



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

GEOLOGIA, PROSPECCION Y ASPECTOS ECONOMICOS  
DE LOS YACIMIENTOS DE COBRE.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**FALLA DE ORIGEN**



**INGENIERO MINERO METALURGICO**

P R E S E N T A :

**ARTURO BAUTISTA GONZALEZ**

MEXICO, D. F.

1990



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E

	Página
I. GENERALIDADES .....	1
I.1. INTRODUCCION .....	1
I.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	3
I.3. SINTESIS DE LA HISTORIA DEL COBRE ..	3
I.4. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL - COBRE .....	8
I.4.1. Propiedades químicas .....	8
I.4.2. Propiedades físicas .....	10
I.5. MINERALES DE MENA MAS IMPORTANTES ..	12
I.6. GEOQUIMICA DEL COBRE .....	13
II. CLASIFICACIONES DE LOS YACIMIENTOS DE - - COBRE .....	26
II.1. CARACTERISTICAS .....	26
II.2. CLASIFICACION SEGUN JENSEN Y BATEMAN	27
II.3. CLASIFICACION SEGUN JACOBSEN .....	29
II.4. CLASIFICACION SEGUN BOWEN Y GUNATI-- LAKA .....	30
II.5. CLASIFICACION SEGUN MITCHEL Y GARSON	33
II.6. CLASIFICACION DE YACIMIENTOS DE CO-- BRE DE ACUERDO CON SU COMPOSICION MI NERALOGICA .....	38
II.7. CLASIFICACION SEGUN PETRASCHER .....	39
II.8. CLASIFICACION SEGUN SMIRNOV .....	42
II.9. CLASIFICACION SEGUN ROUTHIER .....	44

	Página
III. MODELOS PRINCIPALES DE YACIMIENTOS .....	54
III.1. PORFIDOS DE COBRE .....	54
III.1.1. Características .....	54
III.1.2. Mineralización hipogénica .....	58
III.1.3. Rocas encajonantes .....	62
III.1.4. Estructuras .....	68
III.1.5. Aspectos Económicos .....	68
III.1.6. Génesis e historia .....	70
III.1.7. Modelo Diorítico .....	71
III.2. YACIMIENTOS PIROMETASOMÁTICOS ....	75
III.2.1. Paragénesis, Mineralogía y Química .....	75
III.2.2. Alteración Supergénica ..	76
III.2.3. Litología .....	77
III.2.4. Estructuras .....	77
III.2.5. Geología Histórica .....	80
III.2.6. Génesis del Yacimiento ..	80
III.2.7. Principales Ejemplos ....	81
III.3. YACIMIENTOS VULCANO-SEDIMENTARIOS.	82
III.3.1. Paragénesis, Mineralogía y Química .....	82
III.3.2. Alteración Supergénica ..	83
III.3.3. Litología .....	84
III.3.4. Estructuras .....	85
III.3.5. Geología Histórica .....	85
III.3.6. Génesis .....	86

	Página
III.3.7. Ejemplos .....	88
III.4. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS .....	88
III.4.1. Paragénesis, Mineralogía y Química .....	88
III.4.2. Alteración Supergénica ..	90
III.4.3. Aspectos Económicos .....	92
III.4.4. Litología .....	92
III.4.5. Estructuras .....	94
III.4.6. Historia Geológica .....	95
III.4.7. Génesis del Yacimiento ..	95
III.4.8. Principales Ejemplos ....	96
III.5. MANTOS Y CHIMENEAS .....	97
III.5.1. Introducción .....	97
III.5.2. Mineralogía .....	97
III.5.3. Alteraciones .....	99
III.5.4. Litología .....	100
III.5.5. Estructuras .....	101
III.5.6. Origen .....	105
III.5.7. Ejemplos .....	108
III.6. MODELO MISSISSIPPI VALLEY .....	109
III.6.1. Generalidades .....	109
III.6.2. Alteraciones de la roca - encajonante .....	112
III.6.3. Algunas consideraciones - relacionadas con la morfo- logía y la génesis de - estos yacimientos .....	113

	Página
III.6.4. Algunos ejemplos mexicanos de este tipo de yacimiento .....	115
III.7. VETAS EN VOLCANICAS .....	119
III.7.1. Introducción .....	119
III.7.2. Mineralogía .....	119
III.7.3. Alteraciones .....	120
III.7.4. Génesis .....	120
III.7.5. Ejemplos .....	123
III.8. PRINCIPALES MODELOS DE YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MEXICO .....	123
IV. LA PROSPECCION .....	137
IV.1. INTRODUCCION .....	137
IV.2. GUIAS FISIOGRAFICAS Y PALEOGEOGRAFICAS .....	140
IV.3. GUIAS LITOLOGICAS .....	146
IV.3.1. Pórfidos Cupríferos .....	147
IV.3.2. Pirometasomáticos .....	147
IV.3.3. Mantos y Chimeneas .....	148
IV.3.4. Volcánicas .....	150
IV.3.5. Asociados a rocas básicas y ultrabásicas .....	150
IV.3.6. Sulfuros Vulcano-sedimentarios .....	151
IV.3.7. Cobre sedimentario .....	151
IV.4. GUIAS ESTRATIGRAFICAS .....	156
IV.4.1. Pórfidos Cupríferos .....	157

	Página
IV.4.2. Pirometasomáticos .....	158
IV.4.3. Mantos y Chimeneas .....	171
IV.4.4. Volcánicas .....	178
IV.4.5. Asociado a rocas básicas y ultrabásicas .....	188
IV.4.6. Sulfuros Vulcano-sedimentarios .....	190
IV.4.7. Cobre sedimentario .....	199
 IV.5. GUIAS ESTRUCTURALES .....	 201
IV.5.1. Pórfidos Cupríferos .....	202
IV.5.2. Pirometasomáticos .....	202
IV.5.3. Mantos y Chimeneas .....	202
IV.5.4. Volcánicas .....	202
IV.5.5. Asociado a rocas básicas y ultrabásicas .....	203
IV.5.6. Sulfuros Vulcano-sedimentarios .....	203
IV.5.7. Cobre sedimentario .....	204
 IV.6. GUIAS MINERALOGICAS .....	 205
IV.6.1. Pórfidos Cupríferos .....	205
IV.6.2. Pirometasomáticos .....	211
IV.6.3. Mantos y Chimeneas .....	211
IV.6.4. Volcánicas .....	213
IV.6.5. Asociado a rocas básicas y ultrabásicas .....	213
IV.6.6. Sulfuros Vulcano-sedimentarios .....	213
IV.6.7. Cobre sedimentario .....	214

	Página
IV.7. PROSPECCION GEOQUIMICA .....	215
IV.8. PROSPECCION GEOFISICA .....	235
V. PRINCIPALES METODOS DE EXPLOTACION .....	263
V.1. REBAJES ABIERTOS .....	267
V.1.1. Preparación .....	268
V.1.2. Explotación .....	270
V.1.3. Extracción .....	272
V.2. SALONES Y PILARES .....	274
V.2.1. Preparación .....	276
V.2.2. Explotación .....	276
V.2.3. Extracción .....	279
V.3. TUMBE POR SUBNIVELES .....	280
V.3.1. Preparación .....	280
V.3.2. Explotación .....	284
V.3.3. Extracción .....	285
V.4. CORTE Y RELLENO HIDRAULICO .....	286
V.4.1. Preparación .....	286
V.4.2. Explotación .....	291
V.4.3. Extracción .....	292
V.5. CORTE Y RELLENO CON TEPETATE .....	294
V.5.1. Preparación .....	294
V.5.2. Explotación .....	298
V.5.3. Extracción .....	300

	Página
V.6. TUMBE SOBRE CARGA .....	302
V.6.1. Preparación .....	303
V.6.2. Explotación .....	306
V.6.3. Extracción .....	307
V.7. HUNDIMIENTO POR BLOQUES .....	309
V.7.1. Preparación .....	311
V.7.2. Explotación .....	313
V.7.3. Extracción .....	314
V.8. A TAJO ABIERTO .....	315
V.8.1. Planeación y diseño del tajo	316
V.8.2. Preparación .....	320
V.8.3. Explotación .....	321
V.8.4. Extracción .....	326
VI. BENEFICIO .....	328
VI.1. CONCENTRACION .....	332
VI.1.1. Trituración .....	333
VI.1.2. Molienda .....	334
VI.1.3. Flotación .....	337
VI.2. TOSTACION .....	346
VI.2.1. Secado .....	346
VI.2.2. Calcinación .....	347
VI.2.3. Tostación sulfatante y oxidante .....	348
VI.2.4. Nodulización .....	351

	Página
VI.3. FUSION .....	352
VI.3.1. Fusión de horno de reverbero .....	353
VI.4. CONVERSION .....	356
VI.5. REFINACION .....	358
VI.5.1. Pirometalurgia .....	359
VI.5.2. Electrolítica .....	361
VI.6. LIXIVIACION .....	365
VI.6.1. Lixiviación por soluciones .....	367
VI.6.2. Métodos de Lixiviación ...	370
VI.6.3. Lixiviación bacteriológica	372
VII. USOS Y PRODUCCION .....	380
VII.1. USOS .....	380
VII.1.1. Aleaciones .....	382
VII.1.A. Latones .....	382
VII.1.B. Bronces .....	383
VII.1.C. Cobre-Níquel ...	384
VII.2. PRODUCCION .....	387
VII.2.1. Provenir del cobre para - el siglo XXI y perspecti- vas para un futuro más le- jano .....	387
VII.2.2. Pronósticos y cambios en las cotizaciones del co- bre .....	389
VII.2.3. Niveles de producción en México .....	393

	Página
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	409
VIII.1. Recomendaciones .....	409
VIII.2. Conclusiones .....	411
BIBLIOGRAFIA .....	416

## I. GENERALIDADES

## I. GENERALIDADES

### I.1. INTRODUCCION

El progreso nacional y mundial depende directamente de los recursos minerales y de las fuentes de energía, en donde los metales, y entre ellos, el cobre, son bases para la industria, ya que son contribuyentes esenciales para la expansión tecnológica. De aquí la importancia de la exploración y explotación de este metal, por su utilidad en la industria electrónica, de construcción, de transporte, etc.

México se localiza en la franja cuprífera circumpacífica que va desde Alaska hasta la Patagonia. Para América Latina representa un gran potencial económico, ya que sus yacimientos son de considerable importancia. Por lo anterior, y si se tiene en cuenta que México históricamente es un país minero, y que se encuentra entre los 10 primeros países productores de cobre, es conveniente llevar a cabo un análisis exhaustivo de las formas de presentación de este metal en la naturaleza; esto involucra diferentes criterios como son: los geoquímicos, tectónicos, mineralógicos, etc.

El presente trabajo busca ser un apoyo y ayuda para aquel que desee conocer los fenómenos geológico-tectónicos que dan lugar a la acumulación del cobre: así como el tipo de prospección y el método de explotación que se de-

be seguir de acuerdo al modelo de yacimiento, del mismo modo, presenta una síntesis de los diferentes métodos de beneficio de dicho metal.

También se menciona la importancia económica del cobre para el presente y futuro, tanto en México, como en el mundo.

## 1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO

El presente trabajo tiene como propósito dar a conocer los diferentes "modelos" de yacimientos de cobre en el mundo y, encuadrar a los diferentes depósitos mexicanos en cada uno de aquellos.

Se tratarán de definir y analizar los principales métodos de prospección minera. Un trabajo de esta naturaleza no estaría completo si no se tiene en cuenta la explotación y el beneficio de este metal. Por tanto, el trabajo es coronado con una descripción de los métodos de explotación y beneficio más usuales en el país. De esta manera, el geólogo prospector podrá estar en condiciones de realizar su trabajo en la Industria Minera y tendrá ideas acerca del porvenir del yacimiento, objeto de su estudio.

Finalmente, se tienen cifras de producción nacional y mundial para tener un contexto de lo más completo posible acerca de lo que concierne a los yacimientos minerales cupríferos.

## 1.3. SINTESIS DE LA HISTORIA DEL COBRE

El descubrimiento y la utilización de los primeros metales constituyó un paso gigantesco en el desarrollo de

la humanidad hacia los adelantos de la vida moderna. Se puede considerar que con la metalurgia se inició también la química; al transformar la materia para extraer los metales de las sustancias minerales, el hombre realizó una creación que, en un principio, debió parecer milagrosa. Es de tenerse muy en cuenta todo el ingenio y el tesón que representó el descubrimiento de los procesos necesarios para llegar a obtener el metal aprovechable por el hombre. Esto, que puede parecer sencillo en la vida moderna, constituyó una serie de problemas muy complicados para el hombre primitivo, que pueden sintetizarse de la siguiente manera:

1. Obtener el mineral por medio de una cierta explotación o por lo menos por una recolección.
2. Extraer el metal del mineral por diversos procedimientos hasta fundirlo.
3. Darle la forma adecuada para las necesidades humanas.
4. Descubrir nuevas aleaciones que dieran a los metales mayor dureza o maleabilidad.

Todos los pasos mencionados son la consecuencia de -- otros tantos descubrimientos que constituyeron el resultado de un extraordinario derroche de ingenio y tesón por -- parte de los primeros hombres. Seguramente debieron transcurrir muchos años hasta que finalmente, el hombre pudo --

hacer uso de los primeros metales descubiertos por él. --  
Entre estos metales debieron encontrarse indudablemente -  
los que se presentan en la naturaleza en estado casi puro  
como los metales nativos y algunos compuestos simples como  
óxidos.

Oro	}	Metales nativos
Plata		
Cobre		
Fierro	}	Óxidos
Estaño		

Muchos investigadores suponen que uno de los prime--  
ros y más importantes centros de cobre de la antigüedad -  
estuvo en una vieja región al sur del Cáucaso. Pronto, -  
la metalurgia del cobre se extendió en el mundo antiguo.-  
Para los griegos, Chipre fue el foco principal de la - -  
extracción del metal.

Por otra parte, la necesidad de localización del me--  
tal contribuyó, en gran parte a la evolución cultural del  
mundo debido a una intensa exploración. Existen indicios  
para pensar que el hombre, al final del Neolítico y a - -  
principios de la Edad de Bronce, desarrolló grandes via--  
jes através de sierras y ríos. Así, inició los descubri--  
mientos del mundo antiguo conocido, con esto descubrió --  
nuevos yacimientos.

Es muy probable, según algunos historiadores, que el primer metal encontrado fue el oro y que al buscar oro, - encontró el cobre.

La palabra actual que denomina a este metal, cobre, - proviene del latín cuprum, derivado de cyprum, cuyo origen está en el griego Kuprus. Este nombre fue originado\_ en la isla de Chipre donde existía el principal centro de provisión para los griegos. Sin embargo, al parecer la - vieja región de Colokia, al sur del Cáucaso y al este de\_ Armenia, era la principal productora de cobre en la anti- güedad.

La existencia de una cierta clase dominante explotó\_ los yacimientos y comerció con sus productos, lo que supo ne una verdadera tradición minera y al mismo tiempo, el - desarrollo de los viajes y el comercio al nivel del mundo conocido.

En América del Norte, el cobre se utilizó por las -- tribus indígenas en las orillas del Lago Superior, donde\_ el cobre se presenta en forma nativa.

Para la región de Mesoamérica el cobre fue utilizado como objeto de adoración. Su obtención la realizaban ca- lentando las rocas encontradas en los alrededores de los\_ lugares donde estaba el cobre nativo: así obtenían una es

pecie de nódulos que podían moldear con facilidad.

En la historia de la humanidad puede observarse que los metales fueron sustituyendo poco a poco a las rocas utilizadas en los albores de la civilización.

El uso de los metales llegó a ser de importancia primordial al sustituir a los instrumentos de rocas por ellos, sobre todo en las armas.

Durante la Edad Media, la extracción del cobre fue importante con relación a las del oro y la plata que disminuyeron. Las campañas guerreras de la época obligaron al hombre a extraer buenas cantidades del metal. Para ello contaban con centros mineros importantes como: Rammelsberg, Mansfield y Cornualles, Inglaterra.

Hasta 1800 el cobre era producido en muchos sitios en pequeñas cantidades. De 1801 a 1810 la producción mundial fue sólo de 18,200 toneladas lo que equivale a la producción mensual de una mina actual. Inglaterra fue el país que más produjo cobre hasta 1850; en ese año, Chile pasó a ser el primer productor hasta 1953. Desde entonces, Estados Unidos se convirtió y permanece hasta la actualidad en el primer lugar de producción.

## I.4. PROPIEDADES QUIMICAS Y FISICAS DEL COBRE

### I.4.1. PROPIEDADES QUIMICAS DEL COBRE

El cobre se encuentra muy ampliamente distribuido en la naturaleza, donde se encuentra en estado libre, o en forma de sulfatos, sulfuros, arseniuros, cloruros, carbonatos, etc., se le extrae por tostación oxidante y fusión seguida por depositación electrolítica a partir de soluciones de sulfato.

El cobre es inerte a los ácidos no oxidantes, pero reacciona con los agentes oxidantes, por ejemplo se disuelve fácilmente en ácido nítrico y en ácido sulfúrico. También es soluble en soluciones de amoníaco y de cianuro de potasio, pero siempre en presencia del oxígeno. Resiste a la oxidación por el vapor de agua a temperaturas elevadas y tiene buena resistencia a casi todas las soluciones salinas. Presenta poca resistencia a la corrosión por los azufres, pero aleándolo con el zinc aumenta su resistencia al azufre.

Al calentarlo al rojo, el cobre reacciona con el oxígeno para dar  $\text{CuO}$  y a mayores temperaturas da el  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

El cobre arde al reaccionar con el cloro y da como resultado el cloruro cuproso  $\text{CuCl}$ . Al reaccionar con vapo-

res de azufre, arde con una llama incandescente.

Las bases no tienen acción alguna sobre el cobre. -- La superficie del cobre si no se mantiene pulida varía de color por la formación de una delgada capa de algún compuesto de cobre como pueden ser:

a) Oxido cuproso ( $\text{CuO}$ ), el cual es una sustancia roja que comunica su color a la superficie del metal. Al aumentar la temperatura pasa a  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

b) Oxido cúprico ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), es un óxido negro que se forma sobre el cobre caliente cuando se enfría al aire.

c) Carbonato cúprico hidratado ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), sustancia verde que se forma sobre el cobre cuando se ha expuesto al aire por la absorción de ácido carbónico de la atmósfera.

El óxido cuproso y sulfuro cuproso, constituyen los compuestos más estables del cobre a temperaturas elevadas, los correspondientes compuestos cúpricos son térmicamente inestables frente a ellos. El óxido cuproso se prepara en forma de polvo cristalino rojo por reducción, controlada mediante hidracina de una solución alcalina, de una sal cúprica. Por descomposición térmica, el  $\text{CuO}$  se obtiene en forma de cristales rojos. Es soluble en amoníaco -

para dar amina. El sulfuro es un sólido cristalino, de color negro, y se obtiene calentando cobre con azufre en ausencia de aire.

Nota: Hidracina—compuesto que resulta de sustituir uno o varios átomos de hidrógeno de la hidracina por otros tantos radicales alcohólicos. Amina-compuesto derivado del amoníaco.

#### I.4.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL COBRE

Símbolo y fórmula	Cu
Color	Rojo
Masa atómica	63.57
Número atómico	29
Peso específico	8.94
Isótopos del cobre	63 y 65
Volumen atómico	7.11
Sistema	Cúbico
Crucero	No presenta
Dureza (escala de Mohs)	2.5 - 3
Lustre	Metálico
Raya	Metálica-brillante
Densidad	8.7 - 8.9
Temperatura de fusión	1083°C
Temperatura de ebullición	2325°C
Conductividad térmica a 20°C	0.910 cal x seg x cm <sup>2</sup>

Conductividad eléctrica a 20°C	$0.594 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \times \text{ohm}^{-1}$
Calor de fusión	50.6 cal x gramo
Dúctil	Muy dúctil (6 <sup>to</sup> lugar c/r a los demás metales)
Maleable	Muy maleable (4 <sup>to</sup> lugar c/r a los demás metales)
Tenaz	Muy tenaz (5 <sup>to</sup> lugar c/r a los demás metales).

1.5- MINERALES DE MENA MAS IMPORTANTES.

A CONTINUACION SE EXHONENA MANERA DE TABLA ASI COMO SUS PRINCIPALES CARACTERISTICAS.

LOS MINERALES MAS IMPORTANTES DE COBRE.

ZONA	GRUPO QUIMICO	NOMBRE	FORMULA	COLOR	RAYA	LUSTRE	FRACTURA	DUREZA	PEO ESPECIFICO	OLIGOELEMENTOS	
MINERALES DE OXIDACION.	ELEMENTOS NATIVOS	COBRE NATIVO	Cu	ROJO	ROJA	METALICO	GANCHUDA	2.5-3	8.8	Ag, As, Bi, Sb	
	OXIDOS	CUPRITA	Cu <sub>2</sub> O 88% de Cu	ROJO OSCURO	ROJA CAFE	ADAMANTINO	CONCOIDAL	3.5-2.8	6		
		TEUFONITA	CuO	GRIS ACERO	GRISACEA	METALICO	CONCOIDAL	3.4	5.8		
		CHALCOPRITA	2Zn,CuCO <sub>3</sub> -2Zn,Cu(OH) <sub>2</sub>	AZUL-VERDE	VERDE	PERLADO	REGULAR	2	3.5-3.6		
	NATOS	AZURITA	Cu <sub>3</sub> (OH)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	AZUL INTENSO	AZULADA	VITREO	CONCOIDAL	3.5	4		
		MALACHITA	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )	AZUL VERDOSA	VERDE AZUL	ADAMANTINO	IRREGULAR	3.5	4	Fe, Mn	
	FOSFATOS	TURQUESA	CuO.3AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2FeO.9H <sub>2</sub> O	VERDE AZULADO	VERDOSA	CEROSO	CONCOIDAL	5-6	2-6	Fe	
		LIBHÉNITA	Cu <sub>2</sub> (OH)PO <sub>4</sub>	VERDE ACEITUNA	VERDOSA	RESINOSO	SUBCONCOIDAL	4	3.6-3.8		
		CORNETITA	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	AZUL INTENSO	AZULADA	RESINOSO	SUBCONCOIDAL	4	3.6-3.8		
	SILICATOS	CHISOCOLA	Cu <sub>4</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>4</sub> /Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	VERDE	AZUL	VITREO	CONCOIDAL	2.4	2.2		
	ARSENIATOS	OLIVINITA	Cu <sub>2</sub> (OH)/As <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	VERDE	VERDOSA	ADAMANTINO	CONCOIDAL	2.5	5.4		
		LINARITA	PbCu(OH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	AZUL CELESTE	VERDOSA	ADAMANTINO	CONCOIDAL	2.5	5.4		
	SULFATOS	BROCAKITA	Cu <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> /SO <sub>4</sub>	VERDE ESMERALDA	VERDOSA	VITREO	IRREGULAR	3.5-4	3.9		
		CALCANITA	Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 5H <sub>2</sub> O	AZUL	AZULADA	VITREO	CONCOIDAL	2.5	2.1-2.3	Fe	
CLORURO	ATACAMITA	Cu <sub>2</sub> (OH)Cl	VERDE ESMERALDA	VERDOSA	ADAMANTINO	CONCOIDAL	3.5	3.3-3.7			
MINERALES DE ENRIQUECIMIENTO.	HALUROS	BOLEITA *	5PbCl <sub>2</sub> .4Cu(OH) <sub>2</sub> .AgCl/3H <sub>2</sub> O	GRISACEO	AZULADA	VITREO	CONCOIDAL	3.3	5		
	SULFUROS	CUBANITA	Cu <sub>2</sub> S-Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	AMARILLO PASTOSO	AMARILLA	METALICO	IRREGULAR	3.5-4	4		
		CARROLLITA	Cu <sub>2</sub> S-Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -CuCO <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	GRIS ACERO	GRIS	METALICO	SUBCONCOIDAL	5.5	8.4		
		ESTANITA	Cu <sub>2</sub> S-FeS-SnS <sub>2</sub>	GRIS ACERADO	GRIS OSCURA	METALICO	IRREGULAR	4	4.3		
	ESTROMAYERITA	2Ag <sub>2</sub> S-Cu <sub>2</sub> S	GRISACEO	GRIS OSCURO	SUBMETALICO	SUBCONCOIDAL	1.5-2	4.5			
	WITICHINITA	3(Cu <sub>2</sub> S)S <sub>2</sub>	GRIS ACERADO	GRIS	METALICO	CONCOIDAL	3.5	5			
	AIKENITA	3(Pb <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> S)S <sub>2</sub>	NEGRO	NEGRA	METALICO	IRREGULAR	2.5	6-6.5			
	ESTYLOTIPITA	3(Cu <sub>2</sub> Ag <sub>2</sub> FeSb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> )	NEGRO	NEGRA	METALICO	IRREGULAR	4.7	3			
	MINERALES PRIMARIOS.	SULFOSALES	CALCOPRITA	CuFeS <sub>2</sub> 34% de Cu	AMARILLO LATON	NEGRA VERDOSA	METALICO	IRREGULAR	3.5	4.2-4.3	As, Ti, In, Au, Ag, Se
			MOHNITA	Cu <sub>2</sub> FeS <sub>2</sub> 62% de Cu	FARGO	NEGRA GRISACEA	METALICO	IRREGULAR	3	4.9-5.4	As, Ag
CALCOCITA			Cu <sub>2</sub> S 74% de Cu	GRIS ACERADO	GRIS OSCURA	METALICO	IRREGULAR	2.5-3	5.5-7	Fe, Ag	
TETRAEDRITA			4Cu <sub>2</sub> S.Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 52% de Cu	GRIS	NEGRA	METALICO O SUBMETALICO	IRREGULAR	3-4	4.7-5	Fe, Zn, Sb, As, Pt, Ag, Hg	
TENNANTITA			Cu <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	GRIS ACERADO	GRISACEA	AMENUDO OPACO	IRREGULAR	5.1	4.6	As, Fe, Zn, Pb, Ag, Mg	
COVELITA			Cu <sub>2</sub> S.Ag <sub>2</sub> S	GRIS ACERADO	NEGRA	METALICO	SUBCONCOIDAL	2.5-3	6.1-6.3		
ENARGITA			3Cu <sub>2</sub> S.Ag <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	GRIS	GRISACEA	METALICO	IRREGULAR	3.5-1.5	4.6	Fe, Zn, Sb	

\* BOLEITA-MINERAL DESCUBIERTO EN MEXICO

TESIS PROFESIONAL. 1960- ARROYO OSORHO EMILIANO, BUSTAMANTE GONZALEZ ARTURO, CERON SANTILLAN CARLOS, GARCIA GARCIA HECTOR, RODRIGUEZ GUTIERREZ ALEJANDRO, RUBINSTEIN JIMENEZ FRIDA N.

## 1.6. GEOQUIMICA DEL COBRE

En el tratado de F.W. Clarke "The Data of Geochemistry" (1908) se define a la Geoquímica (nombre utilizado primero por C.F. Schonbein (1838) y después por Clarke (1908), "como el estudio de los cambios producidos en los sistemas químicos naturales, representados estos por las rocas". En esta definición no es posible diferenciar la Petrología o para ser más claro la química petrológica y la mineralogía. Esta idea continuó hasta que aparecieron los trabajos de W.J. Vernadsky y A.E. Fersman en Rusia, y de V.M. Goldschmidt, en Noruega y Alemania alrededor de los años 20's, para dar una idea correcta de la Geoquímica.

Las ideas de W.J. Vernadsky (en los 20's.) se diferencian a las ideas de Clarke, con respecto a la geoquímica, en dos puntos:

a) La Geoquímica se ocupa esencialmente de los elementos químicos en su evolución a través de los distintos niveles de la tierra y, sobre todo, en la corteza terrestre.

b) La Geoquímica trata de investigar las leyes físico-químicas y geológicas que rigen la evolución de los elementos; utiliza para ello su distribución cuantitativa en la corteza terrestre.

De lo anterior se llega a la conclusión de que la Geoquímica "es el estudio interpretativo del comportamiento de los elementos químicos -individualmente considerados- durante los procesos geológicos".

Existe otra circunstancia que tuvo una gran influencia en el reciente progreso de la geoquímica, y es su aplicación a la búsqueda de depósitos minerales. La geoquímica no sólo ayuda a la exploración geológica, mediante una idea mejor de los procesos que intervinieron en la acumulación y dispersión de los elementos en las rocas de la corteza, sino que también sus principios y técnicas se aplican a la determinación de anomalías de concentraciones que pueden delatar depósitos de valor económico (Geoquímica de Prospección o Exploración Geoquímica).

La distribución de los elementos en la tierra revela ciertas reglas y afinidad que Goldschmidt señaló por primera vez en trabajos publicados en 1922, desarrolló la idea de que cada una de las tres fases que constituyen los meteoritos y la fundición del alto horno -hierro metálico, sulfuros y silicatos-, está asociada a un grupo particular de elementos químicos, de acuerdo con lo anterior los clasifica de la siguiente manera: (Fig. I.1).

Siderófilos	Calcófilos	Litófilos	Atmófilos	Biófilos
Fe, Co, Ni Ru, Rh, Pd Os, Ir, Pt Au, Re, Mo Ge, Sn C, P (Pb), (As) (W)	Cu, Ag Zn, Cd, Hg Ga, In, Tl (Ge), (Sn), Pb As, Sb, Bi S, Se, Te (Fe), (Mo), (Cr)	Li, Na, K, Rb, Cs Be, Mg, Ca, Sr, Ba B, Al, Sc, Y Tierras raras (C), Si, Ti, Zr, Hf, Th (P), V, Nb, Ta O, Cr, W, U (H), F, Cl, Br, I (Tl), (Ga) (Ge) (Fe), Mn	N, H, (O), (C) He, Ne, Ar Kr, Xe, Rn	H, C, N, (O), P

FIG. 1.1

Clasificación Geoquímica de los Elementos, Según Goldschmidt.

Siderófilos: Elementos asociados de preferencia con el oxígeno.

Calcófilos: Elementos que prefieren asociarse al azufre (en los meteoritos, con la troilita).

Litófilos: Elementos asociados de preferencia al silicio que, por consiguiente, forman parte de los silicatos.

Atmófilos: Elementos propios de la atmósfera.

Biófilos: Elementos esenciales para la vida animal y vegetal.

La clasificación de Goldschmidt es empírica, pero tiene una aplicación teórica basada en la afinidad química (Ahrens, 1965). Los elementos calcófilos, a los que -

pertenece el cobre, si bien su potencial de ionización -- (7.5 - 10.5) es en promedio más elevado que en los siderófilos, su comportamiento es diferente por su capacidad de polarización con el átomo de azufre (mucho más polarizable que el oxígeno); esto facilita la unión covalente -- entre ellos. Esta capacidad de polarizar es función del potencial iónico del catión y del tamaño del anión. El fierro (16, 2), el cobalto (17, 3), el zinc (17, 9) y el cobre (20, 34) prefieren unirse al azufre y son calcófilos.

La clasificación antes expuesta ha sido modificada, entre otros por Szadeczky-Kardos (1958), la cual queda de la siguiente manera: (Fig. 1.2).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		I	II	III	IV	V	VI	VII	O	
1	H	Litosfilos								H	Sedimentófilