrados de niobio ha sido relativamente estable; el precio real en 1979, expresado en término de dólares constantes de 1978, experimentó una variación muy pequeña con relación al precio existente en 1959 (JONES, 1980).

Los precios del niobio en el mercado de Londres el 2 de julio entre los años 1981 y 1986, se ilustra en la Tabla 3. Es notable apreciar la gran estabilidad en el precio de la columbita (65% de tenor combinado con óxido y en proporción Nb: Ta de 10: 1) en los últimos tres años a pesar de las grandes fluctuaciones en el mercado de los minerales y la inflación.

TAB.3: Precios de niobio. Mining Journal (1981-1986).

Año	Precio	US\$/lb CIF
1981	7.0	11.0
1982	6.5	7.5
1983	6.5	7.5
1984	3.0	3.5
1985	3.0	3.5
1986	3.0	3.5

Los precios publicados para el ferrocolumbio estándar-G y altamente puro ha mostrado ligeros cambios en el periodo 1982-1985; pasando de 6 dólares a 5,50 y de 21,0 dólares a 17,70 respectivamente.

## TANTALIO

Los precios de tantalita han mostrado alta movilidad en los últimos cinco años. En la Tabla 4 se presentan los precios del 2 de julio durante los años 1981 a 1986.

11.4: Precios de tantalio. Mining Journal (1981-1986).

Año	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Precio	35	20	25	30	24	20
US\$/lb CIF	40	25	27	32	26	24

## RESUMEN

## NIOBIO

En 1984, los mercados de los Estados Unidos consumieron aproximadamente el 28% del niobio utilizado en el Mundo Occidental. La demanda de este metal por parte de los productores americanos aumentó durante todo el año de 1984 y alcanzó un nivel cercano al máximo logrado en 1981 (IRON, 1985). El consumo de este metal por parte de los Estados Unidos se presentó principalmente en la industria del acero (19%), en la producción de acero inoxidable y aceros resistentes al calor (26%) y en la elaboración de superaleaciones (34%).

Esta tendencia, sin embargo, no se mantuvo durante el año de 1985 en los Estados Unidos. Los datos provisionales indican que el consumo promedio aumentó tan sólo en un 6%, contrastando con el de ferrocolumbio el cual descendió en un 12%, de acuerdo con las estimaciones del USBM (IRON, 1986).

La recuperación en el consumo de niobio que comenzó en los países europeos y en el Japón hacia finales de 1984 continuó notablemente durante todo el año de 1985. Las importaciones de materias primas de niobio ascendieron notoriamente para satisfacer la demanda creciente y renovar los inventarios que habían quedado exhaustos durante la recesión. Este panorama se puede apreciar en el caso del Reino Unido que aumentó aproximadamente en un 35% sus importaciones de ferrocolumbio, óxidos de metal de niobio en comparación con 1984 (IRON, 1986).

Se estima que la demanda acumulada mundial de niobio en el período 1983-2.000 será aproximadamente 870 millones de libras, de las cuales 200 millones serán absorbidas por los Estados Unidos, es decir, un 23% (MORGAN, 1986).

## TANTALIO

La recuperación de los mercados del tantalio que se inició con el resurgimiento de la economía de los Estados Unidos en 1983, continuó creciendo durante 1984 (IRON, 1985). La mayor parte de la demanda fue absorbida por los grandes inventarios de los procesadores, así que este mercado no se extendió a materias primas.

En 1985 el panorama económico del tantalio cambió sustancialmente, y contrario a las expectativas, la demanda cayó en un 12%. La causa principal de este fenómeno se atribuye al limitado crecimiento de la economía norteamericana durante ese año. En este país, el consumo descendió aproximadamente un 29% debido a la escasa demanda de polvo para condensadores por parte de la industria electrónica. Esta situación también la experimentó el Japón donde el consumo de este tipo de material descendió un 27%.

Se estima que la demanda acumulada mundial de tantalio para el período 1983-2.000 será aproximadamente de 43 millones de libras, de las cuales los Estados Unidos absorberán 27 millones, es decir un 62% (MORGAN, 1986).

## SUSTITUTOS

Para las aplicaciones conocidas de aceros y superaleaciones a base de niobio, las sustituciones por cantidades menores de este metal dan como resultado desempeños inferiores e incremento de los costos (JONES, 1980). En algunos aceros, tipo HSLA el uso del niobio como un elemento microaleado compete con el empleo de otros elementos tales como el vanadio, titanio y molibdeno. Para otras variedades, es necesario utilizar el Nb junto con uno o más de estos elementos.

Actualmente, el tantalio es un metal potencial para la sustitución del Nb en las superaleaciones, sin embargo, es altamente costoso. El titanio puede ser usado en vez de Nb en los aceros inoxidables con el propósito de mejorar la resistencia a la corrosión.

## NIOBIO Y TANTALIO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Los depósitos de niobio y tantalio se desconocen completamente en Colombia. La bibliografía geológica nacional existente hasta la fecha menciona la existencia de ambientes geológicos favorables para encontrar depósitos de tierras raras (USGS-INGEOMINAS, 1986 a y b), en los cuales usualmente se encuentran como subproductos el niobio y el tantalio. Los dominios geológicos que se refieren son el del Araracuara (Dominio 28) que comprende los terrenos de: Meta-Vichada y Caquetá-Amazonas, y el del Vichada (Dominio 33) con el terreno Meta-Vichada (Fig. 1).

Los ambientes geológicos en cada uno de estos dominios corresponden a sienitas nefelínicas (tierras raras o carbonatitas) y al Complejo Granítico de Parquaza (tierras raras).

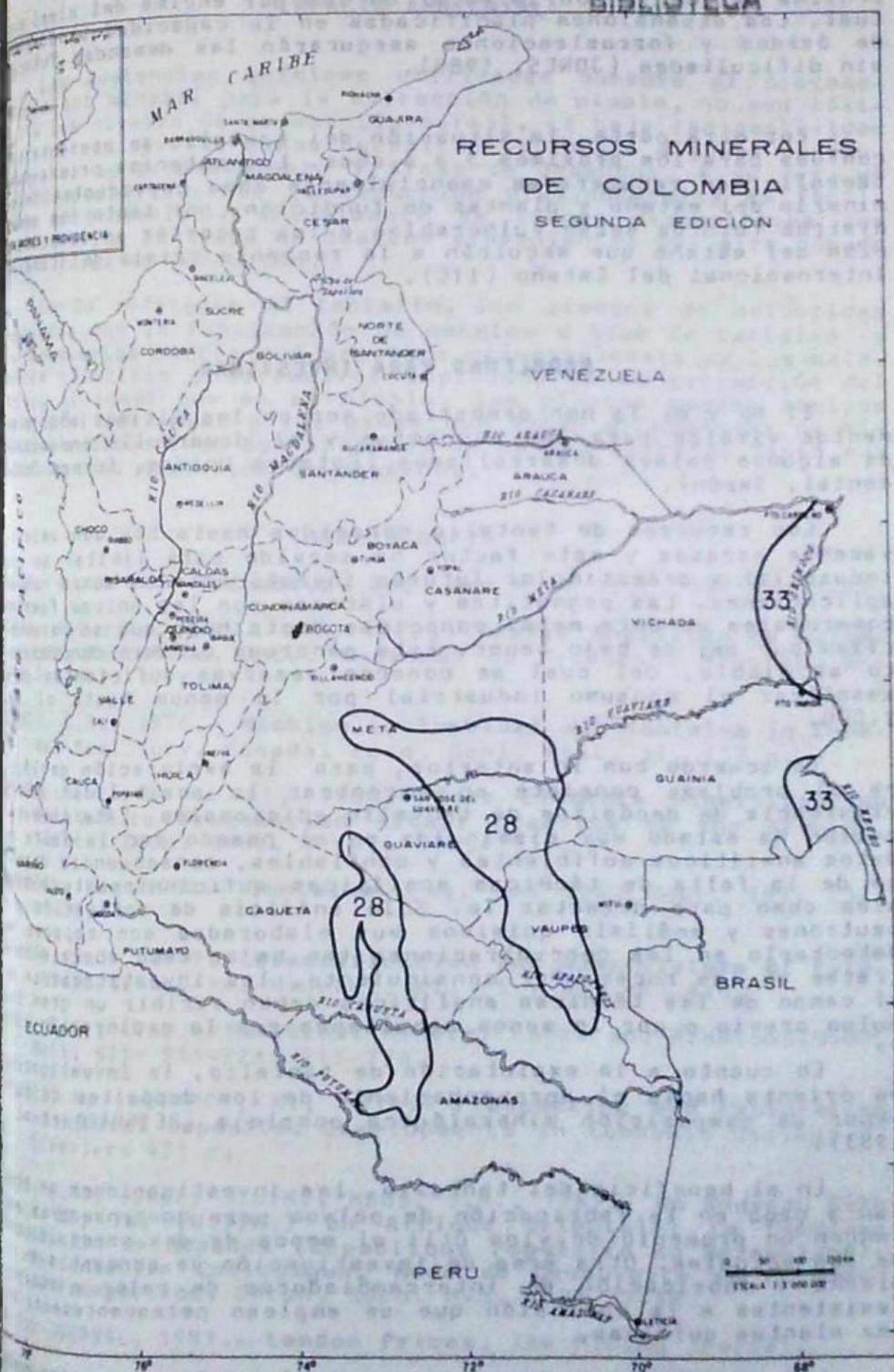
### COMERCIO EXTERIOR

La demanda colombiana de tantalio es atendida en su totalidad por medio de importaciones principalmente de los Estados Unidos. Únicamente se reportaron importaciones durante los años de 1980-1981 por un total de 7 y 5 kg respectivamente (OCAMPO, 1985).

La demanda colombiana de niobio no aparece referenciada específicamente dentro de la nomenclatura de comercio exterior, motivo por el cual no se reportan aquí datos estadísticos. Es posible que su comercio se registre bajo el ítem de "Metales comunes no especificados en bruto o manufacturados" (OCAMPO, comunicación verbal).

### PERSPECTIVAS

Se espera que el consumo de niobio mejore sustancialmente durante los próximos cinco años a una tasa de crecimiento entre un 10 y 15% por debajo de la experimentada durante los últimos dos años (1984-1985). A pesar de las fluctuaciones en la demanda de superaleaciones por parte de la industria aeroespacial, se estima que la demanda mundial de niobio en la década



Dominios No. 28 (Areracuara) y No. 33 (Vichada) en los cuales se pueden presentar depósitos de tierras raras y carbonatitas a los que se asocian minerales de niobio y tantalio. Modificado de USGS-INGEOMINAS (1986).

próxima de los 90 podría estar un 30% por encima del nivel actual. Las expansiones planificadas en la capacidad productiva de óxidos y ferrosaleaciones asegurarán las demandas futuras sin dificultades (JONES, 1980).

Por otra parte, la situación del tantalio se presenta aún confusa para los próximos 3 a 4 años. Las materias primas para tantalio son recuperadas esencialmente como coproductos de la minería del estaño y plantas de fundición, por tanto los suministros futuros serán vulnerables a los recortes en la producción del estaño que seguirán a la reciente crisis del Consejo Internacional del Estaño (IIC).

### PROBLEMAS PARA INVESTIGAR

El Nb y el Ta han demostrado ser en los últimos años elementos vitales para las economías y el desarrollo industrial de algunos países desarrollados (Estados Unidos, Europa Occidental, Japón).

Los recursos de tantalio conocidos hasta hoy son relativamente escasos y este factor ha servido para limitar su uso industrial y desestimular futuras investigaciones sobre nuevas aplicaciones. Las pegmatitas y placeres son las únicas fuentes comerciales de este metal conocidas hasta hoy, que se caracterizan por ser de bajo tenor. Este panorama difiere con respecto al niobio, del cual se conocen reservas suficientes para abastecer el consumo industrial por lo menos hasta el año 2.000.

De acuerdo con lo anterior, para la exploración geológica el problema consiste en encontrar la posibilidad de la existencia de depósitos de tantalio adicionales. Esta investigación ha estado muy disminuida en el pasado por la falta de datos analíticos suficientes y confiables, consecuencia directa de la falta de técnicas analíticas suficientemente sensibles como para detectar Ta. Sólo análisis de activación por neutrones y análisis químicos muy elaborados son capaces de detectarlo en las concentraciones tan bajas como suele encontrarse en las rocas. Por consiguiente, las investigaciones en el campo de las técnicas analíticas deben recibir un gran impulso previo o por lo menos simultáneo con la exploración.

En cuanto a la explotación de tantalio, la investigación se orienta hacia el aprovechamiento de los depósitos de bajo tenor de composición mineralógica compleja (REINHARD et al., 1983).

En el beneficio del tantalio, las investigaciones se llevan a cabo en la fabricación de polvos para condensadores que tienen un promedio de vida útil al menos de dos veces la tasa de los actuales. Otra área de investigación se concentra en el diseño y fabricación de intercambiadores de calor y equipos resistentes a la corrosión que se emplean permanentemente en las plantas químicas.

Los problemas a investigar en el niobio se relacionan principalmente con la producción de ferrocolumbio, con los procedimientos para producir niobio a partir de piroclore y la fabricación de nuevos aceros, superaleaciones y superconductores.

## IMPACTO AMBIENTAL

Las sustancias químicas utilizadas durante el procesamiento del mineral para la extracción de niobio, no son tóxicas a los niveles de exposición normal. La baja radioactividad asociada con ciertas menas necesitan solamente algunas precauciones en su procesamiento y áreas de desechos. A su vez, el vapor despedido durante la reducción aluminotérmica es fácilmente controlable y actualmente se tienen dispositivos que controlan los líquidos de desecho provenientes del aire húmedo y las áreas de fundición.

En lo referente al tantalio, los riesgos de salubridad asociados con la fabricación de metales a base de tantalio y sus compuestos parece que proviene principalmente de los materiales cáusticos y corrosivos empleados en la extracción del metal. Al igual que en el niobio, las plantas poseen equipos de control ambiental y las menas que están acompañadas de minerales radioactivos son tratadas de manera especial tanto sus residuos como depósitos de desechos.

## BIBLIOGRAFIA

- AGOS, A., 1984.- *Columbium*. Eng. and Min. Jour. 185(3):70-71.
- CASTA, F.E.V.T., BAETA DA., -1973.- Perfil Analítica de Columbite-Tantalita. Dpto. Nacional de Producción Mineral, Boletín 9. 43 p.
- FRANSON, K.R., 1974.- Niobium (columbium) and Tantalum in Canada. Geol. Surv. Canada. Econ. Geol. Rept. 29. 157 p.
- HERSCHELL, A. R. et al, 1984.- Rare Elements Mineralization Related to Precambrian Alkali Granites in the Arabian, Shield. Econ. Geol. 7 (6): 1366-1377.
- FRANSON, M., 1984.- Tantalum. Eng. and Min. Jour. 185. (3): 71-72.
- ROBERTS, D.D., 1977.- Classification and Nomenclature of Pyrochlore Group. Am. Mineral, 62. (5 y 6): 403-410.
- JONES, T.S., 1980.- Tantalum. Mineral Facts and Problems. USBM, Bull. 671: 911-924; 215-226.
- FRANSON, M. y BOHMER, M., 1978.- Prospecting and Exploration of Mineral Deposits. Developments in Economic Geology 8. Elsevier: 431 p.
- FRANSON, J.M., JOUDE, J.L.M., MROS, J.M., 1985.- Un Nouveau Gite de Nb, Ta, (U.T.R.) en Afrique Orientale: Le Complexe Alcalin de Meponda (Republique Populaire du Mozambique): Presentation Géologique, Mode de Découverte et Methodes de Prospection. Chron. Rech. Min. 480: 35-48.
- MINING JOURNAL, 1981.- London Prices. The Mining Journal.
- FRANSON, J.D., 1986.- US and the World Mineral Position, 1985 to the year 2000. Min. Eng. 38, (4): 245-248.
- FRANSON, L., 1985. Estadísticas Básicas sobre Minerales. Boletín No.3. Comercio Exterior 1980-1983. Ingeominas. 333 p.

- PARKER, R.L. y FLEISCHER, M., 1968.- **Geochemistry of Niobium and Tantalum.** U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 612: 43 p.
- PARKER, R.L y ADAMS, J.W., 1973.- **Niobium (Columbium) and Tantalum.** In: United States Mineral Resources, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 820: 443-454.
- REINHARD, H.F.J., RETELSFORF, H.J. y SUPP, A., 1983.- **Treatment of Low Grade Tantalum Ores** Nat. Res. and Devel. 18: 83-95.
- SORENSEN, H., 1974.- **The Alkaline Rocks.** John Wiley and Sons. 622 p.
- TAYLOR, S.R., 1964.- **Abundance of Chemical Elements in the Continental Crust-A New Table.** Geochim et Cosmochim Acta, 28, (8): 1273-1285.
- IRON, A.R., 1985.- **Niobium and Tantalum.** Min. Ann. Rev., p. 96-97.
- , 1986.- **Niobium and Tantalum.** Min. Ann. Rev., p. 74-75.
- U.S.B.M., 1985a.- **Columbium.** Min. Ind. Surv., p.6-7.
- , 1985b.- **Tantalum.** Min. Ind. Surv. p. 24-25.
- U.S.G.S.-INGEOMINAS, 1986a.- **Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia.** Bogotá, Pub. Geol. Esp. Ingeominas. 14-I. 235 p.
- , 1986b.- **Evaluación de los Recursos Minerales No-Combustibles de Colombia.** Bogotá, Pub. Geol. Esp. Ingeominas 14-II. 55 p.

## MINERALES DE NIQUEL

HECTOR CASTRO P.

## CONTENIDO

Página

Resumen .....	327
Introducción .....	327
Reservas .....	328
Ambiente Geológico .....	3311
Geoquímica .....	333
Mineralogía .....	335
Tipos de Depósitos .....	338
Beneficio y Metalurgia .....	339
Situación Mundial .....	341
Reservas .....	341
Producción .....	342
Precios y Consumo .....	345
El Níquel en Colombia .....	347
Depósitos .....	347
Reservas .....	358
Perspectivas en el Mercado Internacional .....	359
Comercio .....	361
Guías de Exploración .....	374
Ecología e Impacto Ambiental .....	365
Bibliografía .....	365

## RESUMEN

Este artículo está encaminado en primer término a compilar en un solo texto las características físico-químicas, el ambiente geológico de formación y las propiedades geoquímicas y mineralógicas del níquel, con el objeto de facilitar la clasificación de los depósitos conocidos y orientar la búsqueda de nuevos yacimientos níquelíferos en Colombia.

En segundo término, el trabajo da a conocer la influencia industrial del níquel en el ámbito mundial, teniendo como base las reservas, su producción y su mercadeo.

Finalmente, se señalan algunos datos estadísticos que permitan pautas para que el lector analice las posibilidades del níquel en Colombia, el cual se viene explotando desde 1982 por intermedio de Cerromatosa S.A., tercera empresa minera del país. También se consideran algunos aspectos y posibilidades de esta empresa, de acuerdo con su nivel competitivo en el panorama mundial, sustentados por la capacidad y costos de producción, el alto tenor del mineral que se explota y una proyección futura de incremento en el precio y la demanda del níquel.

## INTRODUCCION

En el año 1751, el níquel fue descubierto por Cronstedt en algunos minerales que hasta entonces no eran usados por los procedimientos usados en la industria (Kupferníquel y níquel nativo).

El conocimiento del níquel puro y de sus aplicaciones industriales es relativamente reciente, pero el de su presencia es remoto. Se ha comprobado la existencia de este metal en monedas babilónicas de 235 años A.C., durante el reinado de Eutidemo. También se dice que los chinos lo emplearon hace muchísimos años en la fabricación de armas. La niquelina o kupferníquel fue mencionada por primera vez en 1694 por Hiarne. Algunos investigadores consideraban que la niquelina era un compuesto de cobre mineralizado por el arsénico; pero como el mineral no produjera cobre, los mineros le llamaron nickel que en alemán se aplica a las personas holgazanas que no producen nada.

Sólo hasta 1775, Berzmann declaró que se trataba de un metal distinto de los conocidos, pero en estado impuro e incluso le atribuyó su carácter magnético a las impurezas con el hierro.

A Proust se debe la certeza de la existencia del níquel, al comprobar su presencia en el hierro meteórico. Gerstorff fue el primero en obtener industrialmente el níquel en el año 1824.

La producción de este metal experimentó una revolución completa en 1867; Garnier descubrió en Nueva Caledonia ricos yacimientos de silicato doble de níquel y magnesio en estado puro; al mineral se le llamó garnierita.

Combinando los aceros obtenidos al crisol y la garnierita, quedó resuelto en Francia en 1888 el problema del acero al níquel, cuya obtención había sido un fracaso debido a la falta de níquel puro.

El níquel existe asociado con el hierro en la mayor parte de los meteoritos; sin embargo el hierro contenido en la litósfera es muy pobre en níquel; de ambos datos se deduce que la cantidad principal de Ni se encuentra en el núcleo terrestre y en la zona de sulfuros.

Número atómico 28; peso atómico 58.71; densidad 8.27; punto de fusión 1453°C; punto de ebullición 2732°C; gravedad específica 8,902 (a 25°C); es tetravalente pero normalmente funciona con 2 valencias positivas. Es un metal blanco grisáceo, el cual con alto brillo toma un color plateado; es duro, dúctil, maleable, tenaz, un poco ferromagnético y un excelente conductor del calor y la electricidad. No se oxida al aire a temperatura elevada. Lo disuelven los ácidos sulfúrico, clorhídrico y nítrico.

## USOS

Más del 90% del Ni se usa en forma metálica; bajo esta condición se combina con diversos metales constituyendo excelentes aleaciones de óptimas características físico-químicas.

Las aleaciones más reconocidas son las que forma con el cobre y el zinc, las cuales reciben diversos nombres a saber: plata alemana - platinoide - metal extrablanco de Birmingham, plata níquel, plata china, plata de Potosí; argentan, pack-fong, electrum, mallechort, argiroide, cobre blanco y otras. Consisten en cristales mezclados homogéneamente pero no constituyen compuestos bien definidos; son muy valoradas por ser dúctiles, duras, tenaces, capaces de soldarse y forjarse, re-

actuando al mismo tiempo la influencia atmosférica. Son el resultado de la combinación de los tres elementos entre los extremos siguientes: cobre del 40 al 65%, zinc del 18 al 30% y níquel del 6 al 31%.

Otras aleaciones de interés son las de níquel y cobre; existen en cristales mezclados, sin formar ningún compuesto; la curva del punto de solidificación cae regularmente de la del níquel a la del cobre. Las aleaciones más reconocidas de este tipo son: constantan, manganina y niquelina. La primera está formada por 40% de níquel y 60% de cobre. La segunda contiene 12% de níquel, 84% de cobre y 4% de manganeso. La tercera análoga a la anterior contiene 25% de níquel; 74.5% de cobre y 0.5% de hierro. Todas estas aleaciones son muy estimadas por su bajo coeficiente térmico.

Aleaciones de gran conveniencia e importancia son las de níquel-hierro y níquel acero. Las más acreditadas son la plaquita y el invar. La primera contiene 46% de níquel, 53.85% de hierro y 0.15% de carbono. La segunda 3% de níquel, 63.09% de hierro y 0.2% de carbono. Estas son aleaciones muy cotizadas por su bajo coeficiente de dilatación y su gran resistencia a la corrosión.

Finalmente, se citan algunas aleaciones reconocidas en el mundo industrial, con porcentajes desconocidos por ser de marcas registradas; ejemplos de ellas son Monel, Inconel y Hastelloy identificadas como aleaciones con acero inoxidable, ampliamente admitidas por la industria química y petroquímica y otros consumidores del níquel aplicado a la manufactura de partes de equipos expuestas a corrosión.

Las aleaciones con un contenido no mayor del 8% en níquel son empleadas en piezas expuestas a corrosión normal; con un contenido mayor del 95% se usan para manipular sustancias cáusticas en alto grado y las aleaciones níquel-cobre son utilizadas para evitar corrosiones salinas.

A continuación se enumeran algunos usos del níquel en la industria: la plata alemana y las aleaciones semejantes se emplean para la fabricación de objetos que se han de platear electrofóticamente y para la producción de monedas, generalmente adicionadas de pequeñas cantidades de plata. Con un aditivo del 3% de aluminio se obtiene una aleación ideal en la elaboración de piezas para máquinas de escribir.

La adición de níquel al cobre reduce la conductibilidad y aumenta la dureza; son utilizadas para fabricar partes expuestas a temperaturas elevadas en la producción de resistencias eléctricas y en la elaboración de pares termoeléctricos.

El níquel y algunas de sus sales se usan como catalizadores; la más importante de éstas es utilizada en hidrogenación de grasas y aceites. El níquel y el cobre se emplean en la elaboración de tuberías para las plantas de salinización en la conversión de agua de mar en agua potable. El níquel se emplea también en baterías y celdas de combustible, asociado con hierro y cadmio. Adicionándolo al vidrio sirve de colorante, dando varias tonalidades de verde. Igualmente el níquel es usado en una amplia variedad de productos metálicos utilizados en un amplio rango de industrias.

## AMBIENTE GEOLOGICO

Actualmente se cree que la roca madre causante de los cuerpos mineralizados de Ni en el mundo procede del manto.

Una teoría muy aceptada expone que el núcleo terrestre (con 3.473 km de diámetro) tiene composición similar a la de los meteoritos de hierro llamados kamacitas compuestos de hierro nativo y 7% de níquel. El manto que rodea el núcleo (aproximadamente 2/3 de la masa total de la tierra) localizado a 2920 km bajo la superficie de la tierra presenta altas concentraciones de níquel; aparentemente está compuesto de rocas ultramáficas de composición predominantemente peridotítica, similares a las expuestas en superficie.

El conocimiento del ambiente geológico de los cuerpos ultramáficos en superficie ha sido objetivo de muchos científicos en los últimos años, no sólo para facilitar el entendimiento de sus génesis sino para orientar la búsqueda de nuevos yacimientos níquelíferos. En la mayoría de los casos hay evidencia clara que los depósitos de sulfuros de níquel han sido introducidos como líquidos inmiscibles ricos en óxidos y sulfuros; de esta manera la razón de su encajamiento es mucho más clara que la razón por la cual ellos ocurren restringidos a ciertas áreas y asociados con ciertas rocas.

En medio de recientes esfuerzos para clasificar rocas ultramáficas y cuerpos máficos relacionados, Willie (1967) ha enfatizado el tamaño, forma y composición química de los cuerpos. Thayer (1960) ha acentuado la diferencia entre los cuerpos que cristalizaron in situ (autigénicos), aquellos que fueron encajados como sólidos (allogénicos) y aquellos que fueron hospedados parcialmente como sólidos y parcialmente como líquidos (poligénicos).

La clasificación de los cuerpos ultramáficos, máficos y rocas asociadas agrupadas en la Tabla 1 acentúa el marco tectónico dentro del cual los cuerpos mencionados fueron encajados, utilizando como complemento los criterios de Willie y Thayer.

Se ha hecho una distinción inicial entre aquellos cuerpos que fueron emplazados en un ambiente tectónico - orogénico y aquellos que fueron encajados en un ambiente no orogénico.

Cabe anotar que, aunque todos los depósitos de níquel conocidos en el mundo están necesariamente relacionados con cualquiera de los cuerpos mencionados, no todos estos presentan concentraciones de níquel que puedan ser económicamente explotables.

Datos experimentales disponibles sugieren que por debajo de 80 km del piso oceánico, los sulfuros serían líquidos y tienden a establecerse aún más abajo; lixiviando una porción del manto inmediatamente por debajo de la profundidad mencionada, el manto se halla completamente agotado en sulfuros. A 300 km de profundidad se establecen los sulfuros y pueden llegar al estado sólido nuevamente; a esta profundidad tienden a concentrarse.

Muchos magmas enriquecidos en níquel parecen haber sido derivados de una porción del manto en esa profundidad. Además, datos experimentales sugieren que si una porción del manto su-

Fig. 1: Clasificación de los cuerpos ultramáficos, máficos y rocas asociadas. Tomado de Naldrett (1973).

#### CUERPOS ASOCIADOS CON CINTURONES OROGENICOS

1. Rocas contemporáneas con vulcanismo eugeoclinal.

- i) Silos y complejos con diferenciación gravitacional.
  - a. Sub-tipo rico en ultramáficos.
  - b. Sub-tipo anortosítico.

ii) Lentes ultramáficos.

2. Cuerpos tipo-alpino.

- i) Grandes bloques laminares obducidos.
- ii) Complejos ofiolíticos
- iii) Complejos ofiolíticos deformados y bloques cáuticos en terrenos de melange.
- iv) Cuerpos encajados por fenómenos diapíricos.

3. Intrusiones zonadas tipo Alaska.

4. Intrusiones asociadas con suturas corticales principales.

#### B. OCURRENCIA DE CUERPOS EN ZONAS MÁS ESTABLES

1. Grandes complejos con bandeamiento estratigráfico.
2. Grandes silos y bloques laminares que son el equivalente intrusivo de basaltos de flujo.
3. Intrusiones tamaño medio asociadas con vulcanismo no orogénico.
4. Pequeños bloques laminares e intrusiones asociadas con vulcanismo no orogénico.
5. Rocas ultrabásicas en complejos anulares y chimeneas de kimberlitas.

Tras fusión parcial, los sulfuros existentes también se fundirán y serán removidos probablemente en solución con los silicatos, dejando un residuo refractario agotado en sus componentes tanto de sulfuros como de silicatos de bajo punto de fusión.

Estudios recientes señalan que los ultramáficos Alpinos son fragmentos de estos residuos refractarios; así se explica la ausencia de depósitos asociados a este tipo de cuerpos. Otra explicación aparente, sobre la ausencia de depósitos en peridotitas alpinas, es que esas rocas son porciones del manto encajados en estado sólido donde los sulfuros originales de los cuerpos fueron removidos durante una fusión parcial del manto.

Si la teoría sobre tectónica de placas se extiende hasta el Arqueano, esto da como resultado que el manto haya tenido muchas veces fusión parcial y por ende un agotamiento en sulfuros de níquel en los últimos  $3 \times 10^9$  años. El progresivo agotamiento de sulfuros por este sistema explica porqué las minas enriquecidas son más viejas que  $1.7 \times 10^9$  años (véase tabla 1).

De lo anterior se puede concluir que los lentes ultramáficos, que hacen parte del cinturón de rocas verdes arqueanas y proterozoicas tempranas, son los cuerpos más importantes en términos de posibilidades para ser rocas huésped de menas níquelíferas.

TAB. 2: Depósitos de sulfuro de níquel, más grandes del mundo. Tomado de A.J. Naldrett (1973).

PAIS	NOMBRE DEL DEPOSITO	ROCA HUESPED (Según Tabla 1)	RESERVAS En millones de toneladas	EDAD DEL DEPOSITO -300 Ma a 1 Ma
AUSTRALIA OCCIDENTAL	EASTERN GOLDSFIELDS	A-1(i)	E 184 M 500	>2667*0027
	EASTERN GOLDSFIELDS	A-1(i)	E 003	>2667*0027
CANADA	NOITIBI PLUS	A-1(i)	E 02	275 a 280
	LYNN LAKE Y DUMBARTON MINE	A-1(i)	F 025	275
	CAPE SMITH - WAKEHAM BAY	A-1(i)	E 065 M 007	>17018
	THOMPSON WABOWDEN BELT	A-4	F 20	>17018
	GORDON LAKE	A-4	F 300	275 a 280
	SUDBURY	B-1	E 27	19 a 20
	GREAT LAKE	B-4	M 02	11
	LAC RENZY	Sin clasificar	E 014	Desconocida
GIANT NICKEL	Sin clasificar	E 0012	Eoceno	
AFRICA DEL SUR	EMPRESS MINE (Rodaswa)	A-1(i)	E 029	29 a 33
	TRIGAM, MADZIWA, INTATI & SHAMPANI (Rodaswa)	A-1(i)	E 02	
	PIKWE & SELIBE (Botswana)	A-4 P	E 039	>194*006
	COMPLEJO IGNEO DE BUSHVELD (Sur Africa)	B-1	022	95*006
ESTADOS UNIDOS	COMPLEJO STILL WATER	B-1	M incierto 032	275
	COMPLEJO DULUTH	B	M incierto 02	1115 a 005
URSS	PECHENGA	A-1(i)	E 032	172 a 178
	NORIL'SK-TALNAK	B-3	M 10	Tridico medio
	MONCHEGERSK	B-7	Sedca 0064	Paleozoico
FINLANDIA	KOTALANTI	Desconocido	E 008	Edad exacta desconocida pero 1 Ma

E = Económico  
M = Marginal e Antieconómico

## GEOQUÍMICA

El níquel, como el aluminio, solamente se encuentra libre sobre la superficie de la tierra en estado de oxidación simple ( $Ni^{2+}$ ). A diferencia del aluminio, forma varios sulfuros estables y ellos son los minerales comunes de mena en los depósitos magmáticos mayores.

El níquel junto con el cobalto pertenecen a la familia del hierro o férridos; son los parientes más próximos en el sistema periódico. Está ampliamente disperso en la naturaleza y estimativamente ocupa el 150. lugar en abundancia. El ferrocobalto se presenta formando dos minerales metaédricos independientes a saber: Komocita y laenita, con distinto contenido de níquel. Desde el punto de vista geoquímico, el níquel y el cobalto son muy siderófilos y cuando en el sistema físico-químico en que se encuentran existe una fase de hierro metálico, la mayor parte de aquellos elementos está contenida en ella.

Las observaciones relativas a la presentación del níquel y cobalto en la litósfera superior, indican que ambos metales poseen una tendencia calcófila inconfundible. Se combinan fácilmente con el azufre por lo que son comunes en las segregaciones de sulfuros. Aparte de su carácter siderófilo y calcófilo, el níquel junto con el cobalto presentan una tendencia litófila manifiesta, ya que son componentes frecuentes de las rocas silicatadas.

El níquel es uno de los componentes típicos de las primeras segregaciones magmáticas de sulfuros de la asociación pirrotina-pentlandita. La pentlandita contiene 22-33% de Ni y tanto desde el punto de vista geoquímico como técnico, es el sulfuro níquelífero más importante. Además, es con pocas excepciones, el único mineral de níquel independiente que se encuentra en las primeras menas magmáticas de sulfuros. El níquel forma varios sulfuros y arseniuros en las últimas segregaciones de sulfuros magmáticos, en particular en los filones metalíferos.

La meteorización superficial puede crear un yacimiento mineral por la concentración residual de materiales que originalmente estaban diseminados en la roca fresca. Las lateritas níquelíferas son un producto del proceso antes mencionado, y presentan una geoquímica diferente según el perfil de suelos desarrollado, que de base a tope consta de: roca madre, saprolita gruesa (peridotita saprolitizada), saprolita fina (saprolita) y corteza ferruginosa (canga + laterita ferralítica).

Las lateritas están compuestas principalmente de Si, Fe, Mg, Mn y Ni (Fig. 1; Tabla 3). Nótese que el níquel está muy poco enriquecido, comparado con la roca madre ultramáfica. El incremento porcentual de Ni está entre 2 y 6 veces, la mayoría del cual es un enriquecimiento relativo causado por la remoción del Mg en el perfil. Por ejemplo, si es  $NiO$  es comparado con sustancias menos solubles tales como  $Al_2O_3$  y  $Cr_2O_3$ , muestra un agotamiento del  $NiO$  en las dos zonas superiores, contrastadas con la proporción en la roca madre, puesto que la zona gruesa de saprolita hacia la base del perfil, muestra una concentración un poco mayor que la roca madre. En este caso hay un fuerte enriquecimiento relativo, combinado con algún enriquecimiento absoluto más abajo en el perfil.

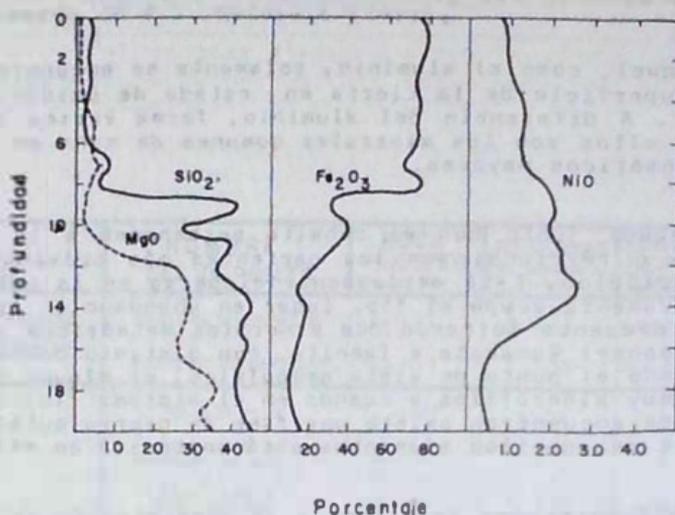


FIG. 1: Perfil químico de una laterita níquelífera en Pulot, Filipinas tomado de Ogura, 1977 (MAYNARD, 1983). En este caso la mineralización de Ni está en la zona saprolítica.

TAB. 3: Perfil químico ideal de una laterita níquelífera en Nueva Caledonia. Tomado de Leng et al., 1976 (MAYNARD, 1983).

Composición dada en porcentaje				
	Roca madre	Saprolita gruesa	Saprolita fina	Corteza ferruginosa
Espesor Compuesto		0.2-6 m	10-40 m	2-10 m
SiO <sub>2</sub>	38	33	1.2	0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	2	4.5	5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	17	72	74
FeO	5	2	1	0.3
CaO	0.1	-	-	-
MgO	41	29	0.9	0.5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	0.8	4.0	0.5
MnO <sub>2</sub>	0.14	0.29	1.0	0.5
NiO	0.40	2.5	1.0	0.4
CoO	0.02	0.08	0.2	0.07
Pérdidas por Ignición	10.5	13.0	13.7	13.5
Densidad	2.8	1.6	0.9	-
NiO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	1.25	0.22	0.08
NiO/Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	3.1	0.25	0.07
NiO/MnO <sub>2</sub>	2.9	8.6	1.0	0.80

La primera tentativa para calcular la abundancia de los elementos en la corteza terrestre (CLARKE, 1889) se basó sobre un promedio simple de datos analíticos disponibles; la compilación de Clarke y Washington (1924), fundamenta en 5159 aná-

lisis es el ejemplo más conocido de esta aproximación. Estos cálculos y otros semejantes a ellos (Tabla 4) fueron inmediatamente criticados y continúan criticándose con base en dos razones:

1. Que la abundancia de los tipos de rocas debe ser tenida en cuenta (en los datos de CLARKE y WASHINGTON las rocas básicas se recargaron) y
2. Que los resultados obtenidos de los promedios de los análisis de las rocas disponibles fueron parcelizados por la sobre-presentación de rocas ultramáficas y afines.

TAB. 4: Abundancia de níquel en la corteza terrestre. Maynard, (1983).

Abundancia de Ni en rocas comunes y en agua natural	
<b>Rocas ígneas</b>	
Ultramáficas	ppm 1450
Basaltos	130
Andesitas	18
Granitos	10
<b>Sedimentos y agua de mar</b>	
Nódulos de Mn	D. Pacífico 3120
Sedimentos (CaCO <sub>3</sub> ) aguas profundas	O. Pacífico 300
Arcillas cerca a la playa	0.0005
<b>Rocas sedimentarias</b>	
Shales	70
Shales negros	30
Grauvacas	40
Calizas	5

La Tabla 5 de Flanagan, 1976 (MAYNARD, 1983), señala la abundancia normalizada del Ni en ppm de los principales tipos de rocas y sirve como guía para un rango de concentración esperado (background). Fueron utilizados los promedios de Vinogradov, 1956 (MAYNARD, 1983), también los promedios establecidos por Wedepohl, 1969-1978 (MAYNARD, 1983).

TAB. 5: Abundancia normalizada del níquel en ppm. Flanagan (1976)

Ultramáficas	(Peridotita)	2339	2000	1390-1450
Máficas	(Basalto)	15.8	160	69- 530
Intermedias	(Andesita)	18.5	55	3- 28
Félsicas	(Granito)	5.1	8	45- 16
Shales	(Shale)	30	95	20- 90
Metamórficas	(Esquisto micáceo)	50	-	-

## MINERALOGIA

Durante la solidificación del magma, el níquel se separa en las rocas eruptivas básicas conjuntamente con la pirita magnética (Fe, Ni)S. Pero la mayor parte del níquel primario en el magma se independiza en la cristalización residual unido al cobalto, constituyendo los arseniuros y sulfoarseniuros níquel y cobalto. Estos minerales se pueden considerar como primarios a saber:

Sulfuros o blanda de níquel .....	NiS
Arseniuro o Pirita roja .....	NiAs
Arseniuro o Pirita blanca .....	NiAs <sub>2</sub>
Sulfarseniuro o Pirita arsenical .....	NiAsS

La mineralogía de las menas de sulfuros de níquel es generalmente siguiente: consiste principalmente en pirrotina, pentlandita y calcopifita, con cantidades menores de pirita, cubanita, oro, cobalto, hierro y azufre. Sin embargo, en detalle, la mineralogía es muy variada; se han reconocido trazas de 64 especies diferentes; se incluyen 10 minerales secundarios o supergénicos y 18 minerales no metálicos y de ganga.

Entre los minerales accesorios más importantes se pueden señalar: nicolita, monchertita, qulena, sperryllita, hesita y diversos minerales del grupo del platino.

Los minerales más comunes en los depósitos de laterita níquelífera son: goethita, serpentinas, talco y esmectitas (Fig. 2). Estas pueden contener Ni por reemplazo de Fe o Mg. Veámos algunos minerales que son el resultado de ese reemplazamiento:

#### Minerales de Mg

Crisotilo  
Lizardita  
Kerolita  
Talco  
Clorita  
Saprolita

#### Minerales de Ni

Pecorita  
Nergovita  
Pimelita  
Willemsita  
Nimita  
Falcondita

Por su incipiente cristalinidad los silicatos níquelíferos son difíciles de identificar y generalmente se utiliza el término de garnierita. Si la goethita níquelífera o el silicato níquelífero predominan en el perfil de una laterita, se pueden identificar dos zonas: de óxidos o de silicatos (o saprolita).

La zona de óxidos se caracteriza por la presencia de goethita, hematita y algo de maghemita. La goethita tiene usualmente algo de aluminio en solución sólida. El Ni se encuentra asociado a la goethita y a la asbolita (óxido de Mn y Co) (Fig. 3).

La zona de silicatos usualmente conserva la textura de la roca madre, de ahí el sinónimo de zona saprolítica. En muchos perfiles está separada de la zona de oxidación por una finísima capa de arcilla esmectítica con sílice secundaria que puede ser ópalo o calcedonia (Fig. 2). Por debajo de esta capa los minerales enriquecidos en Ni son principalmente garnieritas. Las fases de Ni y Mg son raras y la mayoría de las menas consisten en variedades de níquelina. Entre las garnieritas con tamaño 7Å (serpentinas) son abundantes la lizardita y el crisotilo; la antigorita es muy escasa. Las garnieritas tamaño 10Å están representadas por el talco, como también por la serie Kerolita - Pimelita. Brindley, 1978 (en HAYNARD, 1983) usó el nombre de Kerolita para clasificar una variedad hidratada de talco. En ambientes pobres en sílice tales como aquellos encontrados en Karst se han hallado pyrraurites con Ni las cuales se denominan lakovita, cuya fórmula es:  $Ni_6Al_2(OH)_{12}$

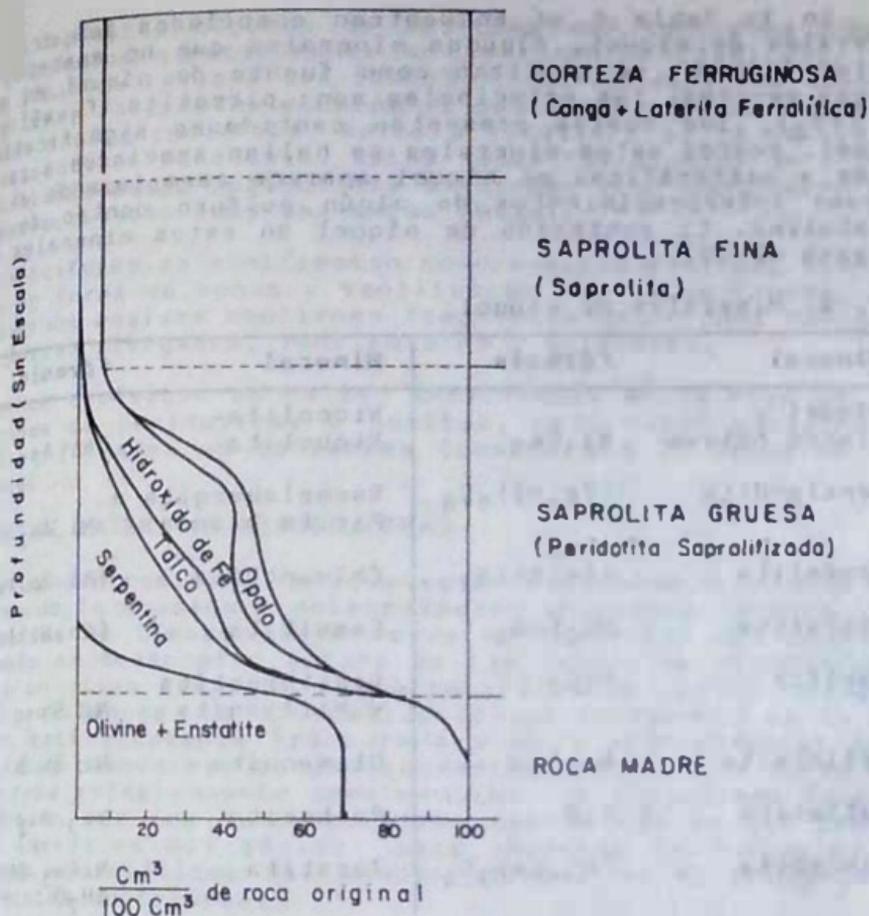


Fig. 1. Perfil mineralógico de una laterita niquelífera. Este ejemplo, procedente de Nueva Caledonia, tiene un espesor aproximado de 30 m. Tomado de Lelong et al., 1976 (MAYNARD, 1981).

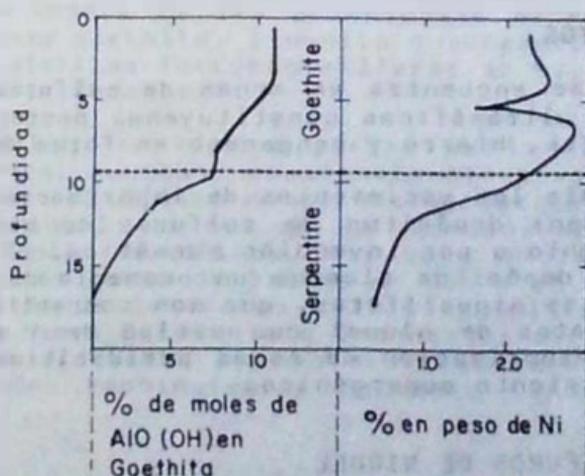


Fig. 2. Muestra de aluminio incorporado en goethita, el cual puede ser mayor de 10% en la zona de óxidos, pero disminuye en la zona saprolítica. Nótese que el enriquecimiento en Ni se halla en la zona de óxidos. Tomado de Zeissink, 1969 (MAYNARD, 1981).

En la Tabla 6 se encuentran compilados los principales minerales de níquel. Algunos minerales que no aparecen en la tabla, también se utilizan como fuente de níquel en proporciones menores; los principales son: pirrotita ( $Fe_{1-x}S$ ) y pirita ( $FeS_2$ ), los cuales presentan cantidades significativas de níquel, cuando estos minerales se hallan asociados a rocas máficas y ultramáficas el níquel aparece reemplazando al hierro o como intercrecimientos de algún sulfuro dentro de la red cristalina. El contenido de níquel en estos minerales no sobrepasa el 1%.

TAB. 6: Minerales de níquel.

Mineral	Fórmula	Mineral	Fórmula
Níquel y hierro nativo	$Ni_3Fe_3$	Niccolita-Niquelita	$Ni As$
Pentlandita	$(Fe, Ni)_9S_8$	Rammelsbergita o Pirita blanca	$Ni As_2$
Bravolita	$(Fe, Ni)_2S_2$	Chloanthita	$(Ni Co)As_{3-2}$
Violarita	$Ni_2FeS_4$	Esmultita	$(Co, Ni)As_{3-2}$
Vaesita	$NiS_2$	Breithauptita y Willyamita	$Ni Sb$
Polidimita	$Ni_3S_4$	Ullmannita	$Ni Sb S$
Millerita	$NiS$	Parkerita	$Ni_3 As_2 S_2$
Siegenita	$(Ni, Co)_3S_4$	Zaratita	$NiCo_3 \cdot 2Ni(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Geradorffita	$Ni As S$	Garnieritas	Hidrosilicatos de Ni y Mg

## TIPOS DE DEPOSITOS

El níquel se encuentra en menas de sulfuros, diseminado dentro de rocas ultramáficas constituyendo protos, y combinado con el azufre, hierro y manganeso en forma de nódulos.

Prácticamente los yacimientos de importancia económica en la actualidad son: depósitos de sulfuros de níquel formados por reemplazamiento o por inyección magmática. El contenido de níquel en estos depósitos alcanza un promedio de 1.5% y depósitos de lateritas níquelíferas, que son concentraciones residuales de silicatos de níquel que varían de 1 al 4%, provenientes de la meteorización de rocas peridotíticas por procesos de enriquecimiento supergénico.

## DEPOSITOS DE SULFUROS DE NIQUEL

Actualmente los sulfuros masivos se consideran como fuente de mayor importancia para el níquel; en Sudbury, región de Ontario, Canadá, se produce cerca del 60% del níquel utilizado en el mundo libre desde 1905. Ha producido unas seis millones de toneladas de Ni y una cantidad similar de cobre. Hawley (1962).

Los depósitos típicos de sulfuros que contienen níquel están compuestos esencialmente de pentlandita ( $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ) y calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). Muchos de estos depósitos contienen cantidades menores de platino, cobalto y minerales tales como qersdorffita, bornita y vallerita; la pirita es ocasionalmente un accesorio. Estos depósitos ocurren en o cerca de intrusiones de peridotitas o noritas y se consideran genéticamente relacionados con estas rocas.

Los sulfuros se manifiestan como cuerpos masivos, diseminados o en forma de venas y venillas en las rocas ígneas. Algunos cuerpos masivos contienen fragmentos de la roca huésped; tienen formas alargadas, lenticulares o aplanadas.

Muchos depósitos se hallan localizados en la base de las intrusiones de peridotitas o noritas, pero están particularmente bien formados en salientes locales o a lo largo de los contactos.

#### DEPÓSITOS DE LATERITAS NIQUELÍFERAS

Son concentraciones residuales de silicatos de níquel que provienen de la erosión y meteorización intensiva durante largos períodos de tiempo sobre rocas ultramáficas enriquecidas en níquel; el desarrollo óptimo de las lateritas níquelíferas necesita un clima tropical o subtropical y un perfil topográfico de penillanura. La mineralización se incrementa si la roca madre está altamente fracturada y solo modestamente serpentinizada; cuando hay serpentización completa se forma una masa de roca relativamente impermeable. Los climas más favorables parecen ser los subtropicales, puesto que en los trópicos, el lavado es muy rápido para permitir la formación de horizontes saprolíticos que puedan atrapar el Ni proveniente de horizontes superiores.

Las lateritas formadas a partir de la meteorización de rocas serpentinizadas son generalmente muy ricas en hierro (45 a 55%) con un tenor promedio de 1% de níquel. Estas lateritas son llamadas ferroníquelíferas. Se considera que el níquel se halla incluido dentro de los principales minerales constituyentes tales como goethita, limonita y serpentina. Los mayores depósitos de lateritas ferroníquelíferas se hallan ubicados en Cuba, Filipinas e Indonesia.

Las lateritas formadas a partir de la meteorización de peridotita fresca, dunita y ocasionalmente piroxonita se conocen con el nombre de sílico-níquelíferas porque una parte significativa de níquel aparece en la garnierita, talco y anhídrido. El contenido de sílice, muy bajo en las lateritas de hierro, alcanza en estos depósitos un 30% y el níquel 16%. Los mayores depósitos de lateritas sílico níquelíferas, se hallan localizados en Nueva Caledonia e Indonesia; otros depósitos de características similares se han explorado ampliamente en California, Oregón, Washington y Colombia (PARK y McDIARMID, 1981).

#### BENEFICIO Y METALURGIA

Son muy pocos los minerales de Ni susceptibles de tratar metalúrgicamente; los más importantes, son aquellos donde Ni se una al As, Sb, S y a los silicatos; estos minerales, en las primeras etapas de la metalurgia dan productos intermedios denominados Speiss, matas, cobre negro, escorias y otros.

Además de la pentlandita, los minerales utilizados en la industria del níquel son: las piritas que contienen hasta el 3% de Ni; piritas magnéticas que tienen hasta 4% de Ni y los silicatos cuya proporción en níquel varía entre 9 y 15%.

Los minerales son transformados en óxidos por tostación. Se obtiene NiO y óxidos de otros metales. Estos se disuelven con ácido sulfúrico diluido; queda el NiO que se somete a la reducción con una mezcla de CO + H<sub>2</sub>. La reacción es la siguiente:



Para extraer el níquel de los minerales sulfurados se tiene en cuenta que el níquel tiene más afinidad para el azufre que el hierro, pero menos que el cobre; la afinidad con el oxígeno va en sentido contrario. Los minerales ricos en cobre y hierro se toscan primero, se funden luego hasta formar el producto intermedio, mata, con un contenido de Ni de 40% y un contenido de cobre de 40%. Con repetidas tostaciones y fusiones se logra obtener níquel bruto. El níquel bruto se afina en un convertidor bessemer hasta una concentración de 80% de Ni; luego se somete esta mata al proceso de Mondlanger, que consiste en reducirla a 300°C con gas de agua y conducir luego el producto al gasificador donde se envía una corriente de óxido de carbono a 100°C; de esta manera se obtiene níquel tetracarbonilo Ni(CO)<sub>4</sub>, que es volátil y pasa a una cámara de descomposición, donde a 180°C libera todo el Ni con una pureza de 99%. Mediante el calentamiento con coque y con un fundente básico, el níquel se extrae del silicato que lo contiene y el pedregado después en un horno Martin con aire caliente para separar, en forma de escorias, el hierro, manganeso y silicio, dejando libre el níquel. Para eliminar el oxígeno se agrega manganeso.

## ELECTROLISIS

La refinación electrolítica del níquel es muy complicada puesto que los ánodos de níquel se decomponen en el proceso electrolítico; por la razón anterior, se utiliza el subperóxido del plomo (PbO<sub>2</sub>) que es insoluble como ánodo, mientras que el níquel iría en solución. Al separarse el Ni, queda en libertad cierta cantidad de ácido, el cual es necesario neutralizar; se hace, añadiendo a la solución hidróxido de níquel el cual se disuelve. Este sistema permite al electrolito tener una cantidad constante de níquel.

En la refinación electrolítica de los componentes ricos en cobre y níquel, se utilizan ánodos de cobre-níquel; el cobre se precipita durante la electrolisis, mientras que el níquel va enriqueciendo el electrolito; en otras palabras: a medida que se separa el cobre en el cátodo, va disolviéndose el ánodo, de modo que la solución adquiere cobre y níquel; pero como el cobre se deposita en el cátodo, la concentración de níquel en el desarrollo aumenta. Para separar los residuos de cobre se apela a los procedimientos químicos de precipitación electrolizando después la sal pura de Ni con ánodos insolubles de peróxido de plomo.

## SITUACION MUNDIAL

## RESERVAS

A continuación se presentan las reservas identificadas de sulfuros de níquel en el mundo (Tabla 7) y las reservas identificadas de níquel laterítico en el mundo (Tabla 8). Para los sulfuros, las mayores reservas se encuentran en Estados Unidos y Canadá, sin considerar el tenor. Para el caso del níquel laterítico, Cuba y Filipinas poseen las reservas mayores, sin tener en cuenta el tenor (Tabla 8).

Tab. 7: Reservas identificadas de sulfuros de níquel en el mundo (Tomado de CORNWALL, 1973).

Area	Toneladas de Mineral	Ni %
<b>Estados Unidos</b>		
California	100.000	1,50
Colorado	70.000	0,80
Montana (Stillwater)(1)	150.000.000	0,25
Missouri	10.000.000	0,50
Nevada	30.000	0,30
Pensylvania	800.000	0,70
Washington	100.000	0,90
Minnesota (Ely)(2)	6.650.000.000	0,21
Alaska Glaciár Brady	200.000.000	0,25
Isla Yakobi	20.000.000	0,30
Bahía Funter	600.000	0,35
Maine	10.000.000	1,00
Total (0,21% porcentaje promedio de Ni)	<u>6.900.000.000</u>	
<b>Canadá</b>		
Distrito de Thompson	150.000.000	3,00
Mina de Thompson	200.000.000	0,45
Deposito del Lago Mystery	600.000.000	0,70
Deposito de Lago Moak	250.000.000	1,00
Otros		
Total (1% porcentaje promedio de Ni)	<u>1.000.000.000</u>	
<b>Distrito de Sudbury</b>		
Otros depósitos Canadienses	400.000.000	1,50
Otros depósitos Canadienses	100.000.000	1,50
Otros depósitos Canadienses	200.000.000	0,20
<b>Africa del Sur</b>		
Noruega	200.000.000	1,00
Burua	2.000.000	1,00
Australia	25.000.000	0,30
Australia	300.000.000	0,60
Australia	100.000.000	1,50
U.R.S.S.	100.000.000	0,60

NOTAS: (1) También contiene 0,25% de cobre.  
(2) También contiene 0,64% de cobre.

TAB. 8: Reservas identificadas de níquel laterítico en el mundo (tomado de CORNWALL, 1973).

Area	Toneladas de Mineral	Ni %
Islas Filipinas	1.000'000.000	0,80
Indonesia	500'000.000	0,90
Australia	100'000.000	1,20
Islas Salomón	100'000.000	1,20
Nueva Caledonia	500'000.000	1,80
Malagasy	2'000.000	2,00
Cuba	2.000'000.000	1,00
República Dominicana	70'000.000	1,50
Guatemala	100'000.000	1,50
Venezuela (Loma del Hierro)	60'000.000	1,60
Colombia (Cerromatoso)	40'000.000	2,50
Brasil	20'000.000	2,00
Puerto Rico	100'000.000	0,90
Grecia	2'000.000	1,70
U.R.S.S.	100'000.000	1,50
Yugoslavia	20'000.000	1,00
Estados Unidos		
Montañas níquelíferas de Oregón	10'000.000	1,50
California del Norte y el resto de Oregón	55'000.000	0,75
Washington (Cle Elum., Blewett)	30'000.000	0,50
Carolina del Norte	5'000.000	1,00

### PRODUCCION MUNDIAL

Los principales países productores de níquel son Canadá, Rusia, Cuba, Francia, Australia y otros. Productores en menor escala, incluyen a Indonesia, Filipinas, Africa del Sur, Grecia, Colombia y República Dominicana. (Tablas 9 y 10.

Para la Tabla 9:

- Hasta donde fue posible, esta tabla intenta representar la producción de materia prima de mena para níquel; donde los datos se hallan relacionados con procesamientos metalúrgicos más elaborados, se identifican con una cifra (2-3-4); este número se ha utilizado para hacer un llamado explicativo sobre la cantidad real de producción, destacando los productos elaborados, entre paréntesis, inmediatamente después del nombre del país o con una nota de pie de página. La tabla incluye datos disponibles hasta mayo de 1984.
- Contenido de níquel refinado, extraído de óxidos y sales, mas níquel recuperado de matas y speis exportados.
- Cifras reportadas.
- Incluye una cantidad pequeña de cobalto no reportado recuperada separadamente.

4: Producción Mundial de materia prima de mena níquelífera, por país<sup>1</sup> en toneladas cortas tomado de Ensminger, (1985).

País	1979	1980	1981	1982 <sup>p</sup>	1983 <sup>e</sup>
Canadá <sup>e</sup>	5.800	6.100	6.200	6.400	6.400
Australia (contenido de concentrados)	76.841	81.927	82.095	97.613	99.200
Botswana	17.828	17.022	18.200	19.573	19.300
Brasil (contenido de mena)	3.267	r 4.730	7.508	re 7.700	7.900
Burkina Faso (contenido de speiss)	19	15	22	e 22	22
Brasil <sup>2</sup>	139.422	203.709	176.642	97.824	134.300
Chad <sup>e</sup>	12.000	12.000	12.000	12.000	8.800
Colombia				1.100	3 15.000
Costa Rica (Contenido de óxidos sulfuros)	34.275	r 40.338	42.489	39.790	41.170
República Dominicana	27.680	18.019	20.601	e 6.600	22.300
Finlandia (contenido de concentrados)	6.393	7.199	7.566	6.852	6.600
República Democrática Alemana <sup>e</sup>	2.800	3.000	3.000	r 2.800	2.400
Grecia (Contenido de mena recuperable) <sup>4</sup>	22.214	16.796	17.200	e 16.800	16.500
Guatemala	6.833	7.650			
Indonesia (contenido de mena) <sup>4</sup>	r 41.059	r 58.739	53.848	60.592	51.400
México (contenido de mena de níquel y mena de cobalto)	176	148	140	e 110	
Nueva Caledonia (Contenido de mena recuperable)	r 88.178	95.451	86.079	66.250	69.400
Paraguay (contenido de concentrados) <sup>e</sup>	550	550	550	550	3 550
Filipinas	36.693	51.934	32.239	22.936	20.900
Polonia (contenido de mena) <sup>e</sup>	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300
República de Sur Africa	33.339	28.329	29.100	24.250	22.600
Unión Soviética (contenido de mena) <sup>e</sup>	166.000	170.000	174.000	r 182.000	187.000
Suecia (contenido de mena enmarcada)	15.065	14.653	12.099	3.203	
Yugoslavia <sup>e</sup>	1.650	2.200	4.400	13.200	13.200
Yemen (contenido de concentrados)	16.084	16.617	14.350	14.671	12.100
TOTAL	r 756.467	r 859.426	802.628	705.136	759.342

e = Estimado p = Preliminar r = revisado

TAB.10: Producción Mundial de níquel metálico, por país. (1) Tomado de Sibley, (1984).

P a í s <sup>2</sup>	1979	1980	1981	1982 <sup>p</sup>	1983 <sup>e</sup>
	Toneladas cortas				
Australia	43.366	38.921	46.854	50.630	50.700
Brasil <sup>4</sup>	2.715	2.760	2.574	2.200	10.700
Canadá <sup>5</sup>	92.315	167.881	127.000	<sup>e</sup> 69.900	121.856
China <sup>e</sup>	11.000	11.000	11.000	10.000	7.700
Colombia				<sup>e</sup> 1.000	16.000
Cuba <sup>6</sup>	8.923	<sup>r</sup> 8.737	9.355	9.910	10.000
Checoslovaquia	2.202	2.240	2.245	<sup>e</sup> 2.245	2.245
República Dominicana <sup>4</sup>	27.680	18.019	20.601	5.812	22.300
Finlandia	12.632	14.117	14.672	13.906	14.300
Francia <sup>5</sup>	3.660	10.802	11.000	<sup>e</sup> 9.900	11.000
República Democrática Alemana <sup>e</sup>	3.300	3.300	<sup>r</sup> 3.100	3.300	3.100
República Federal Alemana <sup>7</sup>	1.348	1.361	<sup>r</sup> 1.320	<sup>e</sup> 1.320	NA
Grecia	16.129	15.300	14.000	13.800	13.200
Japón	111.333	108.428	95.679	91.886	<sup>8</sup> 76.755
México	1				
Nueva Caledonia <sup>4</sup>	33.480	35.913	30.853	30.871	30.900
Noruega	33.826	<sup>9</sup> 40.921	<sup>9</sup> 40.890	28.268	28.700
Filipinas	23.675	27.968	23.683	14.876	10.500
Polonia <sup>e</sup>	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300
República de Sur Africa	8.863	19.950	19.800	19.070	18.700
Unión Soviética <sup>e</sup>	<sup>r</sup> 181.900	189.600	<sup>r</sup> 196.200	<sup>r</sup> 198.400	204.000
Reino Unido	20.793	21.275	27.999	<sup>e</sup> 7.600	7.200
Estados Unidos <sup>10</sup>	44.191	44.225	48.805	44.956	33.600
Yugoslavia				<sup>e</sup> 9.800	19.000
Sinabawe <sup>e</sup>	14.600	15.500	13.200	13.400	10.600
TOTAL	<sup>r</sup> 704.641	<sup>r</sup> 805.401	768.494	660.053	685.080

e = estimado p = Preliminar r = revisado NA = no disponible

ver la Tabla 10:

níquel refinado, más contenido de ferroníquel obtenido de arenas o concentrados, salvo indicación contraria.

Adicionalmente a los países de la lista se sabe que Albania inició su producción de fundición en 1978; Corea del Norte ha producido níquel metálico y ferroníquel; lamentablemente la información no es suficiente para citar niveles de producción estimadas.

Varios países producen matas níquelíferas, pero la producción de níquel procedente de ésta ha sido excluida, con el propósito de evitar duplicidad de cuentas ya que el contenido de Ni de las matas vuelve a tenerse en cuenta en los productos metálicos obtenidos.

Los siguientes países producen matas níquelíferas: Tomado de Sibley (1984).

País	1979	1980	1981	1982	1983
Australia	42.626	35.625	36.223	54.444	54.900
Brasil	17.828	17.022	20.143	19.573	20.080
Indonesia	7.042	17.428	16.499	11.371	19.842
Nueva Caledonia	13.517	17.063	16.954	8.800	7.800

Níquel refinado, más el níquel proveniente de óxidos.

Sólomente el Ni procedente de ferroníquel (no se produce níquel refinado).

Incluye contenido de níquel procedente de Ni refinado, óxido níquelífero y matas níquelíferas.

Contenido de polvo y óxido níquelífero granular solamente; Cuba también produce óxido níquelífero sinterizado y procesa sulfuros, pero no aparecen en el listado anterior para evitar doble cuenta por la razón citada anteriormente. La producción de sinterizados y sulfuros entre los años citados a continuación fue:

	1979	1980	1981	1982	1983
Sinterizada	11.828	13.069	13.354	12.963	11.400
Sulfuros	13.524	18.532	19.779	16.920	19.800

Incluye el níquel de las aleaciones níquelíferas.

Cifra reportada.

Datos derivados, procedentes del contenido de metal estimado en los reportes de concentrados.

Subproductos de metal refinado, incluyendo aquellos derivados procedentes tanto de yacimientos domésticos como de materiales importados (SIBLEY, 1984).

## RESERVAS Y CONSUMO

El mercado mundial de metales ferrosos, al igual que otros metales, comenzó un período de depresión y desplome de precios a mediados de los años setenta del cual hasta la fecha no ha recuperado.

Los precios del níquel mantuvieron una tendencia ligera de incremento hasta 1975. A partir de ese año, se inició el verdadero hundimiento de éstos con cifras críticas en los años 1979 y 1982, cuando alcanzaron los niveles más bajos de la historia.

La demanda del níquel experimentó una baja considerable a partir de 1979 pero se agudizó en 1982 cuando el consumo mundial reportado de 390 toneladas, fue el más bajo desde 1958. Todos los acabados a base de níquel mostraron una caída significativa, pero los más afectados fueron el acero inoxidable, aleaciones de hierro-cobre y super aleaciones.

Hasta 1982, el mercado de níquel primario (identificado como Clase I) se mantuvo estable pero decreció notoriamente el consumo de ferroníquel y óxidos de níquel (identificado como Clase II), pues las ventas descendieron en un 3%, comparadas con el año 1981.

En noviembre de 1982 los precios de existencia del "London Metal Exchange" (LME) alcanzaron el precio mínimo debido a los precios del mercado libre; los consumidores compraron níquel durante todo el año, procedente de contrabandistas de Cuba y la Unión Soviética lo que contribuyó a los niveles bajos en el precio que fueron de US\$ 1.44/lb.

El colapso en los precios se reflejó en la provisión excesiva y la recesión en la demanda para la industria del níquel; los países productores de armamento decidieron reemplazar este material por otros como el hierro, el cobalto y sintéticos.

Algunas minas y plantas procesadoras de níquel fueron cerradas o suspendidas temporalmente en muchos países, incluyendo a Australia, Canadá, República Dominicana, Finlandia, Filipinas, Japón y Zimbabue. La producción fue reducida en Indonesia, Nueva Caledonia y Australia en respuesta a la falta acentuada en la demanda.

A pesar del pobre mercado, varios proyectos para elaborar ferroníquel fueron creados: CERROMATOSO S.A. en Colombia, KAVADARCI en Yugoslavia y la EMPRESA DE DESARROLLO DE RECURSOS MINERALES S.A. en Brasil.

Después de tres años sucesivos de depresión, 1983 vislumbró un giro favorable, con relación a los problemas cónicos del níquel y hubo finalmente un incremento del 10% en el consumo mundial; de 449.000 pasó a 496.000 toneladas. Sin embargo, la recuperación incidió solamente sobre el níquel primario.

El alza en el consumo mundial fue acompañada por un modesto incremento en la producción; de 660.053 pasó a 685.080 toneladas cortas; desafortunadamente este incremento estuvo aún por debajo de la demanda; la producción de níquel fue mitigada por las altas tasas de interés, las cuales redujeron la inversión de capital notoriamente en los sectores de la economía más influyentes, de los cuales más de 40% dependían de la demanda del níquel. Estos sectores incluyen la construcción y ampliación de plantas químicas y petroquímicas que se pensaban reactivar en 1984.

Los productores mundiales de níquel, utilizaron durante 1983 el 50% de su capacidad y buscaron los medios para recor-

A pesar de la situación más favorable de demanda, los precios alcanzaron niveles relativamente rebajados; mientras el LME señala un precio que osciló entre US\$ 2.25 - 2.75 por libra, en el mercado libre los precios variaron entre US\$ 1.78 y US\$ 2.35 por libra.

Hubo reducciones en algunas plantas y minas de níquel, particularmente en Japón, Marinduque y Nueva Caledonia. La producción de ferroníquel en Japón bajó de 60.030 a sólo 45.739 toneladas. La producción de Marinduque fue reducida en 1.300 toneladas. Nueva Caledonia mostró una reducción mayor en 1985 con una caída de producción de 21.700 toneladas. La producción de Canadá fue 121.836 toneladas, cifra que representa un retroceso, si se compara con la correspondiente a 1981.

La producción de Sur América estuvo muy por encima a la del año inmediatamente anterior; Colombia arrojó 16.000 toneladas procedentes de Cerromatoso A.S., pronosticando incrementos para el año 1984 hacia una tasa de 25.000 toneladas de capacidad productiva; Brasil llegó a su producción más importante, pues pasó de 2.200 a 10.700 toneladas.

Aunque no existen datos estadísticos precisos, se confirmó un incremento significativo de producción y consumo de Ni para los años 1984 y 1985; la tendencia de precios también fue positiva, ya que el LME estabilizó el precio del níquel en US\$ 1.20 por libra para los dos últimos años, aunque en el mercado libre el níquel osciló entre US\$ 2.13 como precio mínimo y US\$ 2.60 como precio máximo por libra.

Por más de dos décadas y hasta mediados de los años setenta, la tasa de incremento de consumo de níquel fue de 6% anual; sin embargo, a raíz de la primera crisis del petróleo, esta tasa tuvo una quiebra estructural y hasta la fecha se sitúa entre 1 y 2% solamente. Este factor y otros enumerados a continuación han incidido notoriamente en el equilibrio de oferta y demanda que a su vez incurren en el precio del níquel: 1) un exceso de capacidad productiva, bajo la idea de que la tasa del 6% de crecimiento anual de consumo, seguiría igual. 2) Los altos inventarios existentes en las bodegas del "London Metal Exchange" (LME). 3) El mercado negro procedente de Rusia y Cuba, que establece precios para el níquel no competitivos con los instituidos en el LME, puesto que en los países socialistas no tienen en cuenta los costos de producción. 4) Aunque el mundo industrializado inicia una lenta recuperación, la demanda por el níquel muestra un acentuado retroceso.

Los análisis a largo plazo indican que los factores enumerados tienden a desaparecer hacia 1987. Esta conclusión aceptada en forma general, deja entrever la evolución de los precios que favorecen a los productores a partir de dicho año.

## EL NIQUEL EN COLOMBIA

### DEPÓSITOS

En Colombia actualmente se desconocen cifras de depósitos geológicos de sulfuros masivos de los cuales se pueda obtener económicamente explotable. Algunos autores han reportado la presencia de trazas de níquel en venas y venillas, posiblemente relacionadas a fenómenos hidrotermales, en algunos

departamentos tales como Quindío (municipios de Salento y Pijao), Cauca (municipios de Santander de Quilichao y Moreles), Nariño (municipio Los Andes) y Risaralda (municipio de Miratrató), pero las cantidades reportadas, previos análisis, aparentemente son normales, sin evidencia de interés económico para este elemento. Cabe anotar la no relación de estas venas con rocas ultrabásicas. Por lo anterior, es muy importantes el conocimiento de lugares donde afloran o puedan presentarse estas rocas, y la naturaleza de sus contactos y su espesor, pues esto favorece notoriamente no sólo la exploración sino una posible explotación de los minerales asociados a estas rocas. La Figura 4 muestra las mineralizaciones de níquel laterítico conocidas en Colombia.

#### DEPOSITO DE CERROMATOSO

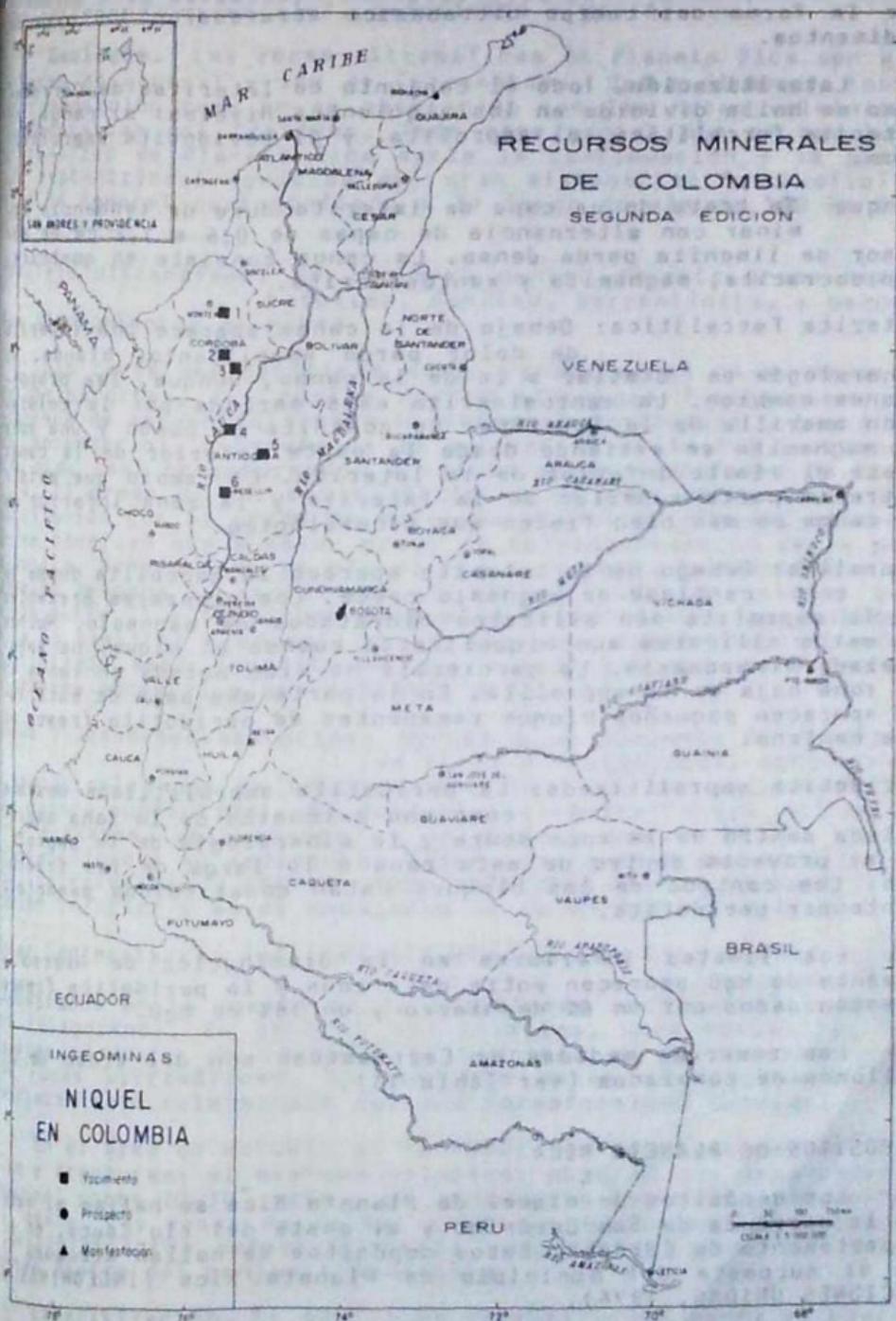
Cerromatoso es un cerro aislado de 200 metros de altura que sobresale claramente del nivel de drenaje del río San Jorge; la pendiente del cerro varía entre 5 y 15°. Este depósito se halla localizado al sur del Departamento de Córdoba, cerca de los límites con el Departamento de Antioquia.

El depósito de Cerromatoso fue descubierto por Enrique Hubach en 1940, quien en ese tiempo trabajaba con la Compañía de Petróleo Shell; él lo reportó como un depósito de hierro de 50 millones de toneladas. Sólo en 1958 Frank Atchley reportó valores altos para níquel, lo cual abrió el interés por este depósito de ferroníquel.

En 1979 se estableció la Compañía Cerromatoso S.A. El IFI, a través de ECONIQUEL Ltda. tendría el 45% de las acciones, CONICOL S.A. el 20% y un tercer socio escogido por decisión conjunta tendría el 35% de las acciones restantes que a la postre recayeron en "Billinton Overseas Ltd." del grupo Dutch Shell.

**Geología.** Las lateritas níquelíferas de Cerromatoso son el producto de alteración de rocas ultrabásicas de edad Cretácea. El depósito aparece como un cuerpo elongado con orientación norte-sur. Dentro del complejo ultrabásico del área de Cerromatoso se han reportado janzburquitas, dunitas serpentinizadas y afloramientos de gabros y basaltos. Petrográficamente la roca madre de Cerromatoso es una harzburgita, en algunas partes levemente serpentinizada y cuyos minerales principales son olivino y enstatita, en los cuales se cree está el níquel y cobalto ocupando espacios en la red cristalina. El grado de serpentización es relativamente bajo, sólo se encuentra una pequeña área de serpentinitas al oeste que representan aproximadamente un 5% de las rocas ultramáficas, siendo curioso el contraste que se observa en los análisis, donde aparentemente el enriquecimiento en níquel es inversamente proporcional al grado de serpentización de la peridotita.

Los contactos entre las rocas ultramáficas, gabros y basaltos están relacionados íntimamente con la gran falla de Reneral. Sedimentos cretácicos estudiados al norte y que se hallan constituidos por areniscas, arcillolitas, calcarenitas, chert y rocas volcánicas, integrando una posible secuencia eugeoclinal, sirven de rocas encajantes para el cuerpo ultrabásico. En los alrededores de Cerromatoso estos sedimentos cretácicos no afloran, hallándose en cambio rocas terciarias arenáceas con niveles arcillosos de colores claros. Estos sedimentos enmarcan las lateritas níquelíferas con contactos sur



1. Planeta Rica  
2. Corromatosa

3. Urié  
4. Ituango

5. Marzopelón  
6. Medellín

FIG. 4. Yacimientos de Niquel en Colombia.

bien definidos en superficie y aparentemente muy verticales a profundidad, ya que las perforaciones realizadas para determinar la forma del cuerpo ultrabásico atravesaron 300 pies de sedimentos.

**Lateritización.** Todo el conjunto de lateritas de Cerromatoso se halla dividido en los siguientes niveles: a) canqa, b) laterite ferralítica, c) saprolita, y d) peridotite saprolitizada.

**Canqa:** Se trata de una capa de laterite dura de tendencia laminar con alternancia de capas de 0,6 a 1,2 cm de espesor de limonita parda densa. La canqa consiste en goethita, lepidocrocita, maghemita y xantosiderita.

**Laterite ferralítica:** Debajo de la canqa aparece una laterite de color pardo amarillento, blanda. Su mineralogía es similar a la de la canqa, aunque, las proporciones cambian. La xantosiderita está marcada por la coloración amarilla de la laterite. La goethita es común y una zona de maghemita se extiende desde la parte inferior de la canqa hasta el límite inferior de la laterite. El cambio que existe entre la parte superior de la laterite y la zona inferior de la canqa es más bien físico que mineralógico.

**Saprolita:** Debajo de la laterite aparece la saprolita donde la cantidad de magnesio crece. Los minerales presentes en la saprolita son silicatos hidratados de magnesio. Muchos de estos silicatos son níquelíferos cuando el níquel ha reemplazado al magnesio. La garnierita ha sido notada en venas en la zona baja de la saprolita. En la parte más baja de esta zona aparecen pequeños bloques remanentes de peridotite fresca en sus centros.

**Peridotite saprolitizada:** La peridotite saprolitizada aparece como una extensión de la zona saprolítica dentro de la roca madre y la mineralogía de la saprolita se proyecta dentro de esta zona a lo largo de las fracturas. Los centros de los bloques están constituidos esencialmente por peridotite.

Los límites inferiores en la disminución de hierro y aumento de MgO aparecen entre esta zona y la peridotite fresca y están dados por un 6% de hierro y un 38% de MgO.

Las reservas medidas de Cerromatoso son del orden de 11 millones de toneladas (ver Tabla 13).

## DEPOSITOS DE PLANETA RICA

Los depósitos de níquel de Planeta Rica se hallan al este de la serranía de San Jerónimo y al oeste del río Cauca, en el Departamento de Córdoba. Estos depósitos se hallan situados 10 km al suroeste del municipio de Planeta Rica (INGEOMINAS y NACIONES UNIDAS, 1976).

A finales de 1973 se firmó un convenio entre las Naciones Unidas (PNUD) y el gobierno colombiano (INGEOMINAS), para hacer un estudio de todas las lateritas níquelíferas en el país incluyendo Planeta Rica. El proyecto INGEOMINAS - NACIONES UNIDAS inició su trabajo con una evaluación de los estudios hechos por ECOMINAS. Posteriormente realizó un programa de perforación con taladro auger y diamante de 21 pozos. foto

trabajo se complementó con levantamientos transversales de geofísico (magnetometría), geoquímica y geológicos.

**Geología.** Las rocas ultramáficas de Planeta Rica son similares en general a las de Cerromatoso, Uré e Ituango, tanto en composición como en su asociación con las rocas volcánicas-sedimentarias del Cretáceo. Todo hace pensar que el complejo ultramáfico de Planeta Rica sería la continuación y la parte más septentrional conocida del gran sistema tectónico-ofiolítico de Romerol cartografiado a lo largo de más de 500 km hacia el sur.

**Complejo Ultramáfico:** Se incluyen dentro de este grupo hornblendas, dunitas, serpentinitas y pequeños afloramientos de gabbro.

Las rocas peridotíticas están constituidas en su mayoría de hornblendas, las cuales fueron afectadas fuertemente por procesos de serpentización hidrotermal (primario) y tectónica (secundario). A través de la serpentización los piroxenos han sido casi transformados a cristales pseudomórficos de basanita. El grado de serpentización es de gran importancia por su relación con el grado de enriquecimiento en níquel, en donde se concluyó que a mayor grado de serpentización de la peridotita, menor tenor de níquel. La roca madre peridotítica en sección delgada ha confirmado su serpentización extensa que varía entre 75 y 100%. Los minerales de serpentina son antigorita (o bastita) y crisotilo. El piroxeno cuando no está serpentizado está constituido por enstatita. Los principales minerales accesorios son espinela y magnetita.

**Rocas Volcano-Sedimentarias:** Agrupa a un conjunto heterogéneo de rocas piroclásticas, extrusivas e hipobasales que se interstratifican con los sedimentos en una cuenca eugeoclinal. El conjunto volcánico consta de basaltos, diabases, aglomerados, y doleritas, que se hallan interstratificados en sedimentos tales como areniscas, arcillolitas, calcarenitas y cherts. Todo este conjunto es de edad Cretácico inferior y es el encajante de la unidad ultramáfica.

**Rocas Sedimentarias Terciarias-Cuaternarias:** Esta unidad agrupa los sedimentos depositados en la cuenca de la plataforma continental terciaria (Oligoceno). En general son friables, poco compactos, de colores claros y de composición arenácea en el contacto con las rocas ultramáficas. El contacto entre el Cretáceo y el Terciario está determinado por una inconformidad angular.

En el área de estudio se reconocieron dos sistemas de fallas y fracturas; el sistema principal observa una orientación regional norte 20-30° este y el secundario una dirección norte 40° oeste. Las zonas de fallas están evidenciadas por brechas y desplazamientos normales. Estos rasgos tectónicos son evidentes dentro del conjunto Mesozoico.

**Lateritización.** El perfil de meteorización sobre el cuerpo ultramáfico de Planeta Rica se ha dividido en: a) canga; b) laterita ferrolítica; c) saprolita; y d) peridotita saprolitizada.

**Canga:** Se presenta en las áreas topográficamente más altas.

En los cerros de Duzress y Porvenir la canga está constituida por bloques de tamaño variable y nunca forma una cobertura continua.

De tres muestras de canga estudiadas en sección delgada, solamente una es claramente el resultado de la alteración de una peridotita. Esta muestra está compuesta de óxidos hidratados de hierro y bastante serpentina ferruginosa con densas disseminaciones de limonita pseudomorfa resultante de olivino y piroxenos.

**Saprolita:** La saprolita de Queresa muestra un color pardo oscuro-verdoso y contiene localmente manchas de color ocre amarillentas de peridotita alterada. Fragmentos de cristales de piroxenos son numerosos y claramente visibles.

**Peridotita saprolitizada:** Se observa una transición entre la saprolita y la roca madre fresca. En esta zona hay fragmentos frescos de peridotita dentro de la saprolita blanda. La saprolitización es más acentuada donde la roca se halla más fracturada.

La Tabla 11 muestra los constituyentes de las zonas de la laterita de Planeta Rica.

TAB.11: Constituyentes en las zonas de la laterita del depósito de Planeta Rica, Departamento de Córdoba. INGEOMINAS - Naciones Unidas (1976).

Zona Laterítica	Ni %	Fe %	MgO %	SiO <sub>2</sub> %	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Co %
Canga	0,20-0,70	33-43	0,25- 0,85	10-15	1,5-2,5	0,01-0,05
Laterita	0,60-1,30	35-48	0,70- 3,50	3-18	2,0-3,5	0,08-0,20
Saprolita	1,00-2,40	10-20	10,00-25,00	30-38	0,5-1,2	0,03-0,05
Peridotita	0,20-0,40	6-10	25,00-35,00	37-42	0,26	0,01

Las reservas de estos depósitos se indican en la Tabla 13.

## DEPOSITOS DE URE

Los depósitos de Uré se hallan localizados en la parte sur del Departamento de Córdoba cerca del límite con el Departamento de Antioquia. Los cerros níquelíferos de esta área denominados La Viera, Alto del Oso, San Juan y Mogambo se localizan a lo largo de una línea norte-sur que pasa al oeste de la población de Uré. El depósito de La Viera, se halla localizado 10 km al sur del depósito de Cerromatoso en línea recta.

INGEOMINAS - Naciones Unidas (1976a) hicieron una evaluación de los trabajos anteriores de exploración realizando un estudio detallado del cuerpo más importante del cerro La Viera, e incluyendo un estudio de orientación con sedimentos finos en las quebradas alrededor del cuerpo de La Viera. En el campo de la geofísica se corrieron varios perfiles utilizando magnetómetro y centíllómetro. Así mismo, se hizo una exploración geológica que cobijó un Área de 20 km<sup>2</sup> complementada con 36 sondeos con broca de diamante, 33 sondeos de suer de mano y 9 spiques remuestreados.

**Geología.** La laterita de Uré se originó por la alteración de un cuerpo peridotítico que se presenta aflorando en una se-

de cuerpos elongados y discontinuos a lo largo de 15 km en sentido norte-sur. El cuerpo más importante es el de La Viera que cubre una superficie de 2,5 por 0,7 km.

El contacto con las peridotitas está constituido por gabbros, basaltos y andesitas porfiríticas. Las relaciones entre los cuerpos ultrabásicos y encajantes están poco definidas debido a escasez de afloramientos; sin embargo, las perforaciones revelan la presencia de una falla a lo largo del contacto occidental de La Viera.

Las formaciones ultrabásicas observadas en los cuerpos de Planeta Rica e Ituanqo son de edad cretácea por lo que se puede asumir la misma edad para los cuerpos de Uiré.

En general, las rocas peridotíticas incluyen principalmente harzburgita, serpentinitas, dunitas y piroxenitas. Todas las intrusiones de peridotita sufrieron serpentización hidrotermal y tectónica en alto grado, generalmente más del 70%.

INGEOMINAS - Naciones Unidas (1976a) realizaron un estudio petrográfico de 30 muestras de mondeos, apiques y afloramientos de los cuerpos de La Viera. El examen microscópico confirmó la serpentización intensa de la peridotita que generalmente varía entre 80 y 100%. Los principales minerales de la serpentina son antigorita y crisotilo.

El piroxeno cuando no está serpentizado está constituido por enstatita. Los principales minerales accesorios son espinela, magnetita y cromita. Aproximadamente en el 50% de las muestras se notan los efectos del metamorfismo dinámico: cristales de piroxenos y en menor proporción de olivino, aparecen rotos, deformados y cizallados.

En cuanto a las rocas encajantes, en toda el área se observan muy pocos afloramientos debido al alto grado de meteorización; por esta razón fuera de las áreas estudiadas con mondeos, los contactos geológicos son aproximados. Los basaltos y andesitas porfiríticas son de color verde oscuro a negro (basaltos) o gris azulado (andesitas). La textura afanítica contiene frecuentes fenocristales de plagioclasa. Los minerales principales son plagioclasas (oligoclasa-andesita) y piroxeno (augita-diopsido). No se hace mención de olivino en las secciones delgadas estudiadas. Los gabbros siempre están asociados y forman facies de variación con los basaltos en los cuerpos de La Viera, Alto del Oso y Mogambo. A menudo son de grano muy fino y difíciles de distinguir de los basaltos. En la sección delgada generalmente se nota la presencia de hornblenda.

**Lateritización.** En el Área estudiada, los perfiles de meteorización más completos se encuentran en La Viera y Alto del Oso, los cuales forman los cuerpos ultrabásicos más importantes.

Los diferentes niveles de lateritización se describen así:

Canga (Zona 1): Nunca se observa en forma de capa continua. Solamente se ven en forma de bloques pequeños de canga sobre la laterita ferrolítica.

**Laterita Ferrolítica (Zona 2):** tiene color pardo oscuro en su superficie, el cual se vuelve más claro en profundidad. Su consistencia es terrosa y el contenido de humedad es bajo. En su parte superior la laterita puede contener fragmentos o bloques pequeños de cancha.

**Saprolita (Zona 3):** Muestra color pardo claro a verdoso amarillento, conteniendo localmente manchas color ocre y/o amarillo que corresponden a bloques de peridotita que no están completamente saprolitizadas.

**Contacto Saprolita-Peridotita fresca:** Está formado por una zona de mezcla de bloques de peridotita fresca con saprolita blanda. La cantidad de bloques de peridotita aumenta en profundidad hasta la roca madre.

A partir de las muestras representativas (cubos y canal) de las zonas 2, 3 y 4 (roca) en los apiques de La Viera, se hizo la Tabla 12, la cual muestra las variaciones del contenido de Ni, Fe, MgO y SiO<sub>2</sub> de cada zona.

TAB.12: Constituyentes en las zonas de la laterita del depósito de Uré, Departamento de Córdoba. INGEOMINAS - Naciones Unidas (1976a).

Zona Laterita	Ni %	Fe %	MgO %	SiO <sub>2</sub> %
Laterita	0,30-1,10	35,0-48,0	0,10- 2,0	1,5-14,0
Saprolita	0,95-1,55	8,5-23,0	10,00-28,0	25,0-37,0
Peridotita	0,20-0,60	5,0- 7,0	31,00-36,0	34,0-41,5

Las reservas medidas de estos depósitos son del orden de 620.000 toneladas (ver Tabla 13).

#### DEPOSITO DE MORRO PELON

Morro Pelón se halla localizado a 8 km del municipio de Campamento (Antioquia); a su vez, Campamento se encuentra situado 164 km al noreste de Medellín.

INGEOMINAS - Naciones Unidas (1976b) realizaron una exploración, la cual se inició con la cartografía del cuerpo de lateritas y posteriormente una serie de perforaciones con taladro de mano para determinar el espesor de la laterita y saber si había desarrollo de saprolita.

**Geología.** Las rocas ultrabásicas que afloran en Morro Pelón están formadas por dunitas, harzburgitas y serpentinitas. Estas rocas afloran dentro de un cuerpo de forma elongada de dirección norte-sur. Las serpentinitas aparecen como rocas de color gris verdoso a negro, faneríticas, muy foliadas y disclasadas; el mineral serpentínico predominante es la antigorita; la dirección predominante de foliación es este-oeste, inclinándose hacia el norte entre 70 y 75°. Las serpentinitas pudieron ser peridotitas, las cuales sufrieron serpentinitización hidrotermal y deformación tectónica. Tanto la dunita como la harzburgita que hacen parte del cuerpo de peridotita aparecen en zonas donde los efectos tectónicos fueron débiles. La harzburgita deja ver restos de piroxenos que en algunos casos están muy alterados; posiblemente se trate de bastita.

Estas rocas ultrabásicas se hallan en contacto con rocas ácidas (gabros) y rocas verdes (basaltos y diabases), todas ellas de edad cretácica. Los contactos entre estas rocas y el cuerpo ultrabásico son tectónicos, y todo parece indicar que se trata de una serie ofiolítica por sus características petrográficas y sus relaciones estructurales.

**Laterización:** La laterita niquelífera de Morro Pelón presenta zonificación similar en su distribución a la de los otros depósitos descritos anteriormente. Desde la superficie hasta la roca fresca se diferencian los siguientes niveles: a) canga; b) laterita ferrolítica; c) saprolita; y d) roca saprolitizada.

La canga aparece como fragmentos pequeños diseminados en la superficie; sólo tiene importancia en la parte centro-occidental donde se observan bloques angulares hasta de 1 m. Son de color marrón rojizo, observándose costras limoníticas de color rojo anaranjado y hematita de color gris plomo.

La laterita ferrolítica es de aspecto terroso, de color marrón oscuro haciéndose más clara a medida que se profundiza.

La saprolita es de color amarillo verdoso. Se trata de un material de aspecto terroso, pudiéndose reconocer fragmentos de peridotita alterados, así como la presencia de cristales de piroxeno y de actinolita-tremolita.

La zona de roca saprolitizada presenta una roca alterada de color verde grisáceo con pintas amarillas observándose vetas de actinolita-tremolita asbestiforme.

Las reservas medidas de estos depósitos alcanzan a 1'940.000 toneladas (Tabla 13).

#### LATERITAS EN LOS ALREDEDORES DE MEDELLÍN

La faja de rocas ultrabásicas se halla localizada al este de la ciudad de Medellín, capital del Departamento de Antioquia, manifestándose en los cerros orientales que circundan la ciudad (INGEOMINAS - NACIONES UNIDAS, 1976c).

INGEOMINAS - Naciones Unidas, en 1974, con el ánimo de definir si estas lateritas ofrecían un potencial para una fuente económica de níquel programó una exploración, la cual consistió en una cartografía geológica detallada de los tres cuerpos ultrabásicos, seguida por perforaciones con máquinas de superficie.

**Geología:** Tres cuerpos ultrabásicos de forma elongada afloran al este de Medellín por una extensión de 35 km<sup>2</sup>. Estos cuerpos ultrabásicos están compuestos por una dunita parcialmente serpentinizada, observándose esporádicamente afloramientos de harzburgita dentro de la dunita. A diferencia del grupo ofiolítico occidental asociado a la falla de Romeral, considerado como el límite entre la corteza continental que se manifiesta desde Planeta Rica, Cerromatoso e Ituango en el norte hasta Pácora - Salamina - Aranzazu, en el sur, esta faja de dunita serpentinizada forma parte del cuerpo ofiolítico central de la Cordillera Central como remanentes de la corteza continental y encajada dentro de rocas metamórficas probablemente paleozoicas.

La edad del cuerpo ultrabásico es Cretáceo y se halla desplazado tectónicamente dentro de una anfibolita de edad paleozoica. Una gran falla de dirección norte 10-20° oeste marca el límite entre la dunita y la anfibolita en el sector oriental del cuerpo ultrabásico.

La dunita es de color gris verdoso de grano medio, cuyos minerales más importantes son olivino, antigorita y crisotilo. Hacia las partes marginales del cuerpo ultrabásico la dunita se halla serpentizada.

Rodeando prácticamente todo el ultrabásico aparece una anfibolita de color gris oscuro, cuya textura varía de néfisa a esquistosa. Los minerales más importantes son hornblenda (50-75%), plagioclasa, diápsido y óxidos de hierro; el cuarzo es un mineral accesorio. La anfibolita se halla ampliamente cloritizada en la zona de contacto con la dunita.

**Lateritización:** Sobre la faja del cuerpo ultrabásico se han formado en ciertos sectores lateritas como producto de alteración de la dunita. El espesor de esta laterita se hace más considerable en la parte norte del cuerpo central (La Gabriela). Prácticamente sólo en el cuerpo central ultrabásico se encuentra laterita "in situ"; en los cuerpos norte y sur aparecen en forma de coluvión.

El perfil general de meteorización que aparece al oriente de Medellín (cuerpo central) se puede dividir en Zona 1: mezcla (coluvión), Zona 2: laterita ferrolítica, Zona 3: saprolita y peridotita (serpentizada y saprolitizada).

**Zona 1:** Llamada zona de mezcla, está compuesta de fragmentos de saprolita, peridotita, anfibolita y laterita. Se halla cubriendo parcialmente el perfil laterítico en forma de coluvión.

**Zona 2:** Esta zona es de color pardo rojizo con tonalidades anaranjadas y aspecto arcilloso en su gran mayoría. El contenido de humedad es relativamente alto. La laterita tiene espesores variables que van desde 1 a 3 m en las partes altas y hasta 11 m en la zona de La Gabriela.

**Zona 3:** Es de color verde pardusco, tonalidades amarillentas de aspecto terroso en zonas altamente meteorizadas, alcanzándose a ver venillas de esquistos actinolíticos-tremolíticos que han quedado como remanentes de la meteorización. La mayoría de la saprolita encontrada es dura. El espesor promedio es de 7,4 m en algunas zonas de La Gabriela. Una de las características de la saprolita es su alto contenido de sílice, con algunos valores que llegan a 5,61%.

El contacto entre la saprolita y la roca madre al oriente de Medellín no es definido; se observa una gradación de roca fresca a saprolita, apareciendo un nivel intermedio entre la roca fresca y la saprolita (peridotita saprolitizada), que representa un estado avanzado en la meteorización química de la roca fresca.

Las reservas de estos depósitos están indicadas en la tabla 13.

## DEPOSITOS DE ITUANGO

Los cuerpos níquelíferos se hallan localizados al sureste del municipio de Ituango, población situada 180 km al noreste de Medellín. El Área fue estudiada durante los trabajos realizados por el inventario Minero Nacional (hoy INGEOMINAS) y publicados en el año de 1970 bajo la denominación Mapa Geológico del Cuadrángulo H-8 (Yarumal) y parte del Cuadrángulo H-7 (Ituango) (ALVAREZ et al, 1970).

INGEOMINAS - Naciones Unidas (1976d) hicieron exploraciones en el sitio El Totumo cubriendo un Área de 15 km<sup>2</sup>; esa exploración consistió en una cartografía de los cuerpos ultrabásicos y en una evaluación económica de sus capas de laterita níquelífera con sondeos de taladro de mano.

**Geología.** En la parte estudiada afloran rocas ultrabásicas (peridotitas serpentinizadas y serpentinitas) del Cretáceo, encajadas dentro de un conjunto de esquistos metamórficos, posiblemente del Grupo Valdivia (Paleozoico). Las rocas ultrabásicas afloran en la parte central del área estudiada, formando un eskarpe con pendientes muy fuertes, orientado en una dirección general norte-sur.

Se trata de rocas de color verde grisáceo, con presencia esporádica de venas, hasta de 2 mm de espesor de actinolita-tremolita. El tipo de roca ultrabásica varía entre dunita y harzburgita. Hacia los contactos de peridotita está muy cizallada con alineamientos fuertes en dirección general norte-sur.

Los esquistos del Grupo Valdivia que rodean el cuerpo ultrabásico se dividen en dos sub-grupos: esquistos cloríticos y sericiticos intercalados, y esquistos cloríticos-actinolíticos. Los primeros afloran en el sector occidental, son rocas finamente foliadas de color azul grisáceo y el mineral predominante es cuarzo. El segundo aflora en la parte oriental y con rocas bandeadas de color verde produciendo un suelo arcilloso de color rojo anaranjado; estos esquistos presentan características muy similares a los esquistos cloríticos-sericiticos, diferenciándose por su color.

**Lateritización.** Debido a que las condiciones no fueron adecuadas (morfología con pendientes fuertes, serpentinitización alta y clima no suficientemente cálido), la capa meteorizada sobre la roca ultrabásica está muy poco desarrollada, formándose laterita y solamente en los sectores donde las pendientes son suaves.

La laterita es de color rojo a marrón con aspecto terroso, arcilloso al tacto. No se observa la presencia de capa en forma de capa o como bloques. Sin embargo, se notan fragmentos pequeños de limolita endurecida en la superficie del suelo. En profundidad, de acuerdo con los sondeos, el material saprolitizado tiene color amarillo verdoso, observándose restos de actinolita-tremolita asbestiforme. En muchos sondeos se pudieron apreciar clastos de esquistos muy alterados.

No se tienen estimativos de reservas de estos depósitos.

## RESERVAS

Cerromatoso es la única empresa minera que produce níquel en Colombia. Elabora ferroníquel en lingotes, con un contenido promedio de níquel de 45% y una capacidad anual de 42 millones de libras. En la tabla 13 se presentan las reservas de los depósitos conocidos en Colombia.

TAB. 13: Yacimientos de ferroníquel en Colombia donde se señalan: el tipo de reserva, magnitud, espesor promedio de mena y contenido en porcentaje de níquel y hierro. INGEOMINAS-Naciones Unidas (1976a,d).

Tipo de Reserva	Magnitud (Ton)	Espesor Promedio (m)	Ni %	Fe %
<b>1-Reservas Minerales del Depósito de Cerromatoso:</b>				
Medidas	21 x 10 <sup>6</sup>	4.86	2.7	-
Indicadas	41 x 10 <sup>6</sup>	4.87	1.5	-
Inferidas	-	-	-	-
<b>2-Reservas Minerales del Depósito de Planeta Rica:</b>				
Medidas	-	-	-	-
Capa ferruginosa	0.25 x 10 <sup>6</sup>	-	1.13	36.87
Laterita	3.80 x 10 <sup>6</sup>	-	1.22	36.98
Saprolita	5.67 x 10 <sup>6</sup>	-	1.46	16.75
<b>3-Reservas Minerales del Depósito de Ure:</b>				
Medidas	0.62 x 10 <sup>6</sup>	3.22	1.32	15.30
Indicadas	1.35 x 10 <sup>6</sup>	2.75	1.28	18.30
Inferidas	0.20 x 10 <sup>6</sup>	1.30	1.49	22.70
<b>4-Reservas Minerales del Depósito de Morro Pelón:</b>				
Medidas	1.94 x 10 <sup>6</sup>	4.00	0.5	30.55
Indicadas	1.73 x 10 <sup>6</sup>	1.05	0.4	28.00
Inferidas	0.49 x 10 <sup>6</sup>	1.05	0.4	28.00
<b>5-Reservas Minerales del Depósito de Medellín:</b>				
Medidas	-	-	-	-
Lateritas	1.23 x 10 <sup>6</sup>	2.1	0.69	35.98
Saprolitas	3.36 x 10 <sup>6</sup>	7.6	0.68	14.77
Indicadas	2.40 x 10 <sup>6</sup>	9.55	0.53	14.00
Inferidas	3.36 x 10 <sup>6</sup>	9.55	0.53	14.00
<b>6-Reservas Minerales del Depósito de Ituango:</b>				
Medidas	-	-	-	-
Lateritas (cuerpo norte)	-	1.10	0.28	14.3
Lateritas (cuerpo sur)	-	0.55	0.30	11.4

Los datos agrupados en la tabla anterior, señalan claramente que Cerromatoso es el único yacimiento económicamente explotable en Colombia; los otros depósitos son marginales y sus reservas solamente podrían utilizarse aprovechando la infraestructura que existe en Cerromatoso.

## PERSPECTIVAS EN EL MERCADO INTERNACIONAL

Los grandes productores de níquel vienen enfrentando, además del cambio en la tasa de consumo, serios contratiempos en la explotación y procesamiento de sus minerales, lo que influye notablemente en sus perspectivas dentro del mercado internacional. Los principales factores que crean esas dificultades son:

1. El encarecimiento de la energía.
2. La proliferación de productores de níquel.
3. Costos de producción de los competidores (alzas en la mano de obra).
4. Regulaciones sobre el medio ambiente.

**1. El encarecimiento de la energía.** Para muchos productores con base en menas lateríticas, los cuales contabilizan más del 66% de la producción actual de níquel en el mundo, cualquier cambio en el precio de los combustibles los afectaría sensiblemente, ya que el procesamiento de lateritas necesita mucho más energía que el procesamiento de sulfuros, en relación de 3:1, y esto equilibra los bajos costos que involucran la minería a cielo abierto, opuesta a la minería subterránea. En la actualidad los costos de combustibles contabilizan el 15% de los costos de operación cuando se utiliza petróleo y 30% cuando se emplea carbón.

Colombia, por el contrario, tiene garantizado un suministro de energía de origen esencialmente hidroeléctrico, que a juicio de los expertos es catalogado de alta confiabilidad y de costos relativamente bajos.

La energía se suministra de una línea de 500.000 voltios que interconecta el sistema nacional con la Costa Atlántica.

**2. La proliferación de productores de níquel.** Hasta 1950 solamente hubo tres productores de níquel: Canadá, Rusia y Francia (Nueva Caledonia); actualmente el níquel es producido en 25 países que han tenido que soportar graves problemas económicos por la superproducción.

Para el caso colombiano es conveniente recordar que, de acuerdo con un convenio suscrito por los socios de Cerromatoso S.A., la totalidad de la producción de los doce primeros años se comprará la firma "Billinton Metals and Ores International" a precios internacionales. Lo anterior le asegura la venta de todo el ferroníquel que pueda producir y obviamente margina al país de un problema competitivo, temporalmente.

**3. Costos de producción de los competidores (alzas en la mano de obra).** Examinando los costos comparativos de los principales productores integrados al mercado mundial del níquel, se encontró que "LARCO", en Grecia, tiene los mayores costos de producción, virtualmente el doble de los de "INCO", en Canadá. Sin embargo, el valor de la mano de obra en el Canadá ha sido muy alto y contabiliza más de la mitad de los costos de producción. Hay que anotar que la minería subterránea de los sulfuros de níquel es mucho más difícil que la minería a cielo abierto de los depósitos lateríticos, lo que obviamente incrementa las tasas en la mano de obra.

De los productores de níquel con base en lateritas niquelíferas, Cerromatoso S.A. en Colombia es el de menores costos de producción. El tenor de 2.7% de níquel le ofrece ciertas

ventajas, ya que el tenor promedio normal en lateritas es de sólo 1.7% de níquel.

Otros depósitos en el mundo tienen costos de producción relativamente bajos pero no son competitivos ya que presentan un tenor relativamente bajo en la mena, con un promedio de níquel que no alcanza el 1.5%.

"France's Société Le Niquel" (SLN): a pesar del alto tenor (3% de níquel) su minería está suspendida por los elevados costos de energía en sus plantas de poder térmico, a base de petróleo, así como por su alta relación estéril-mena.

**4. Regulaciones sobre el Medio Ambiente.** Otro factor de mayor incidencia en los costos de producción, que afecta a los productores de níquel con base en sulfuros, es la regulación establecida para el medio ambiente.

En Canadá, los costos de las instalaciones para eliminar los desechos de pirrotita (reduciendo principalmente las emisiones de  $SO_2$ ) pueden introducir en los costos de producción cifras que sobrepasan los 10 millones de dólares.

Desde 1965, "INCO" ha reducido las emisiones de  $SO_2$  procedentes de las refineries de "Sudbury" en un 80%, y en la actualidad tiene desarrollada una técnica de refinaria capaz de reducir las emisiones de desechos a la mitad; pero este proceso le costaría a la compañía 600 millones de dólares, que no se deben invertir bajo las circunstancias financieras actuales.

"Falconbridge" también ha disminuido las emisiones de  $SO_2$ ; en "Sudbury" entre 1966 y 1982 la compañía gastó 180 millones de dólares canadienses con el fin de disminuir el contenido de  $SO_2$  en la atmósfera, logrando una disminución significativa que pasó de 83% a únicamente 14%.

En cambio estas consideraciones de costos sobre problemas ambientales, son frecuentemente mínimas para los productores de níquel con base en menas lateríticas.

Hasta fines del año 1985, la explotación de ferroníquel en Cerromatoso había acumulado pérdidas cercanas a los 17.000 millones de pesos (incluyendo costos de reparación) para los cuatro primeros años de explotación; las reparaciones y modificaciones introducidas al horno central permitirán, en concepto de los expertos, una operación continuada y sin contratiempos durante un periodo no menor de diez años, con un notorio incremento de la producción; esto le facilitará a Cerromatoso iniciar su etapa de recuperación financiera.

Sobre la empresa siguen pesando los costos financieros derivados del alto nivel de endeudamiento. Los dos principales socios de la empresa, "Billinton" y el Ifl, acordaron aumentar el capital en 9 millones de dólares y abrir un crédito rotatorio por valor de 20 millones de dólares más con lo cual se resolverán problemas de liquidez a corto plazo,

A parte de la deuda externa, la situación del mercado internacional y el precio actual del níquel han conspirado contra los intereses colombianos. Sin embargo, los costos de producción se han logrado colocar por debajo del precio actual del níquel, lo que permite una luz de optimismo en los obje-

del Gobierno, que sólo espera un cambio positivo de mercado y de precios.

## COMERCIO

Las exportaciones en Colombia se iniciaron con la apertura del complejo minero metalúrgico de Cerromatoso S.A. una de las diez empresas más grandes de Colombia y la tercera empresa minera después de ECOPETROL y CERREJON.

**Exportaciones.** A finales de 1982, la compañía Cerromatoso S.A. inició la producción de Ferroniquel, el cual tradicionalmente se ha exportado en forma de lingotes. Sin embargo, para satisfacer algunas solicitudes hechas por plantas productoras de acero inoxidable, se están produciendo en la actualidad pequeños granulos de ferroniquel, que aparte de su forma, son de idéntica composición a los lingotes. La totalidad del material producido en Cerromatoso (Figura 5), con exclusión de aproximadamente 100 toneladas vendidas en 1984 para el mercado nacional, se exporta principalmente hacia Europa, a los países del Mercado Común Europeo y a las naciones Escandinavas; también hacia los Estados Unidos, India y Japón; en menor escala, a México, Corea del Sur y Taiwan, entre otros (Figura 6).

El ferroniquel producido ha generado más de 178 millones de dólares, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Totalidad de ferroniquel producido en los años 1983, 1984 y 1985 y los ingresos generados por las exportaciones. Tomado del informe anual de Cerromatoso S.A., Gómez (1981, 1985). Banco de la República, Anuario de Comercio Exterior (1986).

País Proveedor	Toneladas métricas por año			Valor facturado en miles US\$		
	1983	1984	1985	1983	1984	1985
Holanda	18.347	22.740	15.641	31.826,00	41.890,30	34.267,20
U.S.A.	8.390	5.219	2.611	14.724,00	9.878,20	4.566,70
Suecia	7.266	-	-	1.259,20	-	-
Italia	2.385	1.146	-	4.020,90	2.034,60	-
Japón	1.592	1.962	1.197	2.343,30	3.571,70	2.289,40
India	1.352	-	-	2.192,70	-	-
Francia	-	4.800	6.476	-	8.923,10	12.818,60
<b>Subtotal</b>	<b>32.792</b>	<b>35.867</b>	<b>25.925</b>	<b>56.366,10</b>	<b>66.297,90</b>	<b>53.941,90</b>

Año	Totales acumulados	
	Toneladas métricas	Valor facturado
1982	1.670,000	US\$ 2'153.929,00
1983	32.792,257	56'366.472,00
1984	35.866,924	66'297.946,00
1985	25.925,550	53.941.967,00
<b>Total</b>	<b>96.254.731</b>	<b>178.760.731,00</b>

**Importaciones.** En la Tabla 15 se indican los datos estadísticos más recientes sobre las importaciones de níquel a Colombia, según información bruta obtenida del INCOMEX.

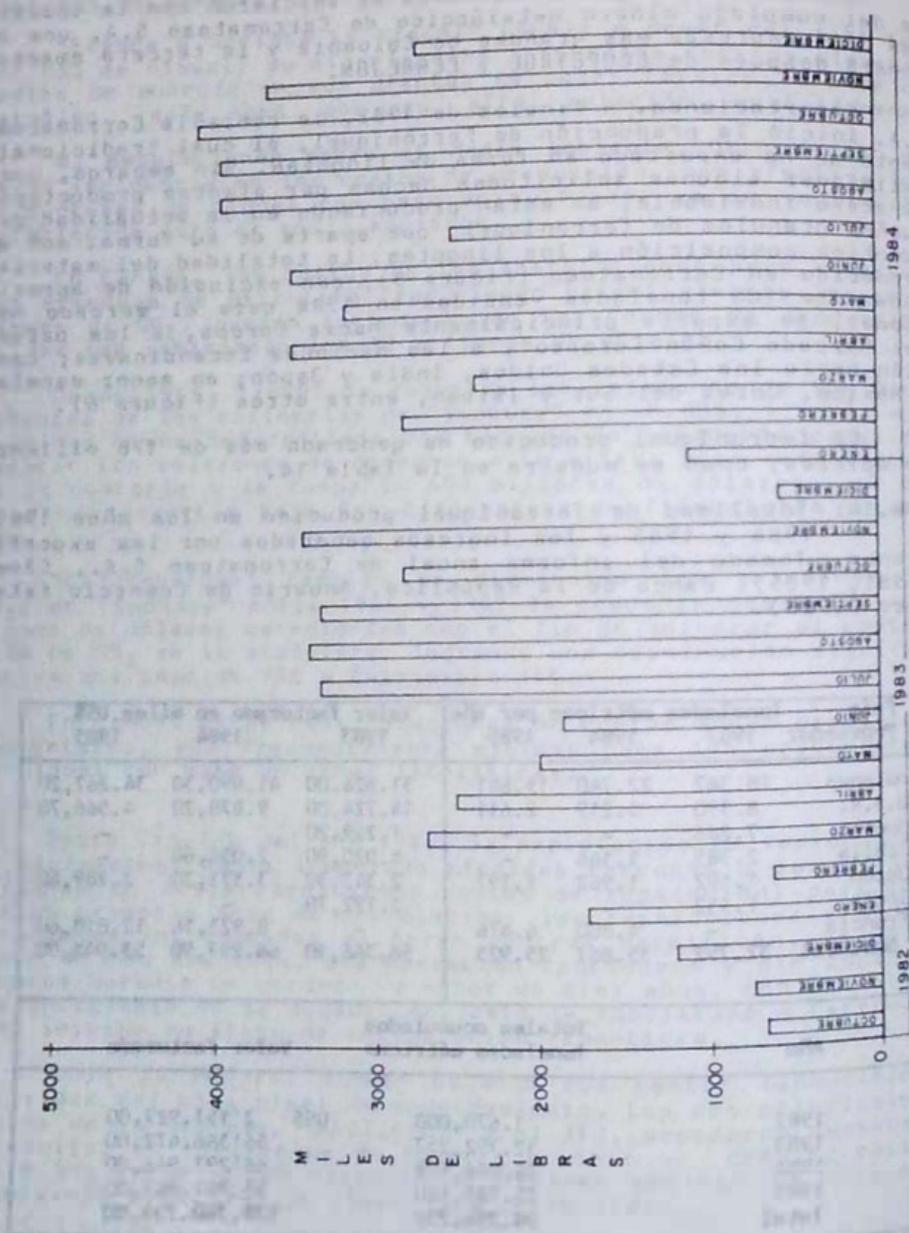


FIG. 5: Cantidad de ferroniquel producido y exportado por la compañía Cerrometoso S.A. de octubre de 1982 a Diciembre de 1984, expresado en millones de libras. Tomado del informe anual de Cerrometoso S.A. GÓMEZ (1985).

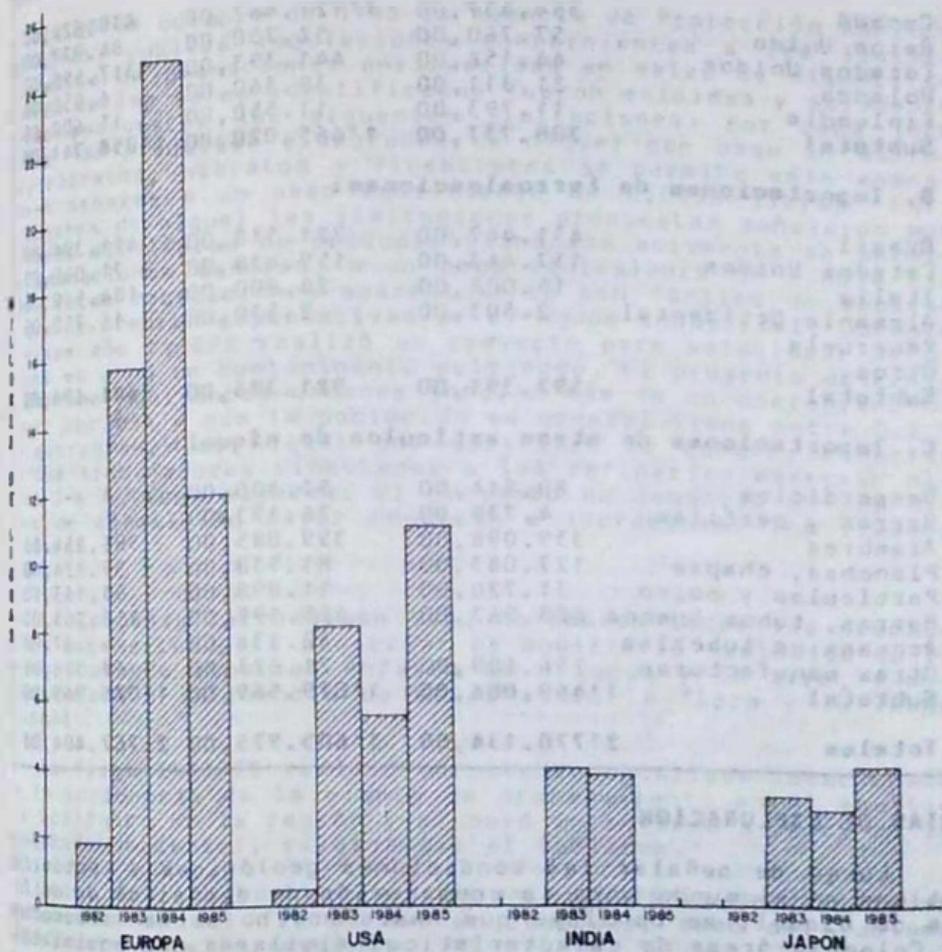


FIG. 6: Principales exportaciones de ferroniquel, en millones de libras, durante los años 1982-1983-1984 y 1985, especificando la cantidad de material exportado anualmente hacia cada uno de los países receptores. Tomado del informe anual de CORMINEX S.A. Gómez (1985) y complementado con datos del INCOMEX, Banco de la República (1986).

TAB. 15: Últimos datos estadísticos de importación registrados en el INCOMEX, aprobada para los años 1983, 1984 y 1985; discriminados en níquel en bruto, ferroaleaciones y otros artículos de níquel.

País Proveedor	Valor facturado en dólares		
	1983	1984	1985
<b>A. Importaciones de níquel en bruto:</b>			
Canadá	564.437,00	1'121.467,00	638.624,00
Reino Unido	57.760,00	52.250,00	84.877,00
Estados Unidos	44.156,00	441.393,00	317.590,00
Holanda	21.311,00	38.360,00	6.050,00
Finlandia	11.793,00	11.550,00	11.600,00
<b>Subtotal</b>	<b>708.737,00</b>	<b>1'665.020,00</b>	<b>1'058.741,00</b>
<b>B. Importaciones de ferroaleaciones:</b>			
Brasil	431.447,00	721.518,00	471.394,00
Estados Unidos	137.443,00	159.438,00	71.040,00
Italia	15.008,00	28.800,00	104.560,00
Alemania Occidental	2.503,00	2.530,00	11.750,00
Venezuela	-	-	-
Otros	-	-	-
<b>Subtotal</b>	<b>592.391,00</b>	<b>921.386,00</b>	<b>681.694,00</b>
<b>C. Importaciones de otros artículos de níquel:</b>			
Desperdicios	80.914,00	51.500,00	-
Barras y perfiles	4.739,00	26.193,00	-
Alambres	339.098,00	359.085,00	586.254,00
Planchas, chapas	127.083,00	81.938,00	59.824,00
Partículas y polvo	31.720,00	11.898,00	53.163,00
Barras, tubos huecos	628.963,00	425.199,00	258.263,00
Accesorios tuberías	-	42.134,00	67,00
Otras manufacturas	256.489,00	21.623,00	69.398,00
<b>Subtotal</b>	<b>1'469.006,00</b>	<b>1'019.569,00</b>	<b>1'026.969,00</b>
<b>Totales</b>	<b>2'770.134,00</b>	<b>3'605.975,00</b>	<b>2.767.404,00</b>

## GUIAS DE EXPLORACION

Luego de señalar las condiciones geológicas y tectónicas óptimas en el mundo para la consecución de depósitos de sulfuros de níquel, se concluye que hasta hoy no se han reconocido en Colombia áreas de características similares con posibilidades económicas de explotación. Sin embargo, sí se han reconocido depósitos de níquel asociado a lateritas y las labores de exploración deben orientarse hacia este tipo de yacimientos.

Las lateritas representan una etapa avanzada de la meteorización de rocas ultramáficas y da lugar a yacimientos níquelíferos constituidos principalmente por óxidos de hierro y aluminio en diferentes estados de hidratación, algo de sílice y muy bajo tenor de magnesio y níquel; por lo tanto, las áreas de interés se hallan circunscritas a regiones donde afloran rocas peridotíticas. La prospección de estas rocas por métodos geofísicos tales como magnetometría, gravimetría, sondeo eléctrico y polarización inducida, se emplea frecuentemente y ha conducido al hallazgo de yacimientos de laterita níquelífera en el mundo. Muchas lateritas níquelíferas de interés económico como las de Cerromatoso han sido encontradas a partir del

estudio de anomalías magnéticas; también es posible identificarlas por métodos gravimétricos debido a la alta densidad de las peridotitas asociadas; sin embargo, mientras los cuerpos intrusivos mayores de peridotita registran anomalías positivas, las rocas serpentinizadas presentan anomalías negativas debido a su baja densidad.

## TECNOLOGIA E IMPACTO AMBIENTAL

El 25 de octubre de 1983 la Agencia de Protección Ambiental (EPA), publicó regulaciones concernientes a los límites aceptables de emanaciones enriquecidas en sales de níquel. La mayoría de las sales identificadas fueron eximidas y solamente fueron propuestas las siguientes limitaciones: Por cada 1000 libras de productos elaborados de níquel con base en sulfatos, cloratos, nitratos y fluoroboratos se permite sólo emanaciones menores a un peso equivalente de 0,0096 libras. Para carbonatos de níquel las limitaciones propuestas señalaron que por cada mil libras de producto elaborado solamente se permiten emanaciones menores, a un peso equivalente de 0.0074 libras. Estas regulaciones aparentemente son fáciles de superar ya que no crean expectativas en el mundo industrial. Durante el mismo año la EPA realizó un proyecto para establecer si el níquel es o no un contaminante peligroso. El proyecto determinó que los habitantes urbanos inhalan más de un microgramo de níquel por día y que la población en general tiene entre 0.2 y 1.1 microgramos de níquel por decilitro de sangre, mientras que los trabajadores vinculados a las refinerías muestran niveles 3 a 4 veces mayores. El proyecto no denunció si los niveles de exposición mayor conducen a incrementar los riesgos de cáncer.

La Compañía Cerromatosa S.A. ha tomado todas las precauciones necesarias para preservar el equilibrio ecológico de la región poniendo especial énfasis en el agua y el aire, y obviamente en la influencia de éstos sobre la flora y la fauna regional.

La firma INCITEC realizó un estudio detallado relacionado con la incidencia de la planta de procesamiento en el equilibrio ecológico de la región y elaboró un informe a cerca de la regulación ambiental, exigida por el Gobierno.

Todos los equipos propuestos en el informe de INCITEC se construyeron con el fin de evitar cualquier tipo de problema ambiental para la región.

## BIBLIOGRAFIA

- WILARD, G.O., 1970.- The Doré Lake complex of Chibougamau, Quebec - a metamorphosed Bushveld-type layered complex. Symposium on the Bushveld and other layered intrusions, Geol. Soc. S. Africa, Spec. Publ. 1, 477-491.
- AVAREZ, A., J.A. et al, 1970.- Cuadrángulo H-8 (Yarumal) y parte del Cuadrángulo H-7 (Ituango). INGEOMINAS-USGS. Convenio No. 514 L-030 de la AID.
- BLAIR, F.W., 1889.- The relative abundance of the chemical elements. Philos. Soc. Washington Bull., No. 131-142.

- CLARKE, F.W. and WASHINGTON, H.S., 1924.- *The composition of the earth's crust.* U.S. Geol. Surv. Prof. paper, pp.127-117.
- CORNWALL, H.R., 1973.- *Nickel*, en: *United States Mineral Resources*, U.S. Geol. Survey Prof. Paper #20, p. 437-442.
- DAVIES, H.L., 1968.- *Papuan ultramafic belt.* Proc. 23rd Int. Geol. Congress, 1, 209-220.
- ENSMINGER, H.R., 1985.- *The Mineral Industry of Colombia.* In: *Bureau of Mines. Minerals Yearbook 1983 Reports: International* U.S. Dept. of Interior. U.S. Government printing office, pp.197-203.
- FLANAGAN, F.J. (editor), 1976.- *Descriptions and analyses of eight new USGS rock standards.* U.S. Geol. Surv. prof. paper 840: 192 pp.
- GASS, I.G., 1968.- *Is the Troodos massif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor?* Nature. 220, 39.
- GOMEZ, D.R., 1981.- *Informe Anual.* Cerromatoso S.A.
- \_\_\_\_\_, 1982.- *Informe Anual.* Cerromatoso S.A.
- \_\_\_\_\_, 1985.- *Informe Anual.* Cerromatoso S.A.
- GOVETT, G.J.S., 1983.- *Rock Geochemistry in mineral exploration.* Handbook of exploration geochemistry; V.3 Elsevier Sci. Publ. Co. 461 p. New York.
- GUILLOM, JEAN-HUGHES, 1969.- *Données nouvelles sur la composition et la structure du grand massif péridotitique du sud de la Nouvelle Calédonie.* Cah. ORSTOM, sér. Geol. Vol. I, 7-25.
- HAWLEY, J.E., 1962.- *The Sudbury Ores. Their Mineralogy and Origin-PI3, Interpretation - The History and Origin of the Sudbury Ores.* Canadian Mineralogist, V.7, PI 1, p. 146-207.
- INGEOMINAS-NACIONES UNIDAS, 1976.- *Investigación detallada de los depósitos de laterita níquelífera en Planeta Rica (Córdoba).* Informe Técnico.
- \_\_\_\_\_, 1976a.- *Investigación detallada de los cuerpos ultrabásicos en el área de Uré (Córdoba).* Informe técnico.
- \_\_\_\_\_, 1976b.- *Investigación detallada de los depósitos de laterita níquelífera de Morro Pelón (Antioquia).* Informe técnico.
- \_\_\_\_\_, 1976c.- *Investigación detallada de los cuerpos ultrabásicos de Medellín (Antioquia).* Informe técnico.
- \_\_\_\_\_, 1976d.- *Investigación detallada de los depósitos de laterita níquelífera de Ituango (Antioquia).* Informe técnico.
- IRVINE, T.N., 1967a.- *The Duke Island Ultramafic complex, southeastern Alaska.* Ultramafic and related rocks (ed. P. J. Wyllie), #4-96, New York, John Wiley & Sons.

- HASKE S., 1966.- The petrography of the Ingeli mountain range. Ann. of the Univ. Stellenbosch 41, Series A, No.1, 109 p.
- McGREGOR, I.D., 1962.- Geology, petrology and geochemistry of the Mount Albert and associated ultramafic bodies of central Caspé, Quebec. Unpublished M.Sc. thesis, Queen's University.
- NETAE, N.D., 1969.- Ultramafic intrusions of the Abitib area. Ontario, Can. Jour. Earth Sci., 6, 281-304.
- NEYNARD, J.B., 1983.- Chapter 4: Aluminium and Nickel. In: Geochemistry of Sedimentary ore Deposits Springer-Verlag, New York; 309 p.
- MOORE, E.M., 1969.- Petrology and structures of the Yourinos ophiolitic complex of northern Greece. Geol. Soc. Amer., Spec. Paper 110, 74 p.
- WALDRETT, A.J., 1973.- Nickel sulphide deposits - their classification and genesis, with special emphasis on deposits of volcanic Association. Can Inst. Min. and Metall; vol. 66 (739): 45-63.
- WALDRETT, A.J., et al, 1970.- Cryptic variation and the petrology of the Sudbury Nickel Irruption. Econ. Geol., 65, 122-155.
- WALDRETT, A.J. and MASON, G.D., 1968.- Contrasting Archean ultramafic igneous bodies in Dundonald and Clergue townships, Ontario. Can. Jour. Earth Sci., 5, 11-143.
- PARK, C.F., and MacDIARMID, R.A., 1981.- Capítulo 19 Meteorización. In: Yacimientos Minerales. pp. 441-464.
- PYKE, D.R., WALDRETT, A.J. and ECKSTRANS, D.R., 1973.- Archean ultramafic flows in Munro township, Ontario. Bull. Geol. Soc. Amer., 84, 955-978.
- RAGAN, D.M., 1967.- The Twin Sisters dunite, Washington. In: Ultramafic and related rocks. (ed. P.J. Wyllie), 160-166 New York, John Wiley & Sons.
- BUCKMIRCK, J.C. and NOBLE, J.A., 1959.- Origin of the ultramafic complex Union Bay, southeastern Alaska. Bull. Geol. Soc. Amer., 70, 981-1018.
- SHARPE, J.I., 1965.- Field relations of Matagal sulfide masses bearin on their disposition in time and space. CIM Bulletin, 58, 951-961; CIM Trans., 68, 265-278.
- SILBEY, S.F., 1984.- Nickel. In: Bureau of Mines. Mineral Year Book 1963. Vol.1. Metals and Minerals. U.S. Dept. of the Interior. U.S. Government printing office, pp. 631-645.
- THAYER I.P., 1960.- Some critical differences between alpine-type and stratiform peridotite-gabbro complex. Rep. 21st Int. Geol. Congress, pt. XIII.
- VILJOEN, R.P. and VILJOEN, M.J., 1970.- The geology and the geochemistry of the layered ultramafic bodies of the Kaapvaal area, Barberton Mountain Land. Symp. on the Bushveld and other layered intrusions, Geol. Soc. S. Africa, Spec. Pub. No.1, 661-688.

- VINOGRADOV, A.P., 1956.- Regularity of distribution of chemical elements in the Earth's crust. *Geochemistry* (Geokhimiya), No. 1, p. 1-43.
- 1962.- Average content of chemical elements in the major types of igneous rocks of the earth's crust. *Geochemistry* 7: 641-664.
- WAGER, L.R. and BROWN, G.M., 1968.- *Layered igneous rocks*. London, Oliver and Boyd.
- WILSON, H.D..R. and BRISLIN, W.C., 1961.- Regional structure of the Thompson-Moak Lake nickel belt. *CIM Bulletin*, 54, 815-822; *CIM Trans.* 64, 470-477.
- WOKITTEL, R., 1960.- *Recursos Minerales de Colombia*. Comp. de Est. Geol. Ofic. de Col. Servicio Geológico Nacional (Colombia). Tomo X, 393 p.
- WYLLIE, P.J., 1967.- *Petrography and petrology*. in: *Ultrabasic and related rocks* (ed, P.J. Wyllie), 1--6. New York, John Wiley & Sons.

## MINERALES DE PLOMO

LUIS FERNANDO SARMIENTO R.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Introducción .....	369
Usos .....	369
Usos antiguos .....	369
Usos modernos .....	370
Ambiente Geológico .....	372
Geoquímica .....	372
Mineralogía .....	374
Tipos de depósitos de plomo y zinc .....	375
Exploración .....	382
Minería .....	382
Beneficio y Metalurgia .....	383
Beneficio .....	383
Metalurgia .....	383
Situación Mundial .....	384
Consideraciones políticas .....	384
Reservas .....	385
Producción .....	387
Consumo .....	388
Precios .....	388
Situación actual y perspectivas .....	389
El Plomo en Colombia .....	390
Depósitos .....	390
Reservas .....	428
Producción Nacional .....	428
Consumo aparente .....	430
Comercio .....	431
Perspectivas del mercado nacional .....	431
Bibliografía .....	436

## INTRODUCCION

El plomo es un elemento calcófilo según la clasificación geoquímica propuesta por Goldschmidt (1937), y sulfófilo según la clasificación de Rankama y Sahama (1954). Su comportamiento geoquímico es tan semejante al del zinc, que sus minerales comúnmente se encuentran juntos en la mayoría de los depósitos. El plomo ha sido usado por el hombre desde hace aproximadamente 6000 años.

La importancia industrial del plomo es solamente superada por el hierro, el aluminio, el cobre y el zinc (MORRIS et al, 1973). El plomo es el quinto metal en el consumo mundial.

## USOS

## USOS ANTIGUOS

Debido a su ocurrencia relativamente común, a la simplicidad de su reducción metalúrgica, a su poca dureza y su maleabilidad, el plomo fue uno de los primeros metales utilizados por el hombre.

En Egipto se han encontrado figuras de plomo del año 3.800 A.C., así como antiguas tuberías de este metal; los egipcios también lo usaron para recubrir cerámica, hacer soldaduras y objetos ornamentales y como aditivo para el bronce.

En el año 2.000 A.C. los chinos acuñaron monedas de plomo. Aproximadamente en el año 1600 A.C. los fenicios desarrollaron las minas de plomo de Chipre, Grecia, Sardinia y España. El plomo fue usado extensivamente por romanos y griegos quienes explotaron las minas de Laurium cerca de Atenas. Los compuestos de plomo fueron ampliamente usados como pigmentos y cosméticos por griegos y romanos. Los romanos extendieron la minería del plomo a lo que hoy es Yugoslavia, Rumania, Francia, Bélgica y Turquía (MORRIS et al, 1973).

En la Edad Media el plomo fue ampliamente usado como material de construcción; muchos edificios construidos en los siglos XV y XVI aún conservan sus techos originales de plomo; en esta época también se usaron objetos ornamentales, estatuas y tuberías de plomo (MORRIS et al, 1973).

### USOS MODERNOS

En los Estados Unidos el plomo fue explotado y fundido en Virginia desde 1621, y el descubrimiento en el Valle Superior del Mississippi fue reportado en 1690 (RATHJEN, 1983). En Estados Unidos la producción promedio de 1000 toneladas anuales desde 1801, se incrementó aproximadamente en 3000 toneladas por año desde 1831 hasta 1840.

En 1867 se descubrió una de las áreas más productoras de plomo del mundo en el sureste de Missouri (MORRIS et al, 1973; RATHJEN, 1983).

La mayor parte del plomo es usado en baterías, motivo por el cual es vital en transporte y comunicaciones; además las baterías son fuentes eléctricas útiles en casos de emergencia en hospitales, teatros, radio, teléfonos, etc. El segundo uso del plomo es en aditivos antidetonantes en la gasolina, como el tetraetilo y el tetrametilo de plomo; los aditivos hacen que la combustión de la gasolina sea más eficiente; sin embargo, las regulaciones gubernamentales de varios países han restringido este uso debido a la toxicidad de los gases de escape de los automóviles. El plomo también es usado en aleaciones, para piezas automotores, que requieren cualidades naturales de lubricación y resistencias.

En construcción el plomo es de gran utilidad; sin embargo, su consumo en planchas y tuberías ha disminuido en los últimos años. Su uso se ha incrementado como barrera de sonido en divisiones y techos de oficinas, escuelas y hoteles. Aún se emplea plomo en tuberías debido a su flexibilidad y resistencia a la corrosión, aunque se ha sustituido en gran parte por plásticos (MORRIS et al, 1973; RATHJEN, 1983).

Las láminas de plomo son utilizadas en construcción como protección a radiaciones y vibraciones.

De los metales comunes el plomo es el más opaco a los rayos-X y Gamma y por esto es usado en vidrio y paredes de salas de rayos-X, en almacenaje y transporte de materiales radioactivos, así como en plantas nucleares. La resistencia del plomo a la corrosión, lo hace útil como protector en la industria química, para proteger el acero en estructuras de ingeniería,

revestimiento en construcciones marítimas, torres de transmisión y cables submarinos; sin embargo en algunos de estos usos está siendo sustituido por plásticos (MORRIS et al, 1973; RATHJEN, 1983).

El plomo aún es el metal más usado en municiones en la forma de perdigones y balas de calibre pequeño y todavía se usa en artillería. El rojo de plomo (óxido de plomo) es tradicionalmente empleado en la industria del hierro y acero.

El plomo junto con el estaño es ampliamente usado en enlatados y soldaduras de los mismos. El contenido de plomo en el vidrio, el esmalte de la porcelana y el vidriado de la cerámica es una medida de su calidad. El plomo da brillantez y claridad, así como resonancia al cristal y añade propiedades que hacen durables y de color firme a los esmaltes y vidriados; sin embargo este uso ha disminuido debido a su toxicidad, cuando las piezas no se han esmaltado debidamente. El plomo tiene muchos usos de volumen pequeño como en la manufactura de artículos del hogar y en la industria de las artes gráficas. Los óxidos de plomo son usados como agentes oxidantes en la manufactura de tintas, cerillas, sustitutos del caucho, adhesivos y en la refinación del petróleo. (MORRIS et al, 1973; RATHJEN, 1983).

En la Figura 1 se indica la distribución de consumo de plomo en EE.UU. donde se puede observar el orden de importancia de los diferentes usos del plomo.

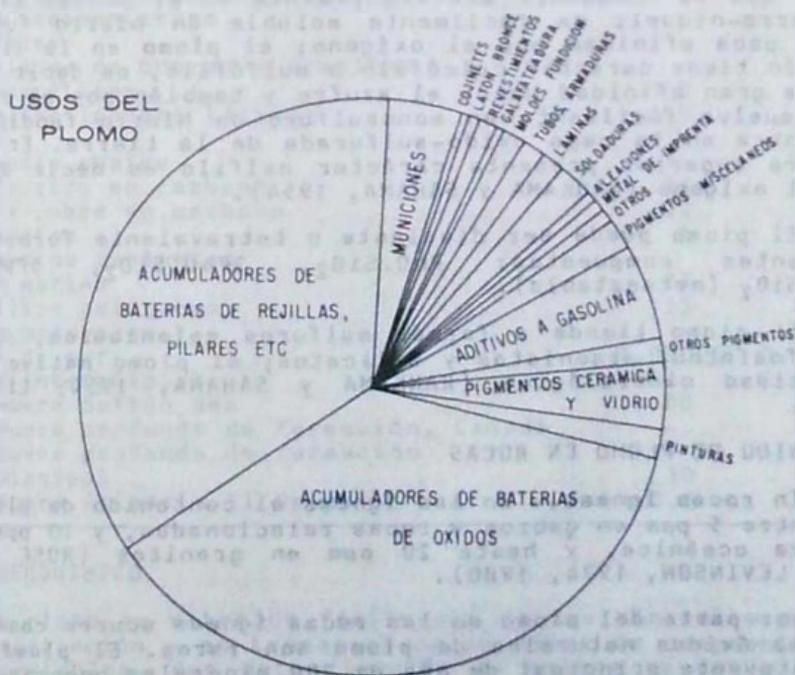


Fig. 1: Uso del plomo. Distribución del consumo de plomo en los Estados Unidos por productos. Figura original elaborada con datos tomados de Woodbury (1985).

## AMBIENTE GEOLOGICO

### GEOQUIMICA

El plomo es el elemento químico con número atómico 82; su peso atómico varía debido a cambios en la composición isotópica, causados por la incorporación desigual de plomo radiogénico, producto de la descomposición atómica de uranio y torio. Los porcentajes de ocurrencias de los isótopos diferentes son los siguientes: Pb204, 1.5%; Pb 206, 23.6%; Pb 207, 22,6% y Pb 208, 52.3% el cual tiene un peso atómico de 207.2.

En la naturaleza el plomo ocurre raramente en estado atómico y en estado tetravalente; predominantemente se encuentra en un estado divalente con radio iónico de 1.26 Å para un número de coordinación seis. El plomo comúnmente, por reemplazamiento diadócico, sustituye el Ba<sup>+2</sup> (1.44 Å) Ca<sup>+2</sup>, Sr<sup>+2</sup> (1.21 Å) y K<sup>+1</sup> (1.46 Å) en la estructura de algunos silicatos, fosfatos y otros minerales (RANKAMA y SAHAMA, 1954; LEVINSON, 1974).

### CARACTER GEOQUIMICO

El plomo es el elemento número 34 en abundancia en la litosfera y es menos abundante que el litio, neodimio, lantano y probablemente el galio.

Según la clasificación geoquímica de los elementos propuesta por Goldschmidt el plomo es un elemento siderófilo, es decir que se concentró preferentemente en el núcleo terrestre de hierro-níquel; es fácilmente soluble en hierro fundido y tiene poca afinidad por el oxígeno; el plomo en la litosfera también tiene carácter calcófilo o sulfófilo, es decir presenta una gran afinidad hacia el azufre y también por el oxígeno; se disuelve fácilmente en monosulfuro de hierro fundido y se concentra en la capa óxido-sulfurada de la tierra. En la litosfera superior presenta carácter oxifilo es decir afinidad por el oxígeno (RANKAMA y SAHAMA, 1954).

El plomo puede ser divalente o tetravalente formando los siguientes compuestos: PbO.SiO<sub>2</sub>, 2PbO.SiO<sub>2</sub>, 3PbO.SiO<sub>2</sub>, 3Pb.2SiO<sub>2</sub> (metaestable).

El plomo tiende a formar sulfuros seleniuros, sulfosales, fosfatos, arseniats y silicatos; el plomo nativo es una curiosidad mineralógica (RANKAMA y SAHAMA, 1954; LEVINSON, 1974).

### CONTENIDO DE PLOMO EN ROCAS

**En rocas ígneas.**— En las ígneas el contenido de plomo varía entre 5 ppm en gabros y rocas relacionadas, y 10 ppm en la corteza oceánica, y hasta 20 ppm en granitos (ROSE et al, 1979; LEVINSON, 1974, 1980).

La mayor parte del plomo en las rocas ígneas ocurre como galena. Los óxidos naturales de plomo son raros. El plomo es un constituyente principal de más de 200 minerales conocidos.

El plomo está esencialmente ausente como sulfuro en las primeras fases magmáticas y su contenido aumenta especialmente en soluciones neumatolíticas e hidrotermales genéticamente asociadas con rocas ígneas que contienen cuarzo.

La forma de presentación del plomo en las rocas ígneas está determinada por la sustitución diadómica de  $\text{Ca}^{+2}$  en minerales cálcicos como el apatito, los piroxenos monoclinicos que cristalizan a temperatura relativamente alta, aragonito, epidoto, biotita y fluorita. El plomo también sustituye diadómicamente al  $\text{K}^{+1}$  en minerales como los feldespatos potásicos (MAYNARD y SAHAMA, 1954, LEVINSON, 1974).

**En rocas sedimentarias.**— En las rocas sedimentarias el contenido de plomo varía entre 7 ppm en areniscas, 9 ppm en arcillas y dolomitas y 20 ppm en shales (WEDEPOHL, 1969). Las arcillas de aguas oceánicas profundas pueden contener un promedio de 80 ppm.

La distribución de plomo y zinc en rocas y aguas naturales está indicada en la Tabla 1.

Fig. 1: Concentración de plomo y zinc en rocas y aguas naturales (ppm) (Fuente WEDEPOHL, 1969; CARPENTER et al, 1974, BREWER y SPENCER, 1969; SKINNER et al, 1967, en MAYNARD, 1980; LEVINSON, 1980).

Rocas Ígneas	Plomo	Zinc
Peridotita	0.3	56
Gabro	3.2	100
Diorita	5.8	70
Granodiorita	15	52
Granito	24	48
Rocas Ígneas máficas (corteza oceánica)	5	100
Rocas ígneas intermedias	15	60
Rocas ígneas félsicas (corteza continental)	5	100
<b>Rocas Sedimentarias</b>		
<b>Areniscas</b>		
Areniscas de cuarzo y arenitas feldespáticas	10	30
Arenitas lodosas líticas	20	95
<b>Shale</b>		
Promedio shales	-	100
Shale rico en carbono	24	200
Shale pobre en carbono	23	-
Carbonatos	5	20
<b>Sedimentos recientes</b>		
Lodo marino	23	90
arcillas pelágicas	55	140
<b>Aguas naturales</b>		
Agua de mar	0.00003	0.005
Agua intersticial	-	0.012
Salmuera Salton Sea	80	780
Salmuera profunda de formación, Canadá	-	750
Salmuera profunda de formación Mississippi	30	155
Salmuera Atlantis II Deep	0.6	5.4

## CICLO GEOQUÍMICO

El plomo es extraído fácilmente de sus minerales durante la meteorización y es transportado en forma de compuestos sencillos estables. Por meteorización la galena se oxida lentamente a sulfato de plomo, proceso que es activado por la oxidación de la pirita a sulfato férrico, el cual actúa como agente oxidante (ROSE et al, 1979; LEVINSON, 1974, 1980). El sulfato de plomo es medianamente soluble, razón por la cual la movilidad del plomo es moderada; está restringida por

la tendencia a ser absorbida por óxidos de manganeso y hierro insolubles y por materia orgánica también insoluble; sin embargo su movilidad es favorecida por la formación de complejos orgánicos solubles y aniones complejos (ROSE et al, 1979).

En presencia de dióxido de carbono y de bicarbonato, el sulfato y otros minerales de plomo producen carbonato de plomo, el cual es el compuesto más estable en la zona de oxidación, en la que también se forman fosfatos, arseniatos, vanadatos, cloruros, cromatos y molibdatos.

En la zona de reducción el plomo no precipita como sulfuro. El carbonato de plomo con el tiempo se desintegra físicamente, o aún es transformado a bicarbonatos de plomo, que es moderadamente soluble, y es llevado al mar. El plomo del agua del mar precipita en forma de sulfuro, en los sedimentos ricos en restos orgánicos, y es absorbido y concentrado en sedimentos hidrolizados (arcillas) y oxidados.

La mayor parte del plomo no llega a los océanos, y la proporción que llega al agua de mar es extraída por absorción en sedimentos arcillosos y óxidos; esto es importante pues reduce la toxicidad del agua del mar, causada por el contenido de plomo.

## MINERALOGIA

### MINERALES DE MENA

Los minerales de mena del Pb y Zn generalmente están asociados de tal manera que son raras las menas que contienen solamente uno de los dos metales.

El plomo es constituyente principal de más de 200 minerales. El mineral de mena de Plomo volumétricamente más importante es el sulfuro galena,  $PbS$ , el cual cristaliza en el sistema cúbico (MORRIS et al, 1973).

La galena es un mineral de color gris acero, con brillo metálico y exfoliación cúbica perfecta; dureza 2 a 3; peso específico 7,4 a 7.6. Contiene 86,6% de Pb y 13,4% de S.

Generalmente la galena contiene plata, principalmente como burbujas de argentita  $Ag_2S$ , tetraedrita argentífera,  $3(Cu, Ag)_2S \cdot Sb_2S_3$  y minerales semejantes; cuando el contenido de plata es alto, hasta 2% de plata, la galena es mena de éste metal.

La galena comunmente se altera al carbonato cerusita  $PbCO_3$ , al sulfato anglesita  $PbSO_4$ , a piromorfita  $Pb_3(Pb, Ca)(PO_4)_3$  y a otros sulfatos, carbonatos y cloruros, que pueden encontrarse en las zonas más superficiales de las menas de plomo.

Existe una gran cantidad de otros minerales que contienen plomo, incluyendo varias sulfosales que además contienen plata, cobre, bismuto y antimonio y pueden ser fuentes de estos metales.

El plomo nativo existe en la naturaleza pero únicamente es una curiosidad mineralógica.

Los sulfuros pirita,  $FeS_2$ , calcopirita,  $CuFeS_2$ , tetraedrita  $2Cu_2S \cdot Sb_2S_3$ , tenantita  $3Cu_2S \cdot As_2S_3$ , argentita  $Ag_2S$ .

annonita  $2\text{PbS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  y algunas sulfosales, son minerales primarios generalmente asociados con las menas de galena y esfalerita.

Otros sulfuros asociados con las menas, aunque de ocurrencia local son marcasita  $\text{FeS}_2$  y pirrotita  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ .

Algunos de estos minerales, así como los metales menores asociados en los sulfuros, comunmente se recuperan como coproductos y subproductos (MORRIS et al, 1973; WEDOW et al, 1973).

Los minerales primarios de ganga más comunes en los depósitos de Pb y Zn son calcita, dolomita y otros carbonatos, bario y fluorita.

## TIPOS DE DEPOSITOS DE PLOMO Y ZINC

Los depósitos de plomo y zinc en algunos casos también son productores de cobre; por esta razón se incluyen en este capítulo algunos tipos de depósitos de cobre. Los yacimientos de estos metales ocurren en una variedad de ambientes geológicos y presentan una diversidad de características de modo tal que pueden agruparse en dos categorías: I. Depósitos estratoconfinados en secuencias de rocas volcánicas o sedimentarias. II. Depósitos relacionados con procesos predominantemente magmáticos.

- I. **Depósitos estratoconfinados;** o sea localizados dentro de secuencias estratificadas de rocas sedimentarias o volcánicas, sin necesidad de que sean estratiformes; están restringidos a determinados intervalos estratigráficos; ocurren en una gran variedad de situaciones tectónicas, aunque en casi todas ellas, la presencia de una tectónica local extensional, asociada con un adelgazamiento de la corteza parece ser un elemento común (SAWKINS, 1976a,b; 1984a) así como su origen a partir de soluciones en las cuales, aunque puede haber un componente magmático, éste no representa la parte principal de las soluciones mineralizantes.
- II. **Depósitos formados por procesos predominantemente magmáticos;** no necesariamente están restringidos a rocas estratificadas y que ocurren en zonas de subducción, que representan límites convergentes de placas litosféricas sometidas a un régimen de esfuerzos predominantemente compresional; estos depósitos están asociados con los arcos magmáticos desarrollados en estas zonas y en su origen intervinieron soluciones mineralizantes, en las cuales el componente magmático predomina.

## DEPOSITOS ESTRATOCONFINADOS DE PLOMO Y ZINC

Según la litología encajante (vulcanitas o sedimentitas) los depósitos estratoconfinados de plomo y zinc pueden dividirse en dos categorías:

**Depósitos contenidos principalmente en vulcanitas** (depósitos vulcanogénicos) desarrollados en situaciones tectónicas en las cuales hay una participación de la corteza oceánica.

Este subgrupo incluye los siguientes tipos de depósitos:  
a) Cobre, zinc en vulcanitas máficas. (Ej. Chipre).

b) Cobre, zinc, plomo en vulcanitas félsicas e intermedias (Ej. Kurcko).

2) **Depósitos contenidos en sedimentitas** (depósitos sedimentogénicos) desarrollados sobre corteza continental.

Este subgrupo incluye los siguientes tipos de depósitos:

- a) Plomo, zinc exhalativos en sedimentos (ej: Mc Arthur River)
- b) Plomo (zinc) en carbonatos (Ej: Mississippi Valley).
- c) Plomo (zinc) en areniscas (Ej: Morocco)
- d) Cobre (plomo, zinc) diseminados estratoconfinado en shales o areniscas (Ej: African Copperbelf).

También es posible clasificar los depósitos estratoconfinados de plomo, zinc, según la estructura y textura de las mineralizaciones en los siguientes grupos:

1. **Depósitos de sulfuros masivos estratiformes:** la mineralización predominantemente consiste en estratos o masas estratiformes de sulfuros masivos:

Incluye los siguientes tipos de depósitos:

- a) Cobre, zinc en vulcanitas máficas.
- b) Cobre, zinc, plomo en vulcanitas félsicas e intermedias.
- c) Plomo, zinc exhalativos en sedimentitas.

2. **Depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados:** la mineralización predominantemente consiste en sulfuros diseminados en determinados intervalos estratigráficos.

Incluyen los siguientes tipos de depósitos:

- a) Plomo (zinc) en areniscas.
- b) Cobre (plomo, zinc) diseminados estratoconfinados en shales o areniscas.

3. **Depósitos de sulfuros en venas y vacíos de disolución estratoconfinados en carbonatos** (o depósitos de plomo, zinc en carbonatos).

**Depósitos de sulfuros masivos estratiformes.**— Depósitos de cobre, zinc en vulcanitas máficas. Consisten en estratos o masas estratiformes de pirita, calcopirita y esfalerita masivos en basaltos almohadillados y diques de diabasa (FRANKLIN et al, 1981; COX, 1983).

Los depósitos ocurren en secuencias ofiolíticas de antiguas dorsales oceánicas, en general en situaciones tectónicas en donde hay límites divergentes de placas litosféricas con participación de corteza oceánica; sin embargo no se ha entendido claramente el contexto geotectónico en donde fueron generados los depósitos arcáicos (FRANKLIN et al, 1981; SANKINS, 1984a).

**Origen de los depósitos de sulfuros masivos estratiformes.**— La mayoría de los autores (FRANKLIN et al, 1984, LARGE, 1980; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; SANGSTER, 1976) basados en evidencias texturales, petrológicas, geoquímicas e isotópicas, concuerdan en postular que los depósitos de sulfuros masivos fueron formados en el fondo marino y cerca de respiración.

varios o sitios de exhalación de descargas de sistema hidrotermal. Los sulfuros estratiformes son formados por la precipitación de los metales a partir de los fluidos hidrotermales; existen ejemplos recientes en los sistemas geotermiales del mar profundo, y otras dorsales oceánicas donde estos mecanismos producen mineralizaciones similares (RONA, 1984). Esta clase de depósitos también se ha denominado exhalativos por considerarse que se forman por exhalaciones de emanaciones fluidas ricas en metales (LARGE, 1980).

De manera general, se considera que la circulación de aguas salinas calentadas a través de las vulcanitas o sedimentos del fondo marino, lixivian los metales contenidos en estos y genera las soluciones mineralizantes. Se han sugerido varias posibles fuentes para estas soluciones en el agua del mar; también se ha propuesto el agua contenida en los sedimentos o rocas de la corteza superior, así como fuentes magmáticas (LARGE, 1980; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; SANGSTER, 1976).

Los mecanismos que calientan las aguas y las ponen en circulación son principalmente el alto flujo calorífico (RONA, 1984) asociado con adelgazamiento de la corteza, propio de áreas con tectónica local extensional, o relacionado con actividad magmática (RONA, 1984; LARGE, 1980; SAWKINS, 1984a,b). También se ha planteado la hipótesis de un mecanismo de bombeo térmico inducido por la actividad de fallas (LARGE, 1980).

Sawkins (1984,b) ha propuesto un mecanismo de deshidratación episódica de los sedimentos para explicar la génesis de los depósitos exhalativos contenidos en sedimentitas.

Considerando que la litología encajante generalmente es poco permeable, se ha supuesto que los canales por los que circulan las soluciones mineralizantes predominantemente son sistemas de fracturas (LARGE, 1980; SAWKINS, 1984b).

En muchos depósitos la mineralización presenta estructuras y texturas sedimentarias; esto sugiere que la precipitación de los sulfuros ocurrió cerca del fondo marino, simultáneamente con la sedimentación, o relativamente poco tiempo después; sin embargo, en algunos depósitos esto es objeto de controversia (MAYNARD, 1983; BOAST et al, 1981).

La mayoría de los yacimientos están localizados en plataformas marinas relativamente estables, bordes de cuencas o en las sedimentitas de pie de monte asociadas por lo menos con algún levantamiento orogénico, siempre sobre corteza continental (BJORLYKKE y SANGSTER, 1981; BRISKEY, 1982).

La zonificación de metales observada en muchos depósitos ha sido explicada como la secuencia de depósitos de sulfuros volcánicos de acuerdo con su solubilidad (LARGE, 1980; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981).

**Depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados.**— Depósitos de plomo (zinc) en areniscas. Los depósitos consisten en estratos o láminas particulares de areniscas con galena y esfalerita diseminadas (BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

La mayoría de los yacimientos están localizados en plataformas marinas relativamente estables, bordes de cuencas o en las sedimentitas de pie de monte asociadas por lo menos con algún levantamiento orogénico, siempre sobre corteza continental (BJORLYKKE y SANGSTER, 1981; BRISKEY, 1982).

**Origen de los depósitos de sulfuros diseminados estrato confinados.**— El origen de los depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados se ha atribuido a la precipitación de sulfuros en los poros y espacios intergranulares de capas de areniscas o lodolitas, donde prevalecieron localmente condiciones reductoras (TOURTELOT y WINE, 1976; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; BRISKEY, 1982; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

Las soluciones mineralizantes provienen de aguas salinas; la salinidad por lo menos en partes es consecuencia de la disolución de evaporitas (GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; SAWKINS, 1984a). Algunos autores (BRISKEY, 1982) consideran la participación de aguas subterráneas derivadas del continente, las cuales aportan metales. Se ha sugerido por lo menos para los depósitos de cobre (plomo, zinc) diseminados estratoconfinado-cortical (rifting) calientan y ponen en circulación las aguas, las cuales lixivian el cobre de las intercalaciones basálticas que acompañan los eventos de rifting (SAWKINS, 1984a).

Las soluciones metalíferas, precipitan los sulfuros únicamente en aquellos estratos en donde las condiciones reductoras actúan como trampas de la mineralización (GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; BRISKEY, 1982). Renfro (1974) ha recalcado la importancia de estratos ricos en materia orgánica derivados de algas en llanuras evaporíticas-Sabkhas.

En los depósitos de plomo (zinc) en areniscas, Rickard et al (1979) han planteado que la deshidratación de los sedimentos en la cuenca causada por la compactación, provee de soluciones salinas con metales disueltos; las soluciones migran hacia los bordes de la cuenca, a través de arenitas permeables; la precipitación de los sulfuros ocurre entonces por disminución de la temperatura y la presión y/o por la mezcla con agua subterránea rica en azufre.

**Depósitos de sulfuros de plomo y zinc en venas y vacíos de disolución estratoconfinados en carbonatos.**— Son mineralizaciones estratoconfinadas de galena, esfalerita y cantidades menores de calcopirita en rocas de carbonato, generalmente cerca de la interfase entre caliza y dolomita. Los sulfuros ocurren como relleno de fisuras y vacíos de disolución, como la matriz de brechas de derrumbamientos sinsedimentario, brechas de colapso por solución, brechas de disolución, brechas tectónicas, o en los espacios vacíos de estructuras arrecifales y otros espacios que representan la porosidad primaria o secundaria de la roca encajante (SNYDDER y GERDEMANS, 1969; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HAGNI, 1976, 1982; HEYL, 1968, 1982).

La mayoría de los depósitos están localizados en altos paleotopográficos o en los márgenes de cuencas intracratónicas o epicratónicas grandes (SAWKINS, 1984a). Según Anderson (1980) los depósitos ocurren en todas las cuencas sedimentarias grandes del mundo y pueden considerarse como un producto normal de la evolución de las mismas. En algunos depósitos puede establecerse relación con desgarramiento cortical (rifting) (SAWKINS, 1984).

Las mineralizaciones están encajadas en secuencias de carbonatos depositados en aguas someras, muchas veces en plataformas marinas, arrecifes, elevaciones y barras y están asociadas con cambios laterales de facies (HAGNI, 1976, 1982; HEYL, 1968, 1982; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HOAGLAND, 1976; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

En la mayoría de los depósitos las secuencias de carbonatos representan facies marginales de la cuenca, y varían lateralmente hacia el centro de la cuenca a secuencias relativamente gruesas de lodolitas depositadas en medios marinos (BEALES y JACKSON, 1968; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HAGNI, 1976; HOAGLAND, 1976; HEYL, 1968, 1982).

Las unidades litoestratigráficas encajantes de la mineralización contienen intervalos estratigráficos permeables, que permiten el movimiento lateral extenso de soluciones y están asociadas con inconformidades. La mayor parte de la mineralización ocurre como relleno de espacios vacíos y en menor proporción como sulfuros diseminados o reemplazamiento de la roca encajante. En general, los depósitos son de bajo grado pero de gran tamaño (BEALES y JACKSON, 1968; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; SNYDER, 1968; HAGNI, 1976; HOAGLAND, 1976; HEYL, 1968, 1982; ANDERSON, 1980; BJORLYKKE y SANGSTIER, 1981).

Es común la dolomitización y disolución de los carbonatos y el desarrollo de lodolitas como residuos insolubles; también es común la presencia de arcilla illita, clorita alterada a muscovita y en algunos casos silicificación y formación de "jasperoide", así como la recristalización de las calizas a calcita espar (SNYDER, 1968; HAGNI, 1976; HOAGLAND, 1968, 1976; HEYL, 1968, 1982).

**Origen de los depósitos de plomo y zinc en carbonatos.**— Con base en el hecho que las salmueras encontradas en las inclusiones fluidas de los minerales de los depósitos de plomo y zinc en carbonatos, son similares a las salmueras de cuencas sedimentarias encontradas en perforaciones para exploración de hidrocarburos, se ha postulado que durante el desarrollo de cuencas sedimentarias grandes, las aguas connatas intersticiales cambian en composición, haciéndose más salinas, posiblemente debido a la disolución o la expulsión de fluidos de estratos de evaporitas y originan las salmueras que transportan los metales y causan la mineralización (BEALES y JACKSON, 1968; ANDERSON, 1980; SANGSTIER, 1976, 1981).

El agua de las salmueras parece ser una mezcla compleja de agua de mar y localmente agua meteórica modificada por la interacción con las rocas de la cuenca; algunos autores plantean la participación de aguas subterráneas derivadas del continente.

Debido a gradientes hidrodinámicas de presión, ocasionadas por compactación de los sedimentos, esas salmueras migran hacia arriba hacia los bordes de las cuencas a través de intervalos estratigráficos permeables. Posiblemente la migración de las salmueras, ocurre un poco después de la migración primaria de hidrocarburos como un proceso epigenético (BEALES y JACKSON, 1968; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HAGNI, 1976, 1982; HEYL, 1968, 1982; HOAGLAND, 1976; SANGSTIER, 1976, 1981; SNYDER, 1969; ANDERSON, 1980).

Adicionalmente al efecto de compactación, se ha sugerido que el calentamiento súbito local, por ejemplo relacionado con una intrusión ígnea, reduciría localmente la densidad de las salmueras provocando su migración hacia arriba (HANOR, 1973; BARNES, 1979, en ANDERSON, 1980).

Los metales contenidos en las salmueras recientes sugieren que éstas pueden arrastrar cantidades de trazas de plomo y zinc contenidos en las rocas por donde pasan, especialmente

shales, carbonatos y evaporitas (SANGSTER, 1976, 1981; ANDERSON, 1980).

De manera semejante como el petróleo es retenido físicamente y acumulado en trampas, los metales son retenidos químicamente y acumulados en niveles estratigráficos calcáreos que actúan como trampas de la mineralización (SANGSTER, 1976, 1981; ANDERSON, 1980).

Beales y Jackson (1968) y Anderson (1980) sugieren que la adición de azufre reducido ( $H_2S$ ) a las salmueras es un modo efectivo de precipitar los sulfuros; las posibles fuentes de  $S$  reducido pueden ser la reducción bacteriana de sulfatos, la degradación térmica del petróleo y la reducción no bacteriana de sulfato por petróleo. También se han sugerido como causas de la precipitación de los sulfuros, cambios en la composición química de la salmuera debido a variación de pH, mezcla con agua subterránea, o enfriamiento de la salmuera debido a disminución de presión, cuando la solución encuentra los espacios vacíos en los niveles calcáreos, o una combinación de estos mecanismos.

#### DEPOSITOS FORMADOS POR PROCESOS PREDOMINANTEMENTE MAGMATICOS

En este grupo se incluyen los siguientes tipos de depósitos: 1) Depósitos de plomo, zinc originados por pirometasomatismo de contacto (Skarn). 2) Depósitos de plomo, zinc de reemplazamiento. 3) Depósitos de venas de plomo, zinc y otros metales.

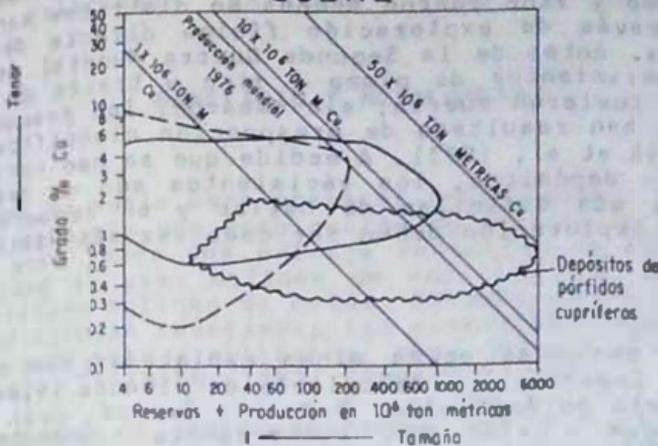
#### TAMAÑO Y TENOR DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DEPOSITOS DE PLOMO Y ZINC

La Figura 2 tomada de Gustafson y Williams (1981) es un gráfico que representa el tamaño (Reservas mas producción) y el tenor de los diferentes tipos de depósitos de Pb, Zn y Cu.

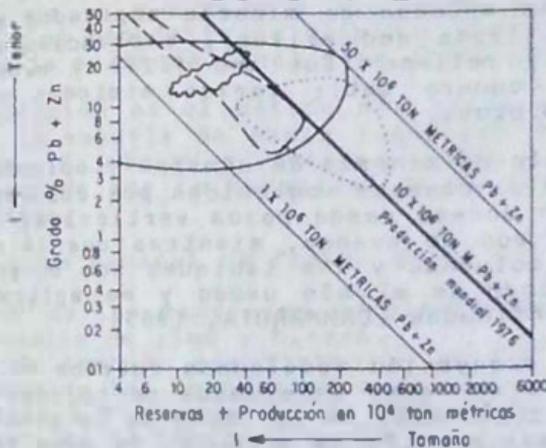
Los depósitos de Pb, Zn de mayor tamaño están encajados en sedimentos. Los mayores depósitos son aquellos de sulfuros estratoconfinados en carbonatos, pues alcanzan tonelajes hasta de 500 millones de toneladas cortas, caso del depósito de Tristate en Estados Unidos. El segundo lugar en tamaño le corresponde a los depósitos de sulfuros masivos exhalativos estratiformes en sedimentitas; los mayores representantes de este tipo son los grandes depósitos australianos y canadienses, con tamaño superior a 150 millones de toneladas. En tercer lugar están los depósitos de sulfuros de Pb, Zn diseminados en areniscas, de los cuales el 10% de los mayores depósitos tienen tamaño superior o igual a 66 millones de toneladas (SINGER y MOSIER, 1983). Los depósitos emplazados en vulcanitas tienen tamaño de 1,6 millones de toneladas en promedio y son principalmente productores de cobre y en parte de metales preciosos; sus tonelajes promedio de Pb y Zn son algo menores del promedio de los depósitos de skarn de Pb y Zn (SINGER y MOSIER, 1983).

En general el tenor de los depósitos de sulfuros masivos es mayor que el de los depósitos de sulfatos diseminados, cosa que se espera.

COBRE



PLOMO Y ZINC



- DEPÓSITOS ESTRATOCONFINADOS DE Pb, Zn, Cu
- - - Depósitos de sulfuros masivos estratiformes en vulcanitas
    - Cu, Zn en vulcanitas máficas
    - Cu, Zn, Pb en vulcanitas félsicas e intermedias
  - Depósitos estratoconfinados en sedimentitas (excepto en carbonatos)
    - Pb, Zn exhalativo en sedimentitas submarinas
    - Pb, Zn en areniscas
    - Cu, (Pb, Zn) diseminado estratoconfinado
  - ..... Depósitos de plomo zinc en carbonatos
  - ~~~~~ Depósitos formados por procesos predominantemente magnéticos
    - Pirometasomatismo de contacto (skarn de Pb, Zn)
    - Pb, Zn de reemplazamiento
    - Venas de Pb, Zn

Fig. 2: Tamaño (reservas) y tenor de los depósitos de plomo, zinc y cobre. Se incluyen los depósitos de pórfidos cupríferos para comparación. Figura ligeramente modificada de GUSTAFSON y WILLIAMS (1981).

## EXPLORACION

Principalmente en el pasado, los descubrimientos de depósitos de plomo y zinc fueron hechos en distritos mineros, conocidos a través de exploración física directa de áreas desarrolladas. Antes de la Segunda Guerra Mundial se hicieron nuevos descubrimientos de plomo y zinc a través de esfuerzos aislados que tuvieron suerte; sin embargo, los descubrimientos más modernos han resultado de prospección científicamente rigida (MORRIS et al, 1973). A medida que se han venido encontrando nuevos depósitos, los yacimientos aún no descubiertos son cada vez más difíciles de hallar y en consecuencia los programas de exploración deben ser cada vez más sistemáticos e intensivos.

## MINERIA

Excepto por unas pocas minas explotadas con métodos de tajo abierto (open-pit) y de colapso de bloques (block caving) a cielo abierto en Australia, Brasil y Canadá, casi todas las minas de plomo y zinc son subterráneas (CAMMAROTA, 1983; RATHJEN, 1983).

Los principales métodos de minería empleados son los de cámaras y columnas (room and pillar), excavación escalonada (shrinkage) corte y relleno (Cut and fill) y extracción de bloques cuadrados (square set); varios sistemas pueden ser usados en una misma mina.

El procedimiento de minería de cámaras y columnas consiste en la excavación de cámaras sostenidas por columnas o tabiques angostos y con acceso desde pozos verticales; los trabajos en las cámaras son de avance, mientras que la extracción de la mena de las columnas y los tabiques son un proceso de retroceso. Este método es el más usado y es aplicable a los depósitos estratoconfinados (CAMMAROTA, 1983).

El sistema de excavación escalonada estriba en el avanzar con explosivos y en forma escalonada de tajadas o secciones horizontales o inclinadas en el techo de la mina subterránea. Una vez que cada sección se arranca, la mena rota se extrae para dejar espacio para trabajar la tajada siguiente (CAMMAROTA, 1983). Esta técnica principalmente se usa en depósitos en venas; los escalones usualmente se excavan a lo largo de las venas sin dejar columnas para soportar el techo si las venas son angostas y en escalones transversales separados por columnas si las venas o enjambres de venas son anchos.

Los métodos de minería de corte y relleno y extracción de bloques cuadrados son más costosos y sólo se utilizan en minas con tenor relativamente alto.

El procedimiento de corte y relleno fundamentalmente es el mismo sistema de excavación escalonada con la diferencia que después de que cada sección se arranca y fragmenta y la mena se remueve, el espacio vacío se rellena con material estéril dejando el espacio apenas necesario para continuar la extracción de la próxima sección.

El ciclo de las operaciones de minería consiste en perforación, arranque por explosión y remoción de escombros de rocas. La perforación se hace con sistemas de percusión de aire comprimido montados en vehículos llamados jumbos; en el arranque de la mena se emplean varios tipos de explosivos. La re-

de la mena se hace con vagonetas y cargadores de alta capacidad y en el transporte se utilizan camiones grandes, volquetes de gran capacidad, o bandas transportadoras de caucho a alta velocidad (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

## BENEFICIO Y METALURGIA

### BENEFICIO

La mena se muele para preparar concentrados. Inicialmente se tritura mediante una combinación de molinos de mandíbulas y barras para hacer una primera reducción de tamaño. En una segunda etapa se usan molinos de varillas. En el molido más fino se utilizan molinos de bolas. Durante varias etapas de la molienda se agregan reactivos; los minerales oxidados de zinc, tales como carbonato y silicatos, requieren la adición de sulfuro de sodio, (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

Los métodos de preconcentración por gravedad se usan en algunas menas que contienen minerales relativamente gruesos y en una etapa inicial de la molienda; esta etapa consiste en tamizado o flotación preliminar antes del molido fino; el propósito es eliminar parte de la roca de ganga antes de la molienda final y la flotación.

La flotación es el método más usado para recuperar concentrados. La mayoría de menas requieren de más de una etapa de flotación. El número y variedad de los tanques de flotación está determinado por la capacidad de la planta y la mineralogía de la mina.

El esquema general de flotación de una mena consiste en:

- 1. Flotación de los minerales de plomo-cobre y decantación de los minerales de zinc y hierro.
- 2. Separación también por flotación de los minerales de plomo y de cobre de los concentrados de plomo-cobre.
- 3. Activación y flotación de la esfalerita para separarla de los minerales de hierro y ganga y
- 4. Flotación de la pirita si se desea su recuperación.

Se utilizan muchos tipos de controles, instrumentación, máquinas o celdas de flotación, y reactivos para incrementar la recuperación y aumentar el grado de los concentrados (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

Además existen sistemas automatizados de beneficio que controlan y regulan la tasa de alimentación de mena, el volumen de agua añadida, las tasas de adición de reactivos y otras variables en la operación. (CAMMAROTA, 1983).

### METALURGIA

El tratamiento de los concentrados de plomo incluye tostación (sintering) - fundición, separación de escorias y refinación. (RATHJEN, 1983).

La tostación (sintering) aglomera el concentrado fino y elimina la mayor parte de azufre y dióxido de azufre, los cuales pueden utilizarse en la producción de ácido sulfúrico. (RATHJEN, 1983).

El producto resultante, junto con coke, es fundido en un horno de inflamación (blast furnace) para producir plomo metálico impuro, escoria y vapor.

El plomo pasa a una caldera de escoriación. La escoria se muele y se trata en una planta de vaporización para recuperar óxido de zinc. La caldera de escoriación y el horno se usan para reducir impurezas y remover el cobre, controlando el enfriamiento al punto en el cual el cobre es insoluble. La escoria que contiene cobre es tratada en un horno de reverberación para producir mata de cobre, y el plomo queda listo para el refinado. (RATHJEN, 1983).

El refinado, a través de la adición de reactivos o por procesos electrolíticos, remueve plata y algún remanente de cobre, así como cantidades menores de arsénico y antimonio. Las últimas trazas de zinc son removidas mediante vacío; la adición de reactivos cáusticos elimina arsénico y antimonio; el bismuto se remueve por el proceso Betterton-Kroll, mediante la adición de calcio y magnesio; el producto refinado contiene 99.9% de plomo (RATHJEN, 1983).

La refinación electrolítica consiste en que el plomo metálico es colocado como ánodo en una solución de fluosilicatos de plomo y ácido fluosilícico libre; el plomo refinado se electrodeposita sobre el cátodo y posteriormente se funde en lingotes (RATHJEN, 1983).

El proceso Imperial Smelting funde concentrados complejos de plomo y zinc, provenientes de menas complejas de estos metales. Consiste en una técnica de horno de inflamación (blast furnace) que produce zinc metálico, plomo metálico que contiene oro, plata y "mata". La ventaja de este método es la capacidad de tratar concentrados de plomo y zinc mezclados para recuperar ambos metales, sin consumo adicional de coke (RATHJEN, 1983; CAMHAROTA, 1983).

El plomo producido comercialmente es moldeado en lingotes de aproximadamente 45 kg, o en bloques de 454 kilogramos. El plomo frecuentemente es aleado con otros metales. La aleación más común es el plomo antimonial que contiene de 2 a 10% de antimonio, usado en baterías cables y otros. Las aleaciones de plomo que contienen calcio estaño, selenio, cadmio y cobre tienen mercado en la nueva tecnología de baterías sin mantenimiento (RATHJEN, 1983, CAMHAROTA, 1983).

El litargirio (PbO) u óxido de plomo es usado en baterías, vidrio cerámico y revestimientos.

El plomo se recupera como coproducto o subproducto de arenas de zinc y es subproducto de yacimientos de cobre, oro, plata y flúor. A su vez se obtiene zinc, plata, cobre, oro, tungsteno, azufre y ácido sulfurado como suproductos de la explotación de plomo (RATHJEN, 1983).

## SITUACION MUNDIAL

### CONSIDERACIONES POLITICAS

El plomo es considerado un material crítico y estratégico y como tal es uno de los metales que se almacenan con propósitos estratégicos; el Gobierno de los Estados Unidos ha previsto la regulación y consumo de éste metal en tiempo de guerra.

ra, así como el subsidio a la exploración y producción, y ha establecido limitaciones y tarifas sobre las importaciones (RATHJEN, 1983).

En mayo de 1959 fue organizado el Grupo Internacional de Estudio del Plomo y del Zinc (International Lead and Zinc Study Group ILZSG) que provee información de relaciones, oferta, demanda y comercio a escala internacional (RATHJEN, 1983).

## RESERVAS

Se estima que las reservas mundiales de plomo sobrepasan los 125 millones de toneladas métricas contenidas en menas; si se incluyen además de las reservas los recursos contenidos en algunos depósitos tales como los estratos Kupferschiefer en Alemania y Polonia, entonces los recursos totales de plomo alcanzarían cifras tan altas como mil quinientos millones de toneladas (MORRIS et al, 1973, RATHJEN, 1983).

La magnitud de los recursos mundiales de plomo aparece en la Tabla 2 tomada de Rathjen (1983), la cual incluye reservas medidas, indicadas e inferidas. Estas reservas se encuentran en todos los continentes excepto Antártida y están distribuidas en 52 países aproximadamente.

Las reservas de plomo se encuentran principalmente en Estados Unidos, especialmente en el sureste del Distrito de Missouri, en Columbia Británica Central, en New Brunswick Canadá, México Central, Perú Central, en los países blancos en Europa, las áreas de Kazakhanstan y Transbaikal, la URSS y Australia (MORRIS et al, 1973).

## RECURSOS CONDICIONALES

Son los depósitos de plomo subeconómicos, e incluyen no solamente menas convencionales con tenores inferiores a los tenores comerciales, sino también recursos no convencionales.

El principal recurso no convencional, de bajo tenor de plomo, son los nódulos de manganeso que ocurren en grandes volúmenes en el fondo oceánico. A pesar que los nódulos son considerados fuentes potenciales valiosas de manganeso, níquel, cobre y cobalto y que contienen en promedio solamente 0.10% de plomo, los nódulos más ricos contienen 0.18 a 0.30% del metal, que sería obtenido como coproducto. Se ha estimado un total de 1.300 millones de toneladas de contenido en los nódulos (MORRIS et al, 1973).

Otro recurso subeconómico son los estratos de Kupferschiefer en Europa; son productores de cobre, pero contienen cantidades de plomo y zinc que pueden ser recuperadas como coproductos y subproductos. Otros recursos similares son los depósitos en el Belt Supergroup de la parte norte de Idaho y al noroeste de Montana en los Estados Unidos. En los Estados Unidos, la parte Occidental de Canadá, Europa Central, Africa del Norte y la URSS se conocen depósitos estratoconfinados parcialmente explorados, presumiblemente de gran tamaño (MORRIS et al, 1973).

Un recurso adicional de plomo y otros metales, son los sedimentos mineralizados que ocurren en las dorsales oceánicas, especialmente en el mar Rojo; según Bischoff y Menhem, 1969 (en MORRIS et al, 1973) los 10 metros superiores del "Atlantis Deep", en esta cuenca, contienen 50 millones de to-

neladas de sedimento mineralizado con 3.4% de Zn, 1.3% de Cu y 0.10% de plomo (MORRIS et al, 1973).

### RESERVAS ALMACENADAS (STOCKS)

Durante 1984 las reservas almacenadas comerciales de plomo se redujeron un 20%, desde 528.000 toneladas hasta 442.000 toneladas. En 1985 aumentaron lentamente hasta 485.000 toneladas (MACGREGOR y HALL, 1984, 1985a; HISCOCK, 1986).

TAB. 2: Recursos mundiales de plomo<sup>1</sup> (Contenido de metal, millones de toneladas métricas).

	Reservas <sup>2</sup>	Otros <sup>3</sup>	Total
<b>América del Norte</b>			
Estados Unidos	27	47	74
Canadá	12	19	31
México	5	5	10
Otros	1	1	2
<b>Total</b>	<b>45</b>	<b>72</b>	<b>117</b>
<b>Sur América</b>			
Brasil	2	2	4
Perú	3	4	7
Otros	2	2	4
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>15</b>
<b>Europa</b>			
Bulgaria	3	3	6
Rep. Federal Alemana	4	5	9
Polonia	2	3	5
España	3	3	6
Suecia	2	1	3
U.R.S.S.	16	17	33
Yugoeslavia	3	3	6
Otros	6	5	11
<b>Total</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>79</b>
<b>África</b>			
Algeria	1	2	3
Marruecos	1	2	3
Sur Africa	5	5	10
Suroeste de Africa	1	3	4
Otros	1	3	4
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>24</b>
<b>Asia</b>			
China (Continental)	3	4	7
Iran	2	2	4
Otros	4	4	8
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>19</b>
<b>Oceanía</b>			
Australia	18	16	34
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>34</b>
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>127</b>	<b>161</b>	<b>288</b>

1) En colaboración con el US. Geol. Survey; 2) Incluyen solamente medidas e indicadas o cantidades demostradas; 3) Incluye reservas inferidas, algunos recursos económicos hipotéticos en distritos conocidos y algunos recursos sub-económicos. Tomado de Rathjen (1983).

## PRODUCCION

La producción mundial de plomo, desde los tiempos prehistóricos hasta 1969, fue de 151'162.000 toneladas cortas; la producción minera mundial en 1969 alcanzó 3'523.401 toneladas cortas; en el lapso comprendido entre 1969 y 1980 la producción excedió a la del siglo XX (MORRIS et al, 1973).

## PRODUCCION MINERA DE PLOMO

Durante la década de los años setenta la producción minera de plomo creció a una tasa promedio anual de 3.7%, pasando de 2.6 millones de toneladas cortas en 1960 a 3.7 millones de toneladas cortas en 1970. A partir de entonces y hasta 1982, la producción minera se estancó en un promedio de 3.7 millones de toneladas cortas (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985); las razones de esto fueron el alto nivel de plomo reciclado, que abasteció cerca de 40% del consumo y una disminución de la demanda.

Desde 1982, hasta 1984, la producción minera de plomo ha disminuido desde 2'550.000 toneladas hasta 2.357.000 toneladas; en 1985 hubo un aumento a 2'470.000 toneladas. La producción mundial de plomo en los últimos años se muestra en la Tabla 3 tomada de ILZSG en HISCOCK (1986).

Los Estados Unidos tienen aproximadamente el 15% de esa producción; la URSS, Australia, Canadá, México y Perú son países productores importantes. Los Estados Unidos son el mayor consumidor de plomo con el 33%, del consumo mundial.

En los otros países productores importantes sus producciones mineras en 1985 fueron las siguientes: Perú 201.000 toneladas (8.13% del total), México 187.000 toneladas (7.57%); Sur Africa 147.000 toneladas (5.95%), Marruecos 107.000 toneladas (4.33%), Yugoslavia 98.000 toneladas (3.96%) y España 89.000 toneladas (3.60%).

## PRODUCCION DE PLOMO FUNDIDO METÁLICO Y RECICLADO

La diferencia entre la producción minera de plomo y la producción de plomo fundido metálico radica en la gran importancia que representa el reciclaje de chatarra de plomo, que es actualmente el 42% del consumo del metal (MACGREGOR y WALL, 1984, 1985a; HISCOCK, 1986).

El principal país productor de plomo metálico es Estados Unidos con un poco menos de la tercera parte de la producción mundial; su producción ha disminuido desde 1.067.000 toneladas en 1981 hasta 921.000 toneladas en 1984; en 1985 su producción fue de 996.000 toneladas (24.23% del total).

Otros productores importantes de plomo metálico y sus producciones en 1985 son Japón con 367.000 toneladas, República Federal Alemana con 356.000 toneladas, Reino Unido con 307.000 toneladas, Canadá con 236.000 toneladas, Francia con 224.000 toneladas, Australia con 216.000 toneladas, España con 164.000 toneladas, e Italia con 135.000 toneladas (MACGREGOR y WALL, 1984, 1985a; HISCOCK, 1986).

Las estadísticas del plomo refinado siguen de cerca a las del plomo metálico fundido. Desde 1980 hasta 1982, decreció la producción de plomo refinado, a una tasa promedio de

3.2%. En el periodo 1978-1982 el 40.7% de plomo refinado se obtuvo por reciclaje (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

### CONSUMO

Durante el periodo 1981-1985 el consumo mundial de plomo se ha mantenido alrededor de 3'800.000 toneladas, con un mínimo de 3.736.000 toneladas en 1982 y un máximo de 3.959 toneladas en 1984.

Durante 1985 el consumo total de plomo alcanzó 3'890.000 toneladas (Tabla 3), 1.8% menos que en 1984 (MACGREGOR y WALL, 1984; 1985a; HISCOCK, 1986).

TAB. 3: Producción y consumo de plomo (Miles de toneladas).

	Producción minera (contenido de metal)			Producción de metal			Consumo (metal refinado)		
	1983	1984	1985	1983	1984	1985	1983	1984	1985
<b>Europa</b>	<b>411</b>	<b>420</b>	<b>397</b>	<b>1.521</b>	<b>1.604</b>	<b>1.582</b>	<b>1.558</b>	<b>1.638</b>	<b>1.593</b>
Austria	4	4	6	23	21	18	55	62	61
Bélgica	-	-	-	126	120	105	70	72	66
Dinamarca	22*	18*	18*	9	10	1	14	15	13
Finlandia	2	2	3	198	206	224	196	209	208
Rep.Fed.Alem.	30	27	26	353	357	356	318	357	345
Grecia	20	22	20	-	12	14	23	20	23
Irlanda	34	37	35	8	9	9	8	10	9
Italia	23	21	15	127	140	135	229	233	230
Holanda	-	-	-	26	34	37	44	47	45
España	82	96	89	147	160	164	102	107	109
Suecia	79	80	76	54	73	71	28	27	27
Reino Unido	4	4	4	322	338	307	293	295	274
Yugoeslavia	105	102	98	114	112	129	116	115	115
<b>África</b>	<b>256</b>	<b>273</b>	<b>289</b>	<b>150</b>	<b>140</b>	<b>155</b>	<b>97</b>	<b>99</b>	<b>101</b>
Marruecos	97	99	107	58	48	63	5	5	5
Sur África	130	137	147	59	67	73	38	33	37
<b>América</b>	<b>1.184</b>	<b>1.110</b>	<b>1.175</b>	<b>1.564</b>	<b>1.537</b>	<b>1.642</b>	<b>1.448</b>	<b>1.474</b>	<b>1.449</b>
Brasil	18	19	17	50	64	73	49	64	74
Canadá	251	307	285	242	254	236	97	122	100
México	182	193	187	179	171	203	89	110	125
Perú	205	196	201	72	72	84	15	16	14
Estados Unidos	463	333	425	964	921	996	1.134	1.092	1.070
<b>Asia</b>	<b>131</b>	<b>136</b>	<b>151</b>	<b>438</b>	<b>494</b>	<b>512</b>	<b>626</b>	<b>677</b>	<b>676</b>
Japón	47	49	50	322	363	367	359	390	395
<b>Oceanía</b>	<b>466</b>	<b>418</b>	<b>458</b>	<b>230</b>	<b>225</b>	<b>220</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>69</b>
Australia	466	418	458	224	219	216	59	59	59
<b>Total</b>	<b>2.448</b>	<b>2.357</b>	<b>2.470</b>	<b>3.903</b>	<b>4.000</b>	<b>4.111</b>	<b>3.810</b>	<b>3.959</b>	<b>3.888</b>

Fuente: International Lead and Zinc Study Group.

\* De Groenlandia. Tomado de Hiscock (1986).

### PRECIOS

En 1983 los precios del London Metal Exchange (LME) fluctuaron entre 262.1 £/ton y 280.7 £/ton y en términos generales disminuyeron; durante 1984 fluctuaron entre 282 y 350 £/ton y

El precio promedio fue de 332 £/ton con un aumento del 19% sobre el promedio de 1983; este aumento continuó hasta alcanzar el valor de 396 £/ton a finales de enero de 1985; desde entonces disminuyó lentamente hasta 270 £/ton a finales de 1985. El precio promedio anual de este año fue 340 £/ton (MACGREGOR y WALL, 1984, 1985a). En los comienzos de 1986 el precio mantuvo la misma tendencia de lenta disminución. (HISCOCK, 1986).

En Estados Unidos en 1984 el precio promedio nominal de productores fue de 25,5 centavos por libra. En la Tabla 4 se presenta el precio promedio del plomo en Estados Unidos entre 1960 y 1985.

TAB. 4: Precio promedio anual de plomo en EE.UU. (centavos de dólar por libra).

Año	Nominal	Real <sup>1</sup>	Real <sup>2</sup>
1960	11,948	12,59	
1961	10,871	11,50	
1962	9,631	10,16	
1963	11,137	11,78	
1964	13,596	14,35	
1965	16,000	16,56	
1966	15,115	15,14	
1967	14,000	14,00	
1968	13,212	12,89	
1969	14,895	13,98	
1970	15,619	14,14	36,32
1971	13,800	12,12	31,15
1972	15,029	12,62	32,39
1973	16,285	12,08	31,08
1974	22,533	14,07	36,16
1975	21,529	12,31	31,61
1976	23,112	12,63	32,46
1977	30,703	15,80	40,61
1978	33,653	16,07	41,29
1979	52,462	22,34	57,40
1980	42,455	17,12	43,99
1981	36,531	14,41	37,01
1982	25,540	10,01	25,72
1983	21,677	8,44	21,67
1984	25,500	9,52	24,45
1985	19,100		

\* Promedio de 9 meses

N.D. = No disponible

1. Deflactado por el Índice Total de precios al por mayor de EE.UU., 1967=100.

2. Idem, 1983 = 100.

Fuente: Ecominas, "América Latina en Cifras" Bogotá, Nov. 1982, según Metals Week.

Minerals Yearbook y Engineering and Mining Journal, según Metals Week.

Cálculos IEC.

Complementado de Castiblanco y Benavides (1985) con datos tomados de Macgregor y Wall (1984, 1985a) y Hiscock (1986).

## SITUACION ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Hasta 1983 la industria del plomo estuvo deprimida; la demanda para baterías permaneció en niveles bajos. La produc-

ción de menas de plomo en 1983 disminuyó en un 30% y la producción de plomo metálico aumentó apenas un 1%, sin embargo los precios se mantuvieron bajos (WOODBURY, 1984; 1985).

Comenzó una mejoría del mercado del plomo en 1984, con un aumento de los precios de 18%, debido a pérdidas mayores en la producción minera y aumento en el consumo de casi 3%, el cual fue el primer aumento significativo desde 1979; además las reservas almacenadas disminuyeron un 20% (MACGREGOR y WALL, 1985a).

Esta mejoría del mercado de plomo pareció haber comenzado a consolidarse en 1985, de manera estática; según HISCOCK (1986) esto es síntoma que indica una amenaza de la muerte del plomo como metal industrial, hecho que ha vislumbrado desde hace tres décadas (MACGREGOR y WALL, 1984; 1985a; HISCOCK, 1986).

En 1985 la producción de menas de plomo en los países occidentales aumentó en 4.8%, la producción de plomo metálico aumentó 2.8% y el consumo disminuyó 1.8% (HISCOCK, 1986).

## PERSPECTIVAS

A pesar de la desmejora notable del mercado del plomo debido a las restricciones de su uso como aditivo a la gasolina y a la sustitución en pequeña escala por otros metales o plásticos (WOODBURY, 1984; 1985) durante los años ochenta el plomo ha sido y es un metal industrial bien establecido y no se espera que las nuevas tendencias tanto optimistas como pesimistas ocurran a plazo corto y mediano; la situación a largo plazo tampoco es de pesimismo total (HISCOCK, 1986).

La investigación de nuevas aplicaciones del plomo podría resultar en usos a término medio, como aditivos al asfalto y en grandes baterías de estaciones eléctricas. En muchos campos la investigación deberá demostrar las ventajas tecnológicas y económicas del empleo del plomo; además puede haber un aumento de su uso en nuevos mercados de baterías y mayores aplicaciones en la industria nuclear (HISCOCK, 1986). La demanda de plomo está en buena parte determinada por el nivel general de la actividad industrial y factores económicos tales como las caídas por inflación en los países industrializados y los precios del petróleo. Los primeros meses de 1986 sugieren un incremento modesto en el consumo (HISCOCK, 1986).

Con los precios bajos del metal y la producción de plomo secundario reciclado, así como los estrictos controles ambientales, es posible que ocurran algunos cierres de minas, particularmente en los Estados Unidos (HISCOCK, 1986).

## EL PLOMO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Desde el siglo pasado se tiene conocimiento de la existencia de mineralizaciones de sulfuros de plomo y zinc en el territorio colombiano (BOUSSINGAULT, 1830).

En Colombia no se han descubierto depósitos grandes de plomo y zinc explotables a gran escala, sino yacimientos relativamente pequeños como La Equis en Chocó, El Diamante en Nariño y Las Nieblas en Quindío. Solamente unas pocas áreas con

Mineralizaciones conocidas en las cuales se han hecho estudios geológicos y geoquímicos han mostrado anomalías dignas de exploración y con resultados preliminarmente satisfactorios; estas áreas pueden considerarse como prospectos; sin embargo la mayoría de mineralizaciones conocidas son manifestaciones de tamaño pequeño que no han sido exploradas ni definidas adecuadamente.

Las numerosas manifestaciones de plomo, zinc y cobre están listadas en la Tabla 5, la cual resume información contenida en los informes del INGEOMINAS sobre ocurrencias minerales por departamentos o por regiones, para los cuales se ha hecho cartografía geológica; algunos de estos informes están acompañados por mapas que muestran la localización de las mineralizaciones.

La Tabla 5 muestra las principales referencias bibliográficas sobre mineralizaciones de plomo y zinc en Colombia. Además el Mapa Metalogénico de Colombia (BARRERO, 1976), el Catálogo de los Yacimientos, Prospectos y Manifestaciones Minerales de Colombia (MUTIS, 1983) y la Evaluación de los Recursos Minerales no Combustibles de Colombia (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Las mineralizaciones de plomo y zinc muchas veces están acompañadas por cobre; estos tres metales parecen estar genéticamente relacionados y resulta arbitrario separar completamente manifestaciones de plomo, zinc y manifestaciones de cobre, y por esta razón se incluyen manifestaciones de este último metal.

El mapa de la Figura 3 muestra la localización geográfica de las mineralizaciones listadas en la Tabla 5; la numeración del mapa corresponde con la de la tabla.

Como puede observarse en el mapa de la Figura 4 las mineralizaciones de cada categoría ocurren en determinadas regiones caracterizadas por un ambiente geológico particular.

A continuación para cada tipo de mineralizaciones se describen:

Sus características generales y las áreas de interés para prospectar depósitos.

Los yacimientos en los cuales se ha hecho alguna evaluación para plomo y zinc y algunos prospectos o manifestaciones que han tenido importancia bien sea por su producción de plomo y zinc, aunque como subproductos de la minería de metales preciosos, o bien por presentar aspectos que los hacen interesantes desde el punto de vista geológico y han sido objeto de algunos estudios. La descripción parcialmente ha sido tomada de Melo (1984).

Recomendaciones para la prospección de depósitos en Colombia; en su mayor parte extractadas de INGEOMINAS-USGS, (1986b).

#### Zn, Pb EN VULCANITAS MÁFICAS

Las mineralizaciones predominantemente consisten en venas diseminaciones, principalmente de sulfuros de Cu y en menor proporción de Zn o Pb. Están localizadas en diabases y basaltos, a veces metamorfizados, y en algunos casos con interes-

TAB. 5: Manifestaciones de plomo y zinc en Colombia.

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
<b>A. Mineralizaciones de Cu (Zn, Pb) en vulcanitas máficas.</b>							
1	Debeiba (Antioquia)	Prospecto	Calcopirita	No precisadas probablemente vulcanitas máfic.		Venas y diseminaciones	Rodríguez y Pernet (1982)
2	Anserma (Caldas)	La Plumbagina	Calcopirita molibdenita bornita cuarzo pigmentos de malaquita	Metabasaltos del Cretáceo?		Venas en zonas de cimentadura	Hall et al (1970)
3	Anserma (Caldas)	El Tascón	Bornita pirrotita calconite malaquita cuprite(?) corelita(?) cuarzo, feldespato alter.	Metabasaltos		Venas de 0,40 m	Hall et al (1970)
4	Buenos Aires (Cauca)	Paso de Bobo	Sulfuros de Fe, Cu, Ni,	Diabasas, basaltos, limolitas y areniscas	Gr. Diabásico Gr. Deques Fm. Ferreira	Diseminaciones, venillas	Rosas (1976)
5	Popayán (Cauca)	La Tetilla	Pirita Calcopirita	Basalto		Venillas, diseminaciones	Rosas (1976)
6	Santander de Quilichao (Cauca)		Galena pirita calcopirita	Rocas ígneas básicas, gabros, dolomitas con diques de decita porfirítica		Venas	Suárez Hoyos (1943)

No.	Paróquia	Lugar	Minerales	Hostio	Yacimiento	Yacimiento	Yacimiento
7	San Marino (Chocó)	Río Cachedd	Pirita calcopirita cuarzo	Diabases, rocas verdes		Relleno de zona de cizalla de 50 cm	Escorce (1971)
8	San Marino (Chocó)	Río Anguedó	Pirita calcopirita corelina malaquita	Diabases		Venas	Escorce (1971)
9	Tadó (Chocó)	Quebrada Mambú	Pirita calcopirita cuarzo calcita	Vulcanitas básicas intruidas por tonalitas y diques		Mineralización en un bloque rodado	Escorce (1971)
10	Carmen de Atrato (Chocó)	Mina Santa Anita	Calcopirita pirita cuarzo calcita	Flujos diabásicos con intercalaciones de shales, grauwacas, chert, conglomerado y caliza		Zona de cizalladura hasta de 10 m	
11	Carmen de Atrato (Chocó)	Mina El Dorado o Gibraltar	Pirita calcopirita	Chert negro, calizas grises a negras, shales negros		Módulos y venas	Escorce (1971)
12	Carmen de Atrato (Chocó)	Mina El Roble	Pirita calcopirita pirrotina cuarzo carbonatos	Diabases, chert, calizas, conglomerados, mineralización en chert con diques andesíticos	Gr. Cañasgordas	intrusiones andesíticas relacionadas(?) al Batolito de Mandé	
13	Lloró (Chocó)	Piedra Muchimba	Cobre nativo	Basalto verde oscuro con amigdalas de zeolitas		Cu en dendritas dentro de calcita relleno de vesículas del basalto	Escorce

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
14	Iadó (Chocó)		Galena, esfalerita, calcopirita, pirita, cuarzo, limonita	Rocas verdes?		Rellenos de fisura por soluciones hidrotermales	Escorco (1971)
15	Guschavés (Nariño)	Prospecto El Diamante	Arsenopirita, esfalerita, pirita, calcopirita, galena	Rocas verdes, vulcanitas máficas afectadas por pequeños stocks granodioríticos del Terciario		Venas y filones	JICA (1984)
16	Belén de Umbria (Risarcaldes)	Corregimiento de Colombia	Sulfuros cupríferos y feldespatos	Basaltos Diabases?		Vetillas localmente en enrejado en un área de 1/2 km <sup>2</sup>	Guarín (1971)
17	El Dovio (Valle)	El Dovio	Sulfuros cupríferos	Diabases y basaltos	Gr. Dague	Vetillas de sulfuro en áreas 300 m	Guarín (1971)
<b>B. Mineralizaciones de Cu, Zn en vulcanitas intermedias.</b>							
18	Urao (Antioquia)		Pirita, esfalerita, argentita, plata, cuarzo, barita, óxidos de Mn, calcita	Intrusivas terciarias y sus fases efusivas; andesitas, dacitos, tobas conglomeráticas y cenizas		Venas. Tipo mesothermal	Mokittel (1954a,b)
19	Suárez (Cauca)	Suárez Piedra Ieán	Pirita, pirrotita, calcopirita	Andes. con interc. de limol. y limol. silic. intruidas por dior. y cuarzod.	Gr. Diabásico	Mineralización en el contacto con intrusiones sulfuro masivo.	

No.	Municipio	Lugar	Mineralización	Rocas anexas	Localidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
20	Quibdó (Chocó)	La Equis Vereda Tutunendó	Esfalerita galena calcopirita oro plata	Volcanitas félsicas e intermedias según Calle y Salinas. Andesitas según Mokittel	Rocas volcánicas de La Equis	Sulfuros masivos y sulfuros en estoverca	Mokittel (1959) Castiblanco y Benavides (1985) Calle y Salinas (1986) Mining Annual Review (1986)
<b>C. Mineralizaciones de Cu, Zn, Pb en lodolitas negras</b>							
21	Noboa (Boyacá)	Santa Isabel	Galena esfalerita	Shale negro y areniscas	F. Fómeneque	Venas	
22	Otanche (Boyacá)		Galena Pirita	Shale negro	F. Paja	Venas	
23	Tibirita (Boyacá)	El Salitre	Hematita siderita calcopirita	Shale negro	F. Fómeneque	Capas y diseminaciones	Gil (1976)
24	Gámbita (Santand.)	Gámbita Centro	Galena calcopirita pirita	Shale negro	F. Paja	Lentejones de 5 a 10 cm de espesor	Otero (1975)
25	Paine (Cund.)	O. La Mina	Esfalerita galena	Shale negro	F. Paja	Venas	Rodríguez (1972)
26	Yacopi (Cund.)	O. La Mina	Pirita Malaquita	Shale oscuro	F. San Gil inferior	Relleno de fracturas	Gil (1976)
27	Gachalá (Cund.)	Tominejas	Especularita (Calcopirita)	Shale Oscuro	F. Lutitas de Mecanal	Filón de 3 m de espesor	Ulloa y Rodríguez (1976)
28	Manta (Cund.)	Las Minas	Siderita (calcopirita)	Shale oscuro	F. Fómeneque	Diseminada, zona de 2 m de espesor	Ulloa y Rodríguez (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
29	Ubalá (Cund.)	Vereda Nazareth	Esfalerita (Galena)	Shale oscuro	F. Lutitas de Macanal	Relleno de fracturas y diseminado	Ulloa y Rodríguez (1976)
30	Junín (Cund.)	Santa Polanía	Calcopirita siderita	Shale oscuro	F. Fómeque	Vetas	Gil (1976)
31	Junín (Cund.)	Mina El Rincón	Esfalerita calcopirita arsenopirita siderita	Shale oscuro intercalacio- nes de arenis- cas	F. Fómeque	Vetas	Gil (1976)
32	Gachetá (Cund.)	Muchindote	Esfalerita galena (malaquita)	Shale negro con intercala- ciones arenis- ca de grano fino	F. Fómeque	Venitas e impreg- naciones	Gil (1976)
33	Supatá (Cund.)	Vereda Providencia	Galena esfalerita	Shale negro	Gr. Villeta	Das vetas de 1 cm de espesor	McLaughlin y Arce (1972)
34	Gachetá (Cund.)	Río Murca	Calcopirita siderita	Shale negro	F. Lutitas de Macanal	Diseminaciones zo- na de 1 m de espesor	Gil (1976)
35	Nocaima (Cund.)	Loma Cocunche	Malaquita azurita siderita limonita	Shale y limo- lita gris	Gr. Villeta (Shale de Torana)	Brecha silicitizada mineralizaciones en la matriz	Cardozo et al (en preparac.)
36	El Peñón (Cund.)	Vereda Cascajetas	Pirita esfalerita calcita pirofilita	Shale negro calcáreo	Gr. Villeta (Shale de Cerinza)	Estratos y láminas de sulfuros masivo diseminaciones y venas.	Sarmiento et al (1985) Sarmiento (1985b)
37	Guevatá (Cund.)	Trea Faguinas	Esfalerita	Shale	F. Paja	Venas	Ulloa y Ro- dríguez, 1979

No. Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancha	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia	
<b>D. Mineralizaciones Cu (Pb, Zn) en arenitas</b>							
38	V. de Leiva (Boyacá)	Rfo Samacá	Galena Esfalerita	Arenisca Cuarzosa	F. Arcabuco	Venas	Rodríguez (1972)
39	V. de Leiva (Boyacá)	Vereda La Copilla	Limonita	Arenisca cuarzosa	F. Arcabuco	Capa de 20 cm de espesor	Mariño (1976)
40	Tunja (Boyacá)	Corregimiento Chiquiza	Galena	Arenisca cuarzosa	F. Arcabuco	Venitas de 1 cm de espesor	Mariño (1976), Ulloa y Rodríguez (1976)
41	Zetaquirá (Boyacá)	D. Porras	Galena	Arenisca	F. Une	Rellenos de fisuras	Ulloa y Rodríguez (1976)
42	Guayatá (Boyacá)	Vereda Romaquirá	Calcopirita siderita	Areniscas y shales negros	Gr. Cáqueza	No precisado	Mariño (1976)
43	Medina (Cund.)	El Salitre	Malaquita	Arcillolitas gris verdosas y arcillas arenosas de color pardo rojizo	No precisado	Diseminaciones en un cuerpo lenticular de arcillolita	Gil (1976)
44	Medina (Cund.)	Caño Cristalino	Malaquita bornita	Arcillolitas grises verdosas y compactas suprayacidas por rocas de color rojo	Gr. Farellones(?)	Espesor 2 cm; 5 m de extensión; impregnaciones locales.	
45	Barrancas (Guajíra)	El Cerrito	Sílice epidota malaquita calcosina	Arenitas, limolitas, conglomerados intruidos por diques riolíticos.	F. La Quinta	Parches distantes varias docenas de metros c/u de 10 x 1.5 m de ancho de mineralización estratíf.	Government of Japan (1965)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
46	Barranca (Guajira)	El Ojo	Malaquita	Diques rioliticos arenita limolita y conglomerados	F. La Quinta(?)		
47	Barranca (Guajira)	Rio Dulce. El Salado. Portales. Carbonelito. La Botella	Minerales de Cu	Basaltos, tobas intercaladas con conglomerados intruidos por diques rioliticos	Basaltos en la Fm. La Quinta(?)	Mineralización estratoconfinada	Government of Japan (1965)
48	Villanueva (Guajira) Urumbita (Guajira) San Diego Cesar	Loma de Corazón, Gallinazo, Plencito Maquival Oveja El Rincón Seno La Rigen Zepellín San José	Minerales de Cu	Arenisca roja	F. La Quinta(?)	Venas eb bchelon	
49	Silos (Norte de Santander)	El Tuto Caño Cajales	Calcosina	Arenisca arcósica	F. Girón	4 manifestaciones Diseminación estratiforme; una de 135 m a lo largo de un estrato de 5,4 m de espesor.	
50	Hucari San Calixto La Playa (N. de Santand.)		Cobre nativo tenorite cuprite cuarzo calcita epidota malaquita azurita	Rocas volcánicas que alternan limolites arenosas	F. Girón	Lentes de 1 m de longitud y pocos cm de espesor	Otero (1971)

## E. Mineralizaciones Zn, Pb (Cu) en calizas o arenitas calcáreas

51	Guicán (Boyacá)	Mina	Galena, esfalerita especularita	Arenisca calcárea(?)	F. Capacho	Repleno de fracturas verticales	
52	Sotó (Boyacá)	Machacuta	Galena (esfalerita)	Arenisca calcárea con intercalacio- nes shale y caliza	F. Capacho		Vargas et al (1976)
53	Sotó (Boyacá)	Mina Alcohol	Galena esfalerita	Arenisca calcárea	F. Aguardiente	Zone de falla	Vargas et al (1976)
54	Tipacoque (Boyacá)	El Jeque	Galena esfalerita	Arenisca calcárea	F. Capacho	En venitas y como cemento de areniscas	Vargas et al (1976)
55	Chiscas (Boyacá)	Las Mercedes	Galena esfalerita (calcopirita)	Arenisca calcárea	F. Capacho	Venitas de 1 a 5 cm de espesor	Vargas et al (1976)
56	La Uvita (Boyacá)	El Escobal	Galena esfalerita	Arenisca calcárea	F. Capacho	Cuerpos lenticulares en zona de falla	Vargas et al (1976)
57	Toquí (Boyacá)	Vereda Carare	Galena (esfalerita)	Caliza	F. Rosablanca	Venas	Rodríguez (1972)
58	Ráquira (Boyacá)	La Candelaria	Galena (limonita) cuarzo	Areniscas calcáreas	F. San Gil Infe- rior	Vena de 10 cm	
59	Gachantivá (Boyacá)	Las Minas	Calcopirita	Caliza	F. Rosablanca	Doce filones espesor 15 a 60 cm	Ulloa y Rodríguez (1979)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
60	La Paz (Boyacá)	Vereda Armadillo	Barita (fluorita) (malaquita)	Caliza	F. Rosablanca	Venas	Otero y Angarite (1975)
61	Ráquira (Boyacá)	Ráquira	Sulfuros de cobre	Areniscas calcáreas	F. Churuvita	Diseminaciones	Meriño (1976)
62	Tunja (Boyacá)	Chiquiza	Sulfuros de cobre	Arenisca	F. Churuvita	Tres venitas de 1 cm de espesor	Meriño (1976)
63	Paipa (Boyacá)	Paipa	Malaquita	Areniscas cuarzosas	F. Guadalupe	No preciado	Meriño (1976)
64	Ubalá (Cund.)	Veredas Las Mercedes y Manizales	Siderita	Caliza	F. Calizas del Guevío	Relleno de fracturas	Gil (1976)
65	Ubalá (Cund.)	Cueva Oscura y San Rafael	Galena calcopirita siderita	Caliza	F. Calizas del Guevío	Diseminada y en fracturas	Ulloa y Rodríguez (1976)
66	Ubalá (Cund.)	La Cascada	Barita	Caliza	F. Calizas del Guevío	Filón de 20 cm relleno de fracturas	Ulloa y Rodríguez (1976)
67	Ubalá Gachalá (Cund.)		Galena calcopirita siderita pirita calcita cuarzo	Calizas de grano fino		Venas	

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca anfitrión	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
68	Gachalá (Cund.)	Vereda El Guavio	Galena (calcopirita, esfalerita, pirita, calcita, cuarzo)	Caliza	F. Calizas del Guavio	Diseminaciones	Gil (1976)
69	Gachalá (Cund.)	Vereda Guatunel	Galena (esfalerita)	Calizas oscuras	Gr. Farallones	Diseminaciones esporádicas	Gil (1976)
70	Gachalá (Cund.)	Farallones de Medina	Galena esfalerita	Calizas	Fr. Farallones	Diseminaciones	Gil (1976)
71	Gachalá (Cund.)	La Colonia Cerro del Cobre	Calcopirita, malaquita, azurita (pirita, cuarzo), limonita, oro, plata	Calizas dolomitas	Gr. Farallones	Vetillas, relleno de fracturas y diseminaciones	Gil (1976)
72	Gachalá (Cund.)	Farallones Medina					
73	Distrito Especial	Sumapaz	Minerales de cobre	Calizas	Gr. Farallones	No precisado	Gil (1976)
74	Quetame (Cund.)	Guayabetal	Galena (argentita, plata, yeso, esfalerita, pirita)	Calizas arcillosas	Calizas paleozoicas Grupo Farallones	Reemplazamiento metasomático	Gil (1976)
75	Gutiérrez (Cund.)	Cueva del Cobre	Malaquita	Caliza	Gr. Farallones(?)	Mineralización	Gil (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
76	Cachalé (Dund.)	Medina y Alto Bojara	Calcopirite pirite covelina cuarzo	Lodolita calcárea y arenisca	Gr. Farallones	Sulfuro diseminado en zona de falla mineralización con espesor 1.5 m prom.	
77	Concep- ción (Santand.)	Montenegro	Galena esfalerita	Caliza y areniscas calcáreas	F. Mercedes	Lentes paralelos con estratificación y diseminaciones	Vargas et al (1976)
78	Coromoro (Santand.)	O. Cedrilla	Galena esfalerita calcopirita	Caliza	F. Rosablanca	Lentes irregulares	Vargas et al (1976)
79	Guacameyo (Santand.)	Vereda San Juan	Galena barita	Caliza	F. Rosablanca	Conocida por rodados	Vargas et al (1976)
80	Jordán (Santand.)	Las Juntas	Barita galena malaquita			2 filones espesor hasta 2.50 m	Vargas et al (1976)
81	Aguada (Santand.)	San Martín	Barita fluorita	Caliza	F. Rosablanca	No precisado	Vargas et al (1976)
82	Sucre (Santand.)	Minas Los Locos	Calcopirita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas y lentes	Ulloa y Rodríguez (1979)
83	Sabanalarga (Santand.)	Minas Peras Blancas	Galena esfalerita	Caliza	F. Rosablanca	Diseminada y en fracturas	Ulloa y Rodríguez (1979)
84	Sucre (Santander)	La Rata	Galena calcosina	Caliza	F. Rosablanca	Filones irregulares	Ulloa y Rodríguez (1979)

85	Bolívar (Santand.)	El Pulpito y Motua	Barita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas	Rodríguez y Ulloa (1979)
86	Bolívar (Santand.)	Varias Minas	Barita Calcopirita Fluorita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas	Ulloa y Rodríguez (1979)
87	Bolívar (Santand.)	Mina Monteoscuro	Barita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas y de cavidades	Ulloa y Rodríguez (1979)
88	Jesús Ma. (Santand.)	Mina La Belleza	Barita	Caliza	F. Rosablanca	Filón de 20 cm de de espesor	Ulloa y Rodríguez (1979)
89	Bolívar Vélez (Santand.)	Varias Minas	Calcopirita siderita	Caliza	F. Rosablanca	Hilos y filoncitos	Escorco (1980)
F. Mineralizaciones Pb, Zn, Cu en zonas de contacto de cuerpos plutónicos							
90	Samaná (Caldas)		Galena pirita, es- falerita, calcopiri- ta, plata	Contacto cuarzo- monzonita y es- quistos cuarzo- cálcico		Contacto	López (1971b)
91	Berlín (Caldas)		Cuarzo pirita calcopirita esfalerita galena argentita oro	Complejo ígneo de Samaná y esquistos cuarzo-sericiticos -grafíticos, esq. clorítico-actino- líticos y cuarcitas		Venas y contacto	Pérez, Lozano (1975)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
92	Samaná (Caldas)		Galena plata oro esfalerita pirita calcopirita cuarzo siderita	Contacto esquisto cuarzo-grafítico cuerzodiorita.		Contacto	López (1971b)
93	Buenos Aires (Cauca)		Calcopirita pirita galena esfalerita pirrotina arsenopirita	Secuencias terciarias y cretáceas (sedimentarias) intruidas por pórfidos de cálcicos y tonalíticos		Contacto venas	Ruge (1971)
94	Marcedares (Cauca)		Galena esfalerita calcopirita pirita oro, plata	Intrusivos ácidos, cortanto arenáceas		Contacto	Buena (1952) Suescún (1959)
95	Neiva (Huila)		Magnetita hematita calcopirita pirrotina esfalerita pirita	Metasedimentos silíceos en contacto con pórfidos andesíticos. Andesitas y cuarzozononitas.		Contacto (subproducto)	Buitrago et al (1976)
96	Neiva (Huila)		Hematita pirita calcopirita pirrotina esfalerita	Metasedimentos silíceos y calcáreos		Reemplazamiento (diseminado)	Buitrago et al (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca antraxita	Unidad litológica	Tipo mineralización	Referencia
97	El Nabo (Huila)		Plomo-Zinc	Idem anterior en contacto con diques andesíticos y aptíticos		Reemplazamiento (diseminado)	Buitrago (1976)
98	Salado-blanco (Huila)		Calcopirita Plomo-zinc	Sedimentitas intruidas por cuarzdioritas Batolito de Ibaqué		Contacto Skarn	Buitrago et al (1976)
99	Anzoátegui (Tolima)		Pirita, galena, plata, calcop. esfalerita Mn, Cd, As, Sb	Xenolito de esquistos en cuarzdiorita del Batolito de Ibaqué		Contacto	Buitrago y Buenaventura (1975)
100	Novira (Tolima)		Pirita esfalerita calcopirita galena tetrahedrita siderita Cd, plata	Diques dacíticos y aptíticos y calizas		Reemplazamiento	Buitrago y Buenaventura (1975)
101	El Valle (Tolima)		Pirita, calcop. galena, esfel. oro, plata	Fm. Payandé en contacto con diorita monzonítica		Contacto	Mejía Nicholls (1953)
102	San Luis Payandé (Tolima)		Calcopirita magnesita granate epidota hematita esfalerita pirita molibdenita	Calizas Fm. Payandé intruidas por granodioritas de Payandé y El Sepo		Masas de skarn dispersas y pequeñas	USGS-Ingeominas (1986b)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
103	San Antonio Los Gueyabos (Tolima)		Magnetita pirita calcopirita esfalerita bornita galena	Mármol relicto de la fm. Payandé o de xenolitos afectado por pór- fidos dacíticos y rocas de dique asociadas con el Batolito de Ibaqué		Skarn siderocuprífero	Escorco (1978)
104	Río Blanco Puerto Saldaña (Tolima)		Cuarzo pirita calcopirita molibdenita bornita	Cuarzodiorita con ocasionales xeno- litos metamórfic. (Precámbricos?) y pequeños skarn		Pequeños skarns, fi- lones, vetillas.	Buena Ventura et al (1976)
G. Mineralizaciones Pb, Zn (Cu) en metarofitas							
105	Segovia (Antioquia)		Pirita galena esfalerita	Metamórficas; neises feldespá- ticos, cuarcitas esquistos sericí- ticos de edad po- siblemente Paleo- zónico		Venas (sub-produc- to de Au y depósi- tos de contacto	Oquendo (1970)
106	Zaragoza (Antioquia)		Pirita galena esfalerita en filones de cuarzo	Idem anterior		Venas (sub-produc- to de Au)	Oquendo (1970)
107	Anorí (Antioquia)		Pirita, esfal. pirrot., ars. galen., calc. oro, plata cuarzo	Esquistos cuarzo- grafíticos Grupo Valdivia		Venas	Hall et al (1970)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca asociada	Usos del litológico	Tipo mineralización	Referencia
108	Marquetalia (Caldas)		Galena calcopirita esfalerita pirita, Bor. Azu. Mal. cuarzo	Esquistos cuarzografí- ticos		Venas (en cuarzo)	Quintero (1958)
109	Pensilvania (Caldas)		Cuarz.pirit. galen.,esfal. argentit.,oro plata.	Esquistos alu- mínicos		Venas subproductos	López 1971b
110	Teruel (Huila)		Esfalerita arsenopirita	Lidita metamor- fizada		?	Royo y Gómez 1940
111	Quetame El Santua- rio (Cund.)	Trapichito	Calcopirita malaquita azurita	Cuarcitas y esquistos sedosos Gr. Quetame		Vetillas en una vena de cuarzo en 3 m de espe- sor	Gil (1976)
112	Hacari (N.Sant.)		Barita galena fluorita	Esquistos cuar- zo-sericíticos		Venas	Otero y Angarita (1975a)
113	Silos (N.Sant.)		Malaquita galena cuarzo	Esquistos clo- ríticos y seric- íticos. Fm. Silgará		Venas	Otero y Angarita (1975a)
114	Salento (Quindío)	Las Nieblas	Galena, plata esfaler.pirit. oro, calcopir. estib., cuarz. sider., barita calcopirite	Rocas metamórficas de medio-bajo grado Edad tentativa Cambro-Ordoviciano		Venas	Barrero et al(1971) Kassem et al(1971) Lozano et al(1975) Mosquera y Buitrago 1971

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
115	Tona (Santand.)		Piromorfita cuzco (galena)	Metamórficas de bajo grado. Fm. Silgará		Venas	Otero y Angerita 1975b Mard et al 1970
116	Anzoátegui (Tolima)		Pirita, gale- na, calcopi- rita, arseno- pirite, Au, Ag	Metamórficas de bajo grado		Venas (subproducto)	López (1971)
117	Líbano y Falan (Tolima)		Oro, plata galena esfalerita calcopirita cuarzo	Metamórficas Esquistos verdes y negros		Reemplazamiento (subproductos)	Buenaventura (1975)
118	Remedios (Antioquia)		Pirita galena esfalerita oro en venas de cuarzo	Plutón cuarzo- diorítico del Batolito de Se- govia		Venas (subproduc- to de Au)	Oquendo (1970)
119	Remedios (Antioquia)		Pirita galena esfalerita oro en venas de cuarzo	Intrusivos fés- sicos (adameli- tas) neis y cuercitas		Venas (subproduc- to de Au)	Oquendo (1970)
120	Segovia (Antioquia)		Pirita esfalerita galena calcopirita pirrotina cuarcita calcita oro, plata	Cuarzodiorita Batolito de Segovia		Venas (Subproduc- to de Au)	Oquendo (1970)

No.	Nombre del yacimiento	Minerales	Formación geológica	Tipo de yacimiento	Autor
121	Valparaiso (Antioquia)	Galena esfalerita	No precisado	Filones y lentes	Gutiérrez et al (1953)
122	Abriaquí Cañasgordas Frontino Urrao (Antioquia)	Pirita calcopirita arsenopirita pirrotina esfalerita galena plata, oro	Stocks dioríticos Morro Pelao, Morro Gacho, Páramo de Frontino localmen- te vulcanitas y se- dimentitas del Gr. Cañasgordas	Venas (subproduc- to Au-Ag) relacio- nadas con plutones	Rodríguez et al (1980)
123	Marmato (Caldas)	Oro, plata pirita esfalerita galena arsenopirita calcopirita pirrotina	Stock de Marma- to Pórfido dacítico	Filones, venas y diseminaciones	Cuéllar y Mora (1985)
124	Samaná (Caldas)	Pirita argentita plata, oro galena esfalerita calcopirita cuarzo	Cuarzodiorita	Venas (subproductos)	López, (1971b)
125	Samaná (Caldas)	Cuarzo pirita galena oro, plata	Cuarzodiorita Batolito de Samaná	Venas (subproductos)	López, (1971b)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
126	Silvia El Plano (Cauca)		Pirita Calcopirita Molibdenita oro, galena esfalerita cinabrio pirrotina (calcosina covelina)	Pórfidos ande- síticos, dacíti- cos dioríticos		Asociado a pórfido cuprífero disemina- ción stockwork	Orrego, (1977)
127	Piedra Sentada (Cauca)		Pirita, calcopirita galena esfalerita estibina arsenopirita cinabrio malaquita oro, cuarzo epidot. feldes.	Cuerpos porfirí- ticos hiposabi- sales		Venas	Laón et al (1977)
128	Santander de Quilichao (Cauca)		Oro, plata galena, cal- copirita, estibina	Cuarzodioritas y dacitas		Venas	Sandoval (1952)
129	Gigante (Huila)		Galena pirita	Cuarzomonzonita biotítica		Venas	(Buitrago et al 1976)
130	El Pital (Huila)		Calcita calcopirita	Dique andesítico en cuarzodiorita		Venas	Buitrago et al (1976)
131	San José de Isnos (Huila)		Galena pirita calcita cuarzo	pórfido andesi- tico		Venas	Buitrago et al (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca anfitriona	Incluido U.T. de origen	Tipo mineralización	Referencia
132	Villavieja (Huila)		Galena pirita malaquita cuarzo			Venas	Royo y Cómez (1940)
133	Berruecos Buesaco Mollana (Nariño)		Galena calcopirita barita	Intrusivos por- firíticos neoterciarios		?	Bueno, (1948)
134	El Carmen (N. Santand.)		Calcocina pirita calcopirita hematita galena esfalerita	?		Venas (Subproducto)	Reyes (1973)
135	Abrego (N. Santand.)		Galena barita fluorita	Cuarzomonzonitas		Venas y disemina- ciones	Cáceres y Magyes (1967) (SGN, 1951)
136	Cácuta (N. Santand.)		Galena calcopirita esfalerita	Granito de Du- rania		Venas	Otero y Angarita (1975)
137	Sardinata (N. Santand.)		Galena calcopirita cuarzo	Intrusivo (?)		Venas	Otero y Angarita (1975a)
138	Riosucio (Risarcald)		Esfalerita galena pirita oro	Pórfido andesi- co		Venas	Guarín (1971)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
139	Quinchía	(Risaralda)	Esfalerita pirite	Pórfidos andesíticos		Venas	Guarín, (1971)
140	Umpalá	(Santander)	Flurita galena cuarzo	Granito de Pescadero		Venas	Otero y Angarita (1975b)
141	California	(Santander)	Galena esfalerita	Diques de roca		Venas	Otero y Angarita (1975b)
142	California	(Santander)	Oro, plata pirita esfalerita tetrahedrita galena marcasita calcopirita	Cuarzodiorita cuerzomonzonite granito. Facies porfiríticas más jóvenes		Venas	Mendoza y Jaramillo (1975)
143	Rovira	(Tolima)	Esfalerita galena pirita calcopirita bornita calcita cuarzo	Cuarzodiorita		Venas	Buitrago y Buena Ventura (1975)
144	Anzoátegui	(Tolima)	Pirita galena esfalerita calcopirita cuarzo	Granodiorita hornbléndica		Venas Reemplazamiento	Buitrago y Buena Ventura (1975)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
145	Fresno (Tolima)		Pirita galena esfalerita calcopirita oro plata	Cuarzodiorita El Hatillo		Venas reempla- zamiento	Buenaventura (1975)
146	San Antonio (Tolima)		Calcopirita galena esfalerita cuarzo (oro, plata)	Roca hipohabisal porfirítica de composición an- desítica		Venas (reempla- zamiento)	Buenaventura et al (1976)
147	Chaparral (Tolima)		Galena esfalerita calcopirita pirita (plata,oro)	Batolito de Ibaqué		Venas	Buenaventura (1975)
148	Cajamarca (Salento) (Tolima)		Pirita argentita galena esfalerita calcopirita oro	Relacionadas a pórfidos dací- ticos		Venas (subpro- ducto)	Lozano et al (1975)

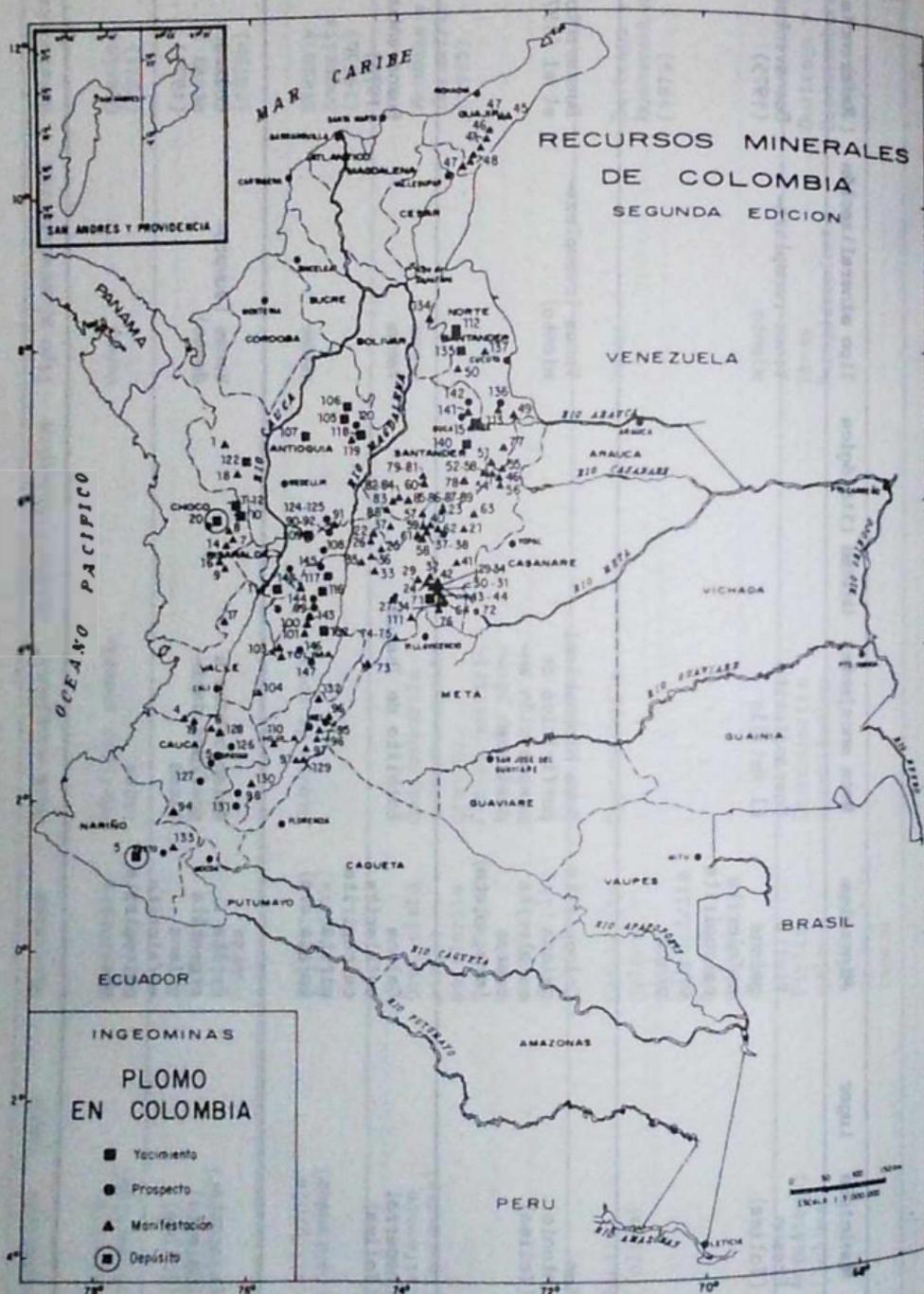


FIG. 3: Mineralizaciones de plomo, zinc (cobre estratoconfinado) en Colombia.

# Ministerio de Minas y Energía

## BIBLIOTECA

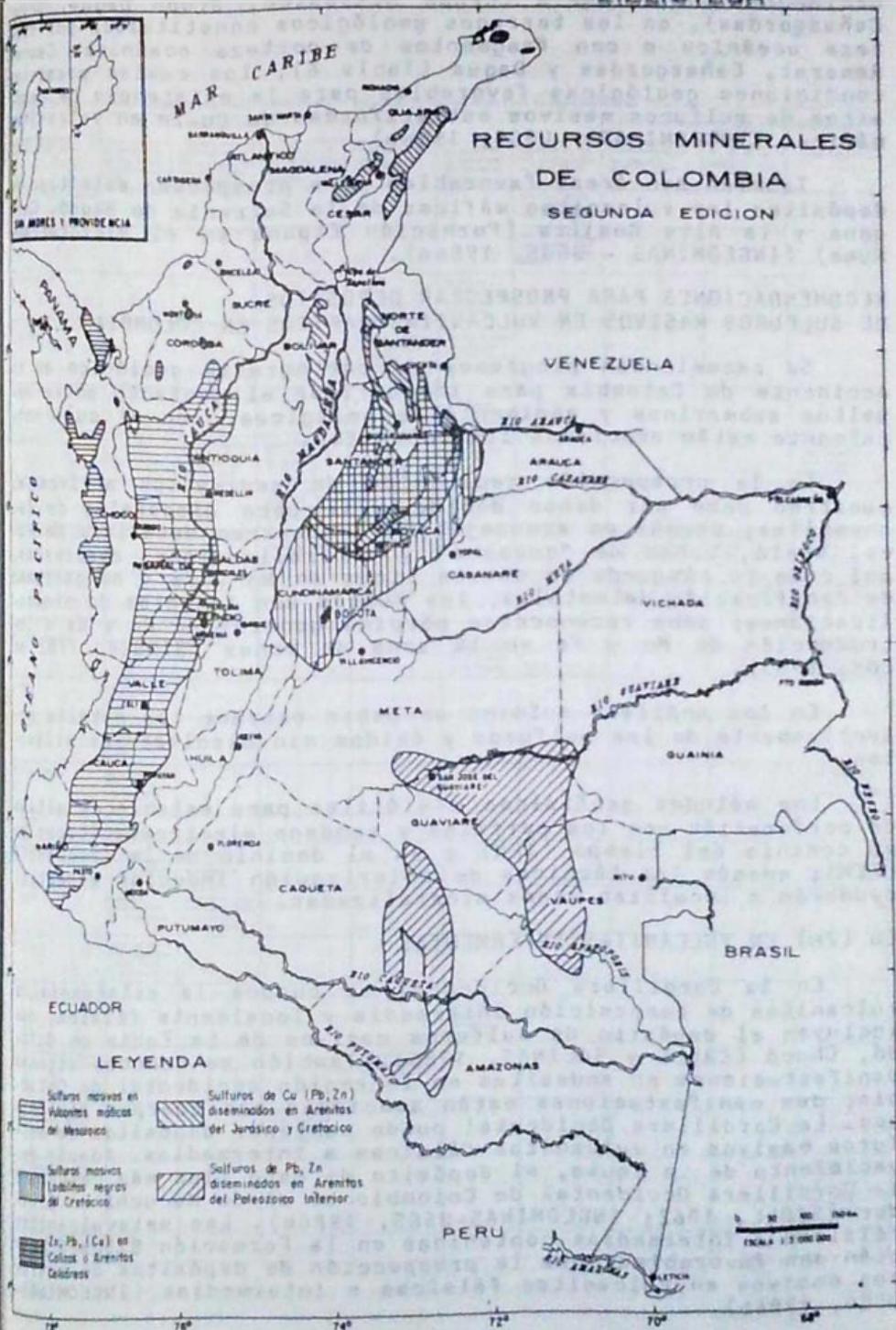


FIG. 4. Zonas favorables para mineralizaciones de plomo y zinc en Colombia.

stratificaciones de lodolitas, chert o arenitas; estas rocas pertenecen a secuencias ofiolíticas del Cretácico de la región occidental de Colombia (Grupo Diabásico, Grupo Dagua, Grupo Cañasgordas), en los terrenos geológicos constituidos por corteza oceánica o con fragmentos de corteza oceánica; Cauca-Romeral, Cañasgordas y Dagua (Tabla 6), los cuales presentan condiciones geológicas favorables para la existencia de depósitos de sulfuros masivos estratiformes de Cu-Zn en vulcanitas félsicas (INGEOMINAS - USGS, 1986a).

También son áreas favorables para prospectar este tipo de depósitos las vulcanitas félsicas de la Serranía de Baudó, Gorgona y la Alta Guajira (Formación Etpana en el Microterreno Ruma) (INGEOMINAS - USGS, 1986a).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE SULFUROS MASIVOS EN VULCANITAS MAFICAS EN COLOMBIA

Se recomiendan programas de cartografía geológica en el occidente de Colombia para identificar el contacto entre basaltos submarinos y sedimentitas pelágicas, con el cual normalmente están asociados los depósitos.

En la prospección geoquímica de sedimentos activos el muestreo debe ser denso debido a la poca dispersión de las anomalías; además es aconsejable el muestreo detallado de roca, suelo, zonas de "gossans" y mineralizaciones observadas, así como la búsqueda de cherts ricos en Mn y Fe y de patrones de zonificación de metales, los cuales son indicios de mineralizaciones; debe reconocerse pérdida general de Ca y Na e introducción de Mn y Fe en la zona de venas (SINGER, 1982 en CDX, 1983).

En los análisis químicos se deben extraer los metales selectivamente de los sulfuros y óxidos sin disolver los silicatos.

Los métodos geofísicos más útiles para establecer sitios de perforación son los perfiles y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) y en el dominio de la frecuencia (FEM); además las técnicas de polarización inducida espectral ayudarán a localizar venas mineralizadas.

#### Cu (Zn) EN VULCANITAS INTERMEDIAS

En la Cordillera Occidental se conoce la existencia de vulcanitas de composición intermedia y localmente félsica, que incluyen el depósito de sulfuros masivos de La Equis en Quibdó, Chocó (CALLE y SALINAS, 1986). También se conocen algunas manifestaciones en andesitas en la región occidental de Colombia; dos manifestaciones están asociadas con cuerpos plutónicos. La Cordillera Occidental puede contener depósitos de sulfuros masivos en vulcanitas félsicas a intermedias. Además del yacimiento de La Equis, el depósito de este tipo más cercano a la Cordillera Occidental de Colombia es el de Macuchi en Ecuador (STOLL, 1962; INGEOMINAS-USGS, 1986b). Las metavulcanitas félsicas a intermedias contenidas en la Formación Silgará también son favorables para la prospección de depósitos de sulfuros masivos en vulcanitas félsicas e intermedias (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

"Las áreas del Ecuado, aún sin cartografiar en una amplia región, pueden contener extensas áreas favorables para depósitos de sulfuros masivos" (INGEOMINAS-USGS, 1986b).



**La Equis.**- En el Departamento del Chocó se desarrolla actualmente este proyecto de minería de sulfuros de zinc, plomo y cobre y de metales preciosos oro y plata.

El depósito de La Equis está localizado en el Cerro Capoteros al este del Corregimiento de Tutunendó Municipio de Quibdó, a 30 km por carretera de esta ciudad y a 128 km de Medellín.

El yacimiento está constituido por un filón hidrotermal de sulfuros masivos y sulfuros en estoverca (MELO, 1984; CALLE y SALINAS, 1986) emplazado en vulcanitas félsicas intermedias de edad pre-Eoceno pertenecientes a la Unidad de Rocas Volcánicas de La Equis (CALLE y SALINAS, 1986).

Los minerales principales son esfalerita, galena y calcopirita; como accesorios se presentan oro y plata. Esta mineralización puede corresponder a un origen hidrotermal asociado con el Batolito de Mandé o puede ser de naturaleza exhalativa submarina (CALLE y SALINAS, 1986). El espesor promedio del filón es de 2 m y el contenido promedio de mineral en la mena es: 11% Zn, 2% Pb, 1% Cu, 12 gr/ton Au, 19 gr/ton Ag. En la zona de oxidación el oro y la plata tienen 18 gr/ton y 22 gr/ton respectivamente.

Mediante trabajos exploratorios que incluyeron 1.200 m de sondeos y 220 m de galerías, se calcularon reservas de 111.000 toneladas medidas, 12.000 toneladas indicadas y 1'600.000 toneladas inferidas (MELO, 1984).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE SULFUROS MASIVOS EN VULCANITAS FELSICAS E INTERMEDIAS, EN COLOMBIA

La cartografía geológica es útil para identificar plutonitas de composición intermedia y félsica y los centros de vulcanismo félsico, en donde deben concentrarse los esfuerzos de la exploración.

Durante la prospección geoquímica es aconsejable el muestreo y análisis de Au y metales básicos en rocas y sedimentos activos, así como en zonas de "gossan" que pueden contener elevados valores de Pb. El Au siempre está presente y es una guía de la mineralización; otras guías son el enriquecimiento de Mg y Zn y el empobrecimiento en Na alrededor de los depósitos, así como los valores altos de Cu, Zn, Pb, Ba, As, Ag, Au, Se, Sn, Bi y Fe dentro de los depósitos (SINGER, 1982 en COX, 1983).

Las técnicas aeromagnéticas son útiles para localizar los centros de vulcanismo félsico y los estudios electromagnéticos lo son para establecer sitios de perforación en zonas muy cubiertas de suelo y vegetación.

#### Cu, Zn, Pb en LODOLITAS NEGRAS

Las mineralizaciones principales son venas, disseminaciones y en algunos casos estratos laminares o lentes de sulfuros de Cu, Zn, Pb y Fe; están encajadas en lodolitas negras del Cretácico inferior (Formaciones Lutitas de Macanal, Fômeque, Paja, Grupo Villeta e intercalaciones de lodolita en la Formación San Gil inferior) de la Cordillera Oriental.

La secuencia estratigráfica de esta región es una gruesa sucesión de lodolitas depositadas en condiciones euxínicas de

energía; localmente contiene evaporitas e intercalaciones estratigráficas arenosas que fueron depositadas más rápidamente que las lodolitas (SARMIENTO, 1985a,b; INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Sarmiento (1985a, b) muestra que las mineralizaciones están localizadas en la parte central de la paleocuenca de sedimentación (Cuenca de Cundinamarca), donde el espesor de la secuencia sedimentaria cretácica es máximo, dentro de la región comprendida por el contorno mínimo del mar durante el Berriasiense-Valanginiense (ETAYO et al, 1969) y donde están localizadas las intrusiones básicas del Cretácico Inferior (FABRE y SALDÍE, 1982).

Además la mayoría de las mineralizaciones están localizadas cerca de fallas o en sitios donde hay cambios laterales rápidos en las facies y en el espesor de las sedimentitas (SARMIENTO, 1985a,b).

Con base en la comparación de las características geológicas de la región central de la Cordillera oriental, región que contiene las mineralizaciones, con aquellas características de las áreas que contienen depósitos exhalativos estratigráficos (SARMIENTO, 1985), en concordancia con INGEOMINAS-USGS (1986b), se concluye que las sedimentitas cretácicas (Supraterrano Cretácico y especialmente la Cuenca de Cundinamarca), ofrecen excelentes posibilidades para el hallazgo de depósitos exhalativos de Cu, Zn y Pb.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Pb, Zn EXHALATIVOS EN LODOLITAS NEGRAS, EN COLOMBIA

Se recomienda el análisis estratigráfico y estructural detallado de la Cuenca de Cundinamarca para localizar:

- Cuencas de sedimentación de tamaño pequeño o cuencas de tercer orden (LARGE, 1980).
- Fallas sinsedimentarias con evidencias de deformación penecontemporánea de los sedimentos.
- Fuentes de calor ígneo.

Las áreas seleccionadas se deben cartografiar en detalle.

La prospección geoquímica debe incluir muestreo de sedimentos activos y rocas en áreas previamente seleccionadas y donde existan manifestaciones minerales. Se deben analizar Ba, Mn, Pb, Zn, Ag y Cu. En las muestras de roca deben analizarse los sulfuros y óxidos independiente de los silicatos.

Los patrones geoquímicos de zonificación lateral hacia afuera: Cu, Pb, Zn, Ba y vertical hacia arriba: Cu, Zn, Pb, Ba, así como los halos regionales de Mn, son guías para reconocer los depósitos (BRISKEY, 1982 en COX, 1983).

La localización de los cuerpos de sulfuro masivo puede facilitarse mediante estudios electromagnéticos.

#### Pb, Zn, (Cu) EN CALIZAS O ARENITAS CALCAREAS

Las mineralizaciones de Zn, Pb, (Cu), en calizas o arenitas calcáreas, ocurren como relleno de fracturas o cavidades, como diseminaciones o en la matriz de brechas; consisten en sulfuros a veces acompañados por barita y fluorita.

La mayoría de manifestaciones están encajadas en sedimentitas cretácicas no más jóvenes que el Cenomaniano (FABRE y DELALOYE, 1982) y en menor proporción ocurren en calizas del Paleozoico superior.

Las manifestaciones cretácicas están localizadas en la Cordillera Oriental, en calizas o arenitas calcáreas (Formaciones Rosablanca, Calizas del Guavio, Capacho, Mercedes, San Gil inferior y Churuvita) y están distribuidas en el área donde existen unas facies calcáreas infrayacidas por arenitas del Jurásico o comienzos del Cretácico y suprayacidas por lodolitas negras del Cretácico inferior (SARMIENTO, 1985b). Sarmiento (1985b) muestra que las mineralizaciones están restringidas a aquellas áreas donde la secuencia estratigráfica cretácica no es muy gruesa, sobre altos paleotopográficos (paleomacizos de Santander y Floresta) o en sectores marginales de la cuenca donde hubo depósito de carbonatos, en ambientes litorales o marinos someros localmente asociados con dolomitas y evaporitas (Formación Rosablanca). Algunas mineralizaciones ocurren cerca de la base de la secuencia sedimentaria transgresiva del Cretácico inferior, en sedimentitas calcáreas depositadas en medios transicionales entre continentales y marinos y a veces asociados con discordancias que evidencien una paleotopografía irregular (MENDOZA, 1983; SARMIENTO, 1985b).

Las características mencionadas de las regiones de la Cordillera Oriental donde están distribuidas estas manifestaciones, son similares con aquellas de las áreas que contienen depósitos de sulfuros de Pb, Zn estratoconfinados en carbonatos (SARMIENTO, 1985b); en consecuencia en estas regiones debe prospectarse este tipo de depósitos.

Las manifestaciones del Paleozoico superior, consisten en venas de galena, calcopirita y esfalerita y disseminaciones de estos sulfuros en calizas del Grupo Farallones de edad Devónico inferior a Pérmico superior, en la región de Quetame - Terreno Quetame (INGEOMINAS, USGS, 1986a). Algunas mineralizaciones contienen galena, esfalerita y calcopirita y otras únicamente calcopirita u otros minerales de cobre. Probablemente las mineralizaciones con predominio de sulfuros de Pb y Zn pueden dar indicios de depósitos de sulfuros de Pb, Zn estratoconfinados en carbonatos, en tanto que las mineralizaciones con predominio de Cu pueden sugerir la presencia de depósitos de cobre y cobalto en dolomitas (INGEOMINAS - USGS, 1986b).

**Cueva Oscura - San Rafael.** - Estas mineralizaciones hidrotermales de sulfuros de plomo y en menor proporción de zinc, están localizadas 3 km al oriente de Ubalá en el Departamento de Cundinamarca. El principal mineral es galena, la cual se encuentra disseminada y rellenando fracturas en las calizas arenosas de la Formación Calizas del Guavio, la cual es la parte basal de la sucesión estratigráfica del Cretácico que reposa discordantemente sobre el Grupo Farallones de edad paleozoica. En menor cantidad se presenta calcopirita, esfalerita, siderita y pirita. El depósito fue explotado antiguamente pero se abandonó por bajo rendimiento. INGEOMINAS efectuó 4 perforaciones con un total de 946 pies, con resultados negativos, pues se concluyó que a pesar de que la mineralización tiene localmente un tenor aceptable es de tamaño reducido (GARZON, 1975a). Por análisis de algunas muestras mineralizadas se estimó un tenor promedio de 7% de mineral de plomo (ULLOA y RODRIGUEZ, 1979). Cerca de esta localidad y dentro de la misma unidad litoestratigráfica existen numerosas manifestaciones de plomo con algo de zinc (ESCOVAR, 1978).

**Quebrada Cedrilla.**— En el prospecto Quebrada Cedrilla, localizado 4 km al este de Coromoro, Departamento de Santander, la mineralización se presenta en forma lenticular dentro de las calizas de la Formación Rosablanca. Consta de galena, esfalerita y calcopirita; esencialmente los estudios realizados por INGEOMINAS (WARD et al, 1970) determinaron mediante sondeos con taladro manual reservas del orden de 100.000 toneladas, con tenores de 1.33% Pb, 57% Zn, 0.04% Cu.

**Montenegro.**— El prospecto de Montenegro, situado 75 km, al sureste de Concepción, Santander, está emplazado en sedimentitas de la Formación Mercedes, del Cretácico. Tiene forma lenticular y los principales minerales, galena y esfalerita, se presentan en forma diseminada, con valores entre 0.5 y 22,5% de Pb y entre 6.25 y 56.6% de Zn en muestras mineralizadas (VARGAS et al, 1976).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE VENAS DE Zn, Pb EN CARBONATOS, EN COLOMBIA

Se aconseja el análisis estratigráfico, especialmente de las sedimentitas de la Cordillera Oriental, para reconocer carbonatos de aguas someras en paleoaltos o bordes de la cuenca de sedimentación y en asociación con inconformidades. En las áreas de interés debe buscarse la interfase entre caliza y dolomita, así como brechas, arrecifes y otras trampas de la mineralización. También es útil el análisis de los patrones de diaclassesamiento.

Durante la prospección geoquímica se deben incluir en el análisis Pb, Zn, Co, Ni, Cd, Re y Ag. En lo posible deben analizarse los sulfuros y óxidos independientemente de silicatos.

El reconocimiento de anomalías regionales de Pb, Zn, Co, Cu, Ag, Co y Ni en residuos insolubles, de halos de Zn primario en carbonatos y del patrón de zonificación vertical hacia arriba aproximado: Cu ( $\pm$  Ni,  $\pm$  Co) Pb, Zn, Sulfuros de Re, es de gran ayuda (BRISKEY, 1983 en COX, 1983).

Varias técnicas electromagnéticas, especialmente de polarización inducida, son útiles para localizar las mineralizaciones.

#### Co (Pb,Zn) EN ARENITAS

Ocurren en la Cordillera Oriental y en la Serranía de Perijá. En realidad la mayoría de mineralizaciones listadas en la tabla 5 contienen únicamente minerales de Cu; solamente las manifestaciones en los municipios de Villa de Leiva y Tunja en la Formación Arcabuco y de Zetaquirá en la Formación Une contienen galena y esfalerita.

Las mineralizaciones ocurren predominantemente en las crías detríticas depositadas en ambientes continentales o litorales con predominio de condiciones oxidantes y localmente condiciones reductoras durante el Jurásico y comienzos del Cretácico (Formaciones La Quinta, Girón, Rionegro y Arcabuco), y están cubiertas por sedimentitas marinas del Cretácico (SARMIENTO, 1985b).

Las arenitas que contienen las mineralizaciones fueron depositadas en grábenas (BARTOK et al, 1981; MAZE, 1984); en algunos lugares están acompañadas por vulcanitas máficas - basaltos en la Formación La Quinta (MAZE, 1984)

o fálaitas - riodilitas en la Formación Girón (MORALES et al., 1958; SARMIENTO, 1985b). Las características anteriores de la Cordillera Oriental y la Serranía de Perijá son semejantes con aquellas características de las regiones donde existen depósitos de sulfuros de Cu (Pb-Zn), diseminados estratoconfinados y en consecuencia son áreas de interés para la búsqueda de este tipo de depósitos (SARMIENTO, 1985b; INGEOMINAS - USGS, 1986b).

Adicionalmente son áreas de interés el margen suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta (Formaciones Guatapurí, Los Portales, Girón), el Valle Superior del Magdalena (Formaciones Saldaña, Yari), la región Oriental de la Guagira (Formaciones La Quinta y Rancho Grande, Capas Rojas de Ipapure), la Serranía de San Lucas (Formaciones El Sudán y La Mojana) y el Macizo de Quetame (Grupo Farallones) donde hay condiciones favorables para la existencia de este tipo de depósitos (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Según INGEOMINAS - USGS (1986) la única región favorable para la ocurrencia de depósitos de sulfuros diseminados de Pb y Zn estratoconfinados en areniscas ocurre en el Araracuara en la Amazonia Colombiana; allí en "unas areniscas con buzamiento suave, del Paleozoico inferior, que suprayacen rocas del basamento cristalino", pueden haberse formado depósitos a partir de "fluidos ricos en metales que fueron expulsados de los sedimentos geosinclinales del Paleozoico inferior en los cinturones plegados de edad Silúrico, en el sitio actual de la Cordillera Oriental" (INGEOMINAS - USGS, 1986b).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Cu, (Pb,Zn) EN ARENISCAS, EN COLOMBIA

Se recomiendan los trabajos de cartografía y estratigrafía para identificar sedimentitas reducidas o ricas en materia orgánica interestratificadas dentro de secuencias de capas rojas y en asociación con evaporitas.

Los análisis de residuos insolubles de carbonatos asociados ayudan a detectar las anomalías geoquímicas.

La asociación geoquímica para diagnóstico es: Cu, Ag, Pb, Zn (Mo, V, U) (COX, 1983).

Si los depósitos tienen volumen suficiente se pueden localizar mediante técnicas electromagnéticas. Los sondeos electromagnéticos tanto en el dominio del tiempo (TEM) como en el dominio de la frecuencia (FEM), el método audiomagnetotelégrafo (AMT) y el de polarización inducida pueden ser útiles para localizar los yacimientos.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Pb, Zn EN ARENISCAS, EN COLOMBIA

En el Araracuara la exploración debe concentrarse en los 100 m inferiores de las arenitas paleozoicas. Debe tenerse en cuenta que la lixiviación superficial y el poco contraste visual de los minerales secundarios de Pb - Zn dificultan el reconocimiento de los depósitos.

Se recomienda el muestreo de sedimentos activos en la vecindad de paleocanales y elevaciones del basamento, con énfasis en aquellos sitios donde las arenitas contengan trazas de carbón orgánico. Deben separarse los minerales pesados y analizarse para Pb, Zn y Ag. Posteriormente debe hacerse muestreo de rocas y suelos para identificar anomalías de Pb y Zn, teniendo en cuenta que las partes inferiores de algunos depósitos comúnmente están enriquecidas en Ba, F y Ag (BRISKEY, 1982 y COX, 1983).

Los métodos geofísicos útiles para localizar las mineralizaciones son los sondeos y perfiles electromagnéticos, los métodos de polarización inducida (IP) y de potencial espontáneo (SP).

#### Pb, Zn, Cu EN ZONAS DE CONTACTO DE CUERPOS PLUTONICOS

Estas mineralizaciones están localizadas predominantemente en la región sur de la Cordillera Central en los terrenos Payandé, Cajamarca y Cauca - Romeral. Las mineralizaciones ocurren en, o cerca de los contactos de intrusiones félsicas o intermedias. Las litologías encajantes son calizas y metacalizas de la Formación Payandé y otras formaciones mesozoicas o consisten en sedimentitas o metasedimentitas no calcáreas, principalmente esquistos, cuarcitas y arenitas.

Las mineralizaciones desarrolladas en calizas y metacalizas están localizadas en el Terreno Payandé en los departamentos del Tolima y Huila; en varios casos se han reportado rocas de skarn (BUITRAGO y BUENAVENTURA, 1975); es posible hallar depósitos adicionales de skarn en esta región, donde la Formación Payandé yace por debajo de las vulcanitas de la Formación Saldaña (INGEOMINAS-USGS, 1986a). También es posible hallar depósitos de Pb, Zn de reemplazamiento en rocas calcáreas como la augleren algunas manifestaciones.

Las mineralizaciones, contenidas en sedimentitas o metasedimentitas no calcáreas, ocurren en disseminaciones o en venas de sulfuros de Pb y Zn, pero además contienen oro y plata; es posible considerar estas manifestaciones como un tipo intermedio entre aquellas de contacto y reemplazamiento en rocas calcáreas y las venas de plomo, zinc y metales preciosos.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE SKARN DE Pb, Zn EN COLOMBIA

Se aconseja la cartografía geológica y el reconocimiento de asociaciones de minerales de skarn en rocas calcáreas en la parte sur de la Cordillera Central, especialmente donde los silicatos hidratados como el anfíbol y la clorita reemplazan al granate o el piroxeno. También deben buscarse calcosilicatos en cantos de corrientes fluviales.

La asociación geoquímica de diagnóstico de los skarns es Zn, Pb, Cu, Co, Au, Ag, As, W, Sn, F, Mn, y posiblemente Be (COX, 1983), por lo tanto deben analizarse estos elementos durante la prospección geoquímica.

El análisis para W, Bi, Sn y metales básicos en minerales pesados separados de concentrados de bates es una guía útil.

En la medida de lo posible deben reconocerse patrones de mineralización mineralógica con rifuga desde Cu, Au, Ag cerca de

los depósitos, luego Au, Ag y Pb, Zn, Ag en las partes más externas (COX, 1983).

Si los skarna de metales básicos están asociados con skarna de magnetita, los estudios magnéticos de detalle facilitan su identificación y los estudios electromagnéticos permiten localizar depósitos en áreas geoquímicas de interés especial.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Pb, Zn DE REEMPLAZAMIENTO, EN COLOMBIA

Mediante cartografía geológica se deben reconocer unidades calcáreas cerca de los cuerpos ígneos intrusivos; en estos sitios se deben buscar patrones de alteración y asociaciones de minerales. La alteración superficial de los depósitos origina masas superficiales de color ocre con cerusita, anglesita, hemimorfita y cerargirita.

Las anomalías geoquímicas regionales de Pb, Zn, Ag, Cu, Au, As, Sb y Bi son indicativas de depósitos. Deben analizarse los minerales pesados obtenidos de bateas.

Es un criterio útil el reconocimiento de patrones de zonificación lateral desde un sector cercano a los depósitos rico en Cu, luego una amplia zona de Pb, Ag y finalmente una prolongación externa rica en Mn y Zn (MORRIS, 1982 en COX, 1983).

Los cuerpos plutónicos a cierta profundidad, pueden localizarse mediante estudios magnéticos terrestres y aéreos. Las técnicas electromagnéticas permiten localizar las mineralizaciones.

#### Pb, Zn, EN METAMORFITAS

Estas mineralizaciones ocurren preferencialmente en metamorfitas de bajo grado; esquistos paleozoicos del Terreno Cajamarca en la Cordillera Central (Grupo Cajamarca, Grupo Ayura Montebello(?)), y de los macizos de Santander (Formación Silgará) y de Quetame (Grupo Quetame); en pocos casos se han hallado en metamorfitas de grado medio y alto (Ej: mineralización en neises en el Municipio de Segovia, Área Fraguas).

Típicamente consisten en venas a veces acompañadas por mineralizaciones de contacto o de reemplazamiento; la mayoría de manifestaciones contiene sulfuros de metales básicos Pb, Zn, Cu acompañados por Au, Ag y cuarzo; en algunos casos el Pb y Zn se extraen como subproducto de pequeñas minas de oro. Algunas mineralizaciones están localizadas cerca de cuerpos plutónicos y localmente se ha observado que la mineralización aumenta hacia el plutón como en el Municipio de Segovia, Área Fraguas (DOQUENDO, 1970) y es posible que todas estén asociadas con cuerpos de origen magmático. En algunas se ha reportado alteración hidrotermal.

La estructura en venas y la paraagénesis de estas manifestaciones sugiere la posibilidad de hallar depósitos de Pb, Zn, Au, Ag en venas especialmente en aquellos cinturones magmáticos de las cordilleras Central y Occidental donde se conocen prospectos para pórfidos cupríferos.

La existencia de algunas manifestaciones de venas de Pb, Zn, Cu sin oro ni plata, que están contenidas en esquistos

gráficas, refuerza la posibilidad planteada por INGEOMINAS-1985 (1986b), que las secuencias metamórficas de esquistos sericiticos con metavulcanitas del Grupo Cajamarca, de la Formación Silgará en el Macizo de Santander y de la Formación Gachalá en el Macizo de Quetame, puedan contener depósitos de Cu, Zn, Pb sedimentario exhalativo en metalodolitas negras.

**Las Nieblas.**— En la Vereda Río Arriba, Municipio de Santsato, Departamento del Quindío, se encuentran los yacimientos de las Nieblas y la Esperanza, uno de los prospectos de plomo, zinc y plata más importantes de la Cordillera Central, de propiedad de la Compañía Minera del Quindío (MELO, 1984).

El depósito, de tipo mesotermal, está relacionado con intrusiones cretácicas de diques y stocks granodioríticos en rocas metamórficas Cambro-ordovicianas, principalmente cuarcitas, esquistos verdes y esquistos sericiticos. La mineralización ocurre en forma de venas controladas estructuralmente y constituidas por galena argentífera, esfalerita, argentita, arsenopirita, pirita y calcopirita. Los filones son de formas irregulares, con espesores beneficiables entre 0.3 y 1 m, y un contenido total de sulfuros entre el 5 y el 10% de Pb, Zn, Ag, Cu. Las reservas para todo el distrito minero se calcularon para el total de sulfuros (mena) en: Indicadas 7.056 toneladas, e inferidas 445.109 toneladas (BARRERD et al, 1971).

El prospecto de La Esperanza está localizado al sur de Las Nieblas y parece ser una continuación de éste. Presenta iguales características geológicas y mineralógicas, lo cual lo hace interesante (MOSQUERA y BUITRAGO, 1971).

#### VENAS DE Pb, Zn (Au) EN PLUTONITAS

Están contenidas en cuerpos plutónicos fásicos a intermedios que afloran en la Cordillera Central (Terrenos Cajamarca, Payandé, Payandé - San Lucas, Cauca Romeral) el Macizo de Santander (Terreno Santander) y en menor proporción en la Cordillera Occidental. La distribución regional de las venas aproximadamente coincide con los cinturones magmáticos donde se han identificado prospectos para pórfidos cupríferos.

La totalidad de las mineralizaciones consisten en venas de sulfuros de metales básicos (Pb, Zn, Cu), frecuentemente con metales preciosos (Au, Ag), pirita, sulfosales, cuarzo y a veces fluorita. En algunos casos el Pb y Zn se obtienen como subproductos de la minería de oro. También se presentan disecciones y reemplazamientos de la roca encajante.

En algunas mineralizaciones se han reportado diferentes tipos de alteración hidrotermal, entre éstos, caolinitización, silicificación, silicificación y cloritización.

La litología encajante varía entre granito, cuarzomonzonita y granodiorita hasta pórfido dacítico andesítico o diorítico.

Los autores que han descrito o estudiado las manifestaciones (véase Tabla 5) las han considerado desde meso-hipotermales hasta meso-epitermales. Las características de éstas venas son semejantes con aquellas contenidas en los depósitos de plomo, zinc y oro en venas.

Las áreas favorables para prospectar depósitos de plomo, zinc y cantidades menores de metales preciosos son los cintu-

ronas magmáticas de las cordilleras Central y Occidental, el Macizo de Santander y La Sierra Nevada de Santa Marta. En cuanto a las venas de oro, plata y cantidades menores de plomo y zinc, los yacimientos de mayor tamaño según INGEOMINAS-USGS (1986b) ocurren en vulcanitas no marinas de composición intermedia a félsica, mientras los más pequeños se presentan en la zona periférica o dentro de las partes superiores de rocas plutónicas félsicas; entonces quizá las venas en cuerpos plutónicos de las Cordillera Central y el Macizo de Santander están asociadas con depósitos de venas de oro y metales básicos de tamaño pequeño, en tanto que las áreas donde afloran vulcanitas no marinas félsicas a intermedias, en la península de la Guajira, cerca de Manizales y entre Popayán y Pasto, son de interés para prospectar depósitos grandes.

**California - Vetes.** - La región de California - Vetes es un antiguo distrito minero de oro y plata, localizado en el Departamento de Santander. La mineralización es del tipo hidrotermal filoniano, con alguna disseminación mineral en las rocas encajantes. Esta relacionada con el emplazamiento de diques y pequeños stocks de roca porfirítica en las migmatitas pre-devónicas y los cuerpos ígneos intrusivos jurásicos (granitos, cuarzodioritas y cuarzomonzonitas) preexistentes. Los minerales metálicos principales son oro y plata y en menor proporción pirita esfalerita, galena, tetrahedrita, calcopirita, y en algunos filones óxidos de uranio. El oro es el metal de principal interés económico; el plomo y el zinc, con tenores generalmente inferiores al 5%, con interés secundario, lo mismo que la plata y cobre presentes (WARD et al, 1970; MENDOZA y JARAMILLO, 1975).

Actualmente las minas del distrito son explotadas exclusivamente para oro, en condiciones rudimentarias de explotación y beneficio. Con métodos adecuados de extracción y tratamiento puede intentarse la recuperación de plomo, zinc, y demás sulfuros como subproductos, tal como se hace en algunos otros depósitos auríferos de similares características en el país.

**Zaragoza - Segovia - Remedios.** - Este distrito minero localizado al noreste del Departamento de Antioquia es uno de los mayores productores de oro en el país. Los filones auríferos se hallan encajados dentro del intrusivo cuarzodiorítico del Batolito de Segovia, con el cual se relacionan. En la mina El Silencio, la más importante del distrito, los sulfuros de plomo y zinc ocurren en los filones como minerales secundarios, con tenores aproximados de 0.5% Pb y 0.8% Zn (HALL et al, 1970). Por flotación se obtienen concentrados de plomo como subproductos de la minería del oro. En Segovia se producen actualmente entre 48 y 50 toneladas mensuales de concentrados (40 a 42% de pureza).

**Marquetalia - Samaná.** - En este distrito minero situado al oriente del Departamento de Caldas, además de las mineralizaciones de sulfuros de plomo y zinc asociadas con filones hidrotermales auríferos de los cuales pueden ser beneficiados como subproductos, existen otros prospectos interesantes como menas de plomo y zinc, tales como La Diamantina (Río La Miel) en Marquetalia y La Gallina y La Sogía en las vecindades de Samaná. Estos prospectos están constituidos por filones hidrotermales polimetálicos (galena, esfalerita, pirita y calcopirita), emplazados hacia las zonas de contacto entre intrusivos cuarzodioríticos y esquistos cuarzosos. Sus características ameritan estudios geológicos y económicos (LOPEZ, 1971a, b).

**Distrito Minero El Centro.**— En este distrito, comprendido por los municipios antioqueños de Abriaquí, Cañasgordas, Frontino y Urrao, también son numerosas las manifestaciones de plomo y zinc en filones auríferos hidrotermales relacionados con cuerpos ígneos intrusivos. En varias minas del distrito se producen a pequeña escala concentrados de plomo y zinc, como subproductos del oro (RODRIGUEZ y PERNET, 1982).

**Riosucio - Marmato.**— Las mineralizaciones de plomo y zinc en este distrito minero, ubicado al occidente del Departamento de Caldas, se presentan en filones auro-argentíferos relacionados con intrusivos porfíricos dacíticos. En los estudios hechos por ECOMINAS (1982a) para la zona baja de Marmato, se calcularon reservas probadas de 150.710 toneladas, probables de 324.673 toneladas y posibles de 1'082.760 toneladas, con tenores promedios de 0.3% de Pb y 5.4% de Zn que pueden ser beneficiados como subproductos (Au: 10.19 gr/ton; Ag: 26.76 gr/ton).

**El Diamante.**— El Área de Piedrancha, comprendida entre las localidades de El Diamante, Paraíso y Bomboná en Mariño, constituye otro sector de interés en el desarrollo de la minería de sulfuros metálicos. Entre los prospectos del Área se destaca como importante el de la mina El Diamante, localizada 12 km por carretera al oeste del municipio de Guachavés.

El yacimiento está formado por filones auríferos polimetálicos, encajados en rocas volcánicas verdes afectadas por pequeños stocks granodioríticos de edad terciaria. La mineralización contiene arsenopirita, esfalerita, pirita, calcopirita y galena. El yacimiento fue estudiado por Japan International Corporation Agency Inc. (JICA) en 1983, mediante el convenio de cooperación entre ese país y Colombia.

Por los estudios de exploración que comprendieron 2.093 m de perforación en 15 pozos, se determinaron reservas explotables de 451.200 toneladas, con un contenido de Au 7.0 gr/ton, Ag 110 gr/ton, Zn 1.68%, Pb 0.11%, Cu 0.22%, As 2.5%, teniendo en cuenta que es explotable el 88% del mineral en el yacimiento. El mineral será beneficiado por cianuración y precipitación por polvos de Zn, obteniéndose oro y plata, para luego recuperar el zinc en concentrados.

El estudio económico de JICA - INGEOMINAS (1984) determina una inversión total de 697 millones de pesos (1983) para la obtención anual de 236 kg de oro, 2.493 kg de plata y 1.094 toneladas de concentrado de zinc (50% de Zn). La vida activa de la mina se calculó en 10.6 años.

En la misma área de Piedrancha, cerca de El Diamante y con un mismo tipo de mineralización, están las minas de La Gitana y La Marina, las cuales no se han estudiado aún, pero parecen presentar perspectivas similares. Igual caso ocurre con los sectores de Paraíso y Bomboná, un poco más distantes de El Diamante (JICA, INGEOMINAS, 1984).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE VENAS DE Au, Pb, Zn EN COLOMBIA

Las áreas donde afloran vulcanitas cenozoicas son las de mayor interés. Los trabajos de cartografía deben ayudar en la localización de intrusiones subvolcánicas asociadas con grandes fallas normales y zonas anulares de fracturas alrededor de calderas y grábenos volcánicos.

En estas áreas de interés la exploración debe concentrarse en la búsqueda de sitios con actividad de fuentes termales productoras de incrustaciones silíceas, en áreas con silicificación y brechamiento, en áreas con enjambres de fracturas con venillas de cuarzo y adularia y en áreas de domos riolíticos intrusivos y exógenos (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Durante la prospección geoquímica debe considerarse que en general el arsénico es el mejor elemento indicador de las mineralizaciones (BERGER, 1982 en COX, 1983).

Las muestras de sedimentos activos deben analizarse para As, Sb, Zn y Hg y las muestras de roca para Au, Ag, As, Sb, Zn, Pb y Hg.

El oro generalmente es de grano fino y únicamente se detecta mediante análisis químicos, especialmente en concentrados de minerales pesados. Es recomendable que los análisis químicos sean hechos por vía húmeda.

La localización de rocas intrusivas y extrusivas puede facilitarse mediante estudios aeromagnéticos. Los centros de mineralización se pueden identificar con la ayuda de técnicas electromagnéticas.

Las anomalías magnéticas planas o negativas, así como las anomalías de polarización inducida espectral (IP) son indicativas de zonas de alteración. A veces son útiles los métodos someros si los depósitos no son diseñados.

## RESERVAS

Según CEPAL (en ECOMINAS, 1982b) las reservas probadas y probables de plomo en América Latina son de 11'484.000 toneladas métricas (contenido metálico) de las cuales el 35% corresponden a los países andinos (Argentina, Bolivia, Colombia, Chile, Ecuador, Perú, Venezuela).

En Colombia no se han evaluado sistemáticamente las reservas de plomo y de zinc, pues las mineralizaciones en las cuales se han estimado reservas son muy pocas y aparecen en la Tabla 7.

## PRODUCCION NACIONAL

Tradicionalmente los concentrados de plomo se han obtenido como subproducto de minas de oro y plata principalmente por la Frontino Gold Mines Ltda. (RODRIGUEZ y PERNEI, 1982). Según un estudio realizado por Castiblanco y Benavides (1985), desde 1970 la producción ha tenido fuertes oscilaciones con tendencia a disminuir a una tasa promedio anual de 10.7% (calculada en valor de la producción en dólares constantes). La producción de concentrados ha disminuido desde 498 toneladas anuales en promedio para el periodo 1970 - 1971 a 350 toneladas promedio entre 1982 y 1983 (Tabla 8); la tasa promedio de disminución ha sido 3.2% anual calculada para el volumen de producción (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985). La producción de plomo en Colombia está marginada a la exploración de metales preciosos y depende de aspectos técnicos de la minería y especialmente del tenor.

En el país no existen plantas para la fundición y refinación del metal, por lo tanto la producción de concentrados se exporta en tanto que se importa plomo metálico; sin embargo,

Fig. 7: Recursos de plomo y zinc en Colombia.

Proyecto	Reservas Indiscriminadas			Tenores	Referencias
	Probadas	Probables	Posibles		
El Cedrillo			100.000	1.33%Pb 0.57%Zn 0.04%Cu	Ward (1970)
Las Vieblas		7.056 (indic.)	445.109 (infer.)	5 a 10%	Barrera et al, 1971
Usocto- Aramato	150.710	324.763	1.082.760	0.3%Pb 5.4%Zn 10.19%Ton/Au 26.76%Ton/Ag	Ecominas (1982a)
La Equis	111.000 (Med.)	12.000	1.600.000	22%Zn 4%Pb 68.999%Ton/Ag 34.299%Ton/Au	Melo (1984) Mining Annual Review (1986)
El Diamante	451.200 (explot.)			1.68% Zn 0.11% Pb 0.22% Cu 2.5 % As 7.09 Ton/Au 11.0 Ton/Ag	JICA (1984)
El Rincon	1.300		1.610	El tonelaje se retiene sulfuros de Zn	

Fig. 8: Producción nacional de plomo.

Año	Producción minera de concentrados			Producción secundaria de plomo refinado
	Volumen (ton)	Valor (miles \$)	Valor (miles \$ 1975) <sup>1</sup>	Volumen (ton) <sup>2</sup>
1970	585	801	1854	
1971	411	699	1459	
1972	126	244	452	
1973	365	823	1268	
1974	301	678	932	
1975	272	626	626	
1976	347	895	715	1500
1977	276	800	494	1500
1978	200	608	320	2000
1979	376	1251	532	2500
1980	312	1372	457	3000
1981	256	1284	348	3000
1982	391	2216	482	3000
1983	308	2060	372	
1984	280			

<sup>1</sup> Valores nominales divididos por el deflector implícito del PIB 1975=100  
cálculos. Castiblanco y Benavides (1985).

<sup>2</sup> Fuente: MInminas. Martínez Simahan (1984), DANE (1985), Castiblanco y  
Benavides (1985).

<sup>3</sup> Tomado de Minerals Yearbook.

se produce plomo refinado metálico a partir de reciclaje de productos que lo contienen. La producción de plomo refinado por reciclaje aumentó de 1.500 toneladas en 1976 a 3.000 toneladas en 1980; posteriormente se estancó (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985). En 1984 Colombia produjo 280 toneladas de concentrados de plomo (DANE, 1985).

### CONSUMO APARENTE DE PLOMO

Castiblanco y Benavides (1985) han calculado el consumo aparente de plomo como la suma de los valores de producción e importaciones menos las exportaciones (Tabla 9); en esos cálculos se incluyen dentro de las importaciones las aleaciones de plomo que alcanzan de 20 a 30% del total, y dentro de la producción se incluye el plomo secundario, el cual representa el 53% de la demanda de plomo refinado (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

TAB. 9: Consumo aparente de plomo en Colombia.

Año	Plomo refinado (ton)
1970	2526
1971	1898
1972	1934
1973	3355
1974	3935
1975	1800
1976	4424
1977	2584
1978	4898
1979	4552
1980	5612
1981	4943
1982	4504
1983	

Fuente: Castiblanco y Benavides (1985).

El consumo aparente ha sido variable hasta 1975; posteriormente ha ocurrido un incremento, especialmente durante el período comprendido entre 1978 y 1980.

Desde 1980 el consumo de plomo ha disminuido con una recuperación a finales de 1983.

Durante el período 1970-1983 el consumo aparente ha aumentado a una tasa promedio anual comprendida entre 7.2% y 7.5% (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

El consumo nacional de plomo está distribuido de la siguiente manera: 30% en la industria de las baterías, 30% en la fabricación de cables de conducción, 20% como óxido de plomo en la industria de las pinturas y el 20% restante está distribuido en otras industrias, entre ellas la Industria Militar (DANE, 1985).

El consumo de plomo en aditivos a la gasolina es muy reducido; solo un 1 a 2% de la gasolina producida por ECOPEIROL contiene 1 a 3 mililitros de tetraetilo de plomo por galón (ECOPEIROL, 1985 en CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

## COMERCIO

## IMPORTACIONES

Las importaciones de plomo metálico y de sus productos durante el período 1976-1983 (Tabla 10), oscilaron bruscamente y mostraron una leve tendencia decreciente. En 1985 se importaron 810 toneladas de plomo por un valor CIF de 627.000 dólares (DANE, 1985).

Teniendo en cuenta los valores promedios de las importaciones correspondientes a los años 1970-1971 (US\$ 3525) y 1981-1982 (US\$ 3211) Castiblanco y Benavides (1985), calculamos una tasa de disminución en las importaciones de 1%, durante el período 1970-1982. El 53% del valor total de las importaciones estuvo representado por plomo en bruto, el 45% por productos intermedios tales como óxidos, barras, perfiles, planchas, hojas, tiras, etc. y sólo el 2% por productos manufacturados, tubos y accesorios para tuberías (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985). Las importaciones por productos, entre 1981 y 1985 se presentan en la Tabla 11.

## EXPORTACIONES

Colombia ha exportado principalmente concentrados de plomo. La evolución de estas exportaciones ha sido muy irregular con una tendencia de decrecimiento.

Entre 1970 y 1975 las exportaciones totales fueron US\$ 127.000 promedio anual (dólares de 1983) y las de concentrados de plomo de US\$ 102.000, en tanto que durante el período 1976-1982 (Tabla 12) las exportaciones anuales promedio fueron US\$ 341.000 totales y US\$ 267.000 de concentrados (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

Desde 1970 las exportaciones de concentrados de plomo representan entre el 78 y 80% del valor total de las de este metal; el segundo lugar lo ocupan las exportaciones de manufacturas de plomo y en último lugar las muy esporádicas de metal en bruto y de productos intermedios.

## PERSPECTIVAS DEL MERCADO NACIONAL DEL PLOMO

## PROYECCION DE LA DEMANDA

Mediante la correlación estadística entre el consumo aparente de plomo y el producto interno bruto total del país, para el período 1970-1982, Castiblanco y Benavides (1985) encontraron la siguiente ecuación de regresión lineal entre esas variables:

$$\text{Consumo de plomo (ton)} = 2.147.7 + 0.132226 \times (\text{Producto Interno Bruto total en millones de pesos de 1985}).$$

coeficiente de correlación 0.77

Además los autores citados, considerando la hipótesis optimista de un crecimiento anual de 6% en el producto interno bruto, estimaron para el año 2005 una cuadruplicación del consumo nacional a 22.500 toneladas. De manera similar, suponiendo la hipótesis pesimista de un crecimiento anual del 4% en el producto interno bruto calcularon para el año 2005, un consumo de 14.700 toneladas, lo cual equivale a 2.6 veces el consumo de 1983.

TAB. 10: Importaciones de plomo.

	(Volumen kgs.)									
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Plomo bruto	2.923.694	484.174	2.898.343	2.051.876	2.612.804	1.943.396	1.504.396	1.328.000	618.000	790.000
Productos intermedios	2.046.953	1.236.845	814.451	936.513	842.000	1.431.526	1.321.915	45.000	17.000	19.000
Manufactur.	7.258	8.394	12.848	5.448	2.123	2.783	17.881	-	-	1.000
<b>Total</b>	<b>4.977.905</b>	<b>1.729.413</b>	<b>3.725.642</b>	<b>2.993.837</b>	<b>3.456.927</b>	<b>3.377.705</b>	<b>2.844.192</b>	<b>1.373.000</b>	<b>635.000</b>	<b>810.000</b>
<b>Valor C.I.F. en dólares corrientes</b>										
Plomo bruto	1.370.672	348.519	2.098.766	2.422.427	3.497.846	1.993.318	1.355.188	989.000	392.000	513.000
Productos intermedios	947.794	516.143	765.563	1.301.724	1.233.716	1.680.083	1.345.267	95.000	103.000	105.000
Manufactur.	29.614	33.439	22.598	18.199	12.546	16.988	23.055	9.000	13.000	9.000
<b>Total</b>	<b>2.348.080</b>	<b>898.101</b>	<b>2.886.927</b>	<b>3.742.350</b>	<b>4.744.108</b>	<b>3.690.389</b>	<b>2.723.510</b>	<b>1.093.000</b>	<b>508.000</b>	<b>627.000</b>
<b>Valor dólares constantes de 1983</b>										
Plomo bruto	1.925.101	461.004	2.575.173	2.641.687	3.624.710	2.019.572	1.364.741			
Productos intermedios	1.331.171	682.729	939.341	1.419.546	1.278.462	1.641.421	1.354.750			
Manufactur.	41.592	44.231	27.727	19.846	13.001	17.212	23.217			
<b>Total</b>	<b>3.297.864</b>	<b>1.187.964</b>	<b>3.522.231</b>	<b>4.081.079</b>	<b>4.916.173</b>	<b>3.678.205</b>	<b>2.742.708</b>			

Fuente: Cálculos propios a partir de Anuarios de Comercio Exterior del DANE.

PRODUCTO	1981		1982		1983		1984		1985	
	ton.	miles	ton.	miles	ton.	miles	ton.	miles	ton.	miles
	met.	US\$ CIF	met.	US\$ CIF	met.	US\$ CIF	met.	US\$ CIF	met.	US\$ CIF
	20	22	20	20	80	57	29	20	-	-
Metal en Plomo refinado en bruto sin alear	270	257	316	252	494	300	308	153	338	178
bruto Aleaciones de plomo	-	-	10	22	-	-	-	-	-	-
Plomo aleado no especificado	10654	1715	1158	1062	754	632	281	219	452	335
Desperdicios y desechos de plomo	36	74	0	2	-	-	-	-	-	-
Barras y perfiles	408	462	275	307	2	10	0	9	-	-
Productos Alambres	1	7	0	2	8	31	1	12	0	1
interme- Planchas, hojas y tiras	177	186	100	95	30	24	3	7	2	4
dios Hojas y tiras delgadas	14	103	12	81	5	30	13	75	17	100
Polvo y partículas de plomo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubos de plomo	0	2	0	1	0	0	-	-	1	1
Manufac- Accesorios no especificados	-	-	14	21	0	6	0	5	0	5
turas Envases blindados	0	2	-	-	-	-	-	0	0	0
Manufacturas no especificadas	2	13	4	9	0	3	0	9	0	2
Total	11582	2843	1909	1874	1373	1093	635	509	810	627

Fuente: DANE (1986)

IAR. 12: Exportaciones de plomo.

	(Volumen kgs.)						
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Míneral	233.550	346.086	200.860	312.387	360.998	92.104	331.203
Pb en bruto	-	-	-	-	16.257	60.036	-
Productos Intermedios	-	1.288	16.054	39.852	-	900	-
Manufacturas	9.993	16.487	82.336	21.458	63.663	11.674	16.235
Total	243.543	363.861	299.250	373.697	440.918	164.714	347.438
	Valor en dólares constantes						
Míneral	144.803	230.820	199.189	298.800	609.326	48.096	336.354
Pb en bruto	-	-	-	-	14.050	67.713	-
Productos intermedios	-	3.472	6.509	72.695	-	1.824	-
Manufacturas	15.066	25.321	124.471	29.689	122.000	41.016	40.821
Total	159.869	259.613	330.169	401.184	745.376	158.649	377.175

FUENTE: Cálculos a partir de anuarios de Comercio Exterior del DANE.

## PROYECCION DE LA OFERTA

Las minas de La Equis y El Silencio producirán concentrados de plomo como subproducto de la explotación de metales preciosos. La proyección de la oferta de plomo refinado secundario ha sido calculada por Castiblanco y Benavides (1985), bajo las siguientes hipótesis: la primera, que la oferta crecerá al mismo ritmo de la demanda; la segunda, que la oferta crecerá según la tasa promedio (media geométrica) obtenida durante el período 1976 - 1982; las tasas de crecimiento de la oferta son 5% y 3.26% respectivamente. Según estas estimaciones se considera que la producción en el año 2005 puede multiplicarse con respecto a 1983 en un caso, o multiplicarse por 2.6 en el otro caso; sin embargo, si la demanda y los precios del plomo disminuyen siguiendo las estimaciones pesimistas, puede afectarse el crecimiento de la producción durante el período de la proyección (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

Los aumentos importantes en la oferta interna de plomo sustinada al consumo nacional, deben esperarse principalmente del aumento del reciclaje de plomo, puesto que no existen plantas de fundición refinado, y no se justifica su instalación debido al reducido volumen de la producción minera.

Castiblanco y Benavides (1985) utilizaron las proyecciones de la oferta y la demanda de plomo, y los precios anuales promedio del plomo durante 1981-1983, para calcular el valor de las importaciones del metal en el período 1990 para calcular el valor de las importaciones del metal en el período 1990-2005 (Tabla 13). Estos cálculos suponen que la estructura de la demanda permanece invariable hasta el año 2005. Según los resultados de la estimación, las importaciones de plomo alcanzarían en el año 2005 de 3 a 5 millones de dólares en el caso más optimista y 10.5 millones de dólares en el caso más pesimista (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

Fig. 13: Proyecciones futuras del mercado de plomo en Colombia.

Producto Interno Bruto total		Consumo plomo refinado		Produc. Concen. para exportar	Oferta Plomo refinado		Importaciones de metal			
							Alta		Baja	
Millones \$ de 1975		Tons.		(Tons. concentrados)	(toneladas)		Valor	Valor	Valor	Valor
Alta 6%	Baja 4%	Alta	Baja		Alta 5%	Baja 3.26%	Ton.	(10 <sup>8</sup> US\$)	Ton.	(10 <sup>6</sup> US\$)
								1983		1983
777426	706800	8132	7198	588	4200	3800	2998	1.85	4332	2.68
1040371	859930	11609	9223	588	5400	4400	3823	2.36	7209	4.47
1392252	1046237	16262	11686	588	6900	5200	4786	2.96	11062	6.95
1863147	1272907	22487	14684	-	8800	6100	5884	3.64	16387	10.15

de Castiblanco y Benavides (1985).

## BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, G.M., 1980.- Mississippi Valley-Type Deposits en: Ore Deposits Workshop, Section one: 3-45. Toronto.
- BARRERO, D., LOZANO, H., 1976.- Mapa Metalogénico de Colombia. Ingeominas. 1:2.500.000, Bogotá.
- BARRERO et al, 1971.- Geología del depósito de plomo-zinc-plata de Las Nieblas. Informe 1580. Ingeominas, 26 p. Bogotá.
- BARTOK, P., BEIJERS, T.J.A., JUHAS, Z.L., 1981.- Lower Cretaceous Cogollo Group Maracaibo Basin, Venezuela: Sedimentology, Diagenesis and Petrophysics. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 65(6):1110-1184. Tulsa, Oklahoma.
- BEALES, F.W., JACKSON, S.A., 1968.- Pine Point: A stratigraphical approach. Can Mining Metallurgy Bull. 61:867-878.
- BJORLYKKE, A., SANGSTER, D.F., 1981.- An overview of Sandstone Lead Deposits and their relation to Red-Bed Copper and Carbonate-Hosted - Lead-Zinc Deposits. Econ. Geol. 75th. Ann. Vol. 179-213. New Haven, Connecticut.
- BOAST, A.M., COLEMAN, M.L. and HALLS, Ch., 1981.- Textural and stable isotope evidence for the genesis of the Tynagh base metal deposit, Ireland. Econ. Geol. 76, p.27-55.
- BOUSSINGAULT, J.B., 1830.- Análisis de la blenda negra de Mar-mato. Anal. de Fis. y Quím. (Paris). Inst. Geol. Andes, Colombia (45):312-316, Bogotá.
- BRISKEY, J.A., 1982.- Summary of the general geologic characteristics of sandstone - hosted lead-zinc deposits in characteristics of Mineral Deposit Occurrences. U.S. Geol. Surv. Open-file Rep. 82 795, p. 183-185.
- BUENAVENTURA, J., 1975.- Ocurrencias Minerales en la Región Norte del Departamento del Tolima. Inf.1688. Ingeominas, 397 p. Bogotá.
- BUENAVENTURA, J. et al, 1976.- Ocurrencias Minerales en las Regiones Sur y Oriental del Departamento del Tolima. Inf. 1694. Ingeominas, 392 p.
- BUENO, J., 1948.- Breve Reseña Explicativa del Croquis Geológico del Departamento de Nariño que presenta el Laboratorio de Fomento Minero de Pasto al Servicio Geológico Nacional. Inf. 625. Inst. Geol. Nal. 64 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1952.- La Región Metalífera de San Joaquín, Municipio de Mercaderes (Cauca). Inf. 889. Inst. Geol. Nal. 18 p. Bogotá.
- BUITRAGO, C., BUENAVENTURA, J., 1975.- Ocurrencias Minerales en la Región Central del Departamento del Tolima. Inf. 1672. Ingeominas. 837 p. Bogotá.
- BUITRAGO, C., BUENAVENTURA, J., PEREZ, H., 1976.- Ocurrencias Minerales en el Departamento del Huila. Inf. 1698. Ingeominas, 503 p. Bogotá.

- MACRES, C., MAGYESI, I., 1967.- **Geología Económica del Norte de Santander.** Inf. 1524. Serv. Geol. Nal. 61 p. Bogotá.
- CALLÉ, B., SALINAS, R., 1986.- **Geología y Geoquímica de la Plancha 165, Carmen de Atrato.** Informe 1987. Ingeominas, 140 p. Bogotá.
- MANWARDIA, A. Jr. 1983.- **Zinc en: Mineral Facts and Problems** pp. 1025-1042.
- CORDOZO, E. et al. (en preparación). **Geología y Estratigrafía de la Plancha 208, Villeta.** Ingeominas, Bogotá.
- CASTIBLANCO, H., BENAVIDES, F., 1985.- **Estudios para la formulación del Plan Nacional de Desarrollo Minero. Plomo y zinc. Área económica.** Consorcio Instituto de Estudios Colombianos. INTEGRAL, 77 p. Bogotá.
- COE, D.P. (editor), 1983.- **Mineral Resource Assessment of Colombia. Ore Deposit Models.** Ingeominas-USGS. Open File Report 83-423. Menlo Park, California. 54 p.
- CRADDOCK, P.T. et al. 1985.- **Early zinc production in India.** Mining Magazine Jan. 1985: 45-52.
- STAMFORD, J., HOAGLAND, A.D., 1968.- **The Mascot-Jefferson City zinc district, Tennessee, on Ridge J.D.** Editor. Ore Deposits of the United States, 1933-1967. AIME: 242-250. N.Y. New York.
- DELLAR, J., MDRA, M., 1985.- **Estudio Geológico del Yacimiento de Oro de Marato.** Congr. Latinoamericano Geol. Memoria Tomo II; 342-377. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1985.- **Exportaciones e importaciones primer semestre 1984.** 307 p. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1982a.- **Proyecto de Explotación Zona Baja Marato.** Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1982b.- **Minería en América Latina. Cifras.** Separata Eco-minas. Nov. Dic. 1982. 16 pag. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1971.- **Ocurrencias Minerales en el Departamento del Chocó.** Inf. 1620. Ingeominas. 66 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1978.- **Cobre en: Recursos Minerales de Colombia.** Pub. Geol. Esp. 1, Ingeominas, 441-458. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1978.- **Plomo y zinc en: Pub. Geol. Esp. 1, Ingeominas, Bogotá.**
- INGEOMINAS, 1969.- **Contornos sucesivos del Mar Cretáceo en Colombia.** 1er. Cong. Col. de Geol. Mem:217-253. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1982.- **Intrusiones básicas cretácicas de la Cordillera Oriental.** Geol. Norandina 6: 19-28. Bogotá.
- FRANKLIN, J.M., SANGSTER, D.M., & LYDON, J.W., 1981.- **Volcanic Associated massive sulfide deposits.** Econ. Geol. 75th Ann. Vol. p.485-627.

- GARZON, A., 1975a.- *Prospección Geoquímica en Suelos en Ubalá-Cueva Oscura y Río Farallones, Región del Guavio. Inf. 1691. Ingeominas, 17 p. Bogotá.*
- GIL, E., 1976.- *Ocurrencias Minerales en el Departamento de Cundinamarca. Inf. 1708. Ingeominas 40 p. Bogotá.*
- GOLDSCHMIDT, V.M., 1937.- *The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. Jour. Chem. Soc. p. 655. Bogotá.*
- GOVERNMENT OF JAPAN, OVERSEAS TECHNICAL COOPERATION AGENCY, 1965.- *Report on the investigation at ore deposits in Colombia. 75 p.*
- GUARIN, G., 1971.- *Ocurrencias Minerales del Departamento de Risaralda. Inf. 1636. Ingeominas, 66 p. Bogotá.*
- GUSTAFSON, L.B., WILLIAMS, N., 1981.- *Sediment-Hosted Stratiform Deposits of Copper, Lead and Zinc. Econ. Geol. 75 th Ann. Vol. 139-178, New Haven, Connecticut.*
- GUTIERREZ, G. et al, 1953.- *Estudio de campo del laboratorio sobre unos yacimientos de plomo, zinc y plata, situados en Valparaiso, Antioquia. Inf. 976. Ingeominas, Bogotá.*
- HAGNI, R.D., 1976.- *Tri-state ore deposits: the character of their host rocks and their genesis. En K.H. Wolfe, Ed: Handbook of strata-Bound and Stratiform Ore Deposits. Elsevier, Amsterdam, v. 6 p. 457-491.*
- \_\_\_\_\_, 1982.- *The influence of original host rock character upon alternation and mineralization in the Tri-state district of Missouri, Kansas and Oklahoma, U.S.A. In: G. C. Amstute A. El Goresy, G. Frenael, C. Kluth, G. Moh, A. Waushkuhn and R.A. Zimmermann, Eds., Ore Genesis: The State of the Art. Springer-Verlag New York, Heidelberg, Berlin, p. 97-107.*
- HALL, R. et al, 1970. *Recursos Minerales de Parte de los Departamentos de Antioquia y Caldas. Bol. Geol. Vol. XVIII, No. 2, 90 p. Bogotá.*
- HEYL, A.V., 1968.- *The Upper Mississippi Valley Base-Metal District. en: Ridge, J.D. Ore Deposits of the United States, 1933-1967. Vol. 1 chap. 21: Aime 433-457, N.Y. New York.*
- \_\_\_\_\_, 1982.- *Mineral deposit occurrence model for the viburnus trend subregion of the southeast Missouri base metal and barite district. in: Características of Mineral Deposit Ocurrences: U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 82-795, p. 158-171.*
- HISCOCK, S.S., 1986.- *Lead en: Min. Ann. 1986. p. 33-34.*
- HOAGLAND, A.D., 1976.- *Appalachian lead-zinc deposits. En K.H. Wolfe, Ed., Handbook of strata-Bound and Stratiform Ore Deposits. Elsevier, 46 p. 495-534. Amsterdam.*
- INGEOMINAS-U.S.G.S., 1986a.- *Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publ. Geol. Esp. Ingeominas. 14: 235 p. Bogotá.*

- 1986b.- Evaluación de los Recursos Minerales no Combustibles de Colombia. Inf. de Proyecto Cooperativo. Ingeominas U.S.G.S. Ed. Prel. Publ. Geol. Esp. Ing. 14. 55 p. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1984.- Estudio preliminar de factibilidad del desarrollo del Area El Diamante-Paraiso-Bomboná, Departamento de Nariño Proyecto de Ingeominas 191 p.
- LASSEN, I., MOSQUERA, D., BUITRAGO, C., 1971.- Prospección Geoquímica al Este del Municipio de Salento, Departamento del Quindío. Inf. 1597. Ingeominas, 42 p. Bogotá.
- LARGE, D. 1980.- Geologic parameters associated with sediment hosted, submarine exhalative Pb-Zn deposits: an empirical model for mineral exploration, in stratiform Cu-Pb-Zn deposits. Geolog.Jahrbuch, Reihe D., Heft 40, p. 59-129.
- LEON, L.A., PADILLA, E., MARULANDA, N., 1973.- Geología, Recursos Minerales y Geoquímica de la parte Noroeste del Cuadrángulo 0-5 Bordo, Departamento del Cauca. Inf. 1652. Ingeominas, 222 p. Bogotá.
- LEVINSON, A., 1974.- Introduction to Exploration Geochemistry. Appl. Publ. Ltd. Calgary, 612 p. Canada.
- 1980.- Introduction to Exploration Geochemistry. 2a. ed. The 1980 Suppl. Appl. Publ. Ltd Wilmette 924 p.
- LOPEZ, J.H., 1971a.- Reconocimiento de la Mina La Sonora. Inf. 1587. Ingeominas, 9 p. Bogotá.
- 1971b.- Recursos Minerales del Departamento de Caldas. Inf. 1602. Ingeominas, 123 p. Bogotá.
- LOZANO, H., PEREZ, H., MOSQUERA D., 1975.- Prospección Geoquímica al Este del Municipio de Salento, Quindío y Cajamarca, Tolima. Inf. 1692. Ingeominas, 103 p. Bogotá.
- MCGREGOR, B.R., WALL, A.J., 1984.- Lead en: Mining Ann. Rev. 1985. 63-64 p.
- 1985.- Lead en: Min. Ann. Rev. 1985. p. 62-63.
- MARIÑO, J. A., 1976.- Ocurrencias Minerales en el Departamento de Boyacá. Inf. 1710 Ingeominas, 41 p. Bogotá.
- MAYNARD, J.B., 1983.- Geochemistry of Sedimentary Ore Deposits. 304 p., Springer-Verlag. New York.
- MEEZE, W.E., 1984.- Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perijá, northwestern Venezuela: Geology and Tectonic environment of red beds and volcanic rocks. Geol. Soc. Amer. Mem. 162: 263-282, Boulder, Colorado.
- McLAUGHLIN, D.H. Jr., ARCE, M., 1971.- Recursos Minerales de parte de los Departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta. Bol. Geol. XIX(1): 103 p., Bogotá.
- MUJICA, R., NICHOLLS, E., 1953.- Informe sobre la Mina El Sapo, Municipio del Valle, Departamento del Tolima. Inf. 950. Inst. Geol. Nal. 8 p. Bogotá.

- MELD, H., 1984.- Informe sobre las tendencias en el mercado internacional y las estructuras productivas de minerales y metales relevantes al caso colombiano. IEC-INTEGNPC. 84p.
- MENDOZA H., 1983.- Distribución y metalogénesis de los depósitos minerales de la Cordillera Oriental de Colombia entre los 4° y 9° latitud norte. 10a. Conf. Geol. del Caribe. Resúmenes. - p. 53 Cartagena.
- MENDOZA, H.; JARAMILLO, L.E., 1975.- Geología y Geoquímica del Área de California, Santander. Inf. 1687. Ingeominas, Bol. Geol. XXII (2). 105 p. Bogotá.
- MINING ANNUAL REVIEW, 1986.- Colombia (por un corresponsal especial). Mining Annual Review, 1986. p. 320-321.
- MORALES et al, 1958.- General Geology and oil occurrences of middle Magdalena Valley, Colombia. En: Habitat of Oil Symposium. Am. Assoc. Pet. Geol. Stud. Geol.: 641-691, Tulsa, Oklahoma.
- MORRIS, H.T., HEYL, A.V., HALL, R.B., 1973.- Lead. en: U.S. Min. Res. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap 820. p. 313-332,
- MOSQUERA, D.; BUITRAGO, C., 1971.- Depósitos Minerales del Departamento del Quindío. Inf. 1599. Ingeominas, 88 p. Bogotá.
- MUTIS J., V. 1983.- Catálogo de yacimientos, prospectos y manifestaciones Minerales de Colombia. Publ. Geol. Esp. Ingeominas 13, 462 p. Bogotá.
- OQUENDO, E., 1970.- Ocurrencias Minerales en los Municipios de Zaragoza, Segovia y Remedios. Inf. 1574 Ingeominas, (Parte II), 54 p. Bogotá.
- OTERO, A., 1975.- Ocurrencias Minerales en el Departamento de Santander del Sur. Inf. 1686. Ingeominas. Bucaramanga.
- OTERO, A. ANGARITA, L., 1975a.- Ocurrencias Minerales en el Departamento de Norte de Santander. Inf. 1685. Ingeominas 85 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1975b.- Ocurrencias Minerales en el Departamento de Santander del sur. Inf. 1686. Ingeominas, 107 p. Bogotá.
- QUINTERO, R., 1958.- Manifestaciones de Minerales de Plomo y Zinc en la región de Marquetalia, Departamento de Caldas. Inf. 1296. Serv. Geol. Nal., 21 p. Bogotá.
- RANKAMA, L., SAHAMA, G., 1954.- Geoquímica. Aguilar, Madrid. 82 p.
- RATHJEN, A., 1983.- Lead. en Mineral Facts and Problems, p. 493-511.
- RENFRO, A.R., 1974.- Genesis of Evaporite Associate Stratiform Metalliferous Deposits. A. Sabkha Proces. Econ. Geol. 69 (1): 33-45, New Haven, Connecticut.
- REYES, J., 1973.- Prospección Geoquímica. Área del Cure, Norte Santander. Inf. 1656. Ingeominas, 53 p. Bogotá.

- RICHARD, D.T., et al.- 1979.- Studies on the genesis of the Långavall sadstone Lead-Zinc deposits Sweden. Econ. Geol. 74: 1255-1285.
- RONIGUEZ, E., 1972.- Ocurrencias Minerales en los Cuadrángulo J-11 (Chiquinquirá), J-12 (Tunja), J-13 (Sogamoso) y parte del J-10 (La Palma) y K-10 (Villeta). Inf. 1617. Ingeominas, 90 p. Bogotá.
- RONIGUEZ, J., PERNET, A., 1982.- Recursos Minerales de Antioquia. Inf. 1885. Ingeominas, 167 p. Medellín.
- RONA, P. A., 1984.- Hydrothermal Mineralization at Seafloor Spreading Centers. Earth-Sci. Rev. 20 (198d) 1-104
- RUSE, A.W., HAUKES, H.E., WEBB, J.S., 1979.- Geochemistry in Mineral Exploration. Acad. Press. 2a. ed. London. 657 p.
- RESAS, H., 1976.- Recursos Minerales del Departamento del Cauca. Inf. 1724. Ingeominas, Bogotá.
- RIBO Y GOMEZ, J., 1940.- Datos sobre la Geología Económica del Departamento del Huila. Bol. de Minas y Petróleos. No. 121-144, p. 147-205. Bogotá.
- RICE, P., 1971.- Mapa Minero del Departamento del Cauca, Parte Noroeste. Inf. 1601. Ingeominas, 30 p. Bogotá.
- SANDOVAL, L., 1952.- El Yacimiento Vilachi, Municipio de Santander, Departamento del Cauca. Inf. 803A. Inst. Geol. Nal., 5 p. Bogotá.
- SANGSTER, D.F. 1976.- Carbonate-hosted lead-zinc deposits. In: K.H. Wolfe, ed., Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits. v. 6. Elsevier, Amsterdam. p. 447-454.
- 1981.- Three potential sites for the occurrence of stratiform, shale-hosted lead-zinc deposits in the Canadian Arctic. Geol. Surv. Can. Paper 81-A: 1-8.
- SARMIENTO, L.F., 1985a.- Condiciones geológicas favorables de las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de plomo y zinc. Inf. 1953. Ingeominas: 1-37, Bogotá.
- 1985b.- Las mineralizaciones de Cu, Pb, Zn, en las sedimentitas del Jurásico Superior y Cretácico de la cordillera Oriental de Colombia. Ingeominas, 12 p. Bogotá.
- SARMIENTO L.F. et al, 1985.- Importancia de la Estratigrafía en la evaluación de las anomalías geoquímicas; caso del área del Río Zumbé, Utiaca (Cundinamarca) en: Proyecto Cretácico. Contribuciones. Publ. Geol. Esp. No. 16, Ingeominas. Capítulo XXVIII: 5-10, Bogotá.
- SCHWINS, F.J., 1976a.- Metal Deposits related to intercontinental hotspot rifting environments. Jour of Geol. 84, (76) p. 653-672.
- 1976b.- Massive Sulfide deposits in relation to geotectonics. In: Strong D F (ed) Metalogeny and Plate Tectonics. Geol. Assoc. Can. Spec. Publ. 14:221-240.

- 1984a.- **Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics.** Springer-Verlag. Berlin. 325 p.
- 1984b.- **Dre genesis by episodic dewatering of sedimentary basins: Application to giant Proterozoic lead-zinc deposits.** Geol. 12:451--454 Boulder, Colorado.
- SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL, 1949.- **Contribución al conocimiento de la riqueza mineral en Colombia.** Inf. 709. 143 p. Bogotá.
- SINGER, D.A., MOSIER, D.L., (editores), 1983.- **Mineral Deposit Grade Tonnage Models.** United States Department of the Interior Geol. Survey. Open-File. Report 83-623. 100 p.
- SNYDER, F.G., and GERDEMANS, P.E., 1969.- **Geology of the south east Missouri lead district.** in: Ridge, D., ed., **Dre deposits of the United States, 1933-1967.** Am. Inst. of Mining Eng., p. 326-358. New York,
- STOLL, C., 1962.- **Notes on the mineral resources of Ecuador.** Econ. Geol. 57: 799-808.
- SUAREZ-HOYOS, V., 1943.- **Reconocimiento Geológico de la Región del Guavio, Gachalá.** Inf. 399. Inst. Geol. Nal. 64 p. Bogotá.
- SUESCUN, D., 1959.- **Yacimientos de sulfuros "Esmeraldas" Municipio de Mercaderes, Departamento del Cauca.** Publicación Especial, Serv. Geol. Nal., 13 p. Bogotá.
- TOURTELLOI, E.B., and WINE, J.D., 1976.- **Copper deposits in Sedimentary and volcanogenic rocks.** U.S. Geol. Surv. Prof. paper 907-C, 34 p.
- ULLOA, C., RODRIGUEZ, E., 1976.- **Geología del cuadrángulo K-12 Guateque, Colombia.** Inf. 1701. Ingeominas, 50 p. Bogotá.
- 1979.- **Geología de las Planchas 170 Vélez y 190 Chiquinquirá.** Inf. 1794. Ingeominas, Bogotá.
- VARGAS, R., et al., 1976.- **Geología del Cuadrángulo I-13, Málaga.** Inf. 1712. Ingeominas, Bol. Geol. 24 (3): 1-76, Bogotá.
- WALL, A.J., MACGREGOR, B., 1984.- **Lead en: Mining Annual Rev.** 1984.
- WARD, D.E. et al, 1970.- **Recursos Minerales de parte de los Departamentos de Norte de Santander y Santander.** Bol. Geol. XVIII (3) 140 p.
- WEDEPOHL, K.H., 1969.- **Composition and Abundance of common sedimentary Rocks.** in: Handbook of Geochemistry, vol. 1. p. 250-271.
- WEDOW, H. Jr., et al., 1973.- **Zinc en: Mineral Resources.** U.S. Geol. Surv. Prof. pap. 820. p. 697-710. Washington.
- WOKITTEL, R., 1954a.- **Informe Preliminar sobre los yacimientos de Minerales del Municipio de Urrao, Departamento de Antioquia.** Inf. 1025. Inst. Geol. Nal., 8 p. Bogotá.

- 1954b.- Yacimientos de Minerales de Morro de Urrea, Departamento de Antioquia. Inf. 1055. Serv. Geol. Nal. 17 p. Bogotá.
- 1959.- Geología Económica del Chocó. Bol. Geol. Vol. VII, No. 1-3, p. 123-162. Bogotá.
- DOBURY, W.D., 1984.- Lead en: Minerals Yearbook, U.S. Dept. of Int. 1983. p. 533-561. Washington.
- 1985.- Lead en: Minerals Yearbook 1984. vol. I, Metals and Minerals. U.S. Dept. of Int. p. 563-594, Washington.

## MINERALES DE RENIO

OSCAR HERNANDO PULIDO U.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	444
Introducción .....	444
Usos .....	445
Ambiente Geológico .....	445
Geoquímica .....	445
Mineralogía .....	445
Tipos de Depósitos .....	446
Prospección .....	446
Explotación .....	446
Metalurgia .....	446
Situación Mundial .....	446
Producción .....	446
Reservas y perspectivas .....	447
El Renio en Colombia .....	447
Conclusiones .....	447
Bibliografía .....	448

## RESUMEN

El renio (Re) es un metal escaso que generalmente se presenta como elemento libre dentro de varios minerales, especialmente molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), de donde es recuperado como subproducto en depósitos de tipo pórfido, siendo Chile el principal país productor.

El renio se utiliza principalmente como catalizador en la producción de gasolina de alto octanaje, y en aleaciones con tungsteno y molibdeno, comúnmente usadas en la fabricación de termocuplas.

Aunque en el territorio colombiano se conocen varios prospectos de tipo pórfido de cobre y molibdeno, en ninguno se ha reportado la presencia de renio.

## INTRODUCCION

El renio es un metal raro y escaso, de color blanco plata, descubierto en 1925 por W. Noddack, I. Tacke y O. Berg, en un análisis de Rayos X realizado sobre un concentrado de columbite. Antes de su descubrimiento, Mendelejev lo predijo, asignándole el número 75 en su Tabla Periódica.

Antes de la Segunda Guerra Mundial el renio se obtenía en Alemania, a partir de residuos de la fundición de cobre y potasio. En 1942 se comenzó a producir renio en la Universidad de Tennessee (USA), tratando residuos provenientes de la fundición de molibdenita. La URSS también ha producido renio, a partir de la década del 70.

El renio posee propiedades físicas muy especiales: gravedad específica de 20,5, superada tan sólo por los elementos del grupo del platino, y punto de fusión de 3.180°C, aventajado únicamente por el del tungsteno y del carbono.

### USOS

Antes de la Segunda Guerra Mundial, la mayoría del renio producido comercialmente fue utilizado en la fabricación de termostatos (equipo diseñado para convertir energía calorífica en energía eléctrica). Más tarde, se usó en la fabricación de aleaciones con tungsteno y molibdeno, en equipos electrónicos como catalizador.

Dos usos principales se le han dado al renio durante los últimos años, como catalizador y en aleaciones (TORRES, 1982 y MCGGS, 1984). Como catalizador se utiliza junto con el platino, en la producción de gasolina de alto octanaje, con poco o nada de plomo, donde el renio aumenta la tolerancia a la acumulación de carbón, permitiendo operar a temperaturas más altas y a presiones más bajas. En aleaciones, el renio se une principalmente con tungsteno y molibdeno, para aumentar la estabilidad. Las aleaciones renio-tungsteno y renio-molibdeno se utilizan en una variedad de productos tales como termostatos, tubos de Rayns X, tubos de vacío, contactos eléctricos, bobinas de flash y recubrimientos metálicos.

Casi el 90% del renio consumido durante los últimos años, en los Estados Unidos, se ha empleado como catalizador.

### AMBIENTE GEOLOGICO

#### GEOQUIMICA

Las principales características químicas y geoquímicas del renio, según Rose et al. (1979), son las siguientes: símbolo químico, Re; número atómico, 75; peso atómico, 186,2; contenido promedio en partes por millón: en rocas ígneas máficas, 0,0006; en rocas ígneas graníticas, 0,0006; en areniscas, 0,0005; en shales, 0,0005. Asociaciones: siderófilo, íntimamente asociado al molibdeno en la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ); también ocurre como  $\text{ReS}_2$  en algunos yacimientos de areniscas cupríferas. Fuente industrial: como subproducto en los procesos metalúrgicos del molibdeno. Movilidad: probablemente muy alta, mayor que la del molibdeno.

Aplicaciones en la prospección geoquímica: La mayor movilidad del renio, sobre el molibdeno, podría hacer del primero un elemento guía muy útil en la búsqueda de depósitos del segundo; sin embargo, las dificultades existentes en la actualidad, para la determinación cuantitativa del renio, limitan su uso en este campo.

El contenido promedio de renio en los depósitos del tipo sulfuro de cobre y molibdeno, es de 660 ppm (ROSE et al., 1979).

#### MINERALOGIA

Aunque en el laboratorio se conocen óxidos ( $\text{ReO}_2$ ,  $\text{ReO}_3$ ,  $\text{Re}_2\text{O}_7$ ), renatos ( $\text{ReO}_4\text{Na}_2$ ), y perrenatos ( $\text{ReO}_4\text{K}$ ), en la naturaleza el renio se presenta como elemento libre, dentro de minerales como la columbita, wolframita y principalmente dentro de la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), de donde se recupera como subproducto.

## TIPOS DE DEPOSITOS

Las investigaciones sobre el renio indican que este metal, ocurre en cantidades significativas en depósitos donde el molibdeno está presente; en especial en los yacimientos tipo pórfido de cobre ricos en molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ). También se reporta renio en cantidades económicas en depósitos sedimentarios de cobre en la URSS, Zaire y Zambia, donde poco o nada de molibdeno existe.

## PROSPECCION

Ya se ha mencionado cómo el renio, en cantidades económicamente recuperables, tiende a asociarse íntimamente con la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), en depósitos de tipo pórfido de cobre; por tanto, su prospección está prácticamente controlada por la prospección que se hace para esa clase de depósitos, tratada en los capítulos del cobre y el molibdeno en el presente libro.

No obstante tener el renio una movilidad alta, la dificultad de detectarlos por los métodos analíticos disponibles en la actualidad, limita su prospección. Mahaffey (1974) explica el método espectrofotométrico, normalmente usado para la determinación del renio.

## EXPLORACION

Las técnicas de explotación del renio están supeditadas a las usadas normalmente en los depósitos de pórfido de cobre ricos en molibdenita, de donde el renio se obtiene. Una vez que se concentra el molibdeno, se emplean procesos metalúrgicos, que permiten recuperar el renio.

## METALURGIA

Según Reno (1970), para recuperar el renio a partir de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), los humos que se producen durante la fundición de los concentrados de este mineral, se limpian de partículas de polvo y luego son mezclados con agua, para disolver el óxido de renio. La solución se clarifica, se acondiciona por oxidación y se pasa a través de un equipo de intercambio iónico. Este proceso se continúa hasta cuando se produce perrenato de amonio muy puro. El perrenato de amonio ( $\text{ReO}_4\text{NH}_4$ ) es luego reducido con hidrógeno y así se obtiene renio, en forma de polvo metálico.

## SITUACION MUNDIAL

### PRODUCCION

Según Briggs (1984), Chile es en la actualidad el principal productor de renio en el hemisferio occidental. Los chilenos obtienen este metal en sus minas de pórfidos de cobre; los más importantes son El Salvador y El Teniente. Canadá produce concentrados de molibdeno en la mina Copper Island, que exporta a Estados Unidos y Alemania Federal, donde son procesados para extraer el renio. Estados Unidos produce renio a partir de concentrados obtenidos en depósitos de cobre en los estados de Utah, Nuevo México y Arizona; además, la compañía Shattck Chemical Co. produce renio al procesar los concentrados que importa desde el Canadá. Perú también obtiene concentrados de molibdeno, con algo de renio, en el depósito de Tequepala, los que exporta a Alemania Federal.

La principal fuente de renio en la URSS, son los depósitos de cobre sedimentario de Dzheckazgan. Los soviéticos también obtienen renio a partir de concentrados de molibdeno, producidos en varias mineralizaciones de pórfidos de cobre en el Altiplano. Entre los productores europeos de renio por el procesamiento de concentrados de molibdeno importados, sobresale Alemania Federal. En 1981, Finlandia comenzó a producir renio a partir de concentrados importados de Alemania Democrática. Finalmente, parece que el complejo minero de Sar Chesneh, en Irán, está en capacidad de exportar concentrados de molibdeno con renio, posiblemente para ser procesados en Chile.

El reciclaje del renio, especialmente en el uso como catalizador, es en la actualidad muy alto; cerca del 93% puede ser recuperado, casi que indefinidamente.

Aunque la información sobre producción de renio es escasa, Briggs (1984) indica para 1983, las siguientes cifras en toneladas de concentrados: Chile, 4,5; URSS, 4,5; Canadá, 1,8; Finlandia, 3; Estados Unidos, menos de 1. La producción de Alemania Federal se estima en unos 2000 kg del metal.

### RESERVAS Y PERSPECTIVAS

El Bureau of Mines de los Estados Unidos estima, según Briggs (1984), que las reservas mundiales recuperables de renio conocidas en la actualidad, son de 3.200 toneladas, aproximadamente de las cuales casi el 75% poseen Chile y Estados Unidos.

Al parecer, la demanda del renio se estabilizó durante 1983, con precios oscilando entre 350-450 dólares la libra. El futuro del renio es algo incierto (BRIGGS, 1984); con un mercado no mayor de 15 toneladas por año y sin la aparición de nuevos usos, su consumo dependerá mucho de las reformas en la industria del petróleo. Aunque el deseo de no producir gasolina con plomo está en favor del consumo del renio, la posibilidad de ser substituido por catalizadores no metálicos o bimetálicos con contenido de iridio, está en su contra. Los especialistas no esperan un crecimiento rápido en la demanda del renio, para la presente década.

### RENIO EN COLOMBIA

Aunque en Colombia se conocen varios prospectos de pórfido de cobre (SILLITOE et al, 1982), algunos de ellos con la presencia de molibdenita, en ninguno se ha reportado la presencia de renio. Tampoco en el depósito de pórfido de cobre y molibdeno de Mocoa (SILLITOE et al, 1984) se menciona la existencia de renio.

Al parecer, la falta de un método analítico confiable para la determinación del renio, ha impedido detectarlo en los distintos proyectos geoquímicos adelantados, en el territorio colombiano, por el INGEOMINAS.

### CONCLUSIONES

El renio se explota principalmente en depósitos de tipo pórfido de cobre y molibdeno, donde generalmente se encuentra íntimamente asociado con la molibdenita. Aunque en Colombia no se conoce aún la primera manifestación de renio, la presencia de varias manifestaciones y prospectos de pórfidos de cobre y molibdeno, permite pensar en la posibilidad de detectarlo, lo

que sucederá en la medida en que dichos prospectos sean investigados; sin embargo, la poca actividad que en ese campo se adelanta en la actualidad, descarta la localización, en un futuro cercano, de anomalías importantes de renio en territorio colombiano.

#### BIBLIOGRAFIA

- BRIGGS, S., 1984.- Rhenium Mining Annual Review. Publ. Min. Jour. London.
- MAHAFFEY, E.J., 1974.- Spectrophotometric method for the determination of rhenium in geological materials. Jour. Geochem. Explor. 3, p. 53-60.
- RENO, H.I., 1970. Rhenium. in: Mineral facts and problems. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, p. 361-368. Washington.
- ROSE, A.W., HAWKES, H.E., and WEBB, J.S., 1979.- Geochemistry in mineral exploration. Academic Press, 658 p. New York. N.Y.
- SILLITOE, R.H., et al, 1982.- Setting, Characteristics, and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia. Econ. Geol. v. 77, p. 837-1850.
- SILLITOE, R.H., JARAMILLO, L., and CASTRO, M., 1984.- Geologic exploration of a molybdenum-rich porphyry copper deposit at Mocca, Colombia. Econ. Geol., v. 79, p. 106-123.
- TORRES, I.E., 1982.- Rhenium, in: Minerals Yearbook, Vol. 1, Metals and Minerals. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, p. 715-718.

## MINERALES DE SELENIO Y TELURIO\*

CARLOS J. RAMIREZ O. - JAIRO V. CUELIAR R.

### CONTENIDO

	<u>Página</u>
Introducción .....	449
Situación Mundial .....	449
Ambiente Geológico y Yacimientos .....	451
Ciclo Geoquímico .....	451
Mineralogía .....	452
Producción .....	454
Consumo .....	454
Selenio y Telurio en Colombia .....	454
Producción y Reservas .....	454
Bibliografía .....	456

### RESUMEN

El selenio y el telurio son elementos no metálicos usados en la electrónica, fotocopiadoras, metalurgia, vidrio, química orgánica y son obtenidos a partir de la refinación de los minerales de cobre. Su demanda es mínima y obedece a sus propiedades únicas como las de ser el conductor de electricidad cuando está expuesto a la luz para el selenio y en el caso del telurio, permitir el endurecimiento del caucho, plomo, etc. Colombia no produce selenio ni telurio y por tanto importa pequeñas cantidades, usadas principalmente por la industria del vidrio.

### INTRODUCCION

Las características similares entre el selenio y el telurio y al ser obtenidos como subproductos de la refinación del cobre, permiten considerarlos en forma conjunta (BATEMAN, 1978)

El selenio fue descubierto por J.J. Berzelius y Grahn en 1817 a partir de la pirita de las minas de Fahlun, Suecia; es el elemento no metálico de número atómico 34 y peso atómico 78.96. El telurio fue descubierto a partir de los minerales de cobre en las minas de Transylvania por F.J. Muler von Reichenstein en 1782; es un elemento no metálico de número atómico 52 y peso atómico 127.7 (LAHRIN and DAVIDSON, 1973 y DAVIDSON and LAKIM, 1973).

### USOS

#### SELENIO

El uso del selenio está distribuido así:

Fotocopiadoras y electrónica, 30%; el importante uso del selenio en los componentes electrónicos ha crecido prin-

\*Estos elementos no metálicos se incluyen aquí, dentro del capítulo de Minerales metálicos, porque están siempre asociados con esos minerales. (Nota del Editor).

principalmente debido al incremento de su uso en aplicaciones fotoeléctricas y copiado xerográfico. Otros usos electrónicos donde son aprovechadas las propiedades semiconductoras de fotoconducción o fotoeléctricas, incluye calculadoras, rectificadores, celdas fotoeléctricas, celdas solares y cámaras de televisión.

- Vidrio, 20%; una de las aplicaciones más antiguas del selenio es la elaboración del vidrio. Se agrega al vidrio como selenio elemental, selenato de sodio, selenito de bario o selenito de sodio en cantidades entre 0.02 y 0.3 libras por toneladas para neutralizar el tinte verde causado por los componentes del hierro.
- Química, 30%; en el campo de la química industrial, los componentes de sulfoselenato de cadmio son usados ampliamente como pigmento rojo en plásticos, tintas, pinturas, esmaltes. El selenio es usado además como catalizador en reacciones químicas y en la preparación de componentes orgánicos. El oxocloruro de selenio es un solvente fuerte que puede usarse como pintura o como removedor y como solventes para cauchos resinas y otros componentes orgánicos.
- Metalurgia, 10%; el selenio se mezcla con acero para darle mayores características de moldeo y manejabilidad sin reducir la resistencia a la corrosión.
- Agricultura, 10%; el selenio es reconocido como un elemento esencial en las dietas del ganado.

Hoy día se adelanta una investigación sobre el significado del selenio en la dieta humana por parte del Dr. D.V. Frost (HAWKS, et al, 1984).

## TELURIO

Según los datos del American Bureau of Metal Statistics, ABMS, de 1984, el uso del telurio está distribuido así:

- Aleaciones ferrosas, 40%; desde 1923 se comenzaron a intentar las aleaciones con el acero, pero en aquella época no fue exitoso debido a la pérdida del telurio hasta en un 60%, hoy día está comprobada su utilidad en esta aleación. Igualmente, se usa para desarrollar una mayor dureza y resistencia a la abrasión. La cantidad de telurio requerida en esta aleación varía con el tipo de hierro y su temperatura, el modo y la forma de adición; regularmente oscila entre 0.005 y 0.11%. Generalmente la porosidad del acero está asociada a una excesiva adición de telurio.
- Aleaciones no ferrosas, 15%; desde 1933 se conocieron los beneficios de la aleación con el plomo, en cantidades entre 0.05 y 0.10% con una pureza de 99,98%. El seleniuro de plomo es más resistente a la corrosión del ácido sulfúrico que otros tipos de plomos químicos.

Otra aleación conocida es de 99.50% de cobre y 0.50% de telurio, permitiendo mayor manejabilidad del cobre sin reducir su conductividad.

- Industria química, 30%; el telurio se usa para darle mayor dureza al caucho en las aplicaciones de éste en las

partes exteriores de puertas. Además, el telurio es también usado como un componente de ciertas catalisis en la industria del petróleo, particularmente cuando se remueve azufre o nitrógeno.

Electrónica y fotocopiadoras, 15%; el telurio ha incrementado su uso en este mercado porque ofrece una nueva combinación de dureza, alta velocidad y amplia respuesta espectral.

### AMBIENTE GEOLOGICO Y YACIMIENTOS

El selenio es sustituido iónicamente por el azufre en la mayoría de los sulfuros de cobre, hierro y plomo y es muy común en la calcopirita, hornita y pirita.

Actualmente no se conocen yacimientos minerales en los cuales el contenido de selenio por sí sólo sea lo suficientemente alto como para considerarlo económicamente importante. Toda la extracción del selenio se obtiene como subproducto en recimientos de cobre es decir, que toda su distribución mundial así como su producción debe mirarse en las posibilidades de existencia de yacimientos de cobre (ver capítulo de cobre).

La corteza de la tierra contiene aproximadamente 0.05 ppm de selenio. El contenido promedio del selenio en el carbón es al menos de 1.5 ppm. El selenio ocurre en concentraciones de 200 a 300 ppm, en depósitos de sedimentación de uranio y vanadio fosfático en el W de los Estados Unidos, pero estas concentraciones no hacen económica su explotación.

La producción de selenio en los Estados Unidos, Chile y Perú, está asociada principalmente con los depósitos de cobre porfídico. Al analizar la relación selenio-cobre en refinería, en Canadá y USA, para un periodo de ocho años muestra que el promedio de recuperación en Canadá fue de 1.28 libras de selenio por tonelada de cobre en minas, comparado con 0.4 libras de selenio en Estados Unidos. La mayor recuperación de selenio en Canadá se debe a una mayor eficiencia en el beneficio y a un contenido de selenio más alto en los depósitos de sulfuros de cobre masivo de Noranda, Quebec, en los depósitos de Cu-Zn de Flin Flon, Manitoba y en los depósitos de Cu-Ni de Sudbury y Ontario.

La producción de telurio está directamente relacionada con la producción de cobre y por ello Chile, USSR, Zambia, Perú, Zaire, Canadá, USA y México, son a la vez los mayores productores de este mineral.

El Te se recupera con una relación de 0.17 libras por tonelada de cobre procesada. Porcentajes significativos de telurio son obtenidos también del procesamiento del plomo, a partir del carbón y de los nódulos de óxido de manganeso.

### CICLO GEOQUIMICO

El selenio y sus componentes  $H_2Se$  y  $SeO_2$ , son suficientemente volátiles para acompañar el azufre en gases volcánicos. Se ha estimado que aproximadamente 2,5 libras de selenio por metro cuadrado han sido depositadas en la superficie de la tierra por gases volcánicos; a través de este proceso, el selenio tiende a llegar a ser un elemento disperso, pero otros procesos geológicos tienden a concentrarlo.

El selenio asociado con rocas intrusivas acompaña al azufre en los sulfuros. El radio iónico del  $\text{Se}^{-2}$  es de 1.98Å y el del  $\text{S}^{-2}$  es de 1.84Å, es decir que el Se puede sustituir al S en muchos sulfuros. Los sulfuros de alta temperatura como pirrotita y pentlandita, tienen una relación de azufre-selenio de 7000, valor que es más o menos cercano al dado por Golschmidt y Strock (LAKIN y DAVIDSON, 1971), para la abundancia estimada en la corteza. En los sulfuros de las minas del Área de Fahlum en el norte de Suecia, el contenido de selenio se presenta en forma decreciente en galena, calcopirita, arsenopirita, esfalerita, pirita y pirrotita; sin embargo, este orden varía en otras Áreas. En las minas de cobre profídico que contienen el 0.5% de cobre, el contenido de selenio es de 2.5 ppm.

En la meteorización, el selenio y el azufre tienden a estar separados debido a que el selenio llega a ser fijado en selenito férrico básico soluble; el azufre sin embargo, se oxida más fácilmente a sulfato altamente soluble y es transportado por aguas superficiales y subterráneas, razón por la cual el selenio no está presente ni en depósitos de sulfatos ni de sulfuros sedimentarios.

En contraste al proceso de meteorización, el selenio y el azufre en los procesos biológicos viajan juntos; el selenio reemplaza al azufre en los aminoácidos; éste es tomado por las plantas y concentrado por algunos animales. La sustitución del selenio por azufre en procesos biológicos y su reducción a seleniuros por microorganismos anaeróbicos a menudo conlleva la presencia de selenio en pirita contenida en shales negros y carbón.

En el caso del telurio, las diferencias de radio iónico no le permiten alternar con el azufre y el selenio ( $\text{S}^{-2}=1.84\text{Å}$ ;  $\text{Se}^{-2}=1.98\text{Å}$ ; y  $\text{Te}^{-2}=2.21\text{Å}$ ); pero en cambio sí permite enlaces muy estables para formar telururos con el oro, la plata, el bismuto, el mercurio, el platino, el paladio y el plomo y menos estables con zinc, cobre, hierro y níquel. Estos telururos ocurren asociados con minerales de sulfuros en depósitos de magmatismo reciente de carácter hidrotermal de baja temperatura como en Sudbury, Canadá y Maresnke Reef, Africa (DAVIDSON y LAKIN, 1973).

El telurio se encuentra en concentraciones significativas en las plantas como en el caso del pino (*Pinus flexilis*) que contiene hasta 0.05 ppm. Aunque concentraciones mínimas se han encontrado en sedimentos ricos en materia orgánica, por lo general, en los procesos de meteorización el telurio se dispersa y no se concentra.

## MINERALOGÍA

El selenio y el telurio ocupan posiciones adyacentes en la posición impar del grupo VI de la tabla periódica, inmediatamente debajo del azufre con números atómicos de 34 y 52 y con pesos atómicos de 78.96 y 127.61, respectivamente. La abundancia de los diferentes isótopos es la siguiente:

SELENIO		TELURIO	
Isótopo	Abundancia %	Isótopo	Abundancia (%)
Se <sup>74</sup>	0.86 + 0.01	Te <sup>118</sup>	0.0003
Se <sup>76</sup>	8.95 + 0.07	Te <sup>120</sup>	0.092 + 0.001
Se <sup>77</sup>	7.65 + 0.07	Te <sup>122</sup>	2.32 + 0.2
Se <sup>78</sup>	23.51 + 0.02	Te <sup>123</sup>	0.88 + 0.02
Se <sup>80</sup>	49.62 + 0.20	Te <sup>124</sup>	4.51 + 0.05
Se <sup>82</sup>	9.39 + 0.20	Te <sup>125</sup>	6.99 + 0.05
		Te <sup>126</sup>	18.53 + 0.04
		Te <sup>128</sup>	32.57 + 0.01
		Te <sup>130</sup>	34.11 + 0.09

## SELENIO

El selenio puede formar compuestos bivalentes, tetravalentes o hexavalentes del mismo tipo general, como el azufre o como el telurio; reacciona con los metales formando seleniuros, como por ejemplo el de aluminio  $Al_2Se_3$ , que los ácidos descomponen con producción de seleniuro de hidrógeno gaseoso  $H_2Se$  (ácido selenhídrico, si se halla en solución acuosa). Al igual que el  $H_2Se$ , es un gas tóxico que arde dando selenio o óxido de selenio  $SeO_2$  y es un reductor más fuerte que el  $H_2S$ .

El selenio forma una serie de componentes con los halógenos. Se presentan dos reacciones de suprema importancia desde el punto de extracción: a) la oxidación del selenio y todos los componentes de selenio a selenatos cuando están sujetos a una fusión alcalina oxidante y b) la reducción de selenio elemental de soluciones de selenatos acidificados con ácido hidroclorehídrico y sulfúrico, cuando son tratados con  $SO_2$ .

Algunos compuestos conocidos del selenio (BEIJTIN, 1977) son:

Naumannita	$Ag_2Se$	Galena (selenífera)	$Pb(S,Se)$
Aguilarita	$Ag_2(Se,S)$	Claustalita	$PbSe$
Berzelianita	$Cu_2Se$	Tiemanita	$HgSe$
Cucalrita	$Cu_2Se.Ag_2Se$	Ferroselita	$FeSe_2$
Hockmannita	$CuSe$	Kerstenita	$PbSO_4$
			$Cu(SeO_3) \cdot 2H_2O$

## TELURIO

El ácido teluroso,  $H_2TeO_3$ , un sólido blanco, con muy pocas excepciones es soluble en agua. El dióxido de telurio y el ácido teluroso son solubles en ácido hidroclorehídrico; la disolución con agua causa precipitación del telurio como ácido o como óxido. El ácido telúrico  $H_2TeO_4 - 2H_2O$  es un sólido blanco cristalino, soluble en agua; sin embargo es un ácido excesivamente débil.

El telurio virtualmente no es conductor de electricidad y no muestra incremento de la conductividad con la luz intensa como el selenio.

Tomando la plata como 100 a la temperatura ambiente, la conductividad del telurio es alrededor de 0.0008 y su resistividad eléctrica es más que 100.000 veces la de la plata.

Algunos compuestos conocidos del telurio son:

Calaverita	$AuTe_2$
Krennerita	$AuTe_2$
Altaíta	$PbTe$
Hessita	$Ag_2Te$
Petzita	$(Ag, Au)_2Te$
Magyagita	$Pb_5Au (Se, Sb) 4S_{5-8}$

**Calaverita** ( $AuTe_2$ ). Monoclínico, prismático, dureza 2.5, peso 9.35, brillo metálico, color amarillo ocre a blanco plata. La calaverita, es un mineral raro asociado con la silvinita ( $Au, Ag$ )  $Te_2$  y otros telurios como también con pirita, cuarzo, calcedonia, fluorita y carbonatos, usualmente en venas formadas a bajas temperaturas y algunas veces en venas de altas temperaturas.

## SITUACION MUNDIAL

### PRODUCCION

La producción mundial de selenio alcanzó en 1984 la cifra de 1.572 toneladas y en 1985 aumentó a 1.647. La producción en 1985, en porcentaje, por países fue la siguiente: USA, 22%; Canadá, 22%; Japón, 16%; URSS, 15%; México, 4%; otros 21%.

La producción mundial de Telurio en 1984 fue de 290 toneladas y en 1985 bajó a 215 tons. La producción de telurio en toneladas, por países fue la siguiente:

	1985	1984
USA	78	106
Bélgica	70	90
Japón	33	50
Canadá	11	11
Perú	10	20
Otros	13	13
Total	215	290

### CONSUMO

El consumo mundial de selenio para 1985 fue la siguiente en porcentaje por países: USA, 29%; Europa, 37%; Japón, 24%; otros, 10%.

El mercado de telurio es pequeño y su comercio es directo entre consumidores y productores.

Los precios para los dos elementos en 1985 presentaron los siguientes valores: Selenio, de US\$ 7 a US\$ 10 por libra; Telurio, de US\$ 9.50 a US\$ 11 por libra. (CULLIFORD - Mining Annual Review, 1986).

## SELENIO Y TELURIO EN COLOMBIA

### PRODUCCION Y RESERVAS

El país no produce selenio ni telurio como subproducto de la minería del cobre.

En cuanto a las reservas, es imposible hablar de éstas, ya que Colombia no dispone de datos de ninguno de los puntos promisorios del selenio y telurio; todo su mercado se basa en importaciones y por lo tanto, tampoco se puede hablar de perspectivas de este material. La mayor parte de las importaciones las consumen la industria del vidrio, como se ve en el Tabla 1.

Sólo nos queda sugerir que, una vez desarrollada la minería del cobre en el país, se tenga en cuenta el selenio y telurio como subproductos de éste, dado que su mercado es muy amplio es decir, muchos son los países que lo consumen y pocos los que lo producen y por lo tanto podría ser una fuente de exportaciones.

Una recomendación valerosa en nuestro país es el tener en cuenta las partes por millón que podrían contener los carbones del Cerrejón, ya que con la infraestructura existente hoy en día, es posible su explotación (si fuera rentable) como subproducto del carbón.

Es de destacar la existencia de manifestaciones de selenio, en los shales negros del Grupo Villeta, especialmente en el área de Utica, donde alcanza hasta 2000 ppm; ésta relativa alta concentración de Se, afecta el organismo de los animales que pastan en estas áreas, originándoles la llamada enfermedad "Selenosis" que consiste en malformaciones de los cascos.

TAB. 1: Relación de Importaciones en Colombia, Enero-noviembre 1985.

NIT	COMPAÑIA	IMPORTACIONES	V/IMPORT. (en dólares)
60000580	Merck Colombia S.A.	Selenio	772
60010728	Cfa. Nal. de Vidrios	Selenio	7.242
60030046	Cfa. Nal. de Vidrios	Selenio	470
90900118	Cristalería Peldar S.A.	Selenio	106.082
99999063	Univ. Nal. de Colombia	Selenio	13
		TOTAL	114.579
03306268	Rodrigo Arroyave Arango	Telurio(sales y persales de ácidos inorg.)	470
60000580	Merck Colombia S.A.	" " "	240
60007972	Discos CBS S.A.	" " "	634
60038544	Produquímica Ltda.	" " "	4.510
60039458	Sifer Ltda.	" " "	103
60065280	Químicos y Reactivos Ltda.	" " "	2.401
90101547	Remaches Industriales S.A.	" " "	330
90107713	Norbelsa S.A.	" " "	747
90301291	Eli Lilly	" " "	4.837
90301715	Interamericana Inc. E.R. Squibb and Sons Americana	" " "	2.040
90301928	Guillete de Colombia	" " "	9
90900148	Saldarriaga Hnos. y Cfa. Dint.	" " "	4.900
		TOTAL	1.805
		TOTAL	23.026



## MINERALES DE TITANIO

RAUL H. MUÑOZ A. - EDUARDO PARRA P.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Resumen .....	457
Introducción .....	458
Aspectos .....	458
Ambiente Geológico .....	459
Geoquímica .....	459
Mineralogía .....	459
Tipos de depósitos .....	460
Exploración .....	462
Explotación y Beneficio .....	463
Minería .....	463
Beneficio .....	463
Situación Mundial .....	464
Producción .....	464
Reservas .....	464
Producción y consumo en América Latina .....	466
El titanio en Colombia .....	466
Depósitos .....	466
Comercio .....	467
Impacto Ambiental .....	469
Bibliografía .....	469

## RESUMEN

El titanio es un elemento abundante en la corteza terrestre, y se encuentra presente en la mayoría de las rocas aunque en bajas cantidades.

El titanio como óxido ( $TiO_2$ ) se utiliza principalmente como pigmento, debido a su color blanco puro; sirve de base para pinturas, papel, cerámica etc.; además, como metal se utiliza en la industria aeronáutica y en aleaciones con otros metales.

Los principales minerales de los cuales se extrae titanio son ilmenita, rutilo, anatasa y leucóxeno, que se explotan a partir de yacimientos aluviales o costeros de arenas negras o de rocas ígneas básicas, especialmente anortosita y gabros.

Para separar el  $TiO_2$  de los minerales naturales que le acompañan se utilizan dos procesos químicos; el método del sulfato que es el más antiguo, y el del cloruro desarrollado a partir de 1957, que es más eficiente y menos contaminante.

Los recursos identificados a nivel mundial son del orden de 1.000 millones de toneladas de ilmenita y unos 150 millones de toneladas de rutilo.

En Colombia no se han identificado reservas apreciables de este mineral, porque no se han desarrollado políticas definidas de exploración. Hasta el momento, las áreas más promiso-

rias son la Sierra Nevada de Santa Marta y las arenas negras derivadas de la explotación del oro en los ríos Nechí y San Juan (Antioquia y Chocó respectivamente).

## INTRODUCCION

El titanio es un elemento abundante en la corteza terrestre; constituye el 0,6% de ella. Fue descubierto en 1790 como un óxido blanco recuperado de un mineral de ilmenita; se obtuvo en estado puro en 1857 y sólo hasta 1918 se empezaron a utilizar comercialmente compuestos de titanio como pigmentos.

Los primeros trabajos de explotación de minerales de titanio se llevaron a cabo en Pensilvania (E.E.UU.). En 1901 se extrajo por primera vez en su forma de rutilo y a partir de 1921 se recuperaron tanto rutilo como ilmenita para la producción de óxido de titanio ( $TiO_2$ ) (LYND, 1983).

Los minerales de titanio procedentes de aluvión se extrajeron por primera vez en 1916, en zonas costeras de Florida (E.E.UU.); sus aplicaciones industriales se extendieron ampliamente solo hasta los años 50, debido a su utilización como metal en la industria militar. Hasta 1957, el proceso metalúrgico tradicional para la recuperación del titanio fue el del sulfato, pero desde ese año se desarrolló el método del cloruro que permite obtener una mayor pureza de  $TiO_2$ ; en la actualidad ambos métodos son utilizados.

## USOS

El titanio se emplea en la industria bajo dos formas principales: el 96% como  $TiO_2$  (blanco de titanio) y el 5% restante como metal. El pigmento de  $TiO_2$ , debido a sus propiedades de alto índice de refracción, opacidad y resistencia a la decoloración por los rayos ultravioleta, tiene uso industrial como aditivo en papel, pinturas, plásticos, caucho, cerámica, tintas, transistores, etc. (Tabla 1).

TAB. 1: Distribución en % de la industria de  $TiO_2$  (pigmento) en E.E.UU. Tomado de Lynd and Hough, 1983. (Mineral Yearbook. Vol. 1).

Industria	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Pinturas, barnices, lacas	47.9	47.4	44.1	43.4	43.3	43.3
Papel	20.8	21.8	24.3	23.8	24.6	24.2
Plásticos	11.6	11.8	10.6	11.4	11.4	11.7
Caucho	2.8	2.9	2.1	2.2	2.3	1.6
Tinta de imprenta	2.0	1.9	2.8	1.3	0.9	1.0
Cerámica	2.1	1.9	1.7	1.4	1.1	1.6
Otros	6.7	7.1	8.2	8.6	6.4	5.9
Exportación	6.1	5.2	6.2	7.9	10.0	11.3

El titanio como metal posee alta resistencia, bajo peso y resistencia al calor y a la corrosión, propiedades que permiten su aplicación en la industria aeronáutica civil y militar; proporciones menores se utilizan como aditivo para el acero y otras aleaciones.

En la industria aeronáutica, este elemento ha sido el factor de desarrollo en la eficiencia de las turbinas y fuselajes, ya que sin él, estos elementos serían más pesados y antieconómicos. Su propiedad de ser inerte permite su aplicación en sistemas de enfriamiento a base de aguas salobres, procesos químicos, refinería del petróleo y plantas desalinizadoras. Las herramientas utilizadas para cortar (buriles, etc.) poseen de 8 a 85% de carburo de titanio, con o sin carburo de tungsteno, en una matriz de carburos de molibdeno, níquel y cobalto.

Buena cantidad de concentrados de rutilo, ilmenita y eskeritas de  $TiO_2$ , se utilizan en el revestimiento de varillas de soldadura para mejorar el acabado de las superficies (PETERSON, 1966).

Compuestos orgánicos de titanio como álcalis, butiltitanatos y éteres se emplean como catalizadores en varios procesos de polimerización, como repelentes de agua y en procesos de tintorería (STAMPER, 1970).

## AMBIENTE GEOLOGICO

### ECONOMICA

El titanio es el noveno elemento en abundancia en la naturaleza después del oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio; es el segundo elemento de la primera serie de los elementos de transición. La distribución promedio en la corteza oceánica es de cerca de 8.100 ppm y en la corteza continental de 5.300 ppm. De acuerdo al tipo de roca su porcentaje aproximado es el siguiente: meteoritos 0.5, ultramáficas 0.03, máficas 0.9, intermedias 0.8, félsicas 0.23 y sedimentarias 0.45.

La presencia de titanio en las etapas de cristalización del magma depende en gran parte de las propiedades químicas del hierro, silicio y aluminio, de la presión parcial de oxígeno y la temperatura de cristalización, que le permite a altas temperaturas entrar a la estructura cristalina de los silicatos en vez de formar óxidos. Un resumen de los parámetros químicos se muestra en la Tabla 2.

### MINERALOGIA

Existen únicamente cinco minerales que contienen titanio en cantidades representativas: rutilo, anatasa, brookita, ilmenita, ulvospinela y sus productos de alteración (leucoxeno, serrofskita y esfena); la ilmenita, el leucoxeno y el rutilo son los que más se explotan en la actualidad (Tabla 3).

**Ilmenita:** La fórmula química teórica de la ilmenita pura es  $FeO \cdot TiO_2$ . Según Ramdohr (1956), con una acumulación de  $Fe_2O_3$  por encima del 6% puede disolverse en soluciones sólidas; a  $1050^\circ C$  y en soluciones sólidas continuas puede existir entre ilmenita y hematita (NICHOLLS, 1955). El magnesio y manganeso pueden ser sustituidos por hierro ferroso en ilmenita, requiriendo los minerales  $MgTiO_3$  (geikelita) y (pirofanita), minerales que se presentan como impurezas menores. La magnetita comúnmente está asociada con ilmenita en rocas ígneas y metamórficas; el vanadio se concentra en magnetita al tiempo que el manganeso se concentra en ilmenita.

En rocas ígneas básicas, principalmente las anortositas, gabros y lavas básicas, la ilmenita ocurre en intercrecimiento mútuo con magnetita. La ilmenita forma lentes siguiendo planos de intercrecimiento octahedral en la magnetita huésped y la magnetita a su vez puede formar cristalográficamente inclusiones orientadas dentro de las lentes de magnetita.

Ilmenita alterada y leucoxeno: la ilmenita de aluviones exhibe comúnmente diferentes grados de alteración causados por la oxidación y remoción del hierro; los productos finales son esencialmente  $TiO_2$ . El leucoxeno es un producto de alteración de ilmenita en el cual se ha lixiviado parte del hierro y por lo tanto no posee una composición química específica.

TAB. 2: Parámetros químicos del Titanio (HODGMAN et al, 1954).

Símbolo	Ti		Estado Ox.	Radio ión	No. Coord.
No. Atómico	22	Configurac. etc. R.10.12	$Ti^{2+}$	0.86	6
Pto. ebullición	3.260	Electronegatividad 1.5	$Ti^{3+}$	0.67	6
Pto. fusión	1.668	Tipo enlace: Metálico	$Ti^{4+}$	0.61	6
Peso atómico	47.9	Densidad 4.51	$Ti^{4+}$	0.53	5
			$Ti^{4+}$	-	4

Rutilo: Es un polimorfo ( $TiO_2$ ) de alta temperatura y presión, es común como mineral accesorio en rocas ígneas, neises y esquistos metamórficos de alto grado. Los concentrados de rutilo tienen más del 95% de  $TiO_2$ , con algunos residuos de  $SiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $V_2O_5$ ,  $Al_2O_3$  y óxidos de hierro. Algunos minerales de rutilo en ocurrencias diferentes a las anteriores pueden tener cantidades apreciables de tantalio y columbio, los cuales entran a los minerales de titanio por la similitud en sus radios iónicos  $Ti^{4+}$ ,  $Ta^{5+}$ ,  $Cb^{5+}$ . El rutilo podría formarse por alteración de ilmenita o anatasa y permanecer en forma estable bajo un amplio rango de condiciones geológicas; ocasionalmente los procesos pueden ser reversibles de tal manera que el rutilo se altere a esfena, posiblemente ilmenita y más raramente a anatasa.

## TIPOS DE DEPOSITOS

Los minerales de titanio se obtienen de rocas o depósitos de arenas negras acumuladas en aluviones o playas; la minería de ellos es la que produce la mayor cantidad de ilmenita y rutilo comercial. Desde 1982 se ha intensificado la minería en depósitos de roca hasta alcanzar o producir una tercera parte de la ilmenita comercial a nivel mundial.

## DEPOSITOS DE ARENAS NEGRAS

Se conocen como arenas negras, los depósitos aluviales o costeros constituidos por minerales pesados, en los que se incluyen minerales titaníferos como rutilo e ilmenita asociados con magnetita, zircón, granate, estauroлита, sillimanita, cromita y ocasionalmente minerales radioactivos y oro. Tales minerales tienen la propiedad común de ser químicamente resis-

10.3] Minerales que contienen titanio y sus características  
(KLEMIC et al., 1973).

Nombre	Composición química		Ocurencias comunes		Sistema	Rango de % de TiO <sub>2</sub>	Rango de gravedad especí	Rango del índice de refracc.	Color
	Minerales	Aluviones	Menas	Aluviones					
Rútilo	TiO <sub>2</sub>	Granulitas eclogitas	De titanio	Muy común	Tetraoanal	100 - 45.7	4.23 - 5.5	2.612 - 1.899	Café, amarillo, rojo, gris, negro, violeta
Anatasa	TiO <sub>2</sub>	Metamórficos de bajo grado	Venas hidroterm.	En poca cantidad	Tetraoanal	100 - 98.2	4.81 - 4.97	2.488 - 2.561	Negro
Brookita	TiO <sub>2</sub>	Metamórficos de bajo grado	Venas hidroterm.	Muy escasa	Ortorrombica	100 - 98.8	4.08 - 4.18	2.583 - 2.700	Amarillo, rojo, café negro
Limenita	FeTiO <sub>3</sub>	Plutónicas, volcánicas, mt. maf.	De titanio	Muy común	Hexagonal	52.7 - 46.2	4.7 - 4.78	—	Negro
Uivospinel	FeTiO <sub>4</sub>	Plutónicas, intrusiones maf.			Cúbica		4.78	—	Negro
Perovskita	CaTiO <sub>3</sub>	Kimberlitas, carbonatitas		Poca común	Pseudomórfico	58.9 - 38.7	3.98 - 4.26	2.30 - 2.37	Café, amarillo
Esteno (Titanita)	CaTiSiO <sub>5</sub>	Plutónicas, metamorf. de bajo g.		Común	Monoclínico	40.8 - 33.7	3.45 - 3.55	1.900 - 2.034	Amarillo, gris, café, negro
Leucosano	Complejo			Común					Amarillo claro, café, rojo

tentes a la meteorización y físicamente fuertes para resistir a la acción abrasiva de las olas o corrientes que permiten su concentración. Es común encontrar en algunas costas capas poco profundas con altos contenidos de dichos minerales, con concentraciones hasta de 80% de minerales titaníferos.

Las etapas de formación de los depósitos aluviales o costeros titaníferos podrían ser:

- Presencia de minerales en la estructura interna de rocas cristalinas en las que los minerales pesados se encontraban en cantidades menores (accesorios).
- Un período de meteorización profunda.
- Levantamiento con erosión rápida y posterior transporte fluvial de tales minerales hacia la línea de costa.
- Levantamiento del nivel de la costa y una acción de fuerte oleaje durante el proceso de ordenamiento de dicha línea costera.

#### DEPOSITOS EN ROCA

La mayoría de los depósitos comerciales que contienen minerales de titanio asociados a rocas, se encuentran en anortositas (gabros compuestos exclusivamente por plagioclasas y ferromagnesianos), y en gabros o rocas afines, algunos de ellos con rasgos metamórficos o hidrotermales, aunque su origen se atribuye a temperaturas y procesos magnéticos. Tales depósitos se presentan de tres maneras: ilmenita-magnetita, donde estos dos minerales se encuentran como intercrecimientos granulares que se pueden separar fácilmente por métodos magnéticos; ilmenita-hematita que normalmente se presentan como intercrecimiento mutuo, cuya separación solo se logra por métodos químicos; ilmenita-rutilo donde ambos minerales pueden estar en forma libre o en intercrecimiento.

Se han encontrado otros depósitos de minerales de titanio en esquistos y pegmatitas y actualmente se investigan ocurrencias de anatasa e ilmenita en cuerpos de carbonatita meteorizados.

#### EXPLORACION

##### DEPOSITOS ASOCIADOS CON ROCAS

Debido a las propiedades magnéticas inherentes al mineral, se facilita la aplicación de pruebas geofísicas y magnetométricas. Donde las anomalías magnéticas negativas coinciden con el depósito, las concentraciones de mineral pueden corresponder a hematita titanífera o a magnetita titanífera; esto ocurre cuando el contenido de titanio es mayor al de hierro. Teóricamente la totalidad de los yacimientos de titanio comercial deben tener una respuesta a los ensayos magnetométricos.

##### DEPOSITOS DE PLAYA O ALUVION

Las pruebas geofísicas como magnetometría, pueden servir para determinar yacimientos titaníferos que contienen suficiente hierro. Tanto la asociación con minerales resistentes a la meteorización y las características que poseen los minerales titaníferos, como el presentar colores oscuros, permiten la rápida identificación por simple observación superficial. En las áreas donde se presenta la acumulación de estos minera-

los, se pueden llevar a cabo durante las etapas de exploración, muestreos detallados tomando concentrados en bateas y posteriormente separando las fracciones magnéticas como la ilmenita de la magnetita o de la magnetita titanífera. Posteriormente, mediante microscopio se pueden identificar otros minerales asociados con ilmenita como zircón, monacita, cianita, sillimanita, estauroлита, etc.

En etapas posteriores de exploración se pueden llevar a cabo perforaciones con barrenos, que ayuden a definir los límites horizontales de las capas donde existe una mayor acumulación de minerales titaníferos.

## EXPLOTACION Y BENEFICIO

### MINERIA

En la explotación de depósitos de aluvión o playas el sistema empleado es el dragado, con el que se obtiene material rico en minerales pesados, que se separan por métodos gravitatorios de la fracción que contiene micas, cuarzo y feldespatos; para procesos posteriores una última fracción compuesta de minerales de gravedad específica alta, la cual varía dependiendo del mineral a tener en cuenta, por ejemplo, la ilmenita y tuitilo son removidos en las primeras etapas por separadores electrostáticos, seguidos por una separación magnética de la ilmenita. De la misma manera se pueden recuperar concentrados de zircón, monacita y otros minerales que tienen valor comercial.

Para que un depósito de ilmenita sea económicamente explotable a los precios actuales, el contenido mínimo de  $TiO_2$  requerido es de aproximadamente 13.5%.

El otro tipo de depósito de ilmenita, encajado en roca se trabaja tanto a cielo abierto como con minería subterránea y posteriormente por procesos de flotación se obtienen los concentrados de ilmenita. Los valores de ley de corte para el  $TiO_2$  en este tipo de minería son del orden de 45 a 50%.

### BENEFICIO

Los procesos químicos aplicados en el beneficio de minerales de titanio son:

**Método de sulfato.** Con este método el mineral de titanio se trata con ácido sulfúrico para producir sulfato de hierro que es soluble y el titanio queda en forma residual; se requieren aproximadamente 2 kg de ácido para producir 0.5 kg de  $TiO_2$ . El sulfato de hierro se utiliza en cantidades mínimas como pigmento y en el tratamiento de aguas. Este proceso de beneficio del titanio se considera altamente contaminante por las emisiones de  $SO_2$ .

**Método de cloruro.** Este proceso requiere cerca de 1 kg de cloruro férrico por cada kg de dióxido de titanio producido. El tetracloruro de titanio resultante es altamente reactivo y requiere especiales cuidados debido a que reacciona violentamente con la humedad del aire y el oxígeno. Algunas impurezas del concentrado inicial forman también cloruros que se deben remover por destilación y/o tratamiento químico por tener colores pigmentantes.

## SUBPRODUCTOS Y COPRODUCTOS DE MINERALES DE TITANIO

Otros minerales que ocurren con el titanio se pueden recuperar como subproductos, entre otros: zircón, monacita, clausenita, granate, estauroilita y minerales de hierro y vanadio. Algunas veces los contenidos de titanio son de importancia secundaria, como en el caso de Malasia donde la ilmenita se recupera como coproducto en el dragado para estaño. Otro ejemplo, se presenta en Australia donde se recupera zircón como subproducto del rutilo en una proporción 1 a 1.

## SUSTITUTOS DE RUTILO

Hay minerales que poseen un contenido de  $TiO_2$  cercano al rutilo natural, pero constituido por ilmenita. También hay rutilo sintético, artificial o reconstituido. Últimamente se han desarrollado tres métodos para separar el rutilo de la ilmenita:

- Proceso donde el hierro es completamente reducido y separado de las reacciones químicas del titanio.
- Proceso en el cual el hierro es reducido del estado ferroso y de la lixiviación química de minerales de titanio.
- Proceso en el que todo el mineral es tratado para producir compuestos con cloruro, bien sea en forma selectiva o con separaciones subsiguientes y purificación de  $TiCl_4$ .

## SITUACION MUNDIAL

### PRODUCCION

En la tabla 4 se presenta la producción de concentrados de titanio por países, entre los años 1978 y 1982. Se excluye de esta la producción de anatasa proveniente de Brasil, de donde se reporta una cantidad de 60.000 toneladas anuales de  $TiO_2$ .

### RESERVAS

Las reservas identificadas a nivel mundial ascienden a unas 817 millones de toneladas de ilmenita y unas 43 millones de rutilo, que se especifican por países en la tabla 5.

### PRODUCCION Y CONSUMO EN AMERICA LATINA

En Latinoamérica, Brasil es el único productor actual de  $TiO_2$  con unas 60.000 ton/año. México produce unas 25.000 toneladas anuales de  $TiO_2$ , que en su mayor parte se refinan a partir de ilmenita importada de Australia.

En la tabla 6, se observa que Colombia requirió para su industria un promedio de 7.000 toneladas anuales de  $TiO_2$  que fueron importadas de Finlandia, Italia y España.

Los precios de los minerales de titanio varían de acuerdo con su pureza; al final de 1983, la ilmenita con 54% de  $TiO_2$  costaba 30 dólares/ton., la escoria de titanio con 74% de  $TiO_2$ , 150 dólares y el rutilo de 95%  $TiO_2$  325 dólares, en puerto de embarque de Estados Unidos.

4. Producción mundial por país de concentrados de titanio - ilmenita - leucóxeno - rutilo y escoria en toneladas cortas (LYND, HOUGH, 1983).

tipo de concentración por países	1978	1979	1980	1981	1982
<b>Ilmenita y Leucóxeno</b>					
Australia					
Ilmenita	1.383.400	1.267.656	1.442.924	1.452.033	1.276.463
Leucóxeno	17.752	24.001	26.393	21.557	22.198
Brasil	22.131	14.541	18.526	16.531	17.000
China	-	-	-	150.000	150.000
Finlandia	145.395	131.947	175.267	178.023	176.000
India	178.063	181.867	185.078	208.140	209.000
Malasia	205.929	220.262	208.470	180.432	121.000
Noruega	845.451	903.690	912.508	724.907	608.215
Portugal	358	295	258	368	370
Sri Lanka	36.421	61.035	37.430	88.157	88.000
Unión Soviética	450.000	450.000	460.000	470.000	475.000
E.E.UU.	589.751	639.292	548.882	509.342	227.844
<b>TOTAL</b>	<b>3.874.651</b>	<b>3.894.586</b>	<b>4.015.736</b>	<b>3.999.497</b>	<b>3.371.090</b>
<b>Rutilo</b>					
Australia	283.376	307.435	323.801	253.729	243.343
Brasil	402	484	472	190	220
India	6.239	5.445	5.908	9.647	8.800
Sierra Leona	-	8.267	52.356	55.942	52.590
República de Sudáfrica	20.000	46.000	53.000	55.000	52.000
Sri Lanka	12.673	16.176	14.097	14.662	14.300
Unión Soviética	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
E.E.UU.	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>332.690</b>	<b>393.807</b>	<b>459.634</b>	<b>399.170</b>	<b>381.253</b>
<b>Escoria Titanífera</b>					
Canadá	937.000	525.840	964.200	837.000	750.000
Jacón	193	198	-	-	-
República de Sudáfrica	100.000	316.000	379.000	408.000	420.000
<b>TOTAL</b>	<b>1.037.193</b>	<b>842.038</b>	<b>1.343.200</b>	<b>1.245.000</b>	<b>1.170.000</b>

TAB. 5: Reservas mundiales de ilmenita y rutilo (Millones de toneladas cortas). Lynd, 1983.

País	Ilmenita	Rutilo
Estados Unidos	48	3
Australia	52	10
Canadá	183	-
Finlandia	10	-
India	147	4
Malasia	2	-
Noruega	154	-
Sudáfrica	110	7
China	90	-
Unión Soviética	15	-
Brasil	-	100
Italia	-	6
Sierra Leona	-	4
Sri Lanka	-	6
Otros	6	3
Total	817	143

TAB. 6: Consumo de  $TiO_2$  para América Latina 1981-1984 (LAML, 1985).

País	Consumo (miles ton.)
Argentina	10.5
Bolivia	0.2
Brasil	50.0
Chile	4.5
Colombia	7.0
Costa Rica	0.3
Cuba	0.3
República Dominicana	1.6
Ecuador	1.2
El Salvador	0.5
Guatemala	0.3
Guyana	0.1
Honduras	0.1
México	33.0
Nicaragua	0.2
Panamá	0.4
Paraguay	0.1
Perú	2.0
Surinam	0.3
Trinidad	0.8
Uruguay	1.2
Venezuela	9.5
Total	124.1

## EL TITANIO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Hasta el presente, no se han llevado a cabo en Colombia, proyectos orientados a la búsqueda de minerales de titanio tanto primarios como secundarios. Las escasas manifestaciones de este mineral se han detectado como consecuencia de la búsqueda de fuentes para hierro, y por lo tanto se refieren únicamente a magnetita o ilmenita.

Depósitos de magnetita y magnetita titanífera asociados a rocas (yacimientos primarios) se han descrito como relacionados con neises anortosíticos, de edad Precámbrica (ISCHANZ et al., 1970), que afloran en la Sierra Nevada de Santa Marta en 4 localidades diferentes: Quebrada del Hierro, Guamachito, Quebrada Niyulá y Pico el Guardián (Figura 1).

En la quebrada del hierro al norte de la Sierra Nevada, afloran venas, diques y cantos de una roca bandeada compuesta casi exclusivamente de ilmenita y apatito, dispuestos en capas delgadas paralelas; una muestra de dicha roca dió los siguientes contenidos: 31-34% de  $Fe_2O_3$ , 20-21%  $P_2O_5$  y 19-20%  $TiO_2$ . En el área de Guamachito se describen granulitas ricas en magnetita (30%); en la quebrada Niyulá (McDONALD, 1969 citado por ISCHANZ et al., 1970), se reportan neises ricos en ilmenita (25%) y apatito. Cerca al pico El Guardián, Gansser (1955), citado por Ischanz et al., 1970, describe granulitas máficas ricas en magnetita o ilmenita (65%) y apatito (20-25%).

Según Wokittel (1960) existen manifestaciones de minerales de titanio solamente de valor mineralógico, en esquistos metamórficos, neises y dioritas, en las siguientes localidades: en San José (Nariño) en esquistos micáceos; en Putumayo, en el neis granítico de San Francisco, en dioritas de la zona de Pepino y Hocoú, y en rocas piroxénicas de contacto en el Cerro Blanco; en el Alto Catatumbo (Santander), en rocas cristalinas.

Depósitos de arenas negras (yacimientos secundarios), con magnetita e ilmenita se pueden encontrar a lo largo de las costas Pacífica y Atlántica. Se conocen manifestaciones entre Guenagu y Galerazamba, en Puerto Colombia, en el Cabo de La Jula y en el sector norte de la Sierra Nevada de Santa Marta; en Tolú y en Galerazamba se hicieron estudios preliminares en 1971 por parte de la compañía Simesa en colaboración con el Ministerio de Minas (Zona Minera de Medellín).

En Acandí (Chocó), Escorce (1972) hizo una evaluación preliminar de un depósito que dió 202.000 ton. con tenores de 4%  $FeO$  y 4.5% de  $TiO_2$ .

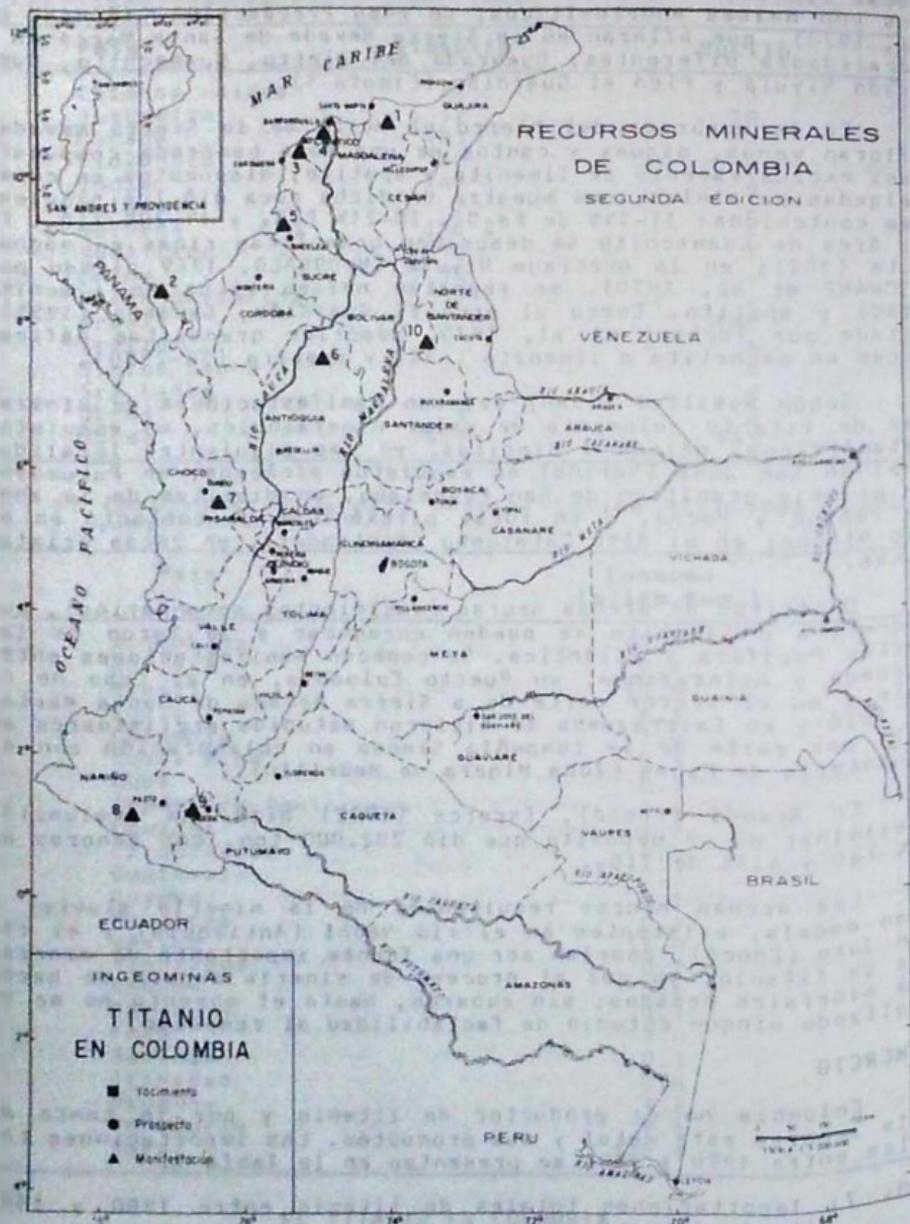
Las arenas negras resultantes de la minería aluvial a gran escala, existentes en el río Nechí (Antioquia) y el río San Juan (Chocó), podrían ser una fuente importante de minerales de titanio, ya que el proceso de minería separa de hecho los minerales pesados; sin embargo, hasta el momento no se ha realizado ningún estudio de factibilidad al respecto.

## COMERCIO

Colombia no es productor de titanio y por lo tanto el país importa este metal y sus productos. Las importaciones totales entre 1980 y 1985 se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Importaciones totales de titanio entre 1980 y 1985 (DANE, 1986).

Año	ton.netas	US\$ CIF
1980	395	234.000
1981	200	157.000
1982	777	452.000
1983	343	172.000
1984	450	229.000
1985	477	255.000



- |                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Sierra Nevada de Santa Marta | 6. Río Nechí             |
| 2. Acandí                       | 7. Río San Juan          |
| 3. Galerazamba                  | 8. San José              |
| 4. Puerto Colombia              | 9. San Francisco - Mocoa |
| 5. Tolú                         | 10. Alto Catatumbo       |

FIG. 1: Titanio en Colombia.

## IMPACTO AMBIENTAL

La explotación y beneficio de los minerales de titanio producen serios problemas de impacto ambiental, que pueden elevar sustancialmente los costos de producción si existen restricciones locales sobre protección del ambiente.

La minería de depósitos de arenas negras no presenta problemas serios en la modificación de ambientes ecológicos. Las tierras pueden ser restauradas, las zonas de dunas pueden retornar a su forma original, mediante trabajos de nivelación y se pueden estabilizar las arenas por medio de cultivos y reimplante de vegetación, a la vez que se pueden adicionar nuevas sustancias de carácter químico a las arenas cuarcíferas.

La remoción y aireación del material durante la minería pueden causar actividad bacteriana en arcillas y las bacterias pueden contribuir a la acidez de la tierra bajo el nivel freático; bajo controles específicos de pH se puede controlar la acidez o alcalinidad del suelo y materiales del área. Las arcillas limosas que pueden presentar algunos problemas en los trabajos de monitoria, generalmente crean ruptura del proceso normal de erosión y un sobresaturamiento de aguas, que puede solucionarse mediante un control cuidadoso de las aguas por medio de lagunas o tanques de decantación.

La minería de arenas negras tiene algunas ventajas: costos más bajos que la minería subterránea y la recuperación de los minerales se hace de una manera más rápida y barata, a la vez que las tierras pueden retornar a su forma original a unos costos más razonables.

Los subproductos del beneficio de los minerales de titanio, sulfatos y cloruros de hierro, son compuestos sin ninguna utilidad industrial y por lo tanto se desechan en su totalidad, bien sea inyectándolos en pozos profundos o vertiéndolos directamente a las aguas, produciendo de esta manera una fuerte contaminación del medio ambiente.

## BIBLIOGRAFIA

- ESCORCE, E., 1972.- Ocurrencia minerales en el Depto. del Chocó. Informe 1620. Ingeominas, 70 p.
- HODGMAN, C.D. et al, 1954.- Handbook of Chemistry and Physics. Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, 3173 p.
- FLEMIC, H., MARCH, P.S. and COOPER, 1973.- Titanium. In: United States Mineral Resources U.S. Geol. Survey prof. paper 820, p. 653-654. Washington.
- LAML, 1985.- Metal Mineral Publications. 4 p. London.
- LEND, L. 1983.- Ilmenite and Rutile Mineral Commodity Summaries. U.S. Department of Interior, pp/ 70-130.
- LEND, L., HUGH, R., 1983.- Titanium Minerals Yearbook. Vol.1 U.S. Department of the Interior. pp. 875-887.
- NICHOLLS, G.D., 1955.- The Mineralogy of Rock Magnetism. Advances in Physics (Supplement to Philosophical Magazine) Vol. 4, p. 113.

- PETERSON, E.C. 1966.- **Titanium Resources of the United States.** BuMines ICR290, 65 pp.
- RAMDORF, P., 1956.- **The Relations of Iron-Titanium Ores of Igneous Rocks.** Bull. Comm. Geol. Finlande. Vol. 173, pp. 1-38.
- STAMPER, J.W., 1970.- **Titanium. Mineral facts and Problems.** Bull. 650 U.S. Bureau of Mines, pp. 773-794.
- TSCHANZ, C., JIMENO, V., CRIIZ, R., 1970.- **Recursos Minerales de la Sierra Nevada de Santa Marta.** Ingeominas, Bol. Geol. 18, 55 p.
- WOKITTEL, R., 1960.- **Recursos Minerales de Colombia.** Comp. Ent. Geol. Ofic. en Colombia. Serv. Geol. Nat., V. (X) 393 p.

## MINERALES DE TUNGSTENO

JOAQUIN BUENAVENTURA A.

## CONTENIDO:

	<u>Página</u>
Resumen .....	471
Introducción .....	471
Índice .....	472
Medio Geológico .....	472
Geoquímica .....	474
Mineralogía .....	476
Tipos de Depósitos .....	477
Explotación .....	479
Técnicas de Prospección .....	480
Situación Mundial .....	481
Recursos y Reservas .....	481
Producción .....	481
Precios .....	482
El Tungsteno en Colombia .....	484
Depósitos .....	484
Comercio .....	486
Bibliografía .....	488

## RESUMEN

Los principales depósitos de tungsteno así como también la mayor parte de las reservas y producción mundial de este metal, ocurren en el área del Cinturón Circumpacífico. Los cinturones orogénicos del Meso-Cenozoico que se presentan dentro de esta Área, exhiben las mejores perspectivas para la ubicación de nuevos yacimientos y en consecuencia es donde debe concentrarse la exploración.

Colombia forma parte del Cinturón Circumpacífico; sin embargo, hasta el momento es muy poco lo que se ha adelantado con miras a evaluar su verdadero potencial en tungsteno. El ambiente geológico más propicio para la búsqueda de depósitos de Skarn, que son los yacimientos de mayor importancia económica, se encuentra localizado en la parte meridional de la Cordillera Central entre el Departamento del Tolima y la Intendencia del Putumayo; los depósitos de filón tienen una importancia secundaria en nuestro país debido a que el tungsteno es obtenido en pequeña escala como un subproducto.

A nivel mundial la industria del tungsteno es capaz de sostener la demanda actual, así como también la oferta puede ser sostenida por las minas en producción, pero en la actualidad la oferta supera sustancialmente la demanda afectando notablemente el precio del concentrado, situación que puede resultar en el cierre de algunas minas en el futuro.

## INTRODUCCION

El tungsteno, conocido también como Wolframio (W), es uno de los metales más importantes de la industria moderna no solo por sus extraordinarias propiedades como elemento sino también por las características de sus compuestos y aleaciones que lo

hacen indispensable en la industria metal-mecánica del mundo. Entre los metales, el tungsteno tiene el más alto punto de fusión ( $3.400^{\circ}\text{C}$ ), la más elevada resistencia a la tracción a elevadas temperaturas (hasta un máximo de 590.000 libras por pulgada cuadrada) y el más bajo grado de compresibilidad. Entre otras propiedades tenemos su alta densidad, excelente resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica y térmica y bajo coeficiente de expansión, características que se deben a la naturaleza y configuración de la estructura cristalina que forman sus átomos.

Actualmente a nivel mundial el tungsteno como muchos otros metales, presenta un exceso en la oferta comparado con la demanda que ha venido decreciendo últimamente por diversos factores, pero principalmente debido a los sustitutos del tungsteno por el molibdeno en algunos campos, tales como la fabricación de tuberías de acero y aleaciones no ferrosas, por carburo de titanio combinado con molibdeno, níquel o cobalto en la fabricación de herramientas cortantes, y óxidos de aluminio y diamantes industriales en ciertas aplicaciones. La caída del precio del tungsteno en los últimos años, al parecer ha repercutido en su prospección, pero se espera que con el rápido desarrollo de la industria moderna, las compañías de exploración se comprometan aún más en la búsqueda de este metal, que debido a sus propiedades físicas y mecánicas excepcionales juega un papel predominante en nuestra vida diaria.

### USOS

Los materiales base de tungsteno se han empleado específicamente en la producción de piezas para maquinaria pesada, turbinas y cohetes, materiales para aplicación nuclear y espacial, equipos eléctricos, filamentos para lámparas, herramientas cortantes, brocas de perforación, termocupias para altas temperaturas y en compuestos químicos inorgánicos para colorantes como tintas y pigmentos luminosos. El porcentaje aproximado de las formas básicas en las cuales se consume el tungsteno es el siguiente: carburo de tungsteno 45%, aleaciones de hierro 25%, aleaciones no ferrosas 11%, aleaciones de tungsteno y otras a base de tungsteno 18%, compuestos químicos y otros 1 a 2%.

### AMBIENTE GEOLOGICO

La mayoría de los yacimientos de tungsteno presentan una relación genética y espacial muy estrecha con rocas plutónicas ácidas o con sus equivalentes hipobasales porfiríticas (HUTCHISON and CHAKRABARTY, 1979), que están localizadas en las partes más internas de los arcos magmáticos principales de carácter continental, asociados con bordes de placas destructivos o con granitos anatócticos en cinturones orogénicos de carácter colisional (SANKINS, 1984).

La distribución de los depósitos de tungsteno a nivel mundial se puede apreciar en la Figura 1; se observa claramente que en la gran mayoría de los depósitos están asociados con cinturones orogénicos Meso-Cenozoicos relacionados con el cinturón Circumpacífico y se extienden desde el occidente de Europa a través de Asia Central hasta Asia Sur-oriental; algunos de estos depósitos están asociados con cinturones orogénicos paleozoicos y con áreas de escudo.

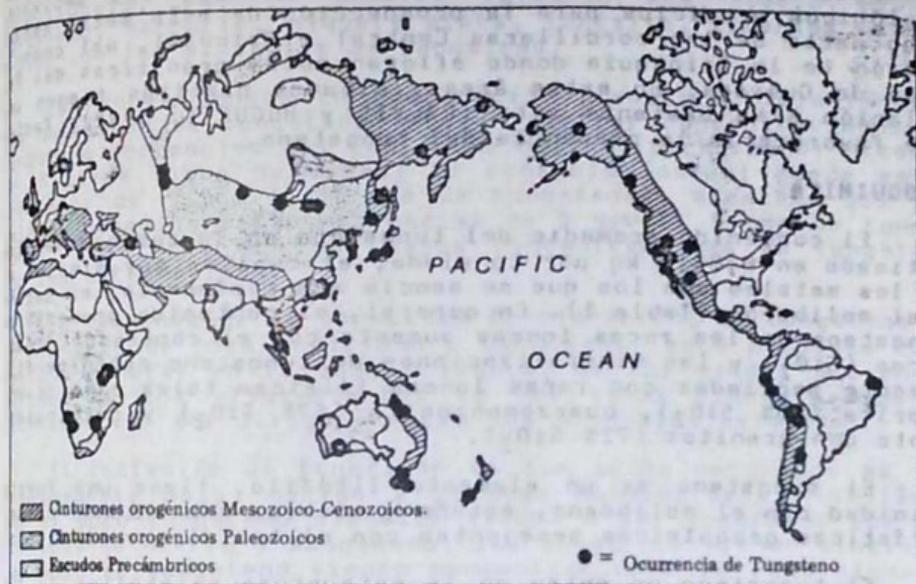


FIG.1: Principales ocurrencias minerales de tungsteno asociadas con cinturones orogénicos. Obsérvese la gran cantidad de mineralizaciones relacionadas con el Cinturón Circumpacífico (CONATORE, 1982).

La teoría de Hutchinson and Chakrabarty (1979) acerca del origen del estaño como proveniente de la parte profunda de la corteza continental y a partir de eventos policíclicos, puede ser igualmente aplicada al tungsteno. El origen del tungsteno a partir de la parte profunda de la corteza continental está soportada en su mayor parte por la presencia de granitos Tipo-S o serie ilmenita (ISHIHARA, 1977), en varias provincias metalogénicas de tungsteno, entre las cuales sobresalen la de China Suroriental una de las más ricas del mundo (TAKAHASHI et al, 1980), la del suroccidente de Inglaterra (DINES, 1956), y el cinturón orogénico de la península Malaya (HUTCHISON, 1977).

Investigaciones recientes indican que el tungsteno a pesar de su gran afinidad por los granitos Tipo-S, se presenta también en arcos plutónicos compuestos que presentan granitos Tipo-S y granitoides Tipo-I, serie magnetita (ISHIHARA, 1977), tales como la parte más oriental del arco volcánico-plutónico de la península Malaya y el arco de islas del Japón (HUTCHISON, 1982). Algunos cinturones orogénicos de edad mesozoica tales como los de los Andes, se caracterizan casi exclusivamente por la presencia de granitos de Tipo-I con una relación  $Sr^{87}/Sr^{86}$  cercanos a 0.7042 (PITCHER, 1979), lo que explicaría en gran parte la ausencia de tungsteno en el arco magmático principal; sin embargo, en algunas provincias metalogénicas del Cinturón Circumpacífico y particularmente en América, se ha observado la presencia de tungsteno donde existe un plutonismo de Tipo-I que cambia hacia el oriente gradualmente a Tipo-S, o se presenta una mezcla de estos facilitando la presencia de tungsteno en asociación con metales básicos, estaño y metales preciosos, como es el caso de Canadá, Bolivia, Perú y Colombia.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta las ocurrencias minerales de tungsteno en Colombia, los ambientes geológicos propicios para la prospección de este metal serían gran parte de las cordilleras Central y Oriental, así como la región de la Orinoquia donde afloran rocas graníticas del Escudo de Guayana. En estas áreas, algunos granitos tienen una relación K/Na bastante alta (CALVIS y HUGUETT, 1982), factor que favorecería la presencia del tungsteno.

### GEOQUIMICA

El contenido promedio del tungsteno en la corteza ha sido estimado en 0.0015 kg por tonelada, el cual es muy similar al de los metales con los que se asocia más comúnmente, el estaño y el molibdeno (Tabla 1). En general, el contenido promedio de tungsteno en las rocas ígneas aumenta con el contenido de sílicas ( $\text{SiO}_2$ ) y las mineralizaciones de tungsteno están genéticamente asociadas con rocas ígneas félsicas tales como granodiorita (65%  $\text{SiO}_2$ ), cuarzomonzonita (67%  $\text{SiO}_2$ ) y particularmente con granitos (72%  $\text{SiO}_2$ ).

El tungsteno es un elemento litófilo, tiene una fuerte afinidad con el molibdeno, estaño y niobio, presentando características geoquímicas semejantes con el tantalio y el niobio.

El tungsteno no entra en la estructura cristalina de los silicatos, sino que es concentrado en los residuos fundidos o fluidos acuosos que se derivan de la cristalización de magmas félsicos (CONATDRE, 1982). Estos residuos, particularmente los fluidos hidrotermales que generalmente presentan concentraciones de otros metales, son relativamente más reactivos y móviles que los magmas a partir de los cuales se originan y son el medio de transporte del tungsteno, a partir del cual el metal es precipitado en los sitios de mineralización.

TAB. 1: Contenido promedio de algunos metales en la corteza terrestre (gramos por tonelada).

Aluminio	81.300	Plomo	12.5
Hierro	56.000	Estaño	2.0
Titanio	5.700	Molibdeno	1.5
Manganeso	950	Tungsteno	1.5
Vanadio	135	Tantalio	0.9
Cromo	100	Cadmio	0.2
Níquel	75	Antimonio	0.2
Zinc	70	Bismuto	0.17
Cobre	55	Mercurio	0.18
Cobalto	25	Plata	0.07
Columbio	20	Oro	0.04

Fuente: CONATDRE (1987).

La precipitación de los minerales de tungsteno en un ambiente específico es una función de la cantidad y actividad de hierro, manganeso y calcio presentes. En términos generales, el tungsteno será precipitado a partir de fluidos hidrotermales como wolframita si el contenido de ión calcio en el ambiente es bajo, o como scheelita si el contenido del ión calcio es alto (CONATDRE, 1982); sin embargo, no podemos afirmar que la wolframita y la scheelita no se pueden presentar juntas, porque existen muchos depósitos en los cuales ambas mineralizaciones están presentes en cantidades significativas. Los minerales de tungsteno en estos depósitos están asociados con cantidades mayores o menores de estaño, molibdeno, cobre o ni-

minerales de bismuto. Algunos depósitos presentan asociaciones de antimonio, arsénico, cobalto, columbio, oro, hierro, plomo, manganeso, mercurio, níquel, plata, tantalio, titanio, uranio y zinc con los minerales de tungsteno.

Las rocas ígneas de composición granítica, relacionadas con depósitos de tungsteno, pueden mostrar concentraciones de tungsteno por encima del contenido normal (background) presente en otros tipos de rocas; el contenido normal puede estar alrededor de 1 ppm (1 ppm de tungsteno), mientras que los valores anómalos están por encima de 5 ppm (5 ppm de tungsteno). Las rocas con más bajas concentraciones de tungsteno son las ultramáficas.

En términos de la capacidad de migración, el tungsteno es un elemento de poca movilidad y usualmente está presente como residuo mineral en la zona primaria, de tal manera que en el estudio de los afloramientos de las zonas mineralizadas la atención debe ser dirigida hacia los minerales estables.

El contenido de tungsteno en las aguas naturales es extremadamente bajo, debido a su poca solubilidad y también a que el poco tungsteno disuelto tiende a ser absorbido por hidróxidos de hierro y manganeso. Las aguas que drenan mineralizaciones de tungsteno tienen concentraciones de este elemento aproximadamente de 0.1 pp. El promedio de tungsteno disuelto en el agua de mar es de 0.1 ppb\*, mientras que en lagos y ríos pueden ser inferior a 0.001 ppm. El lago Seartes en California es una excepción porque presenta en salmueras concentraciones de este elemento de 40 a 64 ppm. En aguas de fuentes termales el contenido de tungsteno puede alcanzar miles de ppb.

En el ambiente secundario el tungsteno es bastante inmóvil en superficie y su dispersión es producida en gran parte por medios mecánicos, factor que es muy importante desde el punto de vista de la exploración, particularmente en el caso de la schelita, mineral que es fácilmente identificable con lámpara ultra-violeta. El tungsteno es mucho más móvil en medios alcalinos y en condiciones reductoras que en medios ácidos y con condiciones oxidantes (KRAYNOV, 1965).

En los suelos el tungsteno presenta cierto grado de movilidad, lo cual es confirmado por los pequeños halos en el horizonte A, que se encuentran rodeando los depósitos primarios; en estos últimos en algunos casos se puede presentar enriquecimiento supergénico de tungsteno pero generalmente son de tamaño reducido y aspecto local. El contenido normal (background) de tungsteno en muestras de suelos, puede estar por debajo de los 2 ppm y en casos especiales puede llegar hasta 20 ppm; sin embargo valores por encima de éstos pueden indicar zonas mineralizadas y generalmente están localizadas directamente sobre la fuente primaria (REEDMAN, 1979).

En sedimentos activos particularmente los concentrados de bales son sumamente útiles en la delineación de áreas de interés, debido a que los minerales de tungsteno que tienen una densidad alta, son transportados por las aguas superficiales como detritos (ROSE et al, 1979). Valores por debajo de 2 ppm y que en algunos casos pueden llegar hasta 10 ppm reflejan contenidos normales en las rocas, sin embargo valores por encima de 10 ppb pueden indicar área mineralizada (REEDMAN, 1979).

\* ppb = partes por billón (nota del editor).

Estudios realizados en Nueva Zelanda (QUIN et al, 1974) a cerca del contenido de tungsteno (W) en vegetales, han demostrado que concentraciones anómalas de este metal se ha observado en plantas localizadas directamente sobre depósitos de tungsteno ocultos. El estudio comparó los resultados de la bioquímica con resultados de un muestreo de suelos realizados en la misma área, encontrándose una buena correlación entre los valores anómalos en cada caso. Estudios similares se han realizado en la India encontrándose que el contenido de tungsteno en plantas sobre mineralizaciones conocidas era de 2 a 18 veces superior al normal de la región. Esta técnica aún no ha sido ampliamente aplicada en el mundo; sin embargo debido a su bajo costo, debería ser considerada como una herramienta de exploración en áreas donde existe cubierta vegetal.

Los elementos quíes o "pathfinders" que se utilizan en la prospección de tungsteno particularmente los relacionados con depósitos de Skarn con el As, P y Fe, debido a que estos tienen un halo amplio de dispersión en comparación con el W, resultan muy útiles en la localización de depósitos profundos. Otros elementos que han sido utilizados en la búsqueda de tungsteno son: Mo, Sn, S, Cu, Be, Bi, Li, Rb, Si, Sc, Re y B (ROSE et al, 1979).

## MINERALOGIA

La mineralogía del tungsteno es bastante simple. A pesar de que se conocen cerca de 20 minerales de tungsteno, todos se presentan como tungstatos u óxidos de tungsteno, con excepción de algunos bisulfuros los cuales son sumamente raros. Por conveniencia estos minerales pueden ser divididos en dos grupos principales, el de la wolframita y el de la scheelita. El grupo de las wolframitas presenta tres minerales de importancia económica cuantitativa como fuentes de tungsteno y forma una serie continua de soluciones sólidas de tungstatos de Hierro-Manganeso: ferberita, wolframita y huebnerita. El grupo de la scheelita presenta solamente un mineral de importancia comercial, el tungstato de calcio, scheelita, el cual es muy abundante, encontrándose aproximadamente en el 50% de los depósitos de tungsteno conocidos en el mundo (KUNDIG, 1981). La tabla 2 muestra los minerales de tungsteno más conocidos.

TAB. 2: Minerales de tungsteno.

Nombre	Composición	Abundancia
Ferberita	$FeWO_6$ (60.5% W)	Común
Wolframita	$(Fe, Mn)WO_6$	Abundante
Huebnerita	$MnWO_6$ (60.7% W)	Común
Scheelita	$CaWO_6$ (63.9% W)	Abundante
Powelita	$Ca(Mo, W)O_4$ (WO <sub>3</sub> 10%)	Común
Stolzita	$PbWO_4$	Escaso
Tungstita	$H_2WO_4$	Común
Cuprotungstita	$Ca_2WO_4(OH)_2$	Escaso

En muchos depósitos el tungsteno se obtiene con otros metales como un coproducto o como un subproducto, particularmente como el molibdeno y el cobre, como es el caso de algunas minas en los Estados Unidos. Asociados a los depósitos de tungsteno ocurren con frecuencia los siguientes minerales: molibdenita ( $MoS_2$ ), casiterita ( $SnO_2$ ), calcopirita ( $CuFeS_2$ ),

bismutinita ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), bismuto nativo (Bi) y fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). En algunos casos se ha observado en ciertas minas de los Estados Unidos que esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y tetrahedrita ( $3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$ ) son cooroductos importantes del tungsteno.

En Colombia los minerales de tungsteno más comunes son scheelita relacionada a depósitos de Skarn y venas de cuarzo y algunos minerales del grupo de la wolframita asociados con depósitos de tipo diseminado como cobre y molibdeno.

#### TIPO DE DEPOSITOS

Las mineralizaciones de tungsteno ocurren en una amplia variedad de ambientes geológicos, y por lo tanto se presentan en diversos tipos de yacimientos entre los cuales sobresalen los de gran importancia económica: depósitos de skarn con scheelita; depósitos de veta con cuarzo y wolframita; y depósitos porfiríticos tipo Stockwork con wolframita-huebnerita. Otros depósitos con tungsteno realmente son variantes de los tipos principales o son el resultado de otros procesos geológicos, e incluyen depósitos pegmatíticos, depósitos volcanogénicos, depósitos de placer, depósitos de fuentes termales y salineras.

Los depósitos de skarn, a nivel mundial constituyen la forma más común de los yacimientos de tungsteno de importancia económica (MORSE, 1979). Estos depósitos se producen por el reemplazamiento y recristalización a altas temperaturas de calcáreas, dolomitas u otras rocas calcáreas, localizadas en las zonas de contacto con los intrusivos o en los alrededores de los cuerpos ígneos a distancias que pueden oscilar entre los 100 y 1500 m (HUTCHISON, 1982). El principal mineral de mena dominante es la scheelita que puede estar acompañada por casiterita, molibdenita, wolframita, bismutinita, calcopirita, esfalerita y galena que usualmente se presentan en pequeñas cantidades; la forma del yacimiento es muy irregular y puede presentarse en bolsones de tamaño variable, lo cual al igual que su distribución está controlada por:

- La regularidad o irregularidad del contacto del intrusivo.
- Fracturamiento, permeabilidad y composición favorable de la roca encajante.
- Relaciones estructurales entre las rocas sedimentarias y el contacto ígneo (CONATORE, 1982).

La scheelita que rara vez se presenta uniformemente distribuida en los depósitos de Skarn, puede ocurrir en forma diseminada o masiva como lentes de diversos tamaños, localizados principalmente en las zonas más silicificadas con tendencia hacia los contactos con los intrusivos. El contenido de  $\text{WO}_3$  en este tipo de yacimiento fluctúa entre el 0.3 y el 6% (KUZVART et al., 1978).

Los depósitos de vetas de cuarzo y wolframita tienen características típicas de las vetas hidrotermales encontrándose espacial y genéticamente relacionados con los cuerpos intrusivos, dentro de las zonas de borde de los ígneos o en las rocas adyacentes ya sean sedimentarias, ígneas o metamórficas. Los minerales de tungsteno ocurren dentro de, o adyacentes a las vetas de cuarzo que tienen forma tabular generalmente con pendiente fuerte y varían en espesor, longitud y profundidad ex-

tendiéndose en algunos casos miles de pies, acuñándose, engrosándose o arrequilándose en una serie de segmentos lenticulares escalonados a lo largo del rumbo y buzamiento (CONATORE, 1992); los minerales característicos son wolframita, huebnerita o ferberita; sin embargo scheelita también puede presentarse y en ocasiones en cantidades muy similares a la wolframita. Otros metales asociados con el tungsteno, algunos de los cuales pueden presentarse en cantidades recuperables son estaño, arsénico, bismuto, oro, plata, antimonio, cobre, hierro, plomo, molibdeno y zinc. Como minerales de ganga pueden encontrarse pirita, pirrotina, fluorita, rodocrosita y feldespatos.

Los minerales de tungsteno usualmente se presentan dispersos erráticamente en las vetas de cuarzo; sin embargo pueden estar localizados en "ore shoots" dentro del depósito con dimensiones muy variables; de acuerdo con Kuzvart (1978) la concentración de  $WO_3$  en estos depósitos fluctúa entre 0.4 y 4%. Este tipo de yacimiento tiene una amplia distribución en el mundo, pero las mayores concentraciones de carácter comercial se encuentran en la parte suroccidental de China donde se han diferenciado cuatro categorías: tungsteno-estaño en greisén; vetas de cuarzo con wolframita; vena de cuarzo con scheelita-wolframita; y depósitos de tungsteno con antimonio y oro (HITCHISON, 1992).

El tercer tipo de yacimientos de tungsteno, depósitos porfiríticos tipo stockwork, muestra una estrecha relación con zonas de intenso fracturamiento, brochamiento o cizalladuras. Cuando estos depósitos están encajados en rocas calcáreas, la composición química de los resalidos juega un papel importante en la precipitación de la scheelita, que llega a constituirse como el único mineral de tungsteno. En los depósitos de molibdeno porfirítico, el tungsteno ocurre como huebnerita en venillas de cuarzo, diseminado dentro del yacimiento y a partir de los cuales se puede recuperar como un subproducto, como es el caso de la mina de Climax en Colorado (WALLACE et al., 1968), donde los diferentes eventos hidrotermales que dieron lugar a la mineralización principal, ubicaron los minerales de tungsteno arriba y periféricamente a los del molibdeno; el tenor de  $WO_3$  en este depósito es tan solo del 0.03%.

Entre otras formas de ocurrencia del tungsteno, aunque de menor importancia que las anteriores, vale la pena mencionar las de placer a partir de los cuales se han recuperado grandes cantidades de tungsteno en el cinturón Circumpacífico, en China Suroccidental, Tailandia y Austria (CONATORE, 1982). La alta densidad y relativa insolubilidad de la wolframita y la scheelita en el ambiente natural, permiten la acumulación de los depósitos de placer, particularmente aquellos de tipo aluvial que son los más abundantes. Los placeres de tipo aluvial son menos comunes y están restringidos prácticamente a áreas cercanas a la fuente primaria, lo cual de acuerdo con Conatore (1992) es explicable porque el clivaje perfecto de ambos minerales permite el rompimiento de estos en partículas muy finas que posteriormente son ampliamente dispersadas en el área a medida que se alejan de la fuente. El contenido mínimo de  $WO_3$  según KUZVART (1978) es del 0.01% en estos depósitos de placer.

Otros depósitos que vale la pena mencionar son los de pegmatitas con wolframita o scheelita los cuales son muy irregulares, generalmente de tamaño pequeño lo que dificulta su explotación, razón por la cual se obtiene de estos depósitos un porcentaje muy bajo en la producción mundial de tungsteno.

El depósito de gran interés en los Estados Unidos es el del lago Seattle en California, donde existen salmueras con una concentración promedio de 0.07 kilogramos por tonelada de  $WO_3$ , existiendo unas reservas de 77.000 toneladas de  $WO_3$  (BARPENTER and GARRETT, 1959).

## EXPLOTACION

Desde el punto de vista económico y tecnológico, la ley de corte (cut-off) en un depósito de tungsteno es una función del tonelaje del depósito, métodos de minería y molienda, tasa de producción, costos de operación y de capital, condiciones de mercado y del valor de los metales asociados. En depósitos que son explotables económicamente, el cut-off varía entre el 1.09% y el 1.55% de  $WO_3$ , reflejando factores de concentración de 370 a 8200 como se puede apreciar en la tabla 3 (CONATORE, 1982).

El éxito de una explotación minera en muchos casos depende de la aplicación del esquema de extracción más eficiente, seguro y económico. Los depósitos de tungsteno pueden estar localizados en la corteza terrestre en ambientes y condiciones muy diferentes, de manera que para su extracción en ocasiones es necesario utilizar varios métodos mineros o modificaciones de los mismos, a medida que el depósito cambia en tamaño, forma, dirección o cuando las rocas encajantes cambian de carácter. Dependiendo del volumen de las reservas, de la forma del yacimiento y de su ubicación con respecto a la superficie, se pueden utilizar métodos de explotación a tajo abierto (open pit) o métodos de explotación subterránea.

En lo relacionado con la metalurgia, los minerales de tungsteno son recuperados primariamente por separación gravitativa. Por flotación la scheelita es recuperada a partir de rocas duras en un 70% o más, dependiendo de la naturaleza de la mena y de la competencia de los operadores (GRASBERG, 1979); en muchas ocasiones una gran parte del tungsteno va a terminar en la pila de desechos, razón por la cual la industria presiona constantemente a los investigadores en la búsqueda de técnicas más eficientes.

TAB.3: Ley de corte (cut-off) de tungsteno empleado en algunos yacimientos de importancia económica.

Depósito	Cut-off de la mena		Factor de concentración*
	$WO_3$ %	W%	
Mount Carbine Queensland, Australia (Wolframita)	0.09	0.07	470
Mount Pleasant (Tungsteno) New Brunswick, Canadá	0.32	0.25	1700
Strawberry, California Estados Unidos	1.00	0.79	5300
Canadá Northwest Territories, Canadá	1.55	1.22	8200

\*Factor de concentración =  $\frac{\% W \text{ en la mena}}{\% W \text{ en la corteza}}$

Fuente: Conatore (1982)

Indudablemente los problemas relacionados con la recuperación de los minerales de tungsteno, deben ser investigados previamente a la mayor inversión de capital, de tal manera que indicaciones claras de las posibles limitaciones sean tenidas en cuenta en las etapas iniciales de los estudios de factibilidad.

### TECNICAS DE PROSPECCION

En varias partes del mundo la mayoría de los descubrimientos de depósitos de tungsteno se han llevado a cabo con base en el reconocimiento de scheelita o wolframita en concentrados de bates, en áreas donde se recuperaba oro u otros minerales pesados. La bates muy utilizada en el pasado, es aún un método muy eficiente en la prospección de tungsteno; prueba de ellos son los programas de exploración geoquímica para scheelita adelantados con éxito en España en 1974 (ZANIOP y NESPEHEIRA, 1979) y en Groenlandia en 1981 (HALLENSTEIN et al, 1983). En ambos casos los concentrados de bates fueron estudiados visualmente con la ayuda de la lámpara de luz ultravioleta o con un microscopio binocular y posteriormente los resultados confirmados por análisis químicos.

Las ventajas en la aplicación de este método de prospección son las siguientes:

- a) No es necesario una gran densidad de muestreo para obtener resultados significativos,
- b) Se elimina el problema de evaluar anomalías irregularmente distribuidas (spot anomalies),
- c) Se puede disponer inmediatamente de los resultados en el campo para orientar el programa de exploración,
- d) Es posible determinar directamente en el campo el contenido de los minerales económicamente explotables en las muestras,
- e) Puede ser aplicado con igual eficiencia en muestras de suelos.

En 1982 INGEOMINAS llevó a cabo un programa de exploración para scheelita utilizando concentrado de bates y lámparas de luz ultravioleta. El contenido de scheelita determinado permitió delimitar un área con alto potencial para depósitos metasomáticos de contacto con scheelita (BUENAVENTURA, 1982).

Existe un nuevo método de prospección aplicable a minerales de tungsteno, desarrollado por Scintrex Limited, compañía canadiense (SEIGEL y RHABINS, 1985), denominado "Luminex Method" el cual está basado en el tiempo de resolución de la luminiscencia de un mineral, creado por una fuente de luz ultravioleta. Este método permite detectar los minerales desde el aire o directamente desde el terreno con equipos manuales; sin embargo una de las limitaciones principales es que los minerales deben estar expuestos en superficie sin cubierta vegetal o de suelo.

Los métodos geofísicos, particularmente los estudios aéreos regionales de magnetometría y radiometría, pueden ser útiles en muchos casos para localizar anomalías en cuerpos rocosos que presentan características favorables para depósitos de tungsteno, tales como localización de zonas de contacto de rocas ígneas, zonas con alta radioactividad o con baja intensidad en el campo magnético asociados generalmente con áreas mineralizadas y anomalías de baja gravedad relacionadas en ciertos casos con estructuras regionales.

Estudios geofísicos detallados tales como magnetometría, eléctrica y gravimetría se pueden aplicar directamente a zonas mineralizadas para definir la ubicación, tamaño y forma del depósito, así como en algunas ocasiones la profundidad del stock o sus contactos.

El muestreo y análisis de los plutones individuales de un intrusivo complejo, ha mostrado que algunas veces los plutones asociados a mineralizaciones de tungsteno, presentan concentraciones anómalas de tungsteno y de los elementos asociados.

El análisis de elementos indicadores (flúor, arsénico, boro) que tienen una gran movilidad y que generalmente están asociados con depósitos de tungsteno podrían ser útiles por los amplios halos que producen en rocas, suelos y plantas.

## SITUACION MUNDIAL

### RECURSOS Y RESERVAS

Más del 86% de los recursos de tungsteno en el mundo están concentrados en el Cinturón Circumpacífico. China cuenta con el 54% del total de los recursos mundiales y Canadá, Estados Unidos, Australia, Corea, Bolivia y Burma cuentan con el 32% (CONATORE, 1982). Hasta el momento se desconoce la proporción de los recursos Soviéticos que ocurren en el Área (Circumpacífica).

Las reservas a nivel mundial, de acuerdo con Conatore (1982), alcanzan a 2,94 millones de toneladas. La mayor parte de éstas se encuentran en el Cinturón Circumpacífico, particularmente en Asia que cuenta con el 58% de las reservas mundiales. Los países con las reservas más significativas son China, con el 46% del total; Canadá, Estados Unidos, Australia, Corea, Bolivia y Burma que cuentan con el 36% (STAFFORD, 1982). La tabla 4 indica la distribución de las reservas por regiones y por países.

China con las más grandes reservas de tungsteno, presenta una posición estratégica a nivel mundial; sin embargo, su importancia se ha visto disminuida por la amplia distribución de depósitos económicos en otras partes del mundo y por el adelanto tecnológico que ha permitido optimizar la producción.

### PRODUCCION

La producción mundial (Tabla 5), vino en ascenso hasta 1980 y posteriormente disminuyó mostrando una ligera recuperación entre 1984 y 1985. Como se observa históricamente, China ha sido el principal productor de tungsteno, seguido por URSS, República de Corea, Bolivia, Canadá y U.S.A. Desde el punto de vista de la producción minera, el mundo occidental presenta un aspecto un poco diferente, debido a que gran parte de ésta es llevada de los países en desarrollo a los industrializados, y por el incremento que muestran en la producción algunos países desarrollados.

Con base en la expansión de la producción en el mundo occidental entre 1970 y 1980 que fue del 48%, sustancialmente más alta que la tasa de consumo la cual fue del 2 - 3%. Muchas minas, particularmente las que han entrado en operación recientemente, han tenido que ser cerradas o disminuida su

producción. A pesar de esta medida hoy en día la oferta aún excede a la demanda y si esta situación persiste se espera que en un futuro cercano muchas minas tendrán que ser clausuradas.

## PRECIOS

El precio de los concentrados de tungsteno depende en gran parte de sus características, tales como el contenido de  $WO_3$ , impurezas, tamaño de las partículas y tipo de concentrados,

Tradicionalmente el concentrado de tungsteno es vendido en unidades de trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ); la unidad de tonelada corta de  $WO_3$  es equivalente al 1% de una tonelada corta o sea 20 libras de  $WO_3$  y contiene 15.86 libras de tungsteno (MINERAL FACTS AND PROBLEMS, 1980). Con base en lo anterior, el precio del concentrado está dado en dólares por unidad de tonelada (10 kgs). Internacionalmente los indicadores de precio más ampliamente aceptados son los de The Metal Bulletin (M.B.) y The International Tungsten Indicator (I.I.I.). Usualmente M.B. presenta por separado los precios de los concentrados de scheelita y los de wolframita. El I.I.I. presenta una combinación de los mismos. La tabla 6 muestra las variaciones del precio del concentrado de tungsteno (M.B., wolframita) desde 1976.

TAB. 4: Reservas mundiales de tungsteno.

Región y País	Reservas en miles de toneladas de W	%
<b>Asia:</b>	<b>1.696.4</b>	<b>57.67</b>
Burma	31.8	1.08
China	1.360.8	46.27
Korea Democrática	108.9	3.7
República de Korea	81.6	0.46
Malasia	13.6	2.77
Tailandia	18.1	0.62
Turkia	77.1	2.62
Otros	4.5	0.15
<b>Australasia:</b>	<b>109.4</b>	<b>3.72</b>
Australia	108.9	3.7
Otros	0.5	0.02
<b>América del Sur:</b>	<b>59.9</b>	<b>2.04</b>
Bolivia	39.5	1.34
Brasil	18.1	0.62
Otros	2.3	0.08
<b>América del Norte:</b>	<b>701.3</b>	<b>23.84</b>
Canadá	430.9	14.65
México	20.0	0.68
Estados Unidos	249.5	8.48
Otros	0.9	0.03
<b>Europa:</b>	<b>364.7</b>	<b>12.40</b>
Austria	18.1	0.62
Francia	15.9	0.54
Portugal	24.5	0.83
Reino Unido	61.2	2.08
URSS	213.2	7.25
Otros	31.8	1.08
<b>África</b>	<b>9.0</b>	<b>0.30</b>
Zimbabwe	4.5	0.15
Otros	4.5	0.15
Reservas Mundiales	2.940.7	

Fuente: Stafford (1982)

TAB. 5: Producción mundial y principales países productores de tungsteno. (toneladas de concentrados)

País	1976	1977	1978	1979	1980	1982	1983*	1984	1985
China	5715	6622	7121	9979	15014	12500	10000	13500	13500
Burma	276	278	471	692	753	844	500	1096	1100
Rep. de Corea	2587	2635	2500	2713	2737	2233	2000	2703	2600
Tailandia	2050	2204	3187	1826	1616	856	700	741	600
Turquía	928	998	801	998	998	150	200	**	**
Austria	1989	2358	2681	3193	3332	2588	2000	1843	2000
Bolivia	3182	2955	2852	3114	3359	2534	3000	2100	1700
Brazil	1002	1212	1165	1177	1202	1089	1000	998	1200
Canadá	1720	1812	2289	2581	3688	2947	250	3690	3000
México	235	191	234	252	270	99	100	**	**
USA	2644	2725	3128	3013	2754	1575	1100	1173	1100
Australia	541	1116	1179	1496	1495	1406	1200	1294	1400
Francia	633	653	608	590	601	599	750	796	800
Portugal	1259	1005	1104	1378	1701	1361	1200	1493	1400
URSS	7983	8210	8482	8709	8709	8900	9000	9100	9100
Otros	5305	5371	5805	5329	5090	5191	4350	4412	5600
Total Mundial	38040	40345	43607	47040	53319	44872	37350	44939	45100

\* Valores estimados  
 \*\* Información no disponible

Fuentes: Comstare (1982); Mining Annual Review (1984-1986).

TAB. 6: Promedio anual del concentrado de tungsteno (US\$ por mtu, 10 kg)\*

Año	Precio	Año	Precio
1976	114.29	1981	143.47
1977	169.03	1982	106.12
1978	143.79	1983	80.69
1979	138.83	1984	81.17
1980	144.41	1985	67.74

\* mtu = unidad de tonelada métrica; 10 kg de  $WO_3$ .

Fuente: Mining Annual Review (1986).

La Figura 2 muestra el comportamiento del precio del concentrado de  $WO_3$  en relación con la producción mundial desde 1976, observándose una ligera recuperación de esta última durante 1984 y 1985; sin embargo el precio continúa el descenso y es afectado en gran parte por el exceso de la oferta y por el aspecto de la inflación. La expectativa a nivel mundial es que si se logra un equilibrio entre la oferta y la demanda el precio del concentrado debe mejorar sustancialmente.

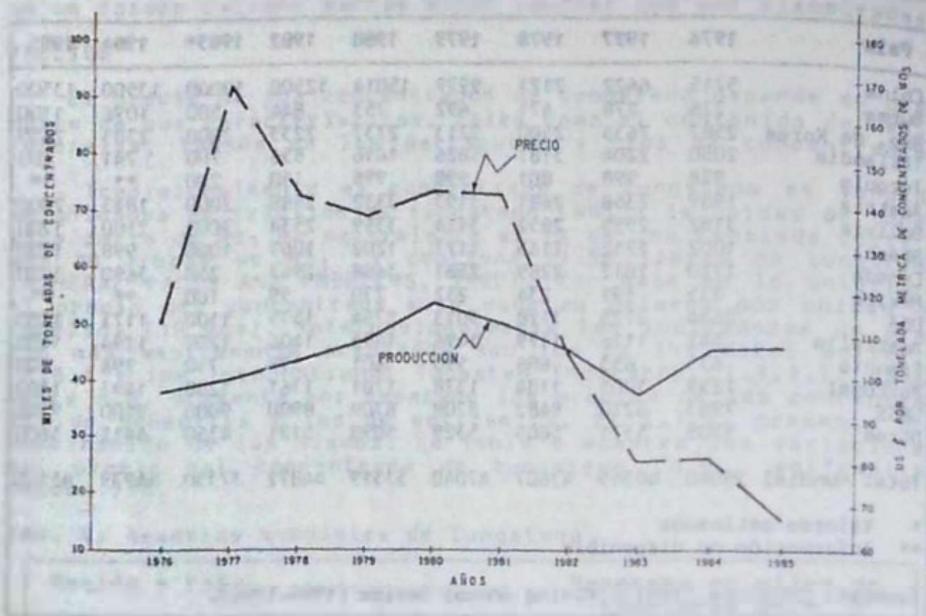


FIG.2: Gráfico indicando el comportamiento mundial del precio del tungsteno en relación con su producción.

## EL TUNGSTENO EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

A partir de los diversos programas de Cooperación Internacional de carácter técnico que Colombia ha realizado en los últimos años con algunos países, particularmente con Suecia y los Estados Unidos, es posible dilucidar el verdadero potencial de tungsteno en nuestro país.

La mayor parte de las reservas de tungsteno en el mundo (86%) están localizadas en el Cinturón Circumpacífico, una de las zonas más ricas de la tierra y donde están concentrados la mayor parte de los metales útiles al hombre (CONATORE, 1982). Por fortuna Colombia forma parte de este cinturón metalogénico y es la razón principal por la cual nuestro país presenta buenas perspectivas en la prospección y exploración para depósitos de tungsteno.

Actualmente en Colombia se conocen aproximadamente 14 ocurrencias minerales con tungsteno (principalmente scheelita), asociadas en algunos casos con depósitos metamórficos de contacto y en otros con venas de cuarzo hidrotermal generalmente de tipo euro-argentífero (Figura 3).

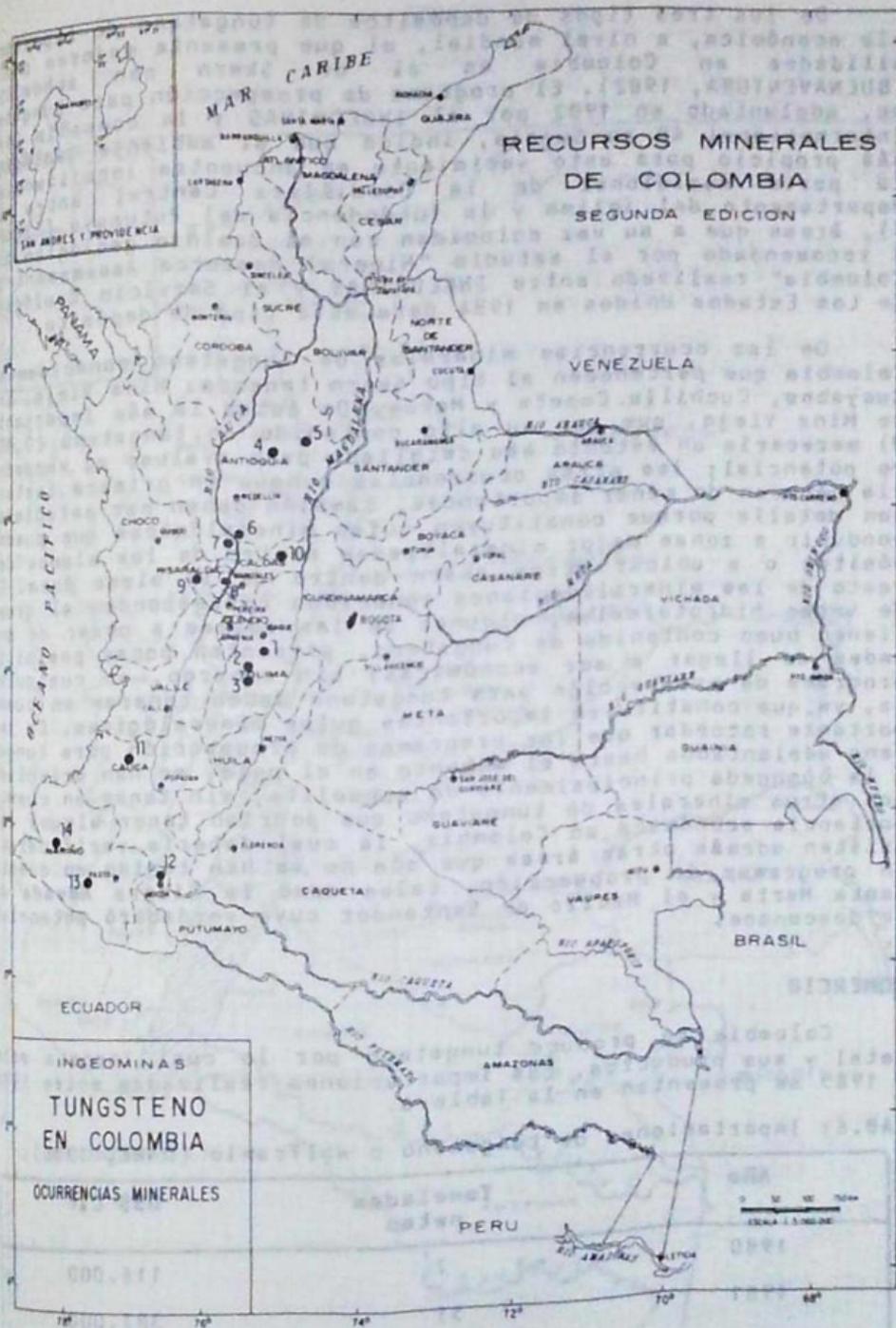


FIG. 3. Ocurrencias minerales con tungsteno en Colombia.

De los tres tipos de depósitos de tungsteno de importancia económica, a nivel mundial, el que presenta mejores posibilidades en Colombia es el de Skarn con scheelita (BUENAVENTURA, 1982). El programa de prospección para tungsteno, adelantado en 1982 por el INGEOMINAS y la compañía KAB International AB en Suecia, indicó que el ambiente geológico más propicio para este yacimiento se encuentra localizado en la parte meridional de la Cordillera Central entre el Departamento del Tolima y la Intendencia del Putumayo (Figura 4), áreas que a su vez coinciden con el dominio geológico No. 8 recomendado por el estudio "Mineral Resource Assessment of Colombia" realizado entre INGEOMINAS y el Servicio Geológico de Los Estados Unidos en 1984 para este tipo de depósito.

De las ocurrencias minerales de tungsteno conocidas en Colombia que pertenecen al tipo Skarn tenemos: Mina Vieja, Los Guayabos, Cuchilla Copete y Mocos. De éstas la más importante es Mina Vieja, que por su alto contenido en tungsteno (0.58% W) merecería un estudio más detallado para evaluar su verdadero potencial; las otras ocurrencias aunque en primera instancia parecen de menor importancia, también deben ser estudiadas con detalle porque constituyen guías mineralógicas que pueden conducir a zonas mejor mineralizadas dentro de los mismos depósitos o a ubicar otros skarn dentro de la misma área. El resto de las mineralizaciones conocidas corresponden al grupo de venas hidrotermales, algunas de las cuales a pesar de que tienen buen contenido de tungsteno, presentan pocas posibilidades de llegar a ser económicas; sin embargo, en cualquier programa de prospección para tungsteno deben tenerse en cuenta, ya que constituyen importantes guías mineralógicas. Es importante recordar que los programas de prospección para tungsteno adelantados hasta el momento en el país, se han orientado a la búsqueda principalmente de scheelita, sin tener en cuenta los otros minerales de tungsteno que podrían tener alguna importancia económica en Colombia, la cual debería verificarse. Existen además otras áreas que aún no se han tenido en cuenta en programas de prospección, tales como la Sierra Nevada de Santa Marta y el Macizo de Santander cuyo verdadero potencial se desconoce.

## COMERCIO

Colombia no produce tungsteno por lo cual importa este metal y sus productos. Las importaciones realizadas entre 1980 y 1985 se presentan en la Tabla 6.

TAB.6: Importaciones de tungsteno ó wolframio (DANE, 1986).

Año	Toneladas netas	US\$ CIF
1980	7	116.000
1981	51	387.000
1982	3	801.000
1983	1	281.000
1984	1	146.000
1985	2	131.000

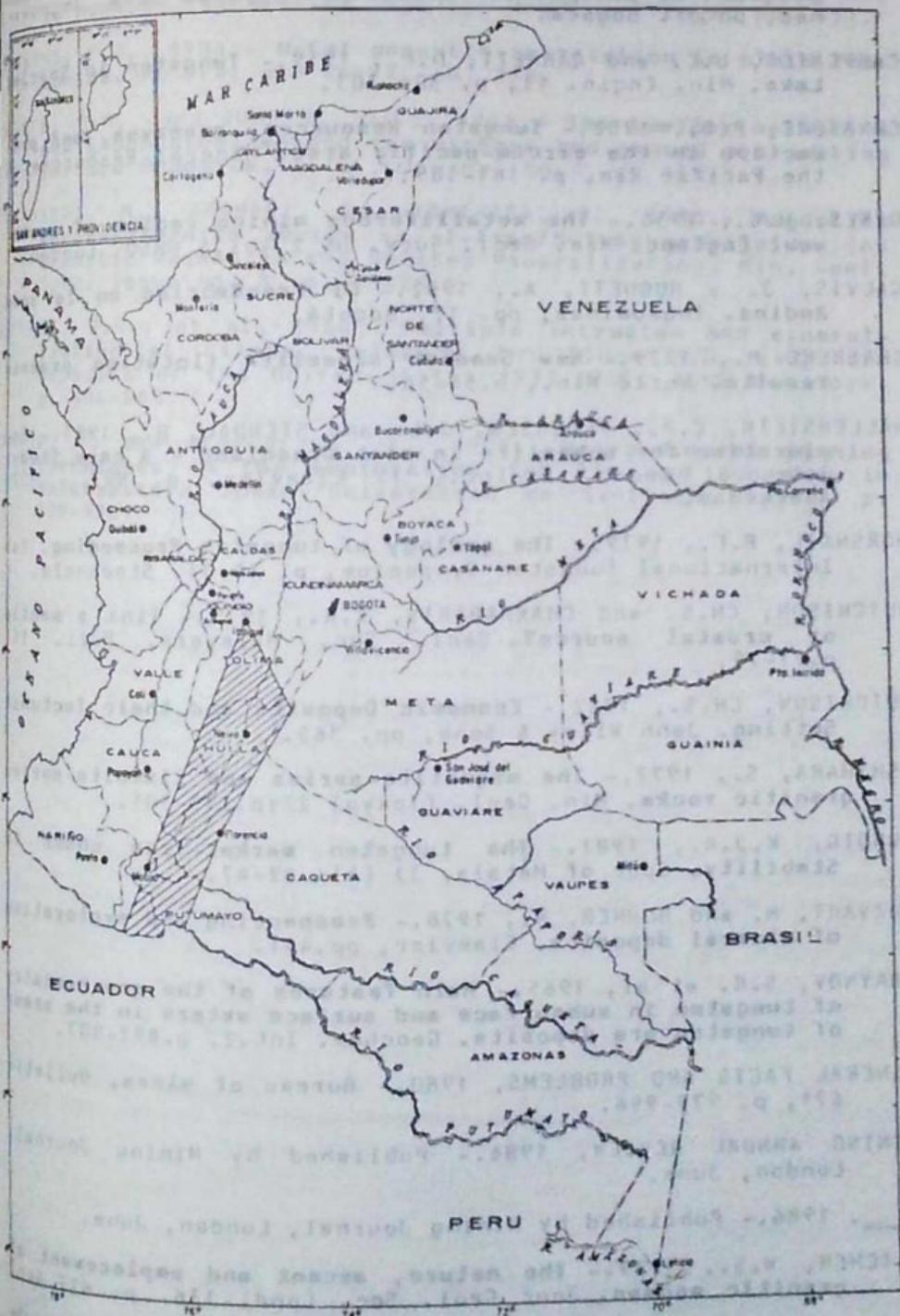


FIG. 4: Area potencial para tungsteno en Colombia.

## BIBLIOGRAFIA

- BUENAVENTURA, A.J., 1982.- Resultados del programa de prospección preliminar para tungsteno en Colombia y diseño del programa de prospección detallada. Informe 1094. Ingeominas, pp.37. Bogotá.
- CARPENTER, L.C. and GARRETT, D.E., 1959.- Tungsten in Searles Lake. Min. Engin. 11, p. 301-303.
- CONATORE, P.D., 1982.- Tungsten Resources, reserves, and production in the circum-pacific area. Mineral Resources of the Pacific Rim, p. 181-189.
- DINES, H.G., 1956.- The metalliferous mining region of south-west England. Mem. Geol. Surv. UK 2 vol.5 HMSO, London.
- GALVIS, J. y HUGUETT, A., 1982.- El Precámbrico en la zona Andina. Ingeominas, pp. 17. Bogotá.
- GRASBERG M., 1979.- New Swedish scheelite flotation process results. World Min., p.54-58.
- HALLENSTEIN, C.P., PEDERSEN, J.L. and STENDAL, M., 1983.- Exploration for scheelite in east Greenland - A case Study. Jour. of Geoch. Explor., 15 Elsevier, p. 897 - 907. Amsterdam.
- HORSNAIL, R.F., 1979.- The geology of tungsten Proceeding. 1st International Tungsten Symposium, p. 1A-31. Stockholm.
- HUTCHISON, CH.S. and CHAKRABARTY, K.R., 1979.- Tin: a mantle or crustal source? Geol. Soc. Malaysia, Bull. 11, p.71-79.
- HUTCHISON, CH.S., 1982.- Economic Deposits and their Tectonic Setting. John Wiley & Sons, pp. 365.
- ISHIHARA, S., 1977.- The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Min. Geol. (Tokyo) 27:p.293-305.
- KUNDIG, K.J.A., 1981.- The tungsten market-from chaos to Stability. Jour of Metals, 33 (4): 42-47.
- KUZVART, M. and BOHMER, M., 1978.- Prospecting and exploration of mineral deposits. Elsevier, pp.431.
- KRAYNOV, S.R. et al, 1965.- Main features of the geochemistry of tungsten in subsurface and surface waters in the areas of tungsten ore deposits. Geochem. Int.2, p.897-907.
- MINERAL FACTS AND PROBLEMS, 1980.- Bureau of mines, Bulletin 671, p. 979-996.
- MINING ANNUAL REVIEW, 1984.- Published by Mining Journal. London, June.
- \_\_\_\_\_, 1986.- Published by Mining Journal, London, June.
- PITCHER, W.S., 1979.- The nature, ascent and emplacement of granitic magmas. Jour Geol. Soc. Lond. 136. p. 627-662.
- QUIN, B.F. et al, 1974.- Biogeochemical exploration for Tg at Berrigton, New Zealand. Geochem. Expl. 3, p. 43-51.

- ELDMAN, J.H., 1979.- **Techniques in mineral exploration.** Applied Scien. Publ. pp. 533.
- ROSE, A.W., HAWKES, H.F. and WERR, J.S., 1979.- **Geochemistry in Mineral Exploration.** 2nd Ed. Academic Press. pp. 657.
- SIMONS, F.J., 1984.- **Metal deposits in relation to plate tectonics.** *Mineral and Rocks*, pp. 325.
- WIGGL, D.H., and ROBBINS, J.C., 1985.- **The luminox method: a new geophysical method for airborne and ground prospecting for ore deposits.** *I.T.C. Journal* No.3, p. 162-168.
- YAMASHI, M., ARAMAKI, S., ISHIHARA, S., 1980.- **Magnetite series/ilmenite series vs. I-Type/S-Type granitoids.** In: *Granitic Magmatism and Related Mineralization.* *Min. Geol. Spec. Issue* No. 8, p. 13-28.
- WILLACE, S.R., et al, 1968.- **Multiple intrusion and mineralization at Climax, Colorado.** In: Ridge J.D. (ed) *ore deposits of the United States 1933-1967.* ALNE New York. p. 606-640.
- ZANTOP, H. and NESPEREIRA, J., 1978.- **Heavy-mineral panning techniques in the exploration for tin and tungsten in Northwestern Spain.** *Universidad de Santiago, Spain*, p. 329-336.

## MINERALES DE ZINC

LUIS FERNANDO SARMIENTO R.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
Introducción .....	490
Usos .....	490
Usos antiguos .....	490
Usos modernos .....	491
Ambiente geológico .....	493
Geoquímica .....	493
Mineralogía .....	495
Tipos de depósitos de plomo y zinc .....	496
Exploración .....	503
Minería .....	503
Beneficio y Metalurgia .....	504
Beneficio .....	504
Metalurgia .....	504
Situación Mundial .....	505
Consideraciones políticas .....	505
Reservas .....	506
Producción .....	508
Consumo .....	510
Precios .....	510
Situación actual y perspectivas .....	510
El Zinc en Colombia .....	512
Depósitos .....	512
Reservas .....	550
Producción Nacional .....	550
Consumo aparente .....	552
Comercio .....	552
Perspectivas del mercado nacional .....	554
Bibliografía .....	558

## INTRODUCCION

El zinc es un elemento calcófilo según la clasificación geoquímica propuesta por Goldschmidt (1937), y sulfófilo según la clasificación de Rankama y Sahama (1954). Su comportamiento geoquímico es tan semejante al del plomo, que sus minerales comúnmente se encuentran juntos en la mayoría de los depósitos.

Se conocen artefactos de zinc con una antigüedad de 2.500 años.

El zinc es el cuarto metal en el consumo mundial y su importancia industrial es solamente superada por el hierro, el aluminio y el cobre (WEDDOW et al, 1973).

## USOS

## USOS ANTIGUOS

El zinc fue llamado plata falsa hace aproximadamente 2.000 años. Los artefactos más antiguos conocidos datan de 500 a.c. El bronce fue usado en la antigüedad por varias culturas que lo produjeron a partir de minerales de cobre y zinc (WEDDOW et al, 1973).

Dos siglos antes de la era cristiana los romanos produjeron bronce y lo utilizaron para hacer monedas. El zinc fue conocido en la India desde el año 1.000 d.c., aunque los chinos desarrollaron alguna metalurgia del zinc antes de este tiempo. Excavaciones recientes en tumbas medievales en la India, demuestran que la tecnología de la fundición y destilación de zinc metálico desde sus menas, fue desarrollada varios siglos antes que en Europa. La identidad del zinc como metal solo fue conocida en Europa hasta la edad media; durante los siglos XVII y XVIII se importaron lasas de zinc de Asia, las cuales fueron vendidas en Europa. La tecnología de la fundición del zinc fue llevada de la China a Europa alrededor de 1730 (WEDOW et al, 1973).

La fundición comercial del zinc comenzó en 1806 con la introducción de la retorta horizontal en Lieja, Bélgica (WEDOW et al, 1973).

### USOS MODERNOS

En los Estados Unidos la industria del zinc comenzó en 1860. En 1895, el descubrimiento de gas natural en Kansas favoreció el desarrollo de fundiciones en los estados del suroeste, a partir de concentrados producidos en los depósitos de plomo y zinc del distrito Tristate de Kansas, Oklahoma y del sureste de Missouri (WEDOW et al, 1973; CAMMAROTA, 1983).

La introducción comercial del proceso de flotación de espuma, en los comienzos del siglo XX, hizo posible la recuperación de concentrados de zinc de menas mezcladas de cobre, plomo, zinc, hierro y la producción de concentrados de zinc de alto grado.

Recientemente se han hecho avances importantes en la tecnología electrolítica del zinc y en el proceso de fundición (WEDOW, et al, 1973; CAMMAROTA, 1983).

El zinc metálico es usado en galvanizado en la elaboración de productos de latón y bronce, en pigmentos y otros productos químicos.

El mayor mercado de zinc es la industria de la construcción, que lo utiliza en acero galvanizado como acero estructural, y en techados, divisiones, canales y valles reforzadas. El acero galvanizado es el material común para sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado; también se usa en conductos de alambres eléctricos y de teléfonos (WEDOW et al, 1973; CAMMAROTA, 1983). Pinturas de polvo de zinc se utilizan para aumentar la protección del acero estructural.

El latón y el bronce son aleaciones de zinc y otros metales y también tienen aplicación en la construcción. La industria utiliza tuberías, grifos, válvulas y condensadores de latón (WEDOW et al, 1973; CAMMAROTA, 1983).

La industria del transporte, que incluye automotores, aviones, barcos, bicicletas, etc. es un consumidor importante de acero galvanizado. Aproximadamente la mitad del consumo de óxido de zinc es utilizado en la industria del caucho, especialmente para llantas. El hierro galvanizado, el latón, las láminas de zinc y el óxido de zinc son utilizados en equipos eléctricos (WEDOW et al, 1973).

El zinc se utiliza también en la industria de baterías secas y empaquetaduras burletes "weatherstripping" y planchas litográficas. Otros usos son la fabricación de ánodos utilizados para proteger el casco de los barcos, plataformas marinas de perforación y producción de petróleo y tuberías sumergidas. También se usa en aleaciones con aluminio y magnesio y para purificar y recuperar plomo y oro (WEDOW et al, 1973; CAMAROTA, 1983).

El óxido de zinc es útil como punto de partida para todos los componentes de zinc industrial. La industria del caucho es el principal consumidor de óxido de zinc, seguida por la industria química y la sensibilización del papel de fotocopias y pinturas; otras aplicaciones menores del óxido de zinc son la industria textil, cubrimiento de pisos y lubricantes (WEDOW et al, 1973; CAMAROTA, 1983).

El litopon (lithopone), un coprecipitado de sulfato de bario, es un pigmento usado en pinturas, caucho y tintas de impresión. El sulfato de zinc y el cloruro de zinc se usan en elaboración de materiales a prueba de fuego, conservación de madera, fundentes, micronutrientes y otras aplicaciones. El zinc es un aditivo para fertilizantes. Muchos otros compuestos químicos de zinc tienen aplicaciones industriales y farmacéuticas (WEDOW et al., 1973; CAMAROTA, 1983).

En la Figura 1 se indica la distribución de consumo del zinc en EE.UU. de acuerdo con los usos.

### USOS DEL ZINC

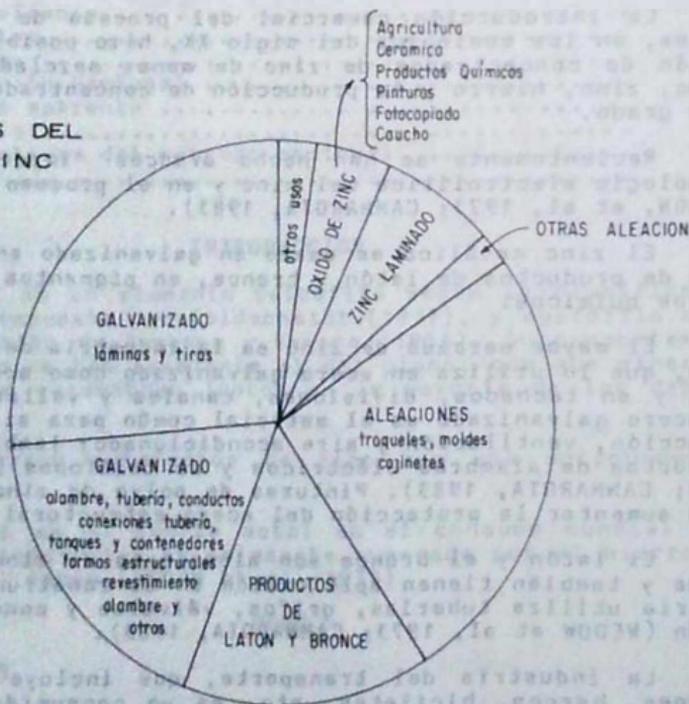


FIG. 1: Usos del zinc. Distribución del consumo de planchas de zinc en los Estados Unidos por productos durante 1984. Figure elaborada con datos tomados de Jolly (1985).

## AMBIENTE GEOLOGICO

### GEOQUIMICA

El zinc es el elemento con número atómico 30 y peso atómico 65,38; la abundancia de sus isótopos es la siguiente: Zn 64, 48,89%; Zn 66, 27,81%; Zn 67, 4,11%; Zn 68 18,56% y Zn 70, 0,62%. En número de coordinación cuatro, el radio iónico del  $Zn^{2+}$  es 0.71 Å y en número de coordinación seis, es 0.74 Å. [Estos radios iónicos son similares a los del  $Mg^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$  y  $Fe^{+2}$ . El comportamiento del zinc es semejante al del cadmio y el mercurio, especialmente al primero; esa es la causa por la cual el cadmio y el zinc siempre están asociados en la naturaleza (RANKAMA y SAHAMA, 1954). El zinc ocupa el puesto 23 en abundancia en la corteza terrestre.

### CARACTER GEOQUIMICO

Según la clasificación geoquímica de los elementos propuestos por Goldschmidt, el zinc es un elemento predominantemente calcófilo y según la clasificación de Rankama y Sahama (1954) es sulfófilo, es decir presenta afinidad por el azufre aunque también tiene algunas características de elemento litófilo (GOLDSCHMIDT, 1937) y débilmente oxifilo (RANKAMA y SAHAMA, 1954) es decir tiene algo de afinidad por el oxígeno. Esta aparente ambigüedad es explicable por su naturaleza anfotérica, es decir que su hidróxido actúa como una base débil o como un ácido débil, según sea el pH del ambiente acuoso. Este aspecto del comportamiento del zinc es semejante con el del aluminio, berilio y galio y opuesto al del hierro y manganeso (RANKAMA y SAHAMA, 1954; LEVINSON, 1974).

### CONTENIDO DE ZINC EN ROCAS

**En rocas ígneas.**— El contenido de Zn en las rocas ígneas es de 130 ppm en basaltos y sienitas, 72 ppm en rocas de composición intermedia y variable entre 39 y 69 ppm en rocas félsicas (ROSE et al, 1979; LEVINSON, 1974, 1980). La esfalerita es el mineral de zinc más común e importante en las rocas ígneas.

El comportamiento del zinc en los procesos magmáticos es similar al del plomo. Sin embargo cantidades pequeñas de zinc permanecen en todas las fases cristalinas de la diferenciación magmática, debido al reemplazamiento diadócico del zinc con el hierro ferroso y el magnesio en las estructuras cristalinas. Lo anterior permite explicar la presencia de cantidades pequeñas de zinc en los óxidos de hierro magnetita e ilmenita formados en las etapas magmáticas tempranas (RANKAMA y SAHAMA, 1954, LEVINSON, 1974).

La cantidad de zinc en los sulfuros magmáticos tempranos es pequeña. La proporción de zinc que se separa del magma al mismo tiempo que los sulfuros tempranos, permanece en las soluciones residuales de la cristalización y pasa a los últimos diferenciados. Por esto el zinc es concentrado en las fases pneumatolíticas o hidrotermales que puedan dar origen a alteraciones de sulfuro.

El zinc no forma silicatos independientes en las rocas ígneas, y tampoco puede incorporarse normalmente a la estructura de los feldspatos; sin embargo los minerales petrogénicos como anfíbol, piroxeno, biotita, tremolita, celadita, tur-

malina y granate poseen variedades ricas en zinc; la mayoría de estas variedades son más comunes en rocas metamórficas que en rocas ígneas (RANKAMA y SAHAMA, 1954; LEVINSON, 1974).

**En rocas sedimentarias.**— El contenido promedio de zinc en rocas sedimentarias es de 16 ppm en areniscas, 20 ppm en calizas y dolomitas y 95 ppm en shales. Los shales carbonáceos son en promedio las rocas sedimentarias comunes con mayor contenido de zinc. Algunos shales bituminosos contienen hasta varios miles de partes por millón. Las arcillas de aguas profundas presentan en promedio 165 ppm; algunos lodos del Mar Rojo contienen en promedio 34.000 ppm (ROSE et al, 1979; LEVINSON, 1974, 1980).

La distribución de plomo y zinc en rocas y aguas naturales puede verse en la Tabla 1.

TAB. 1: Concentración de plomo y zinc en rocas y aguas naturales (ppm) (Fuente WEDEPOHL, 1969; CARPENTER et al, 1974, BREWER y SPENCER, 1969; SKINNER et al, 1967, en MAYNARD, 1983; LEVINSON, 1980).

Rocas Ígneas	Plomo	Zinc
Peridotita	0.3	56
Gabro	3.2	100
Diorita	5.8	70
Granodiorita	15	52
Granito	24	48
Rocas Ígneas máficas (corteza oceánica)	5	100
Rocas ígneas intermedias	15	60
Rocas ígneas félsicas (corteza continental)	5	100
<b>Rocas Sedimentarias</b>		
<b>Areniscas</b>		
Areniscas de cuarzo y arenitas feldespáticas	10	30
Arenitas lodosas líticas	20	95
<b>Shale</b>		
Promedio shales	-	100
Shale rico en carbono	24	200
Shale pobre en carbono	23	-
Carbonatos	5	20
<b>Sedimentos recientes</b>		
Lodo marino	23	90
arcillas pelágicas	55	140
<b>Aguas naturales</b>		
Agua de mar	0.00003	0.005
Agua intersticial	-	0.012
Salmuera Salton Sea	80	780
Salmuera profunda de formación, Canadá	-	750
Salmuera profunda de formación Mississippi	30	155
Salmuera Atlantis II Deep	0.6	5.4

## CICLO GEOQUÍMICO

Durante la meteorización, el zinc es fácilmente disuelto como sulfato o cloruro y es transportado por las aguas superficiales o subterráneas. El ión  $Zn^{+2}$  es muy móvil aunque está limitado por la tendencia a ser adsorbido por óxidos de manganeso y materia orgánica insoluble (ROSE et al, 1979; LEVINSON 1974, 1980). En los yacimientos de sulfuros de zinc, la reprecipitación de zinc como carbonato, silicato y otro mineral oxidado, según la disponibilidad de aniones y el régimen hi-

geológico originan un enriquecimiento secundario en la zona de meteorización, de modo tal que el zinc puede ser completamente lixiviado de la parte superior del yacimiento primario (RANKAMA y SAHAMA, 1954; LEVINSON, 1974, 1980).

El zinc, junto con otros elementos que tienen afinidad por el azufre, se precipita y concentra en sedimentos arcillosos ricos en azufre; también se concentra en fosforitas de origen orgánico.

Algunas similitudes en el comportamiento químico del zinc y el aluminio, sugieren que aquel debería concentrarse en las bauxitas. Sin embargo esto solamente ocurre donde la roca primaria contiene cantidades apreciables de zinc y se forman carbonatos y silicatos de zinc, arcillas ricas en zinc y cinabrita.

Los óxidos de hierro y manganeso absorben cantidades apreciables de zinc. El zinc permanece parcialmente en el agua de mar y finalmente es depositado en los sedimentos de carbonato. Algunas dolomitas contienen varios miles de partes por millón de zinc; a veces el contenido alcanza 1-2% de Zn, parcialmente en sustitución sólida en dolomita (RANKAMA y SAHAMA, 1954; ROSE et al, 1979).

## MINERALOGIA

### MINERALES DE MENA

Los minerales de mena del Zn y del Pb generalmente están asociados de tal manera que son raras las menas que contienen solamente uno de los dos metales.

El zinc es un constituyente mayor de 55 minerales aproximadamente. El mineral de mena de zinc volumétricamente más importante es el sulfuro esfalerita,  $ZnS$ , también conocido como blenda, el cual cristaliza en el sistema cúbico (WEDDOW et al, 1973).

La esfalerita comúnmente es de color amarillo o marrón resinoso, pero existen variedades de otros colores, según el tipo y contenido de impurezas. La variedad pura es casi incolora y es denominada cleiofana, en tanto que la variedad de colores marrón oscuro a negro, con más de 10% de hierro, se conoce como marmatita.

La esfalerita puede contener cantidades traza de plata, cadmio, germanio, galio, indio, talio, hierro, manganeso y cobalto, de los cuales se recuperan los seis primeros. El contenido en estas impurezas depende principalmente de la temperatura de formación; en general la esfalerita de origen hidrotermal de temperatura elevada contiene cobalto, hierro abundante y manganeso, mientras el contenido de galio y germanio es pequeño, y no hay talio. El cadmio casi siempre está presente independientemente de la temperatura de formación.

El galio y el indio son indicativos de temperaturas intermedias. El talio únicamente ocurre en esfalerita formada a temperatura baja a intermedia.

El sulfuro wurtzita,  $ZnS$ , es relativamente raro y menos estable que la esfalerita. La meteorización de las menas de sulfuros de plomo y zinc produce smithsonita  $ZnCO_3$  y el sil-

cato hidratado, hemimorfita  $Zn_4 Si_2 O_7 (OH)_2 \cdot 2H_2O$ . La franklinita  $(Fe, Zn, Mn)(Fe, Mn)_2 O_4$ , la wilfemita  $Zn_2 SiO_4$  y la zincita  $ZnO$ , son minerales de mena en pocos depósitos.

El zinc nativo existe en la naturaleza, pero únicamente es una curiosidad mineralógica.

Los sulfuros pirita  $FeS_2$ , calcopirita  $CuFeS_2$ , tetrahedrita  $(Cu, Fe)_{12} Sb_4 S_{13}$ , tenantita  $(Cu, Fe)_{12} As_4 S_{13}$ , argentita  $Ag_2 S$ , bournonita  $PbCuSbS_5$ , y algunas sulfosales son minerales primarios generalmente asociados con las menas de esfalerita y galena. Otros sulfuros asociados con las menas, aunque de ocurrencia local son marcasita  $FeS_2$  y pirrotita  $Fe_7 S_8$  (o  $Fe_{1-x} S$ ).

Algunos de esos minerales, así como los metales menores asociados en los sulfuros, comúnmente se recuperan como coproductos y subproductos (MORRIS, 1973; WEDOW et al, 1973).

Los minerales primarios de ganga más comunes en los depósitos de Zn y Pb son calcita, dolomita y otros carbonatos, barita y fluorita.

## TIPOS DE DEPOSITOS DE PLOMO Y ZINC

Los depósitos de plomo y zinc en algunos casos también son productores de cobre; por esta razón se incluyen en este capítulo algunos tipos de depósitos de cobre. Los yacimientos de estos metales ocurren en una variedad de ambientes geológicos y presentan una diversidad de características de modo tal que pueden agruparse en dos categorías: I. Depósitos estratoconfinados en secuencias de rocas volcánicas o sedimentarias. II. Depósitos relacionados con procesos predominantemente magmáticos.

- I. **Depósitos estratoconfinados;** o sea localizados dentro de secuencias estratificadas de rocas sedimentarias o volcánicas, sin necesidad de que sean estratiformes; están restringidos a determinados intervalos estratigráficos; ocurren en una gran variedad de situaciones tectónicas, aunque en casi todas ellas, la presencia de una tectónica local extensional, asociada con un adelgazamiento de la corteza parece ser un elemento común (SAWKINS, 1976a,b; 1984a) así como su origen a partir de soluciones en las cuales, aunque puede haber un componente magmático, éste no representa la parte principal de las soluciones mineralizantes.
- II. **Depósitos formados por procesos predominantemente magmáticos;** no necesariamente están restringidos a rocas estratificadas y que ocurren en zonas de subducción, que representan límites convergentes de placas litosféricas sometidas a un régimen de esfuerzos predominantemente compresional; estos depósitos están asociados con los arcos magmáticos desarrollados en estas zonas y en su origen intervinieron soluciones mineralizantes, en las cuales el componente magmático predomina.

## DEPOSITOS ESTRATOCONFINADOS DE PLOMO Y ZINC

Según la litología encajante (volcanitas o sedimentitas) los depósitos estratoconfinados de plomo y zinc pueden dividirse en dos categorías:

**Depósitos contenidos principalmente en vulcanitas** (depósitos vulcanogénicos) desarrollados en situaciones tectónicas en las cuales hay una participación de la corteza oceánica.

Este subgrupo incluye los siguientes tipos de depósitos:

- Cobre, zinc en vulcanitas máficas. (Ej. Chipre).
- Cobre, zinc, plomo en vulcanitas félsicas e intermedias (Ej. Kurcko).

**Depósitos contenidos en sedimentitas** (depósitos sedimentogénicos) desarrollados sobre corteza continental.

Este subgrupo incluye los siguientes tipos de depósitos:

- Plomo, zinc exhalativos en sedimentos (ej: Mc Arthur River)
- Plomo (zinc) en carbonatos (Ej: Mississippi Valley).
- Plomo (zinc) en areniscas (Ej: Morocco)
- Cobre (plomo, zinc) diseminados estratoconfinado en shales o areniscas (Ej: African Copperbelt).

También es posible clasificar los depósitos estratoconfinados de plomo, zinc, según la estructura y textura de las mineralizaciones en los siguientes grupos:

1. **Depósitos de sulfuros masivos estratiformes:** la mineralización predominantemente consiste en estratos o masas estratiformes de sulfuros masivos:

Incluye los siguientes tipos de depósitos:

- Cobre, zinc en vulcanitas máficas.
- Cobre, zinc, plomo en vulcanitas félsicas e intermedias.
- Plomo, zinc exhalativos en sedimentitas.

2. **Depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados:** la mineralización predominantemente consiste en sulfuros diseminados en determinados intervalos estratigráficos.

Incluyen los siguientes tipos de depósitos:

- Plomo (zinc) en areniscas.
- Cobre (plomo, zinc) diseminados estratoconfinados en shales o areniscas.

3. **Depósitos de sulfuros en venas y vacíos de disolución estratoconfinados en carbonatos** (o depósitos de plomo, zinc en carbonatos).

**Depósitos de sulfuros masivos estratiformes.** - Depósitos de cobre, zinc en vulcanitas máficas. Consisten en estratos o masas estratiformes de pirita, calcopitita y esfalerita masivas en basaltos almohadillados y diques de diabasa (FRANKLIN et al, 1981; COX, 1983).

Los depósitos ocurren en secuencias ofiolíticas de antiguos dorsales oceánicas, en general en situaciones tectónicas donde hay límites divergentes de placas litosféricas con participación de corteza oceánica; sin embargo no se ha entendido claramente el contexto geotectónico en donde fueron generados los depósitos arcáicos (FRANKLIN et al, 1981; SAWKINS, 1984a).

**Origen de los depósitos de sulfuros masivos estratiformes.**— La mayoría de los autores (FRANKLIN et al, RONA, 1984, LARGE, 1980; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; SANGSTER, 1976) basados en evidencias texturales, petrológicas, geoquímicas e isotópicas, concuerdan en postular que los depósitos de sulfuros masivos fueron formados en el fondo marino y cerca de respiraderos o sitios de exhalación de descargas de sistema hidrotermales. Los sulfuros estratiformes son formados por la precipitación de los metales a partir de los fluidos hidrotermales; existen ejemplos recientes en los sistemas geotermales del mar Rojo, y otras dorsales oceánicas donde estos mecanismos producen mineralizaciones similares (RONA, 1984). Esta clase de depósitos también se ha denominado exhalativos por considerarse que se forman por exhalaciones de emanaciones fluidas ricas en metales (LARGE, 1980).

De manera general, se considera que la circulación de aguas salinas calentadas a través de las vulcanitas o sedimentos del fondo marino, lixivia los metales contenidos en estos y genera las soluciones mineralizantes. Se han sugerido varias posibles fuentes para estas soluciones en el agua del mar; también se ha propuesto el agua contenida en los sedimentos o rocas de la corteza superior, así como fuentes magmáticas (LARGE, 1980; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981, SANGSTER, 1976).

Los mecanismos que calientan las aguas y las ponen en circulación son principalmente el alto flujo calorífico (RONA, 1984) asociado con adelgazamiento de la corteza, propio de áreas con tectónica local extensional, o relacionado con actividad magmática (RONA, 1984; LARGE, 1980; SAWKINS, 1984a,b). También se ha planteado la hipótesis de un mecanismo de bombeo sísmico inducido por la actividad de fallas (LARGE, 1980).

Sawkins (1984,b) ha propuesto un mecanismo de deshidratación episódica de los sedimentos para explicar la génesis de los depósitos exhalativos contenidos en sedimentitas.

Considerando que la litología encajante generalmente es poco permeable, se ha supuesto que los canales por los que circulan las soluciones mineralizantes predominantemente son sistemas de fracturas (LARGE, 1980, SAWKINS, 1984b).

En muchos depósitos la mineralización presenta estructuras y texturas sedimentarias; esto sugiere que la precipitación de los sulfuros ocurrió cerca del fondo marino, simultáneamente con la sedimentación, o relativamente poco tiempo después; sin embargo, en algunos depósitos esto es objeto de controversia (MAYNARD, 1983, BOAST et al, 1981).

La zonificación de metales observada en muchos depósitos ha sido explicada como la secuencia de depósitos de sulfuros metálicos de acuerdo con su solubilidad (LARGE, 1980; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981).

**Depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados.**— Depósitos de plomo (zinc) en areniscas. Los depósitos consisten en estratos o láminas particulares de areniscas con galena y esfalerita diseminadas (BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

La mayoría de los yacimientos están localizados en plataformas marinas relativamente estables, bordes de cuencas o en las sedimentitas de pie de monte asociadas por lo menos con algún levantamiento orogénico, siempre sobre corteza continental (BJORLYKKE y SANGSTER, 1981; BRISKEY, 1982).

**Origen de los depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados.**— El origen de los depósitos de sulfuros diseminados estratoconfinados se ha atribuido a la precipitación de sulfuros en los poros y espacios intergranulares de capas de areniscas o lodolitas, donde prevalecieron localmente condiciones reductoras (TOURTELOI y WINE, 1976; GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; BRISKEY, 1982; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

Las soluciones mineralizantes provienen de aguas salinas; la salinidad por lo menos en partes es consecuencia de la disolución de evaporitas (GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; SAWKINS, 1984a). Algunos autores (BRISKEY, 1982) consideran la participación de aguas subterráneas derivadas del continente, las cuales aportan metales. Se ha sugerido por lo menos para los depósitos de cobre (plomo, zinc) diseminados estratoconfinados (rifting) calientan y ponen en circulación las aguas, las cuales lixivian el cobre de las intercalaciones basálticas que acompañan los eventos de rifting (SAWKINS, 1984a).

Las soluciones metalíferas, precipitan los sulfuros únicamente en aquellos estratos en donde las condiciones reductoras actúan como trampas de la mineralización (GUSTAFSON y WILLIAMS, 1981; BRISKEY, 1982). Renfro (1974) ha recalcado la importancia de estratos ricos en materia orgánica derivados de algas en llanuras evaporíticas-Sabkhas.

En los depósitos de plomo (zinc) en areniscas, Rickard et al (1979) han planteado que la deshidratación de los sedimentos en la cuenca causada por la compactación, provee de soluciones salinas con metales disueltos; las soluciones migran hacia los bordes de la cuenca, a través de arenitas permeables; la precipitación de los sulfuros ocurre entonces por disminución de la temperatura y la presión y/o por la mezcla con agua subterránea rica en azufre.

**Depósitos de sulfuros de plomo y zinc en venas y vacíos de disolución estratoconfinados en carbonatos.**— Son mineralizaciones estratoconfinadas de galena, esfalerita y cantidades menores de calcopirita en rocas de carbonato, generalmente cerca de la interfase entre caliza y dolomita. Los sulfuros ocurren como relleno de fisuras y vacíos de disolución, como la matriz de brechas de derrumbamientos sinsedimentario, brechas de colapso por solución, brechas de disolución, brechas tectónicas, o en los espacios vacíos de estructuras arrecifales y otros espacios que representan la poroidad primaria o secundaria de la roca encajante (SNYDDER y GERDEMANS, 1969; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HAGNI, 1976, 1982; HEYL, 1968, 1982).

La mayoría de los depósitos están localizados en altos tectopográficos o en los márgenes de cuencas intracratónicas o epicratónicas grandes (SAWKINS, 1984a). Según Anderson (1980) los depósitos ocurren en todas las cuencas sedimentarias grandes del mundo y pueden considerarse como un producto normal de la evolución de las mismas. En algunos depósitos puede establecerse relación con desgarramiento cortical (rifting) (SAWKINS, 1984).

Las mineralizaciones están encajadas en secuencias de carbonatos depositados en aguas someras, muchas veces en plataformas marinas, arrecifes, elevaciones y barras y están asociadas con cambios laterales de facies (HAGNI, 1976, 1982; HEYL, 1968, 1982; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HOAGLAND, 1976; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

En la mayoría de los depósitos las secuencias de carbonatos representan facies marginales de la cuenca, y varían lateralmente hacia el centro de la cuenca a secuencias relativamente gruesas de lodolitas depositadas en medios marinos (BEALES y JACKSON, 1968; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HAGNI, 1976; HOAGLAND, 1976; HEYL, 1968, 1982).

Las unidades litoestratigráficas encajantes de la mineralización contienen intervalos estratigráficos permeables, que permiten el movimiento lateral extenso de soluciones y están asociadas con inconformidades. La mayor parte de la mineralización ocurre como relleno de espacios vacíos y en menor proporción como sulfuros diseminados o reemplazamiento de la roca encajante. En general, los depósitos son de bajo grado pero de gran tamaño (BEALES y JACKSON, 1968; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; SNYDER, 1968; HAGNI, 1976; HOAGLAND, 1976; HEYL, 1968, 1982; ANDERSON, 1980; BJORLYKKE y SANGSTER, 1981).

Es común la dolomitización y disolución de los carbonatos y el desarrollo de lodolitas como residuos insolubles; también es común la presencia de arcilla illita, clorita alterada a muscovita y en algunos casos silicificación y formación de "jasperoide", así como la recristalización de las calizas a calcita espar (SNYDER, 1968; HAGNI, 1976; HOAGLAND, 1968, 1976; HEYL, 1968, 1982).

**Origen de los depósitos de plomo y zinc en carbonatos.**— Con base en el hecho que las salmueras encontradas en las inclusiones fluidas de los minerales de los depósitos de plomo y zinc en carbonatos, son similares a las salmueras de cuencas sedimentarias encontradas en perforaciones para exploración de hidrocarburos, se ha postulado que durante el desarrollo de cuencas sedimentarias grandes, las aguas connatas intersticiales cambian en composición, haciéndose más salinas, posiblemente debido a la disolución o la expulsión de fluidos de estratos de evaporitas y originan las salmueras que transportan los metales y causan la mineralización (BEALES y JACKSON, 1968; ANDERSON, 1980; SANGSTER, 1976, 1981).

El agua de las salmueras parece ser una mezcla compleja de agua de mar y localmente agua meteórica modificada por la interacción con las rocas de la cuenca; algunos autores plantean la participación de aguas subterráneas derivadas del continente.

Debido a gradientes hidrodinámicas de presión, ocasionadas por compactación de los sedimentos, esas salmueras migran buzamiento arriba hacia los bordes de las cuencas a través de intervalos estratigráficos permeables. Posiblemente la migración de las salmueras, ocurre un poco después de la migración primaria de hidrocarburos como un proceso epigenético (BEALES y JACKSON, 1968; CRAWFORD y HOAGLAND, 1968; HAGNI, 1976, 1982; HEYL, 1968, 1982; HOAGLAND, 1976; SANGSTER, 1976, 1981; SNYDER, 1969; ANDERSON, 1980).

Adicionalmente al efecto de compactación, se ha sugerido que el calentamiento súbito local, por ejemplo relacionado con una intrusión ígnea, reduciría localmente la densidad de las salmueras provocando su migración hacia arriba (HANOR, 1973; BARNES, 1979, en ANDERSON, 1980).

Los metales contenidos en las salmueras recientes sugieren que éstas pueden arrastrar cantidades de trazas de plomo y zinc contenidos en las rocas por donde pasan, especialmente

shales, carbonatos y evaporitas (SANGSTER, 1976, 1981; ANDERSON, 1980).

De manera semejante como el petróleo es retenido físicamente y acumulado en trampas, los metales son retenidos químicamente y acumulados en niveles estratigráficos calcáreos que actúan como trampas de la mineralización (SANGSTER, 1976, 1981; ANDERSON, 1980).

Beales y Jackson (1968) y Anderson (1980) sugieren que la adición de azufre reducido ( $H_2S$ ) a las salmueras es un modo efectivo de precipitar los sulfuros; las posibles fuentes de S reducido pueden ser la reducción bacteriana de sulfatos, la degradación térmica del petróleo y la reducción no bacteriana de sulfato por petróleo. También se han sugerido como causantes de la precipitación de los sulfuros, cambios en la composición química de la salmuera debido a variación de pH, mezcla con agua subterránea, o enfriamiento de la salmuera debido a disminución de presión, cuando la solución encuentra los espacios vacíos en los niveles calcáreos, o una combinación de estos mecanismos.

#### DEPOSITOS FORMADOS POR PROCESOS PREDOMINANTEMENTE MAGMATICOS

En este grupo se incluyen los siguientes tipos de depósitos: 1) Depósitos de plomo, zinc originados por pirometasomatismo de contacto (Skarn). 2) Depósitos de plomo, zinc de reemplazamiento. 3) Depósitos de venas de plomo, zinc y otros metales.

#### TAMAÑO Y TENOR DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DEPOSITOS DE PLOMO Y ZINC

La figura 2 tomada de Gustafson y Williams (1981) es un gráfico que representa el tamaño (Reservas mas producción) y el tenor de los diferentes tipos de depósitos de Pb, Zn y Cu.

Los depósitos de Pb, Zn de mayor tamaño están encajados en sedimentos. Los mayores depósitos son aquellos de sulfuros estratoconfinados en carbonatos, pues alcanzan tonelajes hasta de 500 millones de toneladas cortas, caso del depósito de Iristate en Estados Unidos. El segundo lugar en tamaño le corresponde a los depósitos de sulfuros masivos exhalativos estratiformes en sedimentitas; los mayores representantes de este tipo son los grandes depósitos australianos y canadienses, con tamaño superior a 150 millones de toneladas. En tercer lugar están los depósitos de sulfuros de Pb, Zn diseminados en areniscas, de los cuales el 10% de los mayores depósitos tienen tamaño superior o igual a 66 millones de toneladas (SINGER y MOSIER, 1983). Los depósitos emplazados en vulcanitas tienen tamaño de 1,6 millones de toneladas en promedio y son principalmente productores de cobre y en parte de metales preciosos; sus tonelajes promedio de Pb y Zn son algo menores del promedio de los depósitos de skarn de Pb y Zn (SINGER y MOSIER, 1983).

En general el tenor de los depósitos de sulfuros masivos es mayor que el de los depósitos de sulfatos diseminados, como era de esperarse.

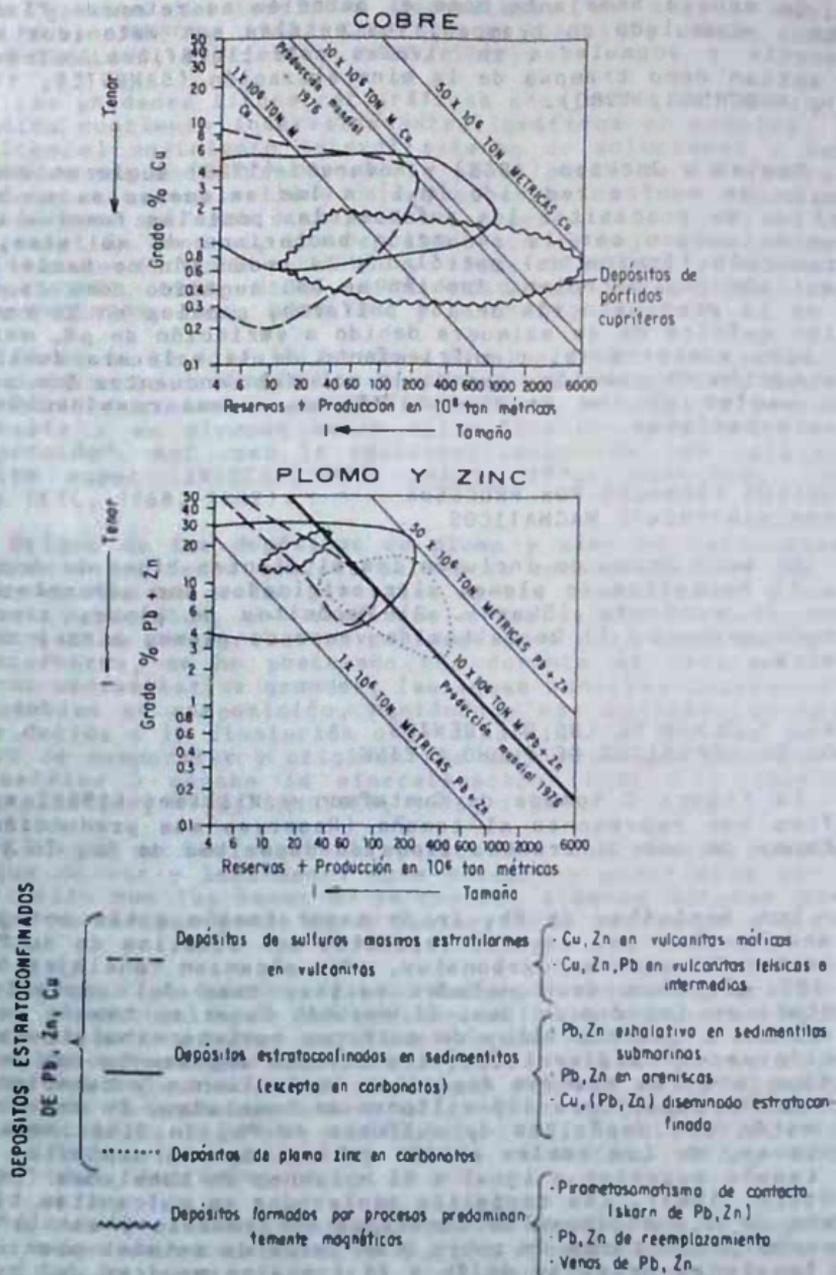


FIG. 2: Tamaño (reservas) y tenor de los depósitos de plomo, zinc y cobre. Se incluyen los depósitos de pórfidos cupríferos para comparación. Figura tomada y ligeramente modificada de GUSTAFSON y WILLIAMS (1981).

**EXPLORACION**

Principalmente en el pasado, los descubrimientos de depósitos de plomo y zinc fueron hechos en distritos mineros, conocidos a través de exploración física directa de áreas no desarrolladas. Antes de la Segunda Guerra Mundial se hicieron nuevos descubrimientos de plomo y zinc a través de esfuerzos aislados que tuvieron suerte; sin embargo, los descubrimientos más modernos han resultado de prospección científicamente dirigida (MORRIS et al, 1973). A medida que se han venido encontrando nuevos depósitos, los yacimientos aún no descubiertos son cada vez más difíciles de hallar y en consecuencia los programas de exploración deben ser cada vez más sistemáticos e intensivos.

**MINERIA**

Excepto por unas pocas minas explotadas con métodos de tajo abierto (open-pit) y de colapso de bloques (block caving) y cielo abierto en Australia, Brasil y Canadá, casi todas las minas de plomo y zinc son subterráneas (CAMMARDIA, 1983, RATHJEN, 1983).

Los principales métodos de minería empleados son los de cámaras y columnas (room and pillar), excavación escalonada (shrinkage) corte y relleno (Cut and fill) y extracción de bloques cuadrados (square set); varios sistemas pueden ser usados en una misma mina.

El procedimiento de minería de cámaras y columnas consiste en la excavación de cámaras sostenidas por columnas o tabiques angostos y con acceso desde pozos verticales; los trabajos en las cámaras son de avance, mientras que la extracción de la mena de las columnas y los tabiques son un proceso de retroceso. Este método es el más usado y es aplicable a los depósitos estratoconfinados (CAMMARDIA, 1983).

El sistema de excavación escalonada estriba en el arranque con explosivos y en forma escalonada de tajadas o secciones horizontales o inclinadas en el techo de la mina subterránea. Una vez que cada sección se arranca, la mena rota se extrae para dejar espacio para trabajar la tajada siguiente (CAMMARDIA, 1983). Esta técnica principalmente se usa en depósitos en venas; los escalones usualmente se excavan a lo largo de las venas sin dejar columnas para soportar el techo si las venas son angostas y en escalones transversales separados por columnas si las venas o enjambres de venas son anchos.

Los métodos de minería de corte y relleno y extracción de bloques cuadrados son más costosos y sólo se utilizan en minas con tenor relativamente alto.

El procedimiento de corte y relleno fundamentalmente es el mismo sistema de excavación escalonada con la diferencia que después de que cada sección se arranca y fragmenta y la mena se renueva, el espacio vacío se rellena con material estéril dejando el espacio apenas necesario para continuar la extracción de la próxima sección.

El ciclo de las operaciones de minería consiste en perforación, arranque por explosión y remoción de escombros de roca. La perforación se hace con sistemas de percusión de aire comprimido montados en vehículos llamados jumbos; en el arranque de la mena se emplean varios tipos de explosivos. La remo-

ción de la mena se hace con vagonetes y cargadores de alta capacidad y en el transporte se utilizan camiones grandes, volquetas de gran capacidad, o bandas transportadoras de caucho de alta velocidad (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

## BENEFICIO Y METALURGIA

### BENEFICIO

La mena se muele para preparar concentrados. Inicialmente se tritura mediante una combinación de molinos de mandíbulas y de barras para hacer una primera reducción de tamaño. En una segunda etapa se usan molinos de varillas. En el molido más fino se utilizan molinos de bolas. Durante varias etapas de la molienda se agregan reactivos; los minerales oxidados de zinc, tales como carbonato y silicatos, requieren la adición de sulfuro de sodio, (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

Los métodos de preconcentración por gravedad se usan en algunas menas que contienen minerales relativamente gruesos fácilmente rotos y en una etapa inicial de la molienda; esta etapa consiste en tamizado o flotación preliminar antes del molido fino; el propósito es eliminar parte de la roca de ganga antes de la molienda final y la flotación.

La flotación es el método más usado para recuperar concentrados. La mayoría de menas requieren de más de una etapa de flotación. El número y variedad de los tanques de flotación está determinado por la capacidad de la planta y la mineralogía de la mina.

El esquema general de flotación de una mena consiste en:

- 1) Flotación de los minerales de plomo-cobre y decantación de los minerales de zinc y hierro.
- 2) Separación también por flotación de los minerales de plomo y de cobre de los concentrados de plomo-cobre.
- 3) Activación y flotación de la esfalerita para separarla de los minerales de hierro y ganga y
- 4) Flotación de la pirita si se desea su recuperación.

Se utilizan muchos tipos de controles, instrumentación, máquina o celdas de flotación, y reactivos para incrementar la recuperación y aumentar el grado de los concentrados (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

Además existen sistemas automatizados de beneficio que controlan y regulan la tasa de alimentación de mena, el volumen de agua añadida, las tasas de adición de reactivos y otras variables en la operación. (CAMMAROTA, 1983).

### METALURGIA

Los concentrados de zinc son tostados para eliminar la mayoría del azufre y producir óxido de zinc impuro conocido como calcina. El zinc se recupera por procesos electrolíticos o por destilación en retortes o en hornos. La mayor parte de las plantas utilizan procesos electrolíticos; el óxido de zinc impuro se lava con ácido sulfúrico diluido para formar una solución de sulfato de zinc. La solución se purifica y se conduce a celdas electrolíticas, donde el zinc es electrodepositado sobre cátodos de aluminio. Los cátodos se limpian periódicamente y el zinc obtenido se funde y moldea en láminas. La ca-

lidad se califica como "Special High Grade" o "high grade". La electrólisis de la solución regenera ácido sulfúrico que nuevamente se usa en el lavado de óxido de zinc. Los avances en las técnicas electrolíticas incluyen remoción automatizada del zinc de los cátodos y los procesos con jarosita, goethita y hematita que aumentan la recuperación de zinc y favorecen el reciclaje de los residuos.

Los residuos del tanque de electrólisis comúnmente contienen plomo, oro y plata; estos residuos son tratados para recuperar esos metales (CAMMAROTA, 1983).

Hay tres clases de retortas de destilación: retortas horizontales, retortas verticales calentadas externamente con combustible y retortas verticales calentadas con electricidad. Todos los tipos de retortas emplean carbón o coke como agente reductor. El vapor de zinc y el monóxido de carbono, provenientes de las retortas, pasan dentro de condensadores de varios tipos donde el zinc se condensa como metal líquido listo para moldear en láminas. El zinc producido por destilación normalmente es de menor grado comercial pero puede ser refinado. La refinación separa las impurezas mediante destilación fraccionada; el zinc refinado alcanza una pureza de 99.995% (CAMMAROTA, 1983).

El proceso Imperial Smelting funde concentrados de plomo y zinc, de menas complejas de estos metales. Consiste en una técnica de horno de inflamación (blast furnace) que produce zinc metálico, plomo metálico que contiene oro y plata y mate. La ventaja de este método es la capacidad de tratar concentrados de plomo y zinc mezclados para recuperar ambos metales, sin consumo adicional de coke (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

El zinc comercial es moldeado en placas de varias formas y tamaños (alab - zinc), frecuentemente de 25 kilogramos, pero se usan hasta de 907 kilogramos. El zinc de moldes de fundición es aleado con aluminio y cobre. La aleación más usada contiene 3.5% a 4.3% de aluminio, hasta 1.25% de cobre y 0.03% a 0.08% de magnesio.

El zinc en una proporción variable de 5% a 40%, es aleado con cobre para producir latones y en una proporción hasta de 4.5% de zinc para producir bronce.

También se fabrican polvo de zinc, óxido de zinc y varios productos químicos de zinc los cuales tienen mercado para multitud de usos (RATHJEN, 1983; CAMMAROTA, 1983).

Los principales subproductos de las menas de zinc son cobre, oro y plata. El zinc es coproducto de yacimientos de plomo y flúor. Los subproductos recuperados de las plantas de zinc a partir de gases, polvo y residuos, son azufre, ácido sulfúrico, cadmio, germanio, talio, indio y galio (CAMMAROTA, 1983).

## SITUACION MUNDIAL

### CONSIDERACIONES POLITICAS

El zinc es considerado un material estratégico y con este propósito se almacenan ciertas reservas del metal (CAMMAROTA, 1983). Durante la Segunda Guerra Mundial y posteriormente en 1951 y 1952 el Gobierno de los Estados Unidos reguló la indus-

tría del zinc para proveer suministro adecuado para los propósitos esenciales. En los Estados Unidos hay impuestos de 0.62 centavos de dólar por libra sobre zinc contenido en mena o concentrados importados y 1% de valor, sobre zinc en bruto, los cuales serán reducidos cada año desde 1986, y se ha planeado que desde el primero de enero de 1987 serían de 0.3 centavos por libra y 1.5% respectivamente (CAMMAROTA, 1983).

## RESERVAS

Las estimaciones de recursos mundiales de Zn indican que las reservas (recursos explotables identificados) son aproximadamente de 170 millones de toneladas métricas; si se incluyen los recursos estimados no descubiertos se alcanza un total de 5 mil millones de toneladas métricas, de las cuales la décima parte se supone sea del tenor suficiente para ser explotado en las circunstancias económicas actuales (MORRIS, et al, 1973; CAMMAROTA, 1983).

Las reservas de zinc se encuentran en más de 40 países en todos los continentes excepto Antártida (Tabla 2); los seis países líderes son Canadá, URSS, Estados Unidos, Perú, México y Australia, los cuales producen más del 60% (MORRIS et al, 1973; CAMMAROTA, 1983).

La mayoría de los recursos recientemente descubiertos de zinc, son sulfuros masivos en rocas metamórficas, o menas estratoconfinadas en carbonatos (MORRIS et al, 1973).

## RECURSOS CONDICIONALES

El total de recursos condicionales se ha estimado en 4850 millones de toneladas métricas de zinc (MORRIS et al, 1973). Los depósitos del Kupferschiefer, y estratos relacionados en Europa, se estima contienen 1000 millones de toneladas de zinc (MORRIS et al, 1973).

Un recurso no convencional de zinc son los depósitos de pirita zincífera en Arizona, que alcanzan un volumen de 12 millones de toneladas de mineral (ANDERSON y CREASEY, 1958 en MORRIS et al, 1973).

Otro recurso no convencional de zinc, son los depósitos subeconómicos de bajo tenor, encajados en carbonatos en el Valle del Mississippi, la región de los Apalaches y otras áreas del mundo; se estima que alcanzan un total de 50 millones de toneladas de zinc (MORRIS et al, 1973).

Los depósitos supergénicos de zinc, desarrollados sobre depósitos de sulfuros masivos o de sulfuros estratoconfinados en carbonatos, son otro recurso condicional; es posible que en regiones tropicales se encuentren apreciables cantidades de zinc en lateritas zincíferas (MORRIS et al, 1973).

Los nódulos de manganeso de los fondos oceánicos y los sedimentos mineralizados de dorsales oceánicas (Mar Rojo), se ha estimado que contienen 2.9 millones de toneladas métricas de zinc; los nódulos de manganeso del Pacífico contienen en promedio 0.05 % de Zn y se espera que contengan 1.500 millones de toneladas de Zn y Pb (MORRIS et al, 1973, RONA, 1984).

Los depósitos asociados con evaporitas son otro recurso potencial no convencional de zinc (MORRIS et al, 1973; RENFRO, 1974).

18. 2: Reservas mundiales de zinc<sup>1</sup> (Contenido de metal, millones de toneladas métricas)

	Reservas <sup>2</sup>	Otros <sup>3</sup>	Total
<b>América del Norte</b>			
Estados Unidos	15	50	65
Canadá	30	33	63
Méjico	3	1	4
América Central	1	-	1
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>84</b>	<b>133</b>
<b>Sur América</b>			
Bresil	9	3	12
Perú	7	4	11
Otros	2	2	4
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>27</b>
<b>Europa</b>			
Irlanda	8	2	10
Polonia	3	1	4
España	4	6	10
U.R.S.S.	11	11	22
Otros	14	6	20
<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>26</b>	<b>66</b>
<b>Africa</b>			
Sur Africa	11	8	19
Otros	4	2	6
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>25</b>
<b>Asia</b>			
China (Continental)	5	2	7
India	3	1	4
Irán	5	1	6
Japón	5	2	7
Otros	6	4	10
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>10</b>	<b>34</b>
<b>Oceanía</b>			
Australia	16	24	40
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>162</b>	<b>163</b>	<b>325</b>

1) En colaboración con el US. Geol. Survey.

2) Reservas incluyen solamente medidas e indicadas o cantidades demostradas.

3) Incluye reservas inferidas, algunos recursos económicos hipotéticos en distritos conocidos y algunos recursos subeconómicos. Tomado de Cammarota (1983).

#### RESERVAS ALMACENADAS

Las reservas almacenadas, comerciales totales a comienzos de 1984 fueron 668.000 toneladas y se redujeron durante ese año un 6%, a 628.000 toneladas; durante los primeros meses de 1985 hubo una reducción a 580.000 toneladas y posteriormente aumentaron en septiembre para volver a disminuir a finales de 1985 (WALL y MACGREGOR; 1984; MACGREGOR y WALL, 1985b; WALL, 1986).

## PRODUCCION

Desde los comienzos del siglo XIX se han utilizado aproximadamente 150 millones de toneladas de zinc; la proyección de tasas de crecimiento sugiere que esa cantidad será mayor que el doble a finales del siglo XX (WEDOW et al, 1973).

La producción mundial de zinc ha crecido en forma exorbitante desde finales del siglo XIX, interrumpida solamente por periodos de tensiones políticas y económicas (WEDOW et al, 1973); estas interrupciones han sido prácticamente las mismas que ha experimentado la producción de plomo, y han coincidido con las dos guerras mundiales y los periodos de recesión económica de 1918-1922 y de 1930-1933 (WEDOW et al, 1973).

La producción mundial anual total excede 5 millones de toneladas métricas; de esta cantidad los Estados Unidos produce el 9% pero consume más de tres veces la cantidad que produce y en consecuencia ha sido importador de concentrados de zinc desde 1941 (WEDOW et al, 1973; CAMMAROTA, 1983).

Las menas de zinc son además productos de plomo como co-producto y de cadmio, talio, indio y germanio como subproductos (CAMMAROTA, 1983). La Tabla 3 tomada de ILZSG en Wall (1986), muestra las cifras de la producción mundial de zinc en los últimos años.

### PRODUCCION MINERA DE ZINC

Durante la década de los años sesenta, la producción minera de zinc fue, en promedio, de 4.7 millones de toneladas cortas, pasando desde 3.7 millones en 1960 hasta 6.0 millones en 1970, con un ritmo de crecimiento promedio de 5.6% anual; durante el periodo 1970 a 1982 hubo una disminución de la producción minera a una tasa promedio anual de 0.5 (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

La producción total de zinc fue afectada por la recesión económica de 1974-1975 cuando disminuyó 10% en un sólo año; desde entonces ha ocurrido una recuperación (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

El principal país productor ha sido Canadá con 1.096.000 toneladas en 1981 y 1.207.000 toneladas en 1985, lo cual equivale al 23% de la producción mundial excluyendo los países socialistas (Tabla 3). Otros países productores de zinc a partir de menas y su producción en 1985 son Australia con 684.000 toneladas que representan el 13% del total, Perú con 567.000 toneladas, México con 297.000 toneladas, Japón con 253.000 toneladas, Estados Unidos con 238.000 toneladas, España con 239.000 toneladas, Suecia con 210.000 toneladas e Irlanda con 192.000 toneladas (WALL y MACGREGOR, 1984; MACGREGOR y WALL, 1985b; WALL, 1986).

Desde 1969 fueron abiertas grandes minas en Australia, Brasil, Groenlandia, Irlanda, La República Sudafricana y España (CAMMAROTA, 1983).

### PRODUCCION DE ZINC METALICO

Durante el periodo 1981-1985, la producción mundial de zinc metálico aumentó desde 4'546.000 toneladas en 1981, hasta 4.948.000 toneladas en 1985, con un mínimo de 4.318.000 toneladas en 1982.

TAB. 3: Producción y consumo de zinc (Miles de toneladas).

	Producción minera (contenido de metal)			Producción de metal			Consumo (metal refinado)		
	1983	1984	1985	1983	1984	1985	1983	1984	1985
<b>Europa</b>	<b>1.047</b>	<b>1.118</b>	<b>1.121</b>	<b>1.864</b>	<b>1.930</b>	<b>1.939</b>	<b>1.645</b>	<b>1.679</b>	<b>1.650</b>
Austria	19	21	22	24	24	25	27	31	31
Bélgica	-	-	-	263	271	271	166	156	169
Dinamarca	79	71	71*	-	-	-	9	10	11
Finlandia	56	60	57	155	159	161	26	22	26
Francia	34	36	40	249	259	247	271	282	247
Rep. Fed. Alem.	114	113	118	356	356	368	405	425	410
Grecia	21	23	21	-	-	-	11	12	12
Irlanda	186	206	192	-	-	-	2	1	1
Italia	43	42	46	156	167	219	208	210	228
Holanda	-	-	-	187	210	203	54	60	51
Noruega	32	27	27	91	94	88	22	20	21
Portugal	-	-	-	4	6	6	9	11	10
España	176	229	239	198	212	209	107	101	108
Suecia	205	208	210	-	-	-	34	37	37
Reino Unido	9	7	4	88	85	74	181	185	174
Yugoslavia	73	75	74	93	86	68	93	95	89
<b>África</b>	<b>281</b>	<b>300</b>	<b>286</b>	<b>214</b>	<b>220</b>	<b>211</b>	<b>162</b>	<b>167</b>	<b>161</b>
Sur Africa	137	134	128	82	90	94	83	90	84
Zaire	75	75	74	63	66	63	-	-	-
Zambia	41	57	51	38	29	23	1	1	1
<b>América</b>	<b>2.392</b>	<b>2.557</b>	<b>2.537</b>	<b>1.385</b>	<b>1.479</b>	<b>1.504</b>	<b>1.362</b>	<b>1.464</b>	<b>1.474</b>
Brasil	73	79	78	100	107	116	102	113	145
Canadá	1.070	1.207	1.207	617	683	692	144	146	144
Méjico	275	304	297	175	180	181	88	101	108
Perú	553	555	567	154	149	163	16	33	41
E.E.UU.	293	278	238	305	331	321	933	980	949
<b>Asia</b>	<b>443</b>	<b>499</b>	<b>522</b>	<b>877</b>	<b>942</b>	<b>1.002</b>	<b>1.311</b>	<b>1.306</b>	<b>1.325</b>
Japón	256	253	253	701	754	740	771	774	780
India	37	41	44	54	55	71	125	130	133
Corea (Rep.)	57	54	45	108	109	110	113	121	118
Taiwan	-	-	-	-	-	-	57	42	56
<b>Oceania</b>	<b>660</b>	<b>634</b>	<b>684</b>	<b>303</b>	<b>306</b>	<b>292</b>	<b>102</b>	<b>97</b>	<b>111</b>
Australia	660	634	684	303	306	292	83	77	87
<b>Total</b>	<b>4.823</b>	<b>5.108</b>	<b>5.150</b>	<b>4.643</b>	<b>4.877</b>	<b>4.948</b>	<b>4.582</b>	<b>4.713</b>	<b>4.721</b>

Fuente: International Lead and Zinc Study Group.

\* De Groenlandia. Tomado de Wall (1986).

El aumento de 1985 fue de 1.5% (JOLLY, 1984, 1985; WALL y MACGREGOR, 1984; MACGREGOR y WALL, 1985b; WALL, 1986).

En 1979 los mayores productores de zinc metálico fueron Japón, la URSS, Canadá y los Estados Unidos (CAMMAROTA, 1983).

Durante 1985 los principales países capitalistas productores de zinc metálico y su producción fueron: Japón con 740.000 toneladas, Canadá con 692.000 toneladas, República Federal alemana con 368.000 toneladas, Estados Unidos con 321.000 toneladas, Australia con 292.000 toneladas, Bélgica con 271.000 toneladas, Francia con 247.000 toneladas, Italia con 219 toneladas y Holanda con 203.000 toneladas (WALL, 1986).

## CONSUMO

En 1983 el consumo mundial de zinc aumentó significativamente sobre los niveles de depresión de 1982. De acuerdo con el Grupo Internacional de Estudio del Plomo y del Zinc (ILZSG) (ILZSG), el consumo de zinc metálico en los países que participan en la economía del mercado fue de 4,5 millones de toneladas; hubo grandes aumentos en el consumo en los Estados Unidos, Japón, La República Federal Alemana y Bélgica. El consumo en las Américas, Asia y Europa aumentó, mientras disminuyó en Africa y Oceanía (JOLLY, 1984).

Los Estados Unidos son el mayor consumidor de zinc (Tabla 3), con aproximadamente la quinta parte del producto mundial (MACGREGOR y WALL, 1985b; WALL, 1986).

Cerca del 45% del consumo de zinc galvanizado es utilizado en la industria automotriz y en la construcción; la industria de latón consumió el 20% y la fundición y moldeado el 15% (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

## PRECIOS

A finales de 1982 el precio del zinc en el London Metal Exchange fue de 413.7 £/ton; posteriormente aumentó en tal forma que, terminando 1983 fue de 597.7 £/ton y en febrero de 1984 alcanzó a 724 £/ton que fue el máximo nivel en los últimos diez años (WALL y MACGREGOR, 1984; MACGREGOR y WALL, 1985b; WALL, 1986).

El precio promedio durante 1984 fue 668 £/ton, un 32% superior al promedio de 1983; el máximo precio durante 1984 fue 803 £/ton (WALL y MACGREGOR, 1984). En 1985 el precio promedio fue 626 £/ton con un valor máximo de 865 £/ton en marzo y un valor mínimo de 474 £/ton en noviembre (WALL, 1986).

En Estados Unidos, en 1984 el precio nominal promedio de productores fue de 48,58 centavos de dólar por libra. En la Tabla 4 se presenta el precio promedio anual entre 1960 y 1985.

## SITUACION ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Durante 1982 los precios del zinc estuvieron extremadamente deprimidos como resultado de la recesión industrial que redujo la demanda; en consecuencia muchas fundiciones fueron cerradas (MINING JOURNAL, 1984). Durante 1983 hubo un fortalecimiento de los mercados con un incremento de 6.4% en el consumo, entonces los precios aumentaron debido a la demanda principalmente en los Estados Unidos (JOLLY, 1984; WALL y MACGREGOR, 1984; MACGREGOR y WALL, 1985b).

En 1984 aumentó un 4% la producción minera de zinc y de zinc metálico y el consumo creció un 2%; en este año el consumo alcanzó su máximo nivel y las reservas almacenadas (stocks comerciales) disminuyeron 6% (WALL y MACGREGOR, 1984; MACGREGOR y WALL, 1985b).

Durante 1984 la producción y demanda de zinc fueron similares a las de 1984, pero hubo un descenso considerable en los precios; los mercados mostraron crecimiento o reducción dependiendo del estado económico de los países, su desarrollo tecnológico y la importancia relativa de los diferentes usos del zinc (WALL, 1986).

148. 41 Precio promedio anual de zinc en EE.UU. (centavos de dólar por libra).

Año	Nominal	Real <sup>1</sup>	Real <sup>2</sup>
1960	12,946	13,64	
1961	11,542	12,21	
1962	11,625	12,26	
1963	11,997	12,69	
1964	13,568	14,33	
1965	14,500	15,01	
1966	14,500	14,53	
1967	13,843	13,84	
1968	13,500	13,17	
1969	14,600	13,71	
1970	15,319	13,87	35,62
1971	16,128	14,16	36,40
1972	17,753	14,90	38,26
1973	20,658	15,33	39,42
1974	35,945	22,45	57,69
1975	38,959	22,27	57,20
1976	37,010	20,22	51,98
1977	34,392	17,71	45,49
1978	30,971	14,79	38,00
1979	37,296	15,83	40,67
1980	37,428	15,09	38,78
1981	44,555	17,57	45,14
1982	38,470	15,08	38,74
1983	41,386	16,10	41,38
1984	48,580	18,55	47,69
1985	40,400		

1. Deflactado por el Índice Total de precios al por mayor de EE.UU., 1967=100.

2. Idem, 1983=100.

Fuente: Econinas, "América Latina en Cifras" Bogotá, Nov. 1982, según Metals Week.

Minerals Yearbook y Engineering and Mining Journal, según Metals Week.

Cálculos IEC.

Complementado de Castiblanco y Benevides (1985) con datos de Wall y Macgregor (1984), Macgregor y Wall (1985b) y Wall (1986).

## PERSPECTIVAS

El factor más importante que afecta el mercado del zinc es el estado de la economía mundial. Hay opiniones opuestas pero parece posible alguna expansión del mercado; sin embargo se esperan cambios relativamente pequeños (WALL, 1986).

El zinc tiene una gran variedad de usos pero la mayoría del consumo ocurre en bronce, revestimientos de zinc y aleaciones de zinc para fundición.

En cada una de esas aplicaciones el consumo está sujeto a influencias en conflicto; en el lado pesimista están los sustitutos de materiales más "avanzados" y económicos y en el lado optimista están las nuevas posibilidades de aplicación o la extensión de las ya existentes. La influencia de la economía mundial y de la de los países individuales se adiciona a esos factores.

Además se abren nuevas posibilidades de consumo en países recientemente industrializados, particularmente en Asia (MACGREGOR y WALL, 1985b; WALL, 1986).

La sustitución del zinc depende del precio y disponibilidad de los nuevos materiales, así como su aplicabilidad técnica. El aluminio y el manganeso son sustitutos en moldes de fundición. No hay sustitutos satisfactorios para el galvanizado de productos de hierro y acero (MACGREGOR y WALL, 1985; WALL, 1986). Algunos sustitutos de aplicación limitada son la cerámica, los revestimientos plásticos, el cadmio electroplata, el aluminio y aceros especiales (MACGREGOR y WALL, 1985; WALL, 1986). El aluminio y el manganeso reemplazan el zinc en algunos agentes químicos, y el óxido de titanio reemplaza al óxido de zinc en pinturas (MACGREGOR y WALL, 1985; WALL, 1986).

## EL ZINC EN COLOMBIA

### DEPOSITOS

Desde el siglo pasado se tiene conocimiento de la existencia de mineralizaciones de sulfuros de plomo y zinc en el territorio colombiano (BOUSSINGAULT, 1830).

En Colombia no se han descubierto depósitos grandes de plomo y zinc explotables a gran escala, sino yacimientos relativamente pequeños como La Equis en Chocó, El Diamante en Nariño y Las Nieblas en Quindío. Solamente unas pocas áreas con mineralizaciones conocidas en las cuales se han hecho estudios geológicos y geoquímicos han mostrado anomalías dignas de exploración y con resultados preliminarmente satisfactorios; estas áreas pueden considerarse como prospectos; sin embargo la gran mayoría de mineralizaciones conocidas son manifestaciones de tamaño pequeño que no han sido exploradas ni definidas adecuadamente.

Las numerosas manifestaciones de plomo, zinc y cobre están listadas en la Tabla 5, la cual resume información contenida en los informes del INGEOMINAS sobre ocurrencias minerales por departamentos o por regiones, para los cuales se ha hecho cartografía geológica; algunos de estos informes están acompañados por mapas que muestran la localización de las mineralizaciones.

La Tabla 5 muestra las principales referencias bibliográficas sobre mineralizaciones de plomo y zinc en Colombia. Véanse además el Mapa Metalogénico de Colombia (BARRERO, 1976), el Catálogo de los Yacimientos, Prospectos y Manifestaciones Minerales de Colombia (MUTIS, 1983) y la Evaluación de los Recursos Minerales no Combustibles de Colombia (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Las mineralizaciones de plomo y zinc muchas veces están acompañadas por cobre; estos tres metales parecen estar genéticamente relacionados y resulta arbitrario separar completamente manifestaciones de plomo, zinc y manifestaciones de cobre, y por esta razón se incluyen manifestaciones de este último metal.

El mapa de la Figura 3 muestra la localización geográfica de las mineralizaciones listadas en la Tabla 5; la numeración del mapa corresponde con la de la tabla.

TAB. 32. Manifestaciones de plomo y zinc en Colombia.

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad litológica	Tipo mineralización	Referencia
<b>A. Mineralizaciones de Cu (Zn, Pb) en vulcanitas máficas.</b>							
1	Debeiba (Antioquia)	Prospecto	Calcopirita	No precisadas probablemente vulcanitas máfic.		Venas y diseminaciones	Rodríguez y Pernet (1982)
2	Anserma (Caldas)	La Plumbagina	Calcopirita molibdenita bornita cuarzo pigmentos de malaquita	Metabasaltos del Cretáceo?		Venas en zonas de cisalladura	Hall et al (1970)
3	Anserma (Caldas)	El Tascón	Bornita pirrotita calconita malaquita cuprita(?) corelita(?) cuarzo, feldespato alter.	Metabasaltos		Venas de 0,40 m	Hall et al (1970)
4	Buenos Aires (Cauca)	Peso de Bobo	Sulfuros de Fe, Cu, Ni,	Diabases, basaltos, limolitas y areniscas	Cr. Diabásico Cr. Deque Fm. Ferreira	Diseminaciones, venillas	Rosas (1976)
5	Popayán (Cauca)	La Tetilla	Pirita Calcopirita	Basalto		Venillas, diseminaciones	Rosas (1976)
6	Santander de Quilichao (Cauca)		Galena pirita calcopirita	Rocas ígneas básicas, gabros, dolomitas con diques de dacita porfirítica		Venas	Suárez Hoyos (1943)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
7	San Marino (Chocó)	Río Gachadó	Pirita calcopirita cuarzo	Diabasas, rocas verdes		Relleno de zona de cizalla de 50 cm	Escorce (1971)
8	San Marino (Chocó)	Río Anquedó	Pirita calcopirita corelina malaquita	Diabasas		Venas	Escorce (1971)
9	Tadó (Chocó)	Duebrada Hambú	Pirita calcopirita cuarzo calcita	Vulcanitas bá- sicas intru- idas por tonali- tas y diques		Mineralización en un bloque rodado	Escorce (1971)
10	Carmen de Atrato (Chocó)	Mina Santa Anita	Calcopirita pirita cuarzo calcita	Flujos diabási- cos con interce- laciones de sha- les, grauvacas, chert, conglome- rado y calize		Zona de cizalladura hasta de 10 m	
11	Carmen de Atrato (Chocó)	Mina El Dorado o Gibraltar	Pirita calcopirita	Chert negro, calizas gri- ses a negras, shales negros		Nódulos y venas	Escorce (1971)
12	Carmen de Atrato (Chocó)	Mina El Roble	Pirita calcopirita pirrotina cuarzo carbonatos	Diabasas, chert, calizas, conglo- merados, minera- lización en chert con diques andesíticos	Gr. Cañasgordas intrusiones an- desíticas relectio- nadas(?) al Bato- lito de Mandé		
13	Lloró (Chocó)	Piedra Muchimba	Cobre nativo	Basalto verde os- curo con maigda- les de zeolitas		Cu en dendritas dentro de calcita relleno vesículas del basalto	Escorce

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca anfitrión	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
14	Tadó (Chocó)		Galena, esfalerita, calcopirita, pirita, cuarzo, limonita	Rocas verdes?		Rellenos de fisura por soluciones hidrotermales	Escorco (1971)
15	Guachavés (Nariño)	Prospecto El Diamante	Arsenopirita, esfalerita, pirita, calcopirita, galena	Rocas verdes, vulcanitas máficas afectadas por pequeños stocks granodioríticos del Terciario		Venas y filones	JICA (1984)
16	Belén de Umbría (Risaralda)	Corregimiento de Colombia	Sulfuros cupríferos y feldespatos	Basaltos Diabases?		Vetillas localmente en enrejado en un área de 1/2 km <sup>2</sup>	Guarín (1971)
17	El Dovio (Valle)	El Dovio	Sulfuros cupríferos	Diabases y basaltos	Gr. Dequa	Vetillas de sulfuro en área 300 m	Guarín (1971)
<b>B. Mineralizaciones de Cu, Zn en vulcanitas intermedias.</b>							
18	Urrao (Antioquia)		Pirita, esfalerita, argentita, plata, cuarzo, barita, óxidos de Mn, calcita	Intrusivas terciarias y sus fases efusivas; andesitas, decitas, tobas conglomeráticas y cenizas		Venas. Tipo mesothermal	Wokittel (1954a,b)
19	Suárez (Cauca)	Suárez Piedra Imán	Pirita, pirrotita, calcopirita	Andes. con interc. de limol. y limol. silic. intruidas por dior. y cuarzod.	Gr. Diabásico	Mineralización en el contacto con intrusiones sulfuro masivo.	

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
20	Duibdó (Chocó)	La Equis Vereda Tutunendó	Esfalerita galena calcopirita oro plata	Volcanitas félsicas e intermedias según Calle y Salinas. Andesitas según Mokittel	Rocas volcánicas de La Equis	Sulfuros masivos y sulfuros en estoverca	Wokittel (1959) Castiblanco y Benevides (1985) Calle y Salinas (1986) Mining Annual Review (1986)
<b>C. Mineralizaciones de Cu, Zn, Pb en lodolitas negras</b>							
21	Nobas (Boyacá)	Santa Isabel	Galena esfalerita	Shale negro y areniscas	F. Fámeque	Venas	
22	Otanche (Boyacá)		Galena Pirita	Shale negro	F. Paja	Venas	
23	Tibirita (Boyacá)	El Salitre	Hematita siderita calcopirita	Shale negro	F. Fámeque	Capas y diseminaciones	Gil (1976)
24	Gámbita (Santand.)	Gámbita Centro	Galena calcopirita pirita	Shale negro	F. Paja	Lentejones de 5 a 10 cm de espesor	Otero (1975)
25	Paine (Cund.)	O. La Mina	Esfalerita galena	Shale negro	F. Paja	Venas	Rodríguez (1972)
26	Yacopí (Cund.)	O. La Mina	Pirita Malaquita	Shale oscuro	F. San Gil inferior	Relleno de fracturas	Gil (1976)
27	Gachalá (Cund.)	Tominejas	Especularita (Calcopirita)	Shale Oscuro	F. Lutites de Macanal	Filón de 3 m de espesor	Ulloa y Rodríguez (1976)
28	Manta (Cund.)	Las Minas	Siderita (calcopirita)	Shale oscuro	F. Fámeque	Diseminada, zona de 2 m de espesor	Ulloa y Rodríguez (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
29	Ubalá (Cund.)	Vereda Nazareth	Esfalerita (Galena)	Shale oscuro	F. Lutitas de Macanal	Relieno de fracturas y diseminado	Ulloa y Rodríguez (1976)
30	Junín (Cund.)	Santa Polonia	Calcopirita siderita	Shale oscuro	F. Fômeque	Vetas	Gil (1976)
31	Junín (Cund.)	Mina El Rincón	Esfalerita calcopirita arsenopirita siderita	Shale oscuro intercalacio- nes de arenis- cas	F. Fômeque	Vetas	Gil (1976)
32	Gachetá (Cund.)	Muchindote	Esfalerita galena (malaquita)	Shale negro con intercala- ciones arenis- ca de grano fino	F. Fômeque	Venitas e impreg- naciones	Gil (1976)
33	Supatá (Cund.)	Vereda Providencia	Galena esfalerita	Shale negro	Gr. Villeta	Dos vetas de 1 cm de espesor	McLaughlin y Arce (1972)
34	Gachetá (Cund.)	Río Murca	Calcopirita siderita	Shale negro	F. Lutitas de Macanal	Diseminaciones zo- na de 1 m de espesor	Gil (1976)
35	Nocaima (Cund.)	Loma Cocunche	Malaquita azurita siderita limonita	Shale y limo- lita gris	Gr. Villeta (Shale de Terana)	Brecha silicitizada mineralizaciones en la matriz	Cardozo et al (en preparac.)
36	El Peñón (Cund.)	Vereda Cascajetas	Pirita esfalerita calcita pirofilita	Shale negro calcáreo	Gr. Villeta (Shale de Cerinza)	Estratos y láminas de sulfuros masivo diseminaciones y venas.	Sarmiento et al (1985) Sarmiento (1985b)
37	Guevatá (Santand.)	Trea Esquinas	Esfalerita	Shale	F. Paje	Venas	Ulloa y Ro- dríguez, 1979

No. Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
D. Mineralizaciones Cu (Pb, Zn) en arenitas						
38	V. de Leiva (Boyacá)	Río Samacá	Galena Esfalerita	Arenisca Cuarzosa	F. Arcabuco	Venas Rodríguez (1972)
39	V. de Leiva (Boyacá)	Vereda La Copilla	Limonita	Arenisca cuarzosa	F. Arcabuco	Capa de 20 cm de espesor Mariño (1976)
40	Tunja (Boyacá)	Corregimiento Chiquiza	Galena	Arenisca cuarzosa	F. Arcabuco	Venitas de 1 cm de espesor Mariño (1976), Ulloa y Rodríguez (1976)
41	Zetaquirá (Boyacá)	O. Porras	Galena	Arenisca	F. Une	Rellenos de fisuras Ulloa y Rodríguez (1976)
42	Guayatá (Boyacá)	Vereda Romaquira	Calcopirita siderita	Areniscas y shales negros	Gr. Cáqueza	No precisado Mariño (1976)
43	Medina (Cund.)	El Salitre	Malaquita	Arcillolitas gris verdosas y arcillas arenosas de color pardo rojizo	No precisado	Diseminaciones en un cuerpo lenticular de arcillolita Gil (1976)
44	Medina (Cund.)	Caño Cristalino	Malaquita bornita	Arcillolitas grises verdosas y compactas suprayacidas por rocas de color rojo	Gr. Farallones(?)	Espesor 2 cm; 5 m de extensión; impregnaciones locales.
45	Barrancas (Guajira)	El Cerrito	Sílice epidota malaquita calcosina	Arenitas, limolitas, conglomerados intruidos por diques riolíticos.	F. La Quinta	Parches distantes varias docenas de metros c/u de 10 x 1.5 m de ancho diseminación estratíf. Government of Japan (1965)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad litológica	Tipo mineralización	Referencia
46	Barrancas (Guaajira)	El Ojo	Malaquita	Diques riolíticos arenita limolita y conglomerados	F. La Quinta(?)		
47	Barrancas (Guaajira)	Río Dulce.El Salado.Porta- les.Carbona- lito. La Botella	Minerales de Cu	Basaltos, tobas in- tercaladas con con- glomerados intruidos por diques riolíticos	Basaltos en la Fm. La Quinta(?)	Mineralización es- tratoconfinada	Government of Japan (1965)
48	Villanueva (Guaajira) Urumbita (Guaajira) San Diego Cesar	Loma de Co- razón, Ge- línazo, Plancito Maquivel Oveja El Rincón Seno La Rigen Zepellín San José	Minerales de Cu	Arenisca roja	F. La Quinta(?)	Venas eb échelon	
49	Silos (Norte de Santander)	El Tuto Caño Cas- cajeles	Calcosina	Arenisca arcósica	F. Girón	4 manifestaciones Diseminación estrá- tiforme; una de 135 m a lo largo de un es- trato de 5.4 m de es- pesor.	
50	Hucari San Calixto La Playa (N. de Santand.)		Cobre nativo tenorita cuprita cuarzo calcita epidoto malaquita azurita	Rocas volcáni- cas que alter- nan limolitas arenosaa	F. Girón	Lentes de 1 m de lon- gitud y pocos cm de espesor	Otero (1971)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
E. Mineralizaciones Zn, Pb (Cu) en calizas o arenitas calcáreas							
51	Guicón (Boyacá)	Mina	Galena, esfalerita especularita	Arenisca calcárea(?)	F. Capacho	Relleno de fracturas verticales	
52	Soatá (Boyacá)	Machacuto	Galena (esfalerita)	Arenisca calcárea con intercalacio- nes shale y caliza	F. Capacho		Vargas et al (1976)
53	Soatá (Boyacá)	Mina Alcohol	Galena esfalerita	Arenisca calcárea	F. Aguardiente	Zona de falla	Vargas et al (1976)
54	Tipacoque (Boyacá)	El Jaque	Galena esfalerita	Arenisca calcárea	F. Capacho	En venitas y como cemento de areniscas	Vargas et al (1976)
55	Chiscas (Boyacá)	Las Mercedes	Galena esfalerita (calcopirita)	Arenisca calcárea	F. Capacho	Venitas de 1 a 5 cm de espesor	Vargas et al (1976)
56	La Uvita (Boyacá)	El Escobal	Galena esfalerita	Arenisca calcárea	F. Capacho	Cuerpos lenticulares en zona de falla	Vargas et al (1976)
57	Toquí (Boyacá)	Vereda Carare	Galena (esfalerita)	Caliza	F. Rosablanca	Venas	Rodríguez (1972)
58	Ráquira (Boyacá)	La Candela- ria	Galena (limonita) cuarzo	Areniscas calcáreas	F. San Gil infe- rior	Vena de 10 cm	
59	Gachantivá (Boyacá)	Las Minas	Calcopirita	Caliza	F. Rosablanca	Dos filones espesor 15 a 60 cm	Ulloa y Rodríguez (1979)

No.	Municipio	Lugar	Mineral	Forma de ocurrencia	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
60	La Paz (Boyacá)	Vereda Arandillo	Barita (Fluorita) (malaquita)	Caliza	F. Rosablanca	Venas	Otero y Angerita (1975)
61	Ráquira (Boyacá)	Ráquira	Sulfuros de cobre	Areniscas calcáreas	F. Churuvita	Diseminaciones	Mariño (1976)
62	Tunja (Boyacá)	Chiquiza	Sulfuros de cobre	Arenisca	F. Churuvita	Tres venitas de 1 cm de espesor	Mariño (1976)
63	Paipa (Boyacá)	Paipa	Malaquita	Areniscas cuarzosas	F. Guadalupe	No precisado	Mariño (1976)
64	Ubalá (Cund.)	Veredas Las Mercedes y Manizales	Siderita	Caliza	F. Calizas del Guavio	Relleno de fracturas	Gil (1976)
65	Ubalá (Cund.)	Cueva Ocure y San Rafael	Galena calcopirita siderita	Caliza	F. Calizas del Guavio	Diseminada y en fracturas	Ulloa y Rodríguez (1976)
66	Ubalá (Cund.)	La Cascada	Barita	Caliza	F. Calizas del Guavio	Filón de 20 cm relleno de fracturas	Ulloa y Rodríguez (1976)
67	Ubalá Gachalá (Cund.)		Galena calcopirita siderita pirita calcita cuarzo	Calizas de grano fino		Venas	

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
68	Gachalá (Cund.)	Vereda El Guavio	Galena (calcopirita esfalerita pirita, cal- cita, cuarzo)	Caliza	F. Calizas del Guavio	Diseminaciones	Gil (1976)
69	Gachalá (Cund.)	Vereda Guarumal	Galena (esfalerita)	Calizas oscuras	Gr. Farallones	Diseminaciones esporádicas	Gil (1976)
70	Gachalá (Cund.)	Farallones de Medina	Galena esfalerita	Calizas	Fr. Farallones	Diseminaciones	Gil (1976)
71	Gachalá (Cund.)	La Colonia Cerro del Cobre	Calcopirita malaquita szurita (pirita, cuarzo) limonita oro, plata	Calizas dolomitas	Gr. Farallones	Vetillas, relleno de fracturas y diseminaciones	Gil (1976)
72	Gachalá (Cund.)	Farallones Medina					
73	Distrito Especial	Sumapaz	Minerales de cobre	Calizas	Gr. Farallones	No precisado	Gil (1976)
74	Quetame (Cund.)	Guayabetal	Galena (argentita, plata, yeso esfalerita pirita)	Calizas arcillosas	Calizas paleozoicas Grupo Farallones	Reemplazamiento metasomático	Gil (1976)
75	Gutiérrez (Cund.)	Cueva del Cobre	Malaquita	Caliza	Gr. Farallones(?)	Mineralización	Gil (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca anclante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
76	Cachalá (Cund.)	Medina y Alto Bojara	Calcopirita pirita covelina cuarzo	Lodolita calcáreas y areniscas	Gr. Farallones	Sulfuro diseminado en zona de falla mineralización con espesor 1.5 m prom.	
77	Concep- ción (Santand.)	Montenegro	Galena esfalerita	Caliza y areniscas calcáreas	F. Mercedes	Lentes paralelos con estratificación y diseminaciones	Vargas et al (1976)
78	Coromoro (Santand.)	O. Cedrilla	Galena esfalerita calcopirita	Caliza	F. Rosablanca	Lentes irregulares	Vargas et al (1976)
79	Guacamayo (Santand.)	Vereda San Juan	Galena barita	Caliza	F. Rosablanca	Conocida por rodados	Vargas et al (1976)
80	Jordán (Santand.)	Las Juntas	Barita galena malaquita			2 filones espesor hasta 2.50 m	Vargas et al (1976)
81	Aguada (Santand.)	San Martín	Barita fluorita	Caliza	F. Rosablanca	No precisado	Vargas et al (1976)
82	Sucre (Santand.)	Minas Los Locos	Calcopirita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas y lentes	Ulloa y Rodríguez (1979)
83	Sabanalarga (Santand.)	Minas Peras Blancas	Galena esfalerita	Caliza	F. Rosablanca	Diseminada y en fracturas	Ulloa y Rodríguez (1979)
84	Sucre (Santander)	La Rata	Galena calcosinas	Caliza	F. Rosablanca	Filones irregulares	Ulloa y Rodríguez (1979)

MINERALES DE ZINC

PUB. GEOL. ESP. INGEOMINAS, No. 1, 1987

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
85	Bolívar (Santand.)	Minas El Pulpito y Motua	Barita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas	Rodríguez y Ulloa (1979)
86	Bolívar (Santand.)	Varias Minas	Barita Calcopirita Fluorita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas	Ulloa y Rodríguez (1979)
87	Bolívar (Santand.)	Mina Monteoscuro	Barita	Caliza	F. Rosablanca	Relleno de fracturas y de cavidades	Ulloa y Rodríguez (1979)
88	Jesús Ma. (Santand.)	Mina La Belleza	Barita	Caliza	F. Rosablanca	Filón de 20 cm de de espesor	Ulloa y Rodríguez (1979)
89	Bolívar Vélez (Santand.)	Varias Minas	Calcopirita siderita	Caliza	F. Rosablanca	Hilos y filoncitos	Escorco (1980)
<b>F. Mineralizaciones Pb, Zn, Cu en zonas de contacto de cuerpos plutónicos</b>							
90	Samaná (Caldas)		Galena pirita, es- falerita, calcopiri- ta, plata	Contacto cuarzo- monzonita y es- quistos cuarzomi- cáceo		Contacto	López (1971b)
91	Berlín (Caldas)		Cuarzo pirita calcopirita esfalerita galena argentita oro	Complejo ígneo de Samaná y esquistos cuarzo-sericíticos -grafitosos, esq. clorítico-actino- líticos y cuarcitas		Venas y contacto	Pérez, Lozano (1975)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Forma de yacimiento	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
92	Sanand	(Caldas)	Galena plata oro esfalerita pirita calcopirita cuarzo siderita	Contacto esquistos cuarzo-grafítico cuarzodiorita.		Contacto	López (1971b)
93	Buenos Aires	(Cauca)	Calcopirita pirita galena esfalerita pirrotina arsenopirita	Secuencias terciarias y cretácicas (sedimentarias) intruidas por pórfidos decíticos y tonalíticos		Contacto venas	Ruge (1971)
94	Mercaderes	(Cauca)	Galena esfalerita calcopirita pirita oro, plata	Intrusivos ácidos, cortando areniscas		Contacto	Buena (1952) Susacón (1959)
95	Neiva	(Huila)	Magnetita hematita calcopirita pirrotina esfalerita pirita	Metasedimentos silíceos en contacto con pórfidos andesíticos. Andesitas y cuarzozononitas.		Contacto (subproducto)	Buitrago et al (1976)
96	Neiva	(Huila)	Hematita pirita calcopirita pirrotina esfalerita	Metasedimentos silíceos y calcáreos		Reemplazamiento (diseminado)	Buitrago et al (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad litológica	Tipo mineralización	Referencia
97	El Hoyo (Huila)		Plomo-Zinc	Idem anterior en contacto con diques andesíticos y aplíticos		Reemplazamiento (diseminado)	Buitrago (1976)
98	Salado-blanco (Huila)		Calcopirita Plomo-zinc	Sedimentitas intruidas por cuarzdioritas Batolito de Ibagué		Contacto Skarn	Buitrago et al (1976)
99	Anzoátegui (Tolima)		Pirita, galena, plata, calcop. esfalerita Mn, Cd, As, Sb	Xenolito de esquistos en cuarzdiorita del Batolito de Ibagué		Contacto	Buitrago y Buena Ventura (1975)
100	Novira (Tolima)		Pirita esfalerita calcopirita galena tetrahedrita siderita Cd, plata	Diques decíticos y aplíticos y calizas		Reemplazamiento	Buitrago y Buena Ventura (1975)
101	El Valle (Tolima)		Pirita, calcop. galena, esfal. oro, plata	Fm. Payandé en contacto con diorita monzonítica		Contacto	Mejía Nicholls (1953)
102	San Luis Payandé (Tolima)		Calcopirita magnetita granate epidota hematita esfalerita pirita molibdenita	Calizas Fm. Payandé intruidas por granodioritas de Payandé y El Sapo		Masas de skarn dispersas y pequeñas	USGS-Ingeominas (1986b)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca anfitrión	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
103	San Antonio	Los Guayabos (Tolima)	Magnetita pirita calcopirita esfalerita bornita galena	Mármol relictos de la Fm. Payandé o de xenolitos afectado por pórfidos decíticos y rocas de dique asociadas con el Batolito de Ibaqué		Skarn siderocuprífero	Escorco (1978)
104	Río Blanco	Puerto Saldaña (Tolima)	Cuarzo pirita calcopirita molibdenita bornita	Cuarzodiorita con ocasionales xenolitos metamórficos. (Precámbricos?) y pequeños skarn		Pequeños skarns, filones, vetillas.	Buenaventura et al (1976)
G. Mineralizaciones Pb, Zn (Cu) en metamorfitas							
105	Segovia	(Antioquia)	Pirita galena esfalerita	Metamórficas: neíses feldespáticos, cuarcitas esquistos sericiticos de edad posiblemente Paleozoico		Venas (sub-producto de Au y depósitos de contacto)	Oquendo (1970)
106	Zaragoza	(Antioquia)	Pirita galena esfalerita en filones de cuarzo	Idem anterior		Venas (sub-producto de Au)	Oquendo (1970)
107	Anorí	(Antioquia)	Pirita, esfal. pirrot., ars. galen., calc. oro, plata cuarzo	Esquistos cuarzo-grafíticos Grupo Valdivia		Venas	Hall et al (1970)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
108	Marquetalia (Caldas)		Galena calcopirita esfalerita pirita, Bor. Azu. Mal. cuarzo	Esquistos cuerzografí- ticos		Venas (en cuarzo)	Quintero (1958)
109	Pensilvania (Caldas)		Cuarz. pirit. galen., esfal. argentit., oro plata.	Esquistos alu- mínicos		Venas subproductos	López 1971b
110	Teruel (Huila)		Esfalerita arsenopirita	Lidita metamor- fizada		?	Royo y Gómez 1940
111	Quetame El Santua- rio (Dund.)	Trapichito	Calcopirita malaquita azurita	Cuarcitas y esquistos sedosos Gr. Quetame		Vetillas en una vena de cuarzo en 3 m de espe- sor	Gil (1976)
112	Hacari (N. Sant.)		Barita galena fluorita	Esquistos cuer- zo-sericíticos		Venas	Otero y Angarita (1975a)
113	Silos (N. Sant.)		Malaquita galena cuarzo	Esquistos clo- ríticos y seri- cíticos. fm. Silgaré		Venas	Otero y Angarita (1975a)
114	Salento (Quindío)	Las Nieblas	Galena, plata esfaler. pirit. oro, calcopir. estib., cuarz. sider., barita calcopirita	Rocas metamórficas de medio-bajo grado Edad tentativa Cambro-Ordoviciano		Venas	Barrero et al (1971) Kessen et al (1971) Lozano et al (1975) Moaquera y Buitrago 1971

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
115	Tona (Santand.)		Piromorfita cuarzo (galena)	Metamórficas de bajo grado. Fm. Silgará		Venas	Otero y Angarita 1975b Ward et al 1970
116	Anzoátegui (Tolima)		Pirita, gale- na, calcopi- rita, arseno- pirita, Au, Ag	Metamórficas de bajo grado		Venas (subproducto)	López (1971)
117	Líbano y Falen (Tolima)		Oro, plata galena esfalerita calcopirita cuarzo	Metamórficas Esquistos verdes y negros		Reemplazamiento (subproductos)	Buenaventura (1975)
118	Remedios (Antioquia)		Pirita galena esfalerita oro en venas de cuarzo	Plutón cuarzo- diorítico del Batolito de Se- govia		Venas (subproduc- to de Au)	Duendo (1970)
119	Remedios (Antioquia)		Pirita galena esfalerita oro en venas de cuarzo	Intrusivos féli- sicos (adameli- tas) neis y cuercitas		Venas (subproduc- to de Au)	Duendo (1970)
120	Segovia (Antioquia)		Pirita esfalerita galena calcopirita pirrotina cuercita calcita oro, plata	Cuarzodiorita Batolito de Segovia		Venas (Subproduc- to de Au)	Duendo (1970)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
121	Valparaiso (Antioquia)		Galena esfalerita	No precisado		Filones y lentes	Gutiérrez et al (1953)
122	Abriaquí Cañasgordas Frontino Urrao (Antioquia)		Pirita calcopirita arsenopirita pirrotina esfalerita galena plata, oro	Stocks dioríticos Morro Pelao, Morro Gacho, Páramo de Frontino localmen- te vulcanitas y se- dimentitas del Gr. Cañasgordas		Venas (subproduc- to Au-Ag) relacio- nadas con plutones	Rodríguez et al (1980)
123	Marmato (Caldas)		Oro, plata pirita esfalerita galena arsenopirita calcopirita pirrotina	Stock de Marma- to Pórfido dacítico		Filones, venas y diseminaciones	Cuéllar y Mora (1985)
124	Samaná (Caldas)		Pirita argentita plata, oro galena esfalerita calcopirita cuarzo	Cuarzodiorita		Venas (subproductos)	López, (1971b)
125	Samaná (Caldas)		Cuarzo pirita galena oro, plata	Cuarzodiorita Batolito de Samaná		Venas (subproductos)	López, (1971b)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca ancajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
126	Silvia El Pinar (Cauca)		Pirita Calcopirita Molibdenita oro, galena esfalerita cinabrio pirrotina (calcosina covelina)	Pórpidos ande- síticos, dacíti- cos dioríticos		Asociado a pórfido cuprífero dissemi- nación stockwork	Oreago, (1977)
127	Piedra Sentada (Cauca)		Pirita, calcopirita galena esfalerita estibina arsenopirita cinabrio malaquita oro, cuarzo epidot. feldes.	Cuerpos porfirí- ticos hipoabi- sales		Venas	León et al (1977)
128	Santander de Quilichao (Cauca)		Oro, plata galena, cal- copirita, estibina	Cuarzodioritas y dacitas		Venas	Sandoval (1952)
129	Gigante (Huila)		Galena pirita	Cuarzomonzonite biotítica		Venas	(Buitrago et al 1976)
130	El Pital (Huila)		Calcita calcopirita	Dique andesítico en cuarzodiorita		Venas	Buitrago et al (1976)
131	San José de Ipana (Huila)		Galena pirita calcita cuarzo	pórfido andesí- tico		Venas	Buitrago et al (1976)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
132	Villavieja (Huila)		Galena pirita walaquita cuarzo			Venas	Royo y Gómez (1940)
133	Berruecos Buesaco Mallens (Nariño)		Galena calcopirita barita	Intrusivos por- firíticos neoterciarios		?	Bueno, (1948)
134	El Carmen (N.Santand.)		Calcocina pirita calcopirita hematita galena esfalerita	?		Venas (Subproducto)	Reyes (1973)
135	Abrego (N.Santand.)		Galena barita fluorita	Cuarzomonzonitas		Venas y disemina- ciones	Cáceres y Magyes (1967) (SGN, 1951)
136	Cácuta (N.Santand.)		Galena calcopirita esfalerita	Granito de Du- renie		Venas	Otero y Angarita (1975)
137	Sardinata (N.Santand.)		Galena calcopirita cuarzo	Intrusivo (?)		Venas	Otero y Angarita (1975a)
138	Riosucio (Risarcolda)		Esfalerita galena pirita oro	Pórfido andesi- co		Venas	Guerín (1971)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca anejante	Unidad litológica	Tipo mineralización	Referencia
139	Quinchía (Risaralda)		Esfalerita pirita	Pórfidos andesí- ticos		Venas	Guarín, (1971)
140	Upará (Santander)		Flurita galena cuarzo	Granito de Pes- cadero		Venas	Otero y Angarita (1975b)
141	California (Santander)		Galena esfalerita	Diques de roca		Venas	Otero y Angarita (1975b)
142	California (Santander)		Oro, plata pirita esfalerita tetrahedrita galena marcasita calcopirita	Cuarzodiorita cuarzomonzonita granito. Facies porfirí- ticas más jóve- nes		Venas	Mendoza y Jaramillo (1975)
143	Rovira (Tolima)		Esfalerita galena pirita calcopirita bornita calcita cuarzo	Cuarzodiorita		Venas	Buitrago y Buena Ventura (1975)
144	Anzotegui (Tolima)		Pirita galena esfalerita calcopirita cuarzo	Granodiorita hornbléndica		Venas Reemplazamiento	Buitrago y Buena Ventura (1975)

No.	Municipio	Lugar	Minerales	Roca encajante	Unidad Litológica	Tipo mineralización	Referencia
145	Fresno (Tolima)		Pirita galena esfalerita calcopirita oro plata	Cuarzodiorita El Hatillo		Venas reempla- zamiento	Buenaventura (1975)
146	San Antonio (Tolima)		Calcopirita galena esfalerita cuarzo (oro, plata)	Roca hipohabisal porfirítica de composición an- desítica		Venas (reemplaza- miento)	Buenaventura et al (1976)
147	Chaparral (Tolima)		Galena esfalerita calcopirita pirita (plata,oro)	Batolito de Ibagué		Venas	Buenaventura (1975)
148	Cajamarca (Salento) (Tolima)		Pirita argentita galena esfalerita calcopirita oro	Relacionadas a pórfidos dací- ticos		Venas (subpro- ducto)	Lozano et al (1975)

Como puede observarse en el mapa de la Figura 4 las mineralizaciones de cada categoría ocurren en determinadas regiones caracterizadas por un ambiente geológico particular.

A continuación para cada tipo de mineralizaciones se describe:

1. Sus características generales y las áreas de interés para prospeccionar depósitos.
2. Los yacimientos en los cuales se ha hecho alguna evaluación para plomo y zinc y algunos prospectos o manifestaciones que han tenido importancia bien sea por su producción de plomo y zinc, aunque como subproductos de la minería de metales preciosos, o bien por presentar aspectos que los hacen interesantes desde el punto de vista geológico y han sido objeto de algunos estudios. (La descripción parcialmente ha sido tomada de Melo (1984).
3. Recomendaciones para la prospección de depósitos en Colombia; en su mayor parte extractadas de INGEOMINAS-USGS, (1986b).

#### Cu, Zn, Pb EN VULCANITAS MAFICAS

Las mineralizaciones predominantemente consisten en venas y disseminaciones, principalmente de sulfuros de Cu y en menor proporción de Zn o Pb. Están localizadas en diabases y basaltos, a veces metamorfizados, y en algunos casos con interestratificaciones de lodolitas, chert o arenitas; estas rocas pertenecen a secuencias ofiolíticas del Cretácico de la región occidental de Colombia (Grupo Diabásico, Grupo Dagua, Grupo Cañasgordas), en los terrenos geológicos constituidos por corteza oceánica o con fragmentos de corteza oceánica: Cauca-Roseral, Cañasgordas y Dagua (Tabla 6), los cuales presentan condiciones geológicas favorables para la existencia de depósitos de sulfuros masivos estratiformes de Cu-Zn en vulcanitas máficas (INGEOMINAS - USGS, 1986a).

También son áreas favorables para prospeccionar este tipo de depósitos las vulcanitas máficas de la Serranía de Baudó, Gorgona y la Alta Guajira (Formación Etpana en el Microterreno Ruma) (INGEOMINAS - USGS, 1986a).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE SULFUROS MASIVOS EN VULCANITAS MAFICAS EN COLOMBIA

Se recomiendan programas de cartografía geológica en el occidente de Colombia para identificar el contacto entre basaltos submarinos y sedimentitas pelágicas, con el cual normalmente están asociados los depósitos.

En la prospección geoquímica de sedimentos activos el muestreo debe ser denso debido a la poca dispersión de las anomalías; además es aconsejable el muestreo detallado de roca, suelo, zonas de "gossans" y mineralizaciones observadas, así como la búsqueda de cherts ricos en Mn y Fe y de patrones de zonificación de metales, los cuales son indicios de mineralizaciones; debe reconocerse pérdida general de Ca y Na e introducción de Mn y Fe en la zona de venas (SINGER, 1982 en COX, 1983).

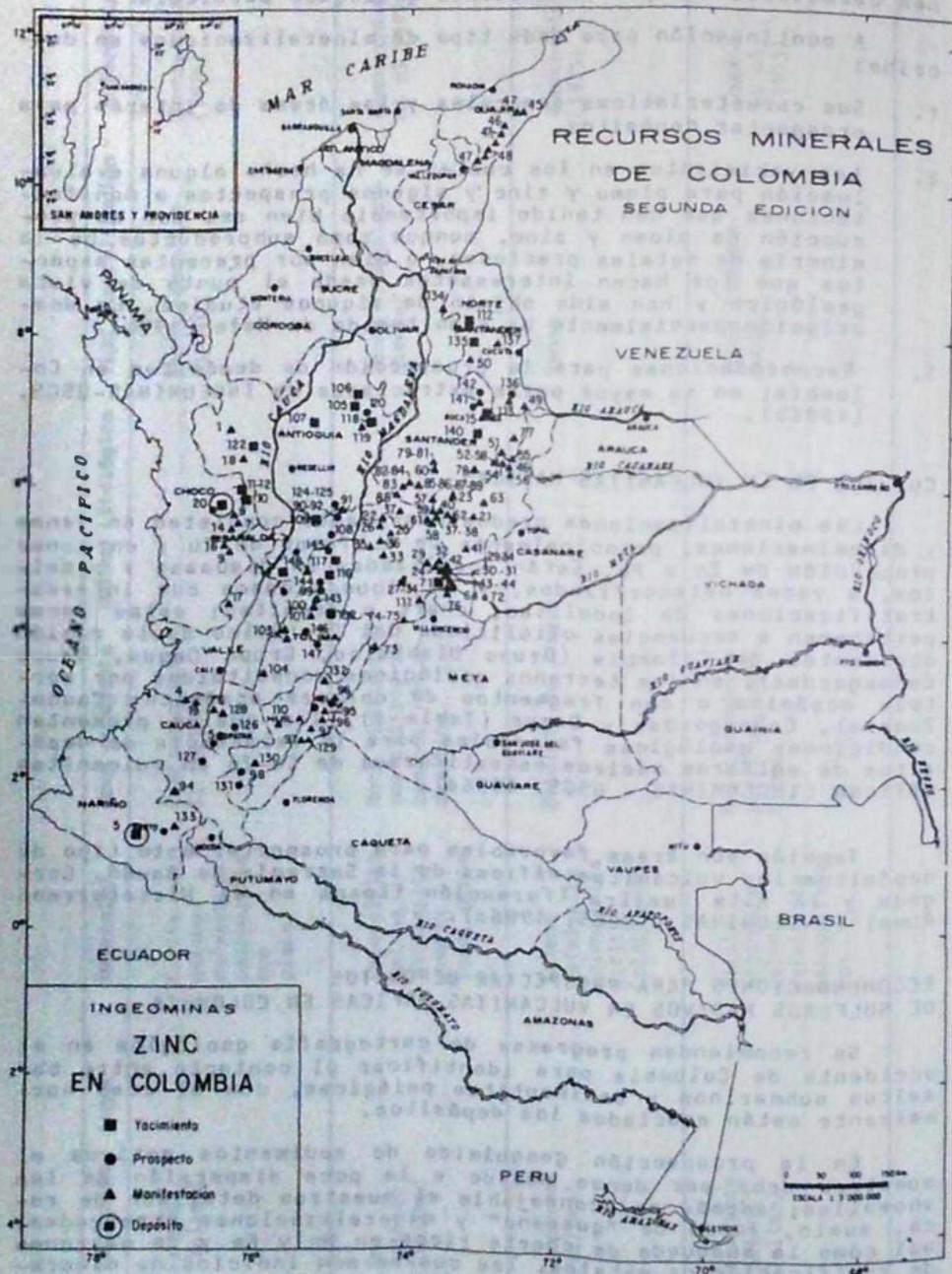


FIG. 3: Mineralizaciones de plomo, zinc (cobre estratoconfinado) en Colombia.

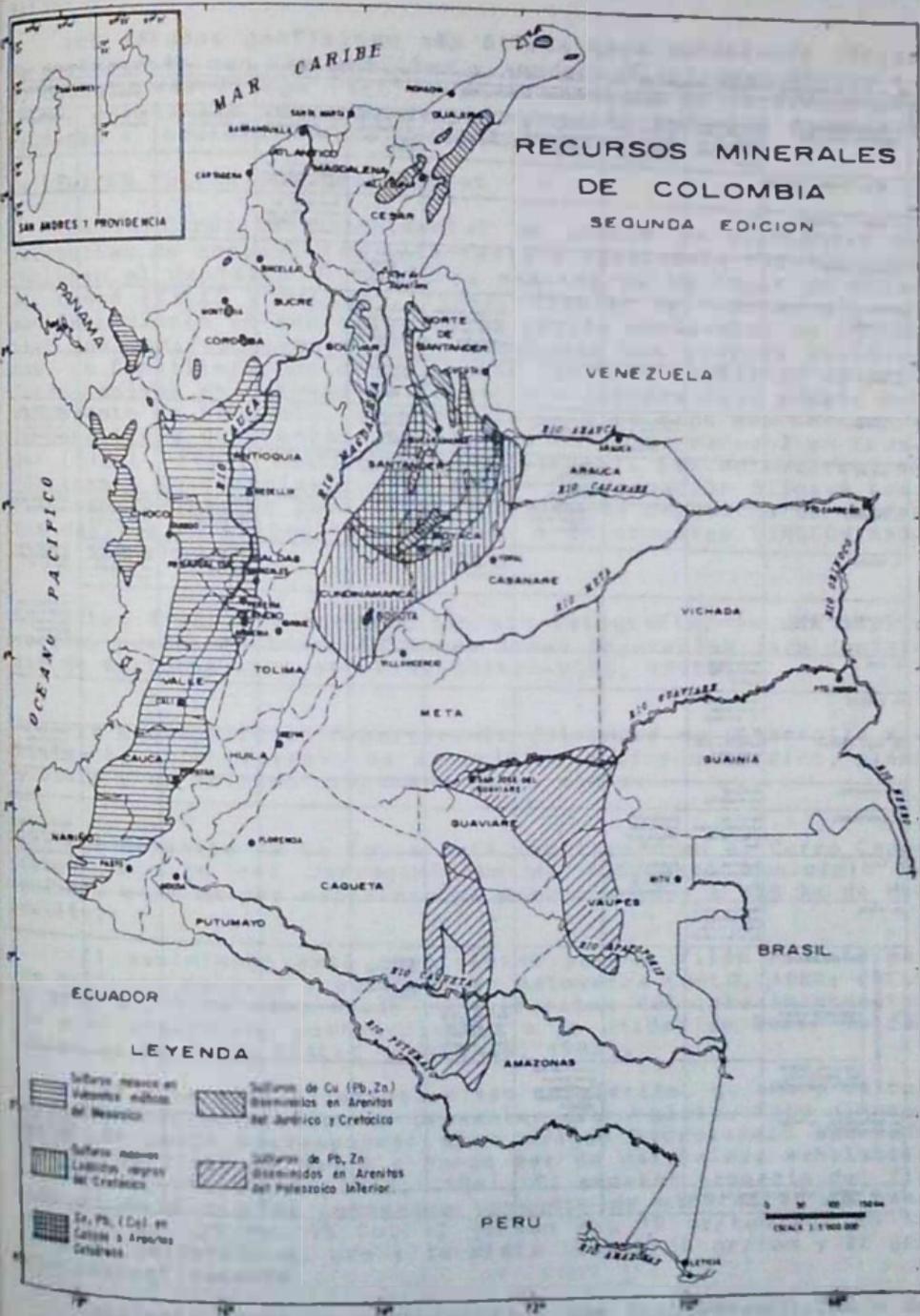


FIG. 4: Zonas favorables para mineralizaciones de plomo y zinc en Colombia.

Tabla No. 1. Recursos minerales de Colombia (continuación de la Tabla No. 1 de la página 537)

SECTOR ECONOMICO: MINAS, CARBON Y PETROLIO

INDICADOR GENERAL	SECTOR ECONOMICO							
1. CARBON - LIGNITE								
2. CARBON - ANTRACITICO								
3. PETROLIO								
4. URANIO								
5. COBALTO								
6. MOLIBDENO								
7. ZINC								
8. CROMITA								
9. NIQUEL								
10. PLATA								
11. ORO								
12. CUPRO								
13. MERCURIO								
14. BISMUTO								
15. VANADIO								
16. TANTALO								
17. NIOBIO								
18. COBALTO								
19. MOLIBDENO								
20. ZINC								
21. URANIO								
22. COBALTO								
23. MOLIBDENO								
24. ZINC								
25. URANIO								
26. COBALTO								
27. MOLIBDENO								
28. ZINC								
29. URANIO								
30. COBALTO								
31. MOLIBDENO								
32. ZINC								
33. URANIO								
34. COBALTO								
35. MOLIBDENO								
36. ZINC								
37. URANIO								
38. COBALTO								
39. MOLIBDENO								
40. ZINC								
41. URANIO								
42. COBALTO								
43. MOLIBDENO								
44. ZINC								
45. URANIO								
46. COBALTO								
47. MOLIBDENO								
48. ZINC								
49. URANIO								
50. COBALTO								
51. MOLIBDENO								
52. ZINC								
53. URANIO								
54. COBALTO								
55. MOLIBDENO								
56. ZINC								
57. URANIO								
58. COBALTO								
59. MOLIBDENO								
60. ZINC								
61. URANIO								
62. COBALTO								
63. MOLIBDENO								
64. ZINC								
65. URANIO								
66. COBALTO								
67. MOLIBDENO								
68. ZINC								
69. URANIO								
70. COBALTO								
71. MOLIBDENO								
72. ZINC								
73. URANIO								
74. COBALTO								
75. MOLIBDENO								
76. ZINC								
77. URANIO								
78. COBALTO								
79. MOLIBDENO								
80. ZINC								
81. URANIO								
82. COBALTO								
83. MOLIBDENO								
84. ZINC								
85. URANIO								
86. COBALTO								
87. MOLIBDENO								
88. ZINC								
89. URANIO								
90. COBALTO								
91. MOLIBDENO								
92. ZINC								
93. URANIO								
94. COBALTO								
95. MOLIBDENO								
96. ZINC								
97. URANIO								
98. COBALTO								
99. MOLIBDENO								
100. ZINC								

En los análisis químicos se deben extraer los metales selectivamente de los sulfuros y óxidos sin disolver los silicatos.

Los métodos geofísicos más útiles para establecer sitios de perforación son los perfiles y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) y en el dominio de la frecuencia (FEM); además las técnicas de polarización inducida espectral ayudarán a localizar venas mineralizadas.

#### Cu (Zn) EN VULCANITAS INTERMEDIAS

En la Cordillera Occidental se conoce la existencia de vulcanitas de composición intermedia y localmente félsica, que incluyen el depósito de sulfuros masivos de La Equis en Quibdó, Chocó (CALLE y SALINAS, 1986). También se conocen algunas manifestaciones en andesitas en la región occidental de Colombia; dos manifestaciones están asociadas con cuerpos plutónicos. La Cordillera Occidental puede contener depósitos de sulfuros masivos en vulcanitas félsicas e intermedias. Además del yacimiento de La Equis, el depósito de este tipo más cercano a la Cordillera Occidental de Colombia es el de Macuchi en Ecuador (STOLL, 1962; INGEOMINAS-USGS, 1986b). Las metavulcanitas félsicas e intermedias contenidas en la Formación Silgará también son favorables para la prospección de depósitos de sulfuros masivos en vulcanitas félsicas e intermedias (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

"Las áreas del Escudo, aún sin catografiar en una amplia región, pueden contener extensas áreas favorables para depósitos de sulfuros masivos" (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

**La Equis.**— En el Departamento del Chocó se desarrolla actualmente este proyecto de minería de sulfuros de zinc, plomo y cobre y de metales preciosos oro y plata.

El depósito de La Equis está localizado en el Cerro Capoteros al este del Corregimiento de Tutunendó Municipio de Quibdó, a 30 km por carretera de esta ciudad y a 128 km de Medellín.

El yacimiento está constituido por un filón hidrotermal de sulfuros masivos y sulfuros en estoverca (MELO, 1984; CALLE y SALINAS, 1986) emplazado en vulcanitas félsicas intermedias de edad pre-Eoceno pertenecientes a la Unidad de Rocas Volcánicas de La Equis (CALLE y SALINAS, 1986).

Los minerales principales son esfalerita, galena y calcopirita; como accesorios se presentan oro y plata. Esta mineralización puede corresponder a un origen hidrotermal asociado con el Batolito de Mandé o puede ser de naturaleza exhalativa submarina (CALLE y SALINAS, 1986). El espesor promedio del filón es de 2 m y el contenido promedio de mineral en la mena es: 11% Zn, 2% Pb, 1% Cu, 12 gr/ton Au, 19 gr/ton Ag. En la zona de oxidación el oro y la plata tienen 18 gr/ton y 22 gr/ton respectivamente.

Mediante trabajos exploratorios que incluyeron 1.200 m de sondos y 220 m de galerías, se calcularon reservas de 111.000 toneladas medidas, 12.000 toneladas indicadas y 1'600.000 toneladas inferidas (MELO, 1984).

## RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE SULFUROS MASIVOS EN VULCANITAS FELSICAS E INTERMEDIAS, EN COLOMBIA

La cartografía geológica es útil para identificar plutonitas de composición intermedia y félsica y los centros de vulcanismo félsico, en donde deben concentrarse los esfuerzos de la exploración.

Durante la prospección geoquímica es aconsejable el muestreo y análisis de Au y metales básicos en rocas y sedimentos activos, así como en zonas de "gossan" que pueden contener elevados valores de Pb. El Au siempre está presente y es una guía de la mineralización; otras guías son el enriquecimiento de Mg y Zn y el empobrecimiento en Na alrededor de los depósitos, así como los valores altos de Cu, Zn, Pb, Ba, As, Ag, Au, Se, Sn, Bi y Fe dentro de los depósitos (SINGER, 1982 en COX, 1983).

Las técnicas aeromagnéticas son útiles para localizar los centros de vulcanismo félsico y los estudios electromagnéticos lo son para establecer sitios de perforación en zonas muy cubiertas de suelo y vegetación.

### Cu, Zn, Pb en LODOLITAS NEGRAS

Las mineralizaciones principales son venas, diseminaciones y en algunos casos estratos laminares o lentes de sulfuros de Cu, Zn, Pb y Fe; están encajadas en lodolitas negras del Cretácico inferior (Formaciones Lutitas de Macanal, Fômeque, Paja, Grupo Villeta e intercalaciones de lododita en la Formación San Gil inferior) de la Cordillera Oriental.

La secuencia estratigráfica de esta región es una gruesa sucesión de lodolitas depositadas en condiciones euxínicas de baja energía; localmente contiene evaporitas e intercalaciones detríticas arenosas que fueron depositadas más rápidamente que las lodolitas (SARMIENTO, 1985a,b; INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Sarmiento (1985a, b) muestra que las mineralizaciones están localizadas en la parte central de la paleocuenca de sedimentación (Cuenca de Cundinamarca), donde el espesor de la secuencia sedimentaria cretácica es máximo, dentro de la región comprendida por el contorno mínimo del mar durante el Berriasiense-Valanginiense (ETAYO et al, 1969) y donde están localizadas las intrusiones básicas del Cretácico Inferior (FABRE y DELALDYE, 1982).

Además la mayoría de las mineralizaciones están localizadas cerca de fallas o en sitios donde hay cambios laterales rápidos en las facies y en el espesor de las sedimentitas (SARMIENTO, 1985a,b).

Con base en la comparación de las características geológicas de la región central de la Cordillera oriental, región que contiene las mineralizaciones, con aquellas características de las áreas que contienen depósitos exhalativos estratiformes (SARMIENTO, 1985), en concordancia con INGEOMINAS-USGS (1986b), se concluye que las sedimentitas cretácicas (Supraterrano Cretácico y especialmente la Cuenca de Cundinamarca), ofrecen excelentes posibilidades para el hallazgo de depósitos exhalativos de Cu, Zn y Pb.

**Vereda Nazareth.**— En el Departamento de Cundinamarca al noreste de Ubalá, en la Vereda Nazareth, aflora una mineralización de esfaleritas probablemente variedad marmatita, zinc rellenando fracturas en una zona de brecha de falla que afecta las sedimentitas de la Formación Lutitas de Macanal. Este parece ser un prospecto interesante debido al alto contenido de zinc, 51.1 a 53.3% y al contenido de cadmio de la esfalerita (5.000 ppm), determinados en el análisis de dos muestras mineralizadas (RODRIGUEZ, 1971).

**La Playa.**— Localizada aproximadamente 5 km al sureste del Municipio de Junín, Departamento de Cundinamarca, la mina de La Playa se explotó conjuntamente con la mina El Rincón para la producción de zinc. La mineralización, de relleno de cavidades y diseminación, está constituida principalmente por esfalerita y en menor proporción por siderita y calcopirita. La mineralización está emplazada en los shales negros de la Formación Fómeque del Cretácico Inferior. En la mina "El Rincón Barrientos" por interpolación de datos de la mina y de 9 perforaciones se han estimado 1610 toneladas de esfalerita.

La mina de La Playa produjo 1.200 toneladas de concentrado de zinc (60% de Zn) en el año 1959. En ese mismo año se inauguró en Bogotá una planta electrolítica de zinc, con una capacidad de 2.500 toneladas anuales (WOKITTEL, 1960). Posteriormente la mina fue abandonada por bajo rendimiento (GARZON, 1975b).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Pb, Zn EXHALATIVOS EN LODOLITAS NEGRAS, EN COLOMBIA

Se recomienda el análisis estratigráfico y estructural detallado de la Cuenca de Cundinamarca para localizar:

- Cuencas de sedimentación de tamaño pequeño o cuencas de tercer orden (LARGE, 1980).
- fallas sinsedimentarias con evidencias de deformación penecontemporáneas de los sedimentos.
- Fuentes de calor ígneo.

Las áreas seleccionadas se deben cartografiar en detalle.

La prospección geoquímica debe incluir muestreo de sedimentos activos y rocas en áreas previamente seleccionadas y donde existan manifestaciones minerales. Se deben analizar Ba, Mn, Pb, Zn, Ag y Cu. En las muestras de roca deben analizarse los sulfuros y óxidos independiente de los silicatos.

Los patrones geoquímicos de zonificación lateral hacia afuera: Cu, Pb, Zn, Ba y vertical hacia arriba: Cu, Zn, Pb, Ba, así como los halos regionales de Mn, son guías para reconocer los depósitos (BRISKEY, 1982 en COX, 1983).

La localización de los cuerpos de sulfuro masivo puede facilitarse mediante estudios electromagnéticos.

#### Zn, Pb, (Cu) EN CALIZAS O ARENITAS CALCAREAS

Las mineralizaciones de Zn, Pb, (Cu), en calizas o arenitas calcáreas, ocurren como relleno de fracturas o cavidades, como diseminaciones o en la matriz de brechas; consisten en sulfuros a veces acompañados por barita y fluorita.

La mayoría de manifestaciones están encajadas en sedimentitas cretácicas no más jóvenes que el Cenomaniano (FABRE y DELALOYE, 1982) y en menor proporción ocurren en calizas del Paleozoico superior.

Las manifestaciones cretácicas están localizadas en la Cordillera Oriental, en calizas o arenitas calcáreas (Formaciones Rosablanca, Calizas del Guavio, Capacho, Mercedes, San Gil inferior y Churuvita) y están distribuidas en el área donde existen unas facies calcáreas infrayacidas por arenitas del Jurásico o comienzos del Cretácico y suprayacidas por lodolitas negras del Cretácico inferior (SARMIENTO, 1985b). Sarmiento (1985b) muestra que las mineralizaciones están restringidas a aquellas áreas donde la secuencia estratigráfica cretácica no es muy gruesa, sobre altos paleotopográficos (paleoacalzcos de Santander y Floresta) o en sectores marginales de la cuenca donde hubo depósito de carbonatos, en ambientes litorales o marinos someros localmente asociados con dolomitas y evaporitas (Formación Rosablanca). Algunas mineralizaciones ocurren cerca de la base de la secuencia sedimentaria transgresiva del Cretácico inferior, en sedimentitas calcáreas depositadas en medios transicionales entre continentales y marinos y a veces asociados con discordancias que evidencien una paleotopografía irregular (MENDOZA, 1983; SARMIENTO, 1985b).

Las características mencionadas de las regiones de la Cordillera Oriental donde están distribuidas estas manifestaciones, son similares con aquellas de las áreas que contienen depósitos de sulfuros de Pb, Zn estretoconfinados en carbonatos (SARMIENTO, 1985b); en consecuencia en estas regiones debe prospectarse este tipo de depósitos.

Las manifestaciones del Paleozoico superior, consisten en venas de galena, calcopirita y esfalerita y disseminaciones de estos sulfuros en calizas del Grupo Farallones de edad Devónico inferior a Pérmico superior, en la región de Guetame - Terreno Guetame (INGEOMINAS, USGS, 1986a). Algunas mineralizaciones contienen galena, esfalerita y calcopirita y otras únicamente calcopirita u otros minerales de cobre. Probablemente las mineralizaciones con predominio de sulfuros de Pb y Zn pueden dar indicios de depósitos de sulfuros de Pb, Zn estretoconfinados en carbonatos, en tanto que las mineralizaciones con predominio de Cu pueden sugerir la presencia de depósitos de cobre y cobalto en dolomitas (INGEOMINAS - USGS, 1986b).

**Cueva Oscura - San Rafael.** - Estas mineralizaciones hidrotermales de sulfuros de plomo y en menor proporción de zinc, están localizadas 3 km al oriente de Ubalá en el Departamento de Cundinamarca. El principal mineral es galena, la cual se encuentra disseminada y rellenando fracturas en las calizas arenosas de la Formación Calizas del Guavio, la cual es la parte basal de la sucesión estratigráfica del Cretácico que reposa discordantemente sobre el Grupo Farallones de edad paleozoica. En menor cantidad se presenta calcopirita, esfalerita, siderita y pirita. El depósito fue explotado antiguamente pero se abandonó por bajo rendimiento. INGEOMINAS efectuó 4 perforaciones con un total de 946 pies, con resultados negativos, pues se concluyó que a pesar de que la mineralización tiene localmente un tenor aceptable es de tamaño reducido (GARZON, 1975a). Por análisis de algunas muestras mineralizadas se estimó un tenor promedio de 7% de mineral de plomo (ULLOA y RODRIGUEZ, 1979). Cerca de esta localidad y dentro de la misma unidad litoestratigráfica existen numerosas manifestaciones de plomo con algo de zinc (ESCOVAR, 1978).

**Quebrada Cedrilla.**— En el prospecto Quebrada Cedrilla, localizado 4 km al este de Coromoro, Departamento de Santander, la mineralización se presenta en forma lenticular dentro de las calizas de la Formación Rosablanca. Consta de galena, esfalerita y calcopirita; esencialmente los estudios realizados por INGEOMINAS (WARD et al, 1970) determinaron mediante sondeos con taladro manual reservas del orden de 100.000 toneladas, con tenores de 1.33% Pb, 57% Zn, 0.04% Cu.

**Montenegro.**— El prospecto de Montenegro, situado 75 km, al sureste de Concepción, Santander, está emplazado en sedimentos de la Formación Mercedes, del Cretácico. Tiene forma lenticular y los principales minerales, galena y esfalerita, se presentan en forma disseminada, con valores entre 0.5 y 22.5% de Pb y entre 6.25 y 56.6% de Zn en muestras mineralizadas (VARGAS et al, 1976).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE VENAS DE Zn, Pb EN CARBONATOS, EN COLOMBIA

Se aconseja el análisis estratigráfico, especialmente de las sedimentitas de la Cordillera Oriental, para reconocer carbonatos de aguas someras en paleoaltos o bordes de la cuenca de sedimentación y en asociación con inconformidades. En las áreas de interés debe buscarse la interfase entre caliza y dolomita, así como brechas, arrecifes y otras trampas de la mineralización. También es útil el análisis de los patrones de diaclasamiento.

Durante la prospección geoquímica se deben incluir en el análisis Pb, Zn, Co, Ni, Cd, Be y Ag. En lo posible deben analizarse los sulfuros y óxidos independientemente de silicatos.

El reconocimiento de anomalías regionales de Pb, Zn, Co, Mo, Ag, Co y Ni en residuos insolubles, de halos de Zn primario en carbonatos y del patrón de zonificación vertical hacia arriba aproximado: Cu ( $\pm$  Ni,  $\pm$  Co) Pb, Zn, Sulfuros de Be, es de gran ayuda (BRISKEY, 1983 en COX, 1983).

Varias técnicas electromagnéticas, especialmente de polarización inducida, son útiles para localizar las mineralizaciones.

#### Cu (Pb,Zn) EN ARENITAS

Ocurren en la Cordillera Oriental y en la Serranía de Perijá. En realidad la mayoría de mineralizaciones listadas en la tabla 5 contienen únicamente minerales de Cu; solamente las manifestaciones en los municipios de Villa de Leiva y Tunja en la Formación Arcabuco y de Zetaquirá en la Formación Una contienen galena y esfalerita.

Las mineralizaciones ocurren predominantemente en las unidades detríticas depositadas en ambientes continentales o litorales con predominio de condiciones oxidantes y localmente condiciones reductoras durante el Jurásico y comienzos del Cretácico (Formaciones La Quinta, Girón, Rionegro y Arcabuco), y están cubiertas por sedimentitas marinas del Cretácico (SARMIENTO, 1985b).

Las arenitas que contienen las mineralizaciones fueron depositadas en grábenes (BARTOK et al, 1981; MAZE, 1984); en algunos lugares están acompañadas por vulcanitas máficas - basaltos en la Formación La Quinta (MAZE, 1984) o felsitas -

riolitas en la Formación Girón (MORALES et al, 1958; SARMIENTO, 1985b). Las características anteriores de la Cordillera Oriental y la Serranía de Perijá son semejantes con aquellas características de las regiones donde existen depósitos de sulfuros de Cu (Pb-Zn), diseminados estratoconfinados y en consecuencia son áreas de interés para la búsqueda de este tipo de depósitos (SARMIENTO, 1985b; INGEOMINAS - USGS, 1986b).

Adicionalmente son áreas de interés el margen suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta (Formaciones Guatapuri, Los Portales, Girón), el Valle Superior del Magdalena (Formaciones Saldaña, Yarí), la región Oriental de la Guagira (Formaciones La Quinta y Rancho Grande, Capas Rojas de Ipagure), La Serranía de San Lucas (Formaciones El Sudán y La Mojana) y el Macizo de Quetame (Grupo Farallones) donde hay condiciones favorables para la existencia de este tipo de depósitos (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Según INGEOMINAS - USGS (1986) la única región favorable para la ocurrencia de depósitos de sulfuros diseminados de Pb y Zn estratoconfinados en areniscas ocurre en el Araracuara en la Amazonia Colombiana; allí en "unas areniscas con buzamiento suave, del Paleozoico inferior, que suprayacen rocas del basamento cristalino", "pueden haberse formado depósitos a partir de "fluidos ricos en metales que fueron expulsados de los sedimentos geosinclinales del Paleozoico inferior en los cinturones plegados de edad Silúrico, en el sitio actual de la Cordillera Oriental" (INGEOMINAS - USGS, 1986b).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Cu, (Pb,Zn) EN ARENISCAS, EN COLOMBIA

Se recomiendan los trabajos de cartografía y estratigrafía para identificar sedimentitas reducidas o ricas en materia orgánica interestratificadas dentro de secuencias de capas rojas y en asociación con evaporitas.

Los análisis de residuos insolubles de carbonatos asociados ayudan a detectar las anomalías geoquímicas.

La asociación geoquímica para diagnóstico es: Cu, Ag, Pb, Zn (Mo, V, U) (COX, 1983).

Si los depósitos tienen volumen suficiente se pueden localizar mediante técnicas electromagnéticas. Los sondeos electromagnéticos tanto en el dominio del tiempo (TEM) como en el dominio de la frecuencia (FEM), el método audiomagnetotelégrafo (AMT) y el de polarización inducida pueden ser útiles para localizar los yacimientos.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Pb, Zn EN ARENISCAS, EN COLOMBIA

En el Araracuara la exploración debe concentrarse en los 100 m inferiores de las arenitas paleozoicas. Debe tenerse en cuenta que la lixiviación superficial y el poco contraste visual de los minerales secundarios de Pb - Zn dificultan el reconocimiento de los depósitos.

Se recomienda el muestreo de sedimentos activos en la vecindad de paleocanales y elevaciones del basamento, con énfasis en aquellos sitios donde las arenitas contengan trazas de carbón orgánico. Deben separarse los minerales pesados y analizarse para Pb, Zn y Ag. Posteriormente debe hacerse muestreo de rocas y suelos para identificar anomalías de Pb y Zn, teniendo en cuenta que las partes inferiores de algunos depósitos comúnmente están enriquecidas en Ba, F y Ag (BRISKEY, 1982 en COX, 1983).

Los métodos geofísicos útiles para localizar las mineralizaciones son los sondeos y perfiles electromagnéticos, los métodos de polarización inducida (IP) y de potencial espontáneo (SP).

#### Pb, Zn, Cu EN ZONAS DE CONTACTO DE CUERPOS PLUTONICOS

Estas mineralizaciones están localizadas predominantemente en la región sur de la Cordillera Central en los terrenos Payandé, Cajamarca y Cauca - Romeral. Las mineralizaciones ocurren en, o cerca de los contactos de intrusiones félsicas o intermedias. Las litologías encajantes son calizas y metacalizas de la Formación Payandé y otras formaciones mesozoicas o consisten en sedimentitas o metasedimentitas no calcáreas, principalmente esquistos, cuarcitas y arenitas.

Las mineralizaciones desarrolladas en calizas y metacalizas están localizadas en el terreno Payandé en los departamentos del Tolima y Huila; en varios casos se han reportado rocas de skarn (BUIRAGO y BUENAVENTURA, 1975); es posible hallar depósitos adicionales de skarn en esta región, donde la Formación Payandé yace por debajo de las vulcanitas de la Formación Saldaña (INGEOMINAS-USGS, 1986a). También es posible hallar depósitos de Pb, Zn de reemplazamiento en rocas calcáreas como lo sugieren algunas manifestaciones.

Las mineralizaciones, contenidas en sedimentitas o metasedimentitas no calcáreas, ocurren en disseminaciones o en venas de sulfuros de Pb y Zn, pero además contienen oro y plata; es posible considerar estas manifestaciones como un tipo intermedio entre aquellas de contacto y reemplazamiento en rocas calcáreas y las venas de plomo, zinc y metales preciosos.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECIAR DEPOSITOS DE SKARN DE Pb, Zn EN COLOMBIA

Se aconseja la cartografía geológica y el reconocimiento de asociaciones de minerales de skarn en rocas calcáreas en la parte sur de la Cordillera Central, especialmente donde los silicatos hidratados como el anfíbol y la clorita reemplazan el granate o el piroxeno. También deben buscarse calcosilicatos en cantos de corrientes fluviales.

La asociación geoquímica de diagnóstico de los skarns es Zn, Pb, Cu, Co, Au, Ag, As, W, Sn, F, Mn, y posiblemente Be (COX, 1983), por lo tanto deben analizarse estos elementos durante la prospección geoquímica.

El análisis para W, Bi, Sn y metales básicos en minerales pesados separados de concentrados de batea es una guía útil.

En la medida de lo posible deben reconocerse patrones de zonificación mineralógica centrífuga desde Cu, Au, Ag cerca de

los depósitos, luego Au, Ag y Pb, Zn, Ag en las partes más externas (COX, 1983).

Si los skarna de metales básicos están asociados con skarna de magnetita, los estudios magnéticos de detalle facilitan su identificación y los estudios electromagnéticos permiten localizar depósitos en áreas geoquímicas de interés especial.

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE Pb, Zn DE REEMPLAZAMIENTO, EN COLOMBIA

Mediante cartografía geológica se deben reconocer unidades calcáreas cerca de los cuerpos ígneos intrusivos; en estos sitios se deben buscar patrones de alteración y asociaciones de minerales. La alteración superficial de los depósitos origina masas superficiales de color ocre con cerusita, anglesita, hemimorfita y cerargirita.

Las anomalías geoquímicas regionales de Pb, Zn, Ag, Cu, Au, As, Sb y Bi son indicativas de depósitos. Deben analizarse los minerales pesados obtenidos de concentrados de batea.

Es un criterio útil el reconocimiento de patrones de zonificación lateral desde un sector cercano a los depósitos rico en Cu, luego una amplia zona de Pb, Ag y finalmente una prolongación externa rica en Mn y Zn (MORRIS, 1982 en COX, 1983).

Los cuerpos plutónicos a cierta profundidad, pueden localizarse mediante estudios magnéticos terrestres y aéreos. Las técnicas electromagnéticas permiten localizar las mineralizaciones.

#### Pb, Zn, EN METAMORFITAS

Estas mineralizaciones ocurren preferencialmente en metamorfitas de bajo grado; esquistos paleozoicos del Terreno Cajamarca en la Cordillera Central (Grupo Cajamarca, Grupo Ayura Montebello(?)), y de los macizos de Santander (Formación Silgará) y de Quetame (Grupo Quetame); en pocos casos se han hallado en metamorfitas de grado medio y alto (Ej: mineralización en neises en el Municipio de Segovia, Área Fraguas).

Típicamente consisten en venas a veces acompañadas por mineralizaciones de contacto o de reemplazamiento; la mayoría de manifestaciones contiene sulfuros de metales básicos Pb, Zn, Cu acompañados por Au, Ag y cuarzo; en algunos casos el Pb y Zn se extraen como subproducto de pequeñas minas de oro. Algunas mineralizaciones están localizadas cerca de cuerpos plutónicos y localmente se ha observado que la mineralización aumenta hacia el plutón como en el Municipio de Segovia, Área Fraguas (OQUENDO, 1970) y es posible que todas estén asociadas con cuerpos de origen magmático. En algunas se ha reportado alteración hidrotermal.

La estructura en venas y la paragénesis de estas manifestaciones sugiere la posibilidad de hallar depósitos de Pb, Zn, Au, Ag en venas especialmente en aquellos cinturones magmáticos de las cordilleras Central y Occidental donde se conocen prospectos para pórfidos cupríferos.

La existencia de algunas manifestaciones de venas de Pb, Zn, Cu sin oro ni plata, que están contenidas en esquistos

grafíticos, refuerza la posibilidad planteada por INGEOMINAS-BSGS (1986b), que las secuencias metamórficas de esquistos grafíticos con metavulcanitas del Grupo Cajamarca, de la Formación Silgará en el Macizo de Santander y de la Formación Gachalá en el Macizo de Quetame, puedan contener depósitos de Cu, Zn, Pb sedimentario exhalativo en metalodolitas negras.

**Las Nieblas.**— En la Vereda Río Arriba, Municipio de Salento, Departamento del Quindío, se encuentran los yacimientos de las Nieblas y La Esperanza, uno de los prospectos de plomo, zinc y plata más importantes de la Cordillera Central, de propiedad de la Compañía Minera del Quindío (MELO, 1984).

El depósito, de tipo mesotermal, está relacionado con intrusiones cretácicas de diques y stocks granodioríticos en rocas metamórficas Cambro-ordovicianas, principalmente cuarcitas, esquistos verdes y esquistos sericiticos. La mineralización ocurre en forma de venas controladas estructuralmente y constituidas por galena argentífera, esfalerita, argentita, arsenopirita, pirita y calcopirita. Los filones son de formas irregulares, con espesores beneficiables entre 0.3 y 1 m, y un contenido total de sulfuros entre el 5 y el 10% de Pb, Zn, Ag, Cu. Las reservas para todo el distrito minero se calcularon para el total de sulfuros (mena) en: Indicadas 7.056 toneladas, e inferidas 445.109 toneladas (BARRERO et al, 1971).

El prospecto de La Esperanza está localizado al sur de las Nieblas y parece ser una continuación de ésta. Presenta iguales características geológicas y mineralógicas, lo cual lo hace interesante (MOSQUERA y BUITRAGO, 1971).

#### VENAS DE Pb, Zn (Au) EN PLUTONITAS

Están contenidas en cuerpos plutónicos félsicos a intermedios que afloran en la Cordillera Central (Terrenos Cajamarca, Payandé, Payandé - San Lucas, Cauca Romeral) el Macizo de Santander (Terreno Santander) y en menor proporción en la Cordillera Occidental. La distribución regional de las venas aproximadamente coincide con los cinturones magnéticos donde se han identificado prospectos para pórfidos cupríferos.

La totalidad de las mineralizaciones consisten en venas de sulfuros de metales básicos (Pb, Zn, Cu), frecuentemente con metales preciosos (Au, Ag), pirita, sulfosales, cuarzo y a veces fluorita. En algunos casos el Pb y Zn se obtienen como subproductos de la minería de oro. También se presentan diseñaciones y reemplazamientos de la roca encajante.

En algunas mineralizaciones se han reportado diferentes tipos de alteración hidrotermal, entre éstos, caolinitización, piritización, silicificación y cloritización.

La litología encajante varía entre granito, cuarzomonzonita y granodiorita hasta pórfido dacítico andesítico o diorítico.

Los autores que han descrito o estudiado las manifestaciones (véase Tabla 5) las han considerado desde meso-hipotermales hasta meso-epitermales. Las características de éstas venas son semejantes con aquellas contenidas en los depósitos de plomo, zinc y oro en venas.

Las áreas favorables para prospectar depósitos de plomo, zinc y cantidades menores de metales preciosos son los cintu-

rones magmáticos de las cordilleras Central y Occidental, el Macizo de Santander y La Sierra Nevada de Santa Marta. En cuanto a las venas de oro, plata y cantidades menores de plomo y zinc, los yacimientos de mayor tamaño según INGEOMINAS-USGS (1986b) ocurren en vulcanitas no marinas de composición intermedia a félsica, mientras los más pequeños se presentan en la zona periférica o dentro de las partes superiores de rocas plutónicas félsicas; entonces quizá las venas en cuerpos plutónicos de las Cordillera Central y el Macizo de Santander están asociadas con depósitos de venas de oro y metales básicos de tamaño pequeño, en tanto que las áreas donde afloran vulcanitas no marinas félsicas a intermedias, en la península de la Guajira, cerca de Manizales y entre Popayán y Pasto, son de interés para prospectar depósitos grandes.

**California - Vetas.** - La región de California - Vetas es un antiguo distrito minero de oro y plata, localizado en el Departamento de Santander. La mineralización es del tipo hidrotermal filoniano, con alguna diseminación mineral en las rocas encajantes. Esta relacionada con el emplazamiento de diques y pequeños stocks de roca porfirítica en las migmatitas pre-devónicas y los cuerpos ígneos intrusivos jurásicos (granitos, cuarzodioritas y cuarzomonzonitas) preexistentes. Los minerales metálicos principales son oro y plata y en menor proporción pirita esfalerita, galena, tetrahedrita, calcopirita, y en algunos filones óxidos de uranio. El oro es el metal de principal interés económico; el plomo y el zinc, con tenores generalmente inferiores al 5%, con interés secundario, lo mismo que la plata y cobre presentes (WARD et al, 1970; MENDOZA y JARAMILLO, 1975).

Actualmente las minas del distrito son explotadas exclusivamente para oro, en condiciones rudimentarias de explotación y beneficio. Con métodos adecuados de extracción y tratamiento puede intentarse la recuperación de plomo, zinc, y demás sulfuros como subproductos, tal como se hace en algunos otros depósitos auríferos de similares características en el país.

**Zaregoza - Segovia - Remedios.** - Este distrito minero localizado al noroeste del Departamento de Antioquia es uno de los mayores productores de oro en el país. Los filones auríferos se hallan encajados dentro del intrusivo cuarzodiorítico del Batolito de Segovia, con el cual se relacionan. En la mina El Silencio, la más importante del distrito, los sulfuros de plomo y zinc ocurren en los filones como minerales secundarios, con tenores aproximados de 0.5% Pb y 0.8% Zn (HALL et al, 1970). Por flotación se obtienen concentrados de plomo como subproductos de la minería del oro. En Segovia se producen actualmente entre 48 y 50 toneladas mensuales de concentrados (40 a 42% de pureza).

**Marquetalia - Samaná.** - En este distrito minero situado al oriente del Departamento de Caldas, además de las mineralizaciones de sulfuros de plomo y zinc asociadas con filones hidrotermales auríferos de los cuales pueden ser beneficiados como subproductos, existen otros prospectos interesantes como menas de plomo y zinc, tales como La Diamantina (Río La Miel) en Marquetalia y La Gallina y La Sogía en las vecindades de Samaná. Estos prospectos están constituidos por filones hidrotermales polimetálicos (galena, esfalerita, pirita y calcopirita), emplazados hacia las zonas de contacto entre intrusivos cuarzodioríticos y esquistos cuarzosos. Sus características ameritan estudios geológicos y económicos (LOPEZ, 1971a, b).

**Distrito Minero El Centro.** - En este distrito, comprendido por los municipios antioqueños de Abriaquí, Cañasgordas, Frontino y Urrea, también son numerosas las manifestaciones de plomo y zinc en filones auríferos hidrotermales relacionados con cuerpos ígneos intrusivos. En varias minas del distrito se producen a pequeña escala concentrados de plomo y zinc, como subproductos del oro (RODRIGUEZ y PERNET, 1982).

**Riosucio - Marmato.** - Las mineralizaciones de plomo y zinc en este distrito minero, ubicado al occidente del Departamento de Caldas, se presentan en filones auro-argentíferos relacionados con intrusivos porfiríticos dacíticos. En los estudios hechos por ECOMINAS (1982a) para la zona baja de Marmato, se calcularon reservas probadas de 150.710 toneladas, probables de 324.673 toneladas y posibles de 1'082.760 toneladas, con tenores promedios de 0.3% de Pb y 5.4% de Zn que pueden ser beneficiados como subproductos (Au: 10.19 gr/ton; Ag: 26.76 gr/ton).

**El Diamante.** - El área de Piedrancha, comprendida entre las localidades de El Diamante, Paraíso y Bomboná en Mariño, constituye otro sector de interés en el desarrollo de la minería de sulfuros metálicos. Entre los prospectos del área se destaca como importante el de la mina El Diamante, localizada 12 km por carretera al oeste del municipio de Guachavés.

El yacimiento está formado por filones auríferos polimetálicos, encajados en rocas volcánicas verdes afectadas por pequeños stocks granodioríticos de edad terciaria. La mineralización contiene arsenopirita, esfalerita, pirita, calcopirita y galena. El yacimiento fue estudiado por Japan International Corporation Agency Inc. (JICA) en 1983, mediante el convenio de cooperación entre ese país y Colombia.

Por los estudios de exploración que comprendieron 2.093 m de perforación en 15 pozos, se determinaron reservas explotables de 451.200 toneladas, con un contenido de Au 7.0 gr/ton, Ag 110 gr/ton, Zn 1.68%, Pb 0.11%, Cu 0.22%, As 2.5%, teniendo en cuenta que es explotable el 88% del mineral en el yacimiento. El mineral será beneficiado por cianuración y precipitación por polvos de Zn, obteniéndose oro y plata, para luego recuperar el zinc en concentrados.

El estudio económico de JICA - INGEOMINAS (1984) determina una inversión total de 697 millones de pesos (1983) para la obtención anual de 236 kg de oro, 2.493 kg de plata y 1.094 toneladas de concentrado de zinc (50% de Zn). La vida activa de la mina se calculó en 10.6 años.

En la misma área de Piedrancha, cerca de El Diamante y con un mismo tipo de mineralización, están las minas de La Gitana y La Marina, las cuales no se han estudiado aún, pero parecen presentar perspectivas similares. Igual caso ocurre con los sectores de Paraíso y Bomboná, un poco más distantes de El Diamante (JICA, INGEOMINAS, 1984).

#### RECOMENDACIONES PARA PROSPECTAR DEPOSITOS DE VENAS DE Au, Pb, Zn EN COLOMBIA

Las áreas donde afloran vulcanitas cenozoicas son las de mayor interés. Los trabajos de cartografía deben ayudar en la localización de intrusiones subvolcánicas asociadas con grandes fallas normales y zonas anulares de fracturas alrededor de calderas y grábenos volcánicos.

En estas áreas de interés la exploración debe concentrarse en la búsqueda de sitios con actividad de fuentes termales productoras de incrustaciones silíceas, en áreas con silicificación y brechamiento, en áreas con enjambres de fracturas con venillas de cuarzo y adularia y en áreas de domos riolíticos intrusivos y exógenos (INGEOMINAS-USGS, 1986b).

Durante la prospección geoquímica debe considerarse que en general el arsénico es el mejor elemento indicador de las mineralizaciones (BERGER, 1982 en COX, 1983).

Las muestras de sedimentos activos deben analizarse para As, Sb, Zn y Hg y las muestras de roca para Au, Ag, As, Sb, Zn, Pb y Hg.

El oro generalmente es de grano fino y únicamente se detecta mediante análisis químicos, especialmente en concentrados de minerales pesados. Es recomendable que los análisis químicos sean hechos por vía húmeda.

La localización de rocas intrusivas y extrusivas puede facilitarse mediante estudios aeromagnéticos. Los centros de mineralización se pueden identificar con la ayuda de técnicas electromagnéticas.

Las anomalías magnéticas planas o negativas, así como las anomalías de polarización inducida espectral (IP) son indicativas de zonas de alteración. A veces son útiles los métodos someros si los depósitos no son diseminados.

## RESERVAS

Las reservas probadas y probables de zinc en América Latina son del orden de 15'536.000 toneladas, de las cuales el 45% corresponde a los países andinos (CEPAL en ECOMINAS, 1982b).

En Colombia no se han evaluado sistemáticamente las reservas de plomo y de zinc; las mineralizaciones en las cuales se han estimado reservas son muy pocas y aparecen en la Tabla 7.

## PRODUCCION NACIONAL

Las producción de zinc en Colombia ha sido pequeña e intermitente, principalmente como subproducto de venas de oro y plata (Tabl. 8). Hasta 1950 se explotó zinc en las minas de Junín, Cundinamarca. La mina Cueva Oscura en Ubalá ha producido intermitentemente algunas toneladas (ESCOVAR, 1978), también la mina Mochancuta en la región de Tipacoque - Soatá (ALVARADO, 1947; FRANCO, 1946).

Desde 1970 la principal explotación fue hecha por una empresa filial de Coltejer S.A.; la producción de concentrados disminuyó de 389 toneladas en 1970 a 18 en 1975 y luego se detuvo debido a problemas de costos de la Empresa citada. En 1981 hubo un aumento de la producción, el cual no continuó por problemas técnicos y de contaminación ambiental (MINMINAS, OFICINA DE PLANEACION en: CASIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

La producción inicial de mena en el depósito La Equis en Chocó se espera en 200 toneladas diarias con un tenor de 22% de zinc y 4% de plomo.

TAB. 7: Recursos de plomo y zinc en Colombia.

Proyecto	Reservas Indiscriminadas			Tenores	Referencias
	Probadas	Probables	Posibles		
D. Cedrilla			100.000	1,33%Pb 0,57%Zn 0,04%Cu	Ward (1970)
Las Nieblas		7.056 (indic.)	445.109 (infer.)	5 a 10%	Barrero et al, 1971
Riosucio- Mareto	150.710	324.763	1.082.760	0,3%Pb 5,4%Zn 10,19%Ton/Au 26,76%Ton/Ag	Ecominas (1982a)
La Equis	111.000 (Med.)	12.000	1.600.000	22%Zn 4%Pb 88,999%Ton/Ag 34,299%Ton/Au	Melo (1984) Mining Annual Review (1986)
El Diamante	451.200 (explot.)			1,68% Zn 0,11% Pb 0,22% Cu 2,5 % As 7,09 Ton/Au 11,0 Ton/Ag	JICA (1984)
El Rincón	1.300		1.610	El tonelaje se retiene sulfuros de Zn	

TAB. 8: Producción nacional de zinc.

Año	Producción minera de concentrados		
	Volumen (ton)	Valor (miles \$)	Valor (miles \$ 1975) <sup>1</sup>
1970	389	669	1549
1971	279	558	1165
1972	77	136	252
1973	54	263	405
1974	93	452	555
1975	18	68	68
1976	-	-	-
1977	-	-	-
1978	-	-	-
1979	-	-	-
1980	-	-	-
1981	303	2.200	597
1982	-	-	-
1983	-	-	-
1984	-	-	-

1. Valores nominales divididos por el deflactor implícito del PIR 1975=100.  
Cálculos Castiblanco y Benavides (1985).  
Fuente: Mininas. Martínez Simahan (1984). DANE (1985), Castiblanco y Benavides (1985).

## CONSUMO APARENTE DE ZINC

Castiblanco y Benavides (1985) calcularon el consumo aparente de zinc como la diferencia entre las importaciones del metal en bruto y las exportaciones corrientes, sin tener en cuenta la producción nacional porque se exporta totalmente (Tabla 9). Mientras el consumo de zinc en bruto en Colombia ha crecido rápidamente desde 1970, el consumo mundial tiende a estancarse. Según los autores mencionados antes, el consumo aparente de zinc en bruto aumentó de 5.900 toneladas en 1970 a 15.000 toneladas en 1982, con una tasa de crecimiento promedio anual comprendida entre 6.4 y 7.3%.

TAB. 9: Consumo aparente de zinc en Colombia.

Año	Zinc en bruto (ton)
1970	5874
1971	8543
1972	7037
1973	10620
1974	8590
1975	7618
1976	11971
1977	11075
1978	12978
1979	13359
1980	14547
1981	13654
1982	15180

Fuente: Castiblanco y Benavides (1985).

## COMERCIO

### IMPORTACIONES

Entre 1970 y 1982 (Tabla 10) el valor total de las importaciones de zinc creció a un ritmo de 7.5%, pasando de US\$ 8.600.000 en promedio anual para el período 1970-1972 a US\$ 16.400.000 promedio para 1980-1982, es decir se duplicó en ese tiempo (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

El volumen de las importaciones de metal en bruto se incrementó un 7.3% promedio anual, mientras que el valor de las mismas aumentó el 5.5% promedio anual; ésta diferencia en las tasas de crecimiento del volumen y del valor de las importaciones reflejó la disminución de los precios CIF del metal alrededor del 1.8% promedio anual (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

Las empresas privadas importadores del metal en bruto y productos de artículos manufacturados del zinc principalmente, son: Metalurgías Mivasquez Ltda. y Compañía Metalúrgica Bera (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

En 1985 se importaron 1.541 toneladas de zinc por un valor CIF de 15'674.000 US\$ de los cuales más del 80% fueron metal en bruto.

Tab. 60. Importaciones en toneladas.

Prod./País	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Valores Importaciones (Tons)																
Brasil	150	210	91	1	216	272	6	637	50	18	168					
en bruto	8.071,796	8.342,736	8.036,700	8.020,266	8.790,631	8.817,972	11.971,944	11.079,962	11.978,143	11.339,312	14.367,679	11.434,171	11.180,261	13.111,000	13.079,000	14.917,000
Prod. Extran.	1.343,251	1.332,134	1.340,723	918,987	871,278	1.781,703	268,193	176,276	300,546	374,360	348,976	548,634	608,184	202,000	641,000	279,000
Manufacturas	6.974	17,707	30,381	68,877	1.612,032	175,600	31,679	5,328	60,639	33,681	107,177	28,315	18,099	80,000	168,000	509,000
Total	8.029,171	8.372,791	8.025,035	11,677,510	11,634,704	11,989,201	12,162,074	11,953,764	13,400,383	11,888,615	11,872,673	11,761,504	13,478,644	11,993,000	14,007,000	15,497,000
Valor C.I.F. Importaciones (Millones de dólares)																
Brasil	161	278	170	3	1,166	601	780	2,076	3,306	606	879					
en bruto	3,088,275	3,088,679	3,765,068	3,424,947	11,674,666	8,633,570	8,616,643	8,189,269	1,506,700	9,409,136	11,394,078	11,909,175	16,515,106	10,774,000	14,114,000	16,168,000
Prod. Extran.	621,560	636,668	648,754	634,754	316,692	347,078	354,768	2,029,433	1,086,096	8,179,685	2,791,815	1,111,068	8,109,600	316,000	264,000	607,800
Manufacturas	19,339	30,177	67,605	55,336	2,257,179	206,273	66,651	133,179	93,336	19,873	131,907	189,996	69,561	158,000	311,000	199,700
Total	2,637,171	3,156,071	3,682,077	6,377,062	11,668,194	11,201,947	9,794,687	10,312,163	8,768,168	16,172,676	11,121,676	11,121,676	17,091,000	11,121,676	17,091,000	17,435,000
Valor Importaciones (en millones constantes de 1983)																
Brasil	132	427	266	9,5	1,679	644	330	2,587	1,603	419	679					
en bruto	6.764,209	6.099,871	1.979,118	10,724,631	77,190,716	2.770,776	11,223,648	10,779,536	9,026,180	12,281,509	11,674,199	12,081,697	11,616,076			
Prod. Extran.	1.463,133	979,371	1,799,607	1,371,511	973,358	109,585	135,820	2,666,661	1,309,068	8,981,927	2,641,568	3,151,081	8,279,337			
Manufacturas	6,756,137	68,319	107,363	100,601	1,439,106	302,808	93,634	176,162	112,274	44,064	167,340	189,339	100,000			
Total	6,756,137	7,790,314	3,481,816	12,137,799	71,995,272	10,966,186	11,679,122	13,680,603	10,736,168	20,361,109	14,101,639	11,391,024	11,315,642			

NOTA: Estadísticas de Comercio Exterior de los Países de América Latina y el Caribe, Dirección de Estadística y Censos, Ministerio de Economía y Finanzas, Bogotá, Colombia, 1987.

Las importaciones de productos intermedios tales como óxidos de zinc, barras, perfiles, planchas, hojas, tiras, etc. disminuyeron de 1.400.000 US\$ en 1970 a 500.000 US\$ en 1983; las importaciones de productos manufacturados y de minerales de zinc fueron ínfimas en comparación con el valor total de las importaciones de este metal (Tabla 11).

La anterior distribución de las importaciones de zinc es el reflejo de la ausencia de la infraestructura necesaria para refinar el metal, y en consecuencia de la dependencia de la industria nacional de las importaciones de metal en bruto, así como del papel de la industria nacional el cual es elaborar productos tales como óxidos, barras, planchas, tubos, etc. (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

## EXPORTACIONES

El total de la producción minera de concentrados de zinc es exportada; las exportaciones de zinc alcanzan un valor ínfimo comparadas con las importaciones del metal; así durante el período 1970-1976 el valor total de las exportaciones fue equivalente al 5% del total de las importaciones. Posteriormente el promedio anual de las importaciones correspondió a sólo el 1% de las exportaciones. En la Tabla 12 se presentan las exportaciones entre 1970 y 1982.

Las exportaciones de mineral de zinc y metal en bruto son esporádicas y raramente sobrepasan US\$ 50.000 (de 1983).

Las ventas de productos con un grado mayor de elaboración son menos esporádicas y su valor varía irregularmente. (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

## PERSPECTIVAS

### PROYECCION DE LA DEMANDA

Castiblanco y Benavides (1985) con base en la correlación estadística entre el consumo de zinc en bruto y el producto interno bruto total del país, para el período 1970-1982, hallaron la siguiente ecuación de correlación lineal entre estas variables:

$$\text{Consumo de zinc (toneladas)} = 4'281.227 + 0.03502 \times \text{(producto interno bruto total de miles de pesos de 1975)}.$$

Coeficiente de correlación: 0.925.

Usando la ecuación hicieron un estimativo del consumo hasta el año 2005, sin considerar cambios en la estructura actual del consumo del metal.

Las estimaciones optimista y pesimista están basadas en tasas de crecimiento del producto interno bruto del 6% y 4% respectivamente, para el período 1985-2005; según esta proyección el consumo se cuadruplicará en la estimación optimista y se duplicará en la estimación pesimista.

### PROYECCION DE LA OFERTA

Los autores antes citados han hecho una proyección de zinc únicamente como subproducto de la minería de metales pre-

TAB. 11: Importaciones nacionales de zinc por productos.

PRODUCTO	1981		1982		1983		1984		1985		
	ton.	miles	ton.	miles	ton.	miles	ton.	miles	ton.	miles	
	met.	US\$	met.	US\$	met.	US\$	met.	US\$	met.	US\$	
		CIF		CIF		CIF		CIF		CIF	
Metal en bruto	Zinc en bruto sin alea	12417	10739	14623	13721	12719	10414	15247	15990	14161	13966
	Zinc en bruto aleado	1237	1166	557	594	394	360	451	524	756	902
Productos intermedios	Desperdicios y desechos de zinc	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-
	Barras, perfiles y alambres	30	31	1	8	15	28	10	27	10	32
	Planchas, hojas y tiras	52	47	76	62	22	19	23	21	33	51
	Polvo y partículas de zinc	29	47	26	52	165	269	130	218	186	324
Manufacturas	Tubos y barras huecas	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	Accesorios para tuberías	0	0	-	-	1	16	5	33	-	-
	Canalones; tejas, manuf. construc.	-	-	4	22	7	41	-	-	-	-
	Otras manufacturas no especificadas	38	99	34	78	72	101	143	278	305	399
	<b>Total</b>	<b>13803</b>	<b>12131</b>	<b>15321</b>	<b>14537</b>	<b>13395</b>	<b>11248</b>	<b>16009</b>	<b>17091</b>	<b>15451</b>	<b>15674</b>

Fuente: DANE (1986)

Tab. 121. Exportaciones de Zinc.

Prod./año	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Volumen de exportaciones (tgs.)													
Mineral en bruto	285,983	-	-	-	-	-	370	500	-	-	-	-	302,542
Prod. Intermedios	1,414	156,970	28,383	3,058	28,117	50,000	73,410	-	-	-	99,999	111,245	191,157
Manufacturas	212,930	176,212	183,603	599,807	392,801	430,669	45,741	29,783	100,016	334,247	56,942	29,599	30,656
Total	499,841	213,082	211,986	602,865	420,948	480,669	119,481	50,283	100,016	334,247	156,941	140,844	524,355
Valor F.O.B. exportaciones (dólares corrientes)													
Mineral en bruto	27,495	-	-	-	-	-	1,320	2,000	-	-	-	-	183,000
Prod. Intermedios	623	25,145	48,259	2,435	27,490	40,511	41,928	-	-	-	77,161	128,200	226,300
Manufacturas	134,495	125,513	137,823	287,020	437,565	751,587	57,311	34,464	43,814	73,163	11,536	44,013	69,209
Total	135,453	150,658	186,082	289,455	465,055	792,098	100,559	36,464	43,814	73,163	88,697	172,213	478,604
Valor exportaciones zinc (dólares constantes de 1983)													
Mineral en bruto	54,639,5	-	-	-	-	-	1,854	2,645	-	-	-	-	184,290
Prod. Intermedios	1,955,5	1,250	104,006	4,647	44,125	11,39,407	58,887	-	-	-	79,959	128,888	227,991
Manufacturas	312,779,1	5,715	297,032	547,748	702,351	1,110,3,652	80,493	45,587	53,759	29,785	31,954	44,592	69,692
Total	370,820,9	6,966	401,038	552,395	746,476	1,116,3,139	141,234	49,232	53,759	29,785	91,914	174,481	481,978

FUENTE: CÁLCULO A PARTIR DE OMC, INVENTARIO DE COMERCIO EXTERIOR.

ciosos; adicionalmente del proyecto La Equis y del proyecto El Diamante se estima una producción constante de 1.094 toneladas desde 1988. No se espera producción futura de zinc metálico fundido por lo menos a plazo mediano.

Castiblanco y Benavides (1985), estimaron los costos de las importaciones de zinc en bruto proyectadas hasta finales del presente siglo (Tabla 13) usando dos precios: el primero un promedio ponderado del precio implícito CIF de estas importaciones, durante los años 1981, 1982 y 1983; el segundo es un promedio de los precios internacionales en Estados Unidos en los años 1981-1983, que se asimilaría al valor FOB. Los cálculos dieron 0.828 US\$/kg obtenido con los precios implícitos de las importaciones y 0.90 US\$/kg con los precios internacionales.

La contribución de las exportaciones a la balanza de pagos no se tuvo en cuenta, pero es prácticamente despreciable comparado con el efecto de las importaciones.

La proyección prevé que el valor de las importaciones se multiplicara por un factor comprendido entre 2.5 y 3.8 en el lapso 1985-2005. (CASTIBLANCO y BENAVIDES, 1985).

TAB. 13: Proyecciones futuras del mercado del Zinc en Colombia.

Año	Producto Interno Bruto total		Consumo metal en bruto		Produc. Concent. para exportar	Valor importaciones de metal en bruto			
	(Millones \$ de 1975)		(Tons.)			(Tons. concentrado)	(millones \$US de 1983)		
	Alta 6%	Baja 4%	Alta	Baja	Alta		Baja	Alta	Baja
	Prec. bajo	Prec. alto	Prec. bajo	Prec. alto	(1)	Prec. bajo	Prec. alto	Prec. bajo	Prec. alto
1990	777426	706800	22946	20473	1094	18.9	20.7	16.9	18.4
1995	1040371	859930	32155	25	1094	26.6	28.9	21.4	23.3
2000	1392252	1046237	44479	323	-	36.7	40.0	26.7	29.1
2005	1863147	1272907	60971	4029	-	50.5	54.9	33.3	36.3

Tomado de Castiblanco y Benavides (1985).

(1) El proyecto La Equis duraría 4 años de 1985 a 1988 y el proyecto El Diamante duraría 11 años desde 1986, de tal manera que la producción total promedio anual entre 1985 y 1988 sería de 4814.87 toneladas de concentrados.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO, B., 1946. Informe preliminar sobre los Yacimientos de Plomo de la región de Tipacoque. Inf. IFI 833A. Bogotá
- ANDERSON, G.M., 1980.- Mississippi Valley-Type Deposits en: Ore Deposits Workshop, Section one: 3-45. Toronto.
- BARRERO, D., LOZANO, H., 1976.- Mapa Metalogénico de Colombia. Ingeominas. 1:2.500.000, Bogotá.
- BARRERO L.D., et al, 1971.- Geología del depósito de plomo - zinc - plata de Las Nieblas. Informe 1580. Ingeominas, 26 p. Bogotá.
- BARTOK, P., BEIJERS, T.J.A., JUHAS, Z.L., 1981.- Lower Cretaceous Cogollo Group Maracaibo Basin, Venezuela: Sedimentology, Diagnosis and Petrophysics. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 65(6):1110-1184. Tulsa, Oklahoma.
- BEALES, F.W., JACKSON, S.A., 1968.- Pine Point: A stratigraphical approach. Can Mining Metallurgy Bull. 61:867-878.
- BJORLYKKE, A., SANGSTER, D.F., 1981.- An overview of Sandstone Lead Deposits and their relation to Red-Bed Copper and Carbonate-Hosted - Lead-Zinc Deposits. Econ. Geol. 75th. Ann. Vol. 179-213. New Haven. Connecticut.
- BOAST, A.M., COLEMAN, M.L. and HALLS, Ch., 1981.- Textural and stable isotope evidence for the genesis of the Tynagh base metal deposit, Ireland. Econ. Geol. 76, p.27-55.
- BOUSSINGAULT, J.B., 1830.- Análisis de la blenda negra de Marato. Anal. de Fis. y Quim. (Paris). Inst. Geol. Andes, Colombia (45):312-316, Bogotá.
- BRISKEY, J.A., 1982.- Summary of the general geologic characteristics of sandstone - hosted lead-zinc deposits in characteristics of Mineral Deposit Occurrences. U.S. Geol. Surv. Open-file Rep. 82 795, p. 183-185.
- BUITRAGO, C., BUENAVENTURA, J., 1975.- Ocurrencias Minerales en la Región Central del Departamento del Tolima. Inf. 1672. Ingeominas. 837 p. Bogotá.
- CALLE, B., SALINAS, R., 1986.- Geología y Geoquímica de la Plancha 165, Carmen de Atrato. Informe 1987. Ingeominas, 140 p. Bogotá.
- CAMMARDTA, V.A. Jr. 1983.- Zinc en: Mineral Facts and Problems pp. 1025-1042.
- CASTIBLANCO, H., BENAVIDES, F., 1985.- Estudios para la formación del Plan Nacional de Desarrollo Minero. Plomo y zinc. Area económica. Consorcio Instituto de Estudios Colombianos. INTEGRAL, 77 p. Bogotá.
- COX, D.P. (editor), 1983.- Mineral Resource Assessment of Colombia. Ore Deposit Models. Ingeominas-USGS. Open File Report 83-423. Menlo Park, California. 54 p.
- CRADDOCK, P.T. et al, 1985.- Early zinc production in India. Mining Magazine Jan. 1985: 45-52.

- CRAWFORD, J., HOAGLAND, A.D., 1968.- *The Mamcot-Jefferson City zinc district, Tennessee*, en Ridge J.D. Editor. *Ore Deposits of the United States, 1933-1967*. Aims: 242-250. N.Y. New York.
- DANE, 1985.- *Exportaciones e importaciones primer semestre 1984*. 307 p. Bogotá.
- ECONIMAS, 1982a.- *Proyecto de Explotación Zona Baja Marmato*. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1982b.- *Minería en América Latina. Cifras. Separate Econiminas*. Nov. Dic. 1982. 16 pag. Bogotá.
- ESCOVAR, R., 1978.- *Plomo y zinc en: Recursos Minerales de Colombia*. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, 1, Bogotá.
- ETAYO, F., RENZONI, G., BARRERO, D., 1969.- *Contornos sucesivos del Mar Cretáceo en Colombia*. 1er. Cong. Col. de Geol. Mem:217-253. Bogotá.
- FABRE, A., DELALDYE, M., 1982.- *Intrusiones básicas cretácicas de la Cordillera Oriental*. Geol. Norandina 6: 19-28. Bogotá.
- FRANCO R., 1946.- *Estudio sobre las minas de plomo en Tipacoque*. Inf. 833c. IFI. Bogotá.
- FRANKLIN, J.M., SANGSTER, D.M., & LYDON, J.W., 1981.- *Volcanic Associated massive sulfide deposits*. Econ. Geol. 75th Ann. Vol. p.485-627.
- GARZON, N.A., 1975a.- *Prospección Geoquímica en Suelos en Ubalá- Cueva Oscura y Río Farallones, Región del Guavio*. Inf. 1691. Ingeominas, 17 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1975b.- *Prospección Geoquímica en Suelos en El Rincón, El Santuario y Quebrada Sogamoso, Región del Guavio*. Inf. 1667. Ingeominas. 30 p.
- GOLDSCHMIDT, V.M., 1937.- *The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks*. Jour. Chem. Soc. p. 655. Bogotá.
- GUSTAFSON, L.B., WILLIAMS, N., 1981.- *Sediment-Hosted Stratiform Deposits of Copper, Lead and Zinc*. Econ. Geol. 75 th Ann. Vol. 139-178, New Haven, Connecticut.
- MAGNI, R.D., 1976.- *Iri-state ore deposits: the character of their host rocks and their genesis*. En K.H. Wolfe, Ed: *Handbook of strata-Bound and Stratiform Ore Deposits*. El sevier, Amsterdam, v. 6 p. 457-491.
- \_\_\_\_\_, 1982.- *The influence of original host rock character upon alternation and mineralization in the Iri-state district of Missouri, Kansas and Oklahoma, U.S.A.* In: G. C. Ametute A. El Goreay, G. Frenael, C. Kluth, G. Moh, A. Waushkuhn and R.A. Zimmermann, Eds., *Ore Genesis: The State of the Art*. Springer-Verlag New York, Heidelberg, p. 97-107.

- HALL, R.B. et al, 1970. Recursos Minerales de Parte de los Departamentos de Antioquia y Caldas. Bol. Geol. Vol. XVIII, No. 2, 90 p. Bogotá.
- HEYL, A.V., 1968.- The Upper Mississippi Valley Base-Metal District. en: Ridge, J.D. Ore Deposits of the United States, 1933-1967. Vol. 1 chap. 21: Aime 433-457, N.Y. New York.
- \_\_\_\_\_, 1982.- Mineral deposit occurrence model for the viburnum trend subregion of the southeast Missouri base metal and barite district. In: Characteristics of Mineral Deposit Occurrences: U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 82-795, p. 158-171.
- HOAGLAND, A.D., 1976.- Appalachian lead-zinc deposits. En K.H. Wolfe. Ed., Handbook of trace-Bound and Stratiform Ore Deposits. Elsevier, 46 p. 495-534. Amsterdam.
- INGEOMINAS-U.S.G.S., 1986a.- Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publ. Geol. Esp. Ingeominas. 14-I: 235 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1986b.- Evaluación de los Recursos Minerales no Combustibles de Colombia. Inf. de Proyecto Cooperativo. Ingeominas U.S.G.S. Ed. Prel. Publ. Geol. Esp. Ing. 14-II: 55 p. Bogotá.
- JICA-INGEOMINAS, 1984.- Estudio preliminar de factibilidad del desarrollo del Área El Diamante-Paraiso-Bomboná, Departamento de Nariño Proyecto de Ingeominas 191 p.
- JOLLY, J.H., 1984.- Zinc en: Minerals Yearbook 1983. p. 919 - 946.
- \_\_\_\_\_, 1985.- Zinc en: Minerals Yearbook 1984, Volumen I Metals and Minerals. United States Department of the Interior. p. 961-989, Whashington, 1985.
- LARGE, D.D., 1980.- Geologic parameters associated with sediment hosted, submarine exhalative Pb-Zn deposits: an empirical model for mineral exploration, in stratiform Cu-Pb-Zn deposits. Geologisches Jahrbuch, Reine D., Heft 40, p. 59-129.
- LEVINSON, A.A., 1974.- Introduction to Exploration Geochemistry. Appl. Publ. Ltd, Calgary, 612 p. Canada.
- \_\_\_\_\_, 1980.- Introduction to Exploration Geochemistry. 2a. ed. The 1980 Suppl. Appl. Publ. Ltd Wilmette 924 p.
- LOPEZ, A.J., 1971a.- Reconocimiento de la Mina La Sonora. Inf. 1587. Ingeominas, 9 p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1971b.- Recursos Minerales del Departamento de Caldas. Inf. 1602. Ingeominas, 123 p. Bogotá.
- MACGREGOR, B.R., WALL, A.J., 1984.- Lead en: Mining Ann. Rev. 1984. 2 p.
- \_\_\_\_\_, 1985.- Zinc en: Min. Ann. Rev. 1985. p. 63-64.

- WAYNARD, J.B., 1983.- *Geochemistry of Sedimentary Ore Deposits*. 304 p., Springer-Verlag. New York.
- HAZE, W.E., 1984.- *Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perijá, northwestern Venezuela: Geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks*. Geol. Soc. Amer. Mem. 162: 263-282, Boulder, Colorado.
- MELD, H., 1984.- *Informe sobre las tendencias en el mercado internacional y las estructuras productivas de minerales y metales relevantes al caso colombiano*. IEC-INTEGNPC. 84p.
- MENDOZA F.H., 1983.- *Distribución y metalogénesis de los depósitos minerales de la Cordillera Oriental de Colombia entre los 4° y 9° latitud norte*. 10a. Conf. Geol. del Caribe. Resúmenes. - p. 53 Cartagena.
- MENDOZA, F.H.; JARAMILLO, L.E., 1975.- *Geología y Geoquímica del Área de California, Santander*. Inf. 1687. Ingeominas, Bol. Geol. XXII (2). 105 p. Bogotá.
- MORALES L., et al, 1958.- *General Geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia*. En: *Habitat of Oil Symposium*. Am. Assoc. Pet. Geol. Stud. Geol.: 641-691, Tulsa. Oklahoma.
- MORRIS, H.T., et al, 1973.- *Lead*, en: U.S. Min. Res. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap 820. p. 313-332,
- MOSQUERA, T.D.; BUITRAGO, R.C., 1971.- *Depósitos Minerales del Departamento del Quindío*. Inf. 1599. Ingeominas, 88 p. Bogotá.
- MUTIS J., V. 1983.- *Catálogo de yacimientos, prospectos y manifestaciones Minerales de Colombia*. Publ. Geol. Esp. Ingeominas 13, 462 p. Bogotá.
- QUENDO, Z.E., 1970.- *Ocurrencias Minerales en los Municipios de Zaragoza, Sagovia y Remedios*. Inf. 1574 (parte II) Ingeominas,
- RANKAMA, L., SAHAMA, Th G., 1954.- *Geoquímica*. Aguilar, 862 p. Madrid.
- RATHJEN, J.A., 1983.- *Lead*. en *Mineral Facts and Problems*, p. 493-511.
- RENFRO, A.R., 1974.- *Genesis of Evaporite Associate Stratiform Metalliferous Deposits*. A. Sabkha Process. Econ. Geol. 69 (1): 33-45, New Haven, Connecticut.
- RICKARD, D.T., et al.- 1979.- *Studies on the genesis of the Laisvall sandstone Lead-Zinc deposits Sweden*. Econ. Geol. 74: 1255-1285.
- RODRIGUEZ, M.E., 1971.- *Ocurrencias Minerales en el Cuadrángulo K-12 y Parte del K-11*. Inf. 1581. Ingeominas, 49 p.
- RODRIGUEZ, C.J., PERNET, A., 1982.- *Recursos Minerales de Antioquia*. Inf. 1885. Ingeominas, 167 p. Medellín.
- RONA, P. A., 1984.- *Hydrothermal Mineralization at Seafloor Spreading Centers*. Earth-Sci. Rev. 20 (198d) 1-104.

- ROSE, A.W., HAUKE, H.E., WEBB, J.S., 1979.- *Geochemistry in Mineral Exploration*. Acad. Press. 2a. ed. 657 p. London.
- SANGSTER, D.F. 1976.- Carbonate-hosted lead-zinc deposits. In: K.H. Wolfe, ed., *Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits*. v. 6. Elsevier, Amsterdam. p. 447-454.
- \_\_\_\_\_, 1981.- Three potential sites for the occurrence of stratiform, shale-hosted lead-zinc deposits in the Canadian Arctic. *Geol. Surv. Can. Paper* 81-A: 1-8.
- SARMIENTO, RODRIGUEZ L.F., 1985a.- Condiciones geológicas favorables de las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de plomo y zinc. *Inf. 1953. Ingeominas*: 1-37, p. Bogotá.
- \_\_\_\_\_, 1985b.- Las mineralizaciones de Cu, Pb, Zn, en las sedimentitas del Jurásico Superior y Cretácico de la cordillera Oriental de Colombia. *Ingeominas*, 12 p. Bogotá.
- SAWKINS, F.J., 1976a.- Metal Deposits related to intercontinental hotspot rifting environments. *Jour. of Geol.* 84, (76) p. 653-672.
- \_\_\_\_\_, 1976b.- Massive Sulfide deposits in relation to geotectonics. In: Strong D F (ed) *Metalogeny and Plate Tectonics*. *Geol. Assoc. Can. Spec. Publ.* 14:221-240.
- \_\_\_\_\_, 1984a.- *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*. Springer-Verlag. 325 p. Berlin.
- \_\_\_\_\_, 1984b.- Ore genesis by episodic dewatering of sedimentary basins: Application to giant Proterozoic lead-zinc deposit. *Geology* 12:451-454 Boulder, Colorado.
- SINGER, D.A., MOSIER, D.L., (editores), 1983.- *Mineral Deposit Grade Tonnage Models*. United States Department of the Interior Geol. Survey. Open-File. Report 83-623. 100 p.
- SNYDER, F.C., and GERDEMANS, P.E., 1969.- *Geology of the southeast Missouri lead district*. in: Ridge, J. D., ed., *Ore deposits of the United States, 1933-1967*. Am. Inst. of Mining Eng., p. 326-358. New York,
- STOLL, W.C., 1962.- *Notes on the mineral resources of Ecuador*. *Econ. Geol.* 57: 799-808.
- TOURTELOT, E.B., and WINE, J.D., 1976.- *Copper deposits in Sedimentary and volcanogenic rocks*. U.S. Geol. Surv. Prof. paper 907-C, 34 p.
- ULLOA, C., RODRIGUEZ, E., 1979.- *Geología de las Planchas 170 Vélez y 190 Chiquinquirá*. *Inf. 1794. Ingeominas*, Bogotá.
- WALL, A. J., 1986.- Zinc en: *Mining Annual Review*, 1986. p. 34-37.
- WALL, A.J., MACGREGOR, R. B., 1984.- Lead en: *Mining Annual Rev.* 1984.
- WARD, D.E. et al, 1970.- *Recursos Minerales de parte de los Departamentos de Norte de Santander y Santander*. *Bol. Geol.* XVIII (3) 140 p.

- MEDEPohl, K.H., 1969.- **Composition and Abundance of common sedimentary Rocks.** in: Handbook of Geochemistry, vol. I. p. 250-271.
- MEDEPohl, H. Jr., et al., 1973.- **Zinc en: Mineral Resources.** U.S. Geol. Surv. Prof. pap. 820. p. 697-710. Washington.
- WOKITTEL, R., 1960.- **Recursos Minerales de Colombia: Comp. Est. Geol. Ofic. en Colombia.** Tomo X, p. 117-129. Bogotá.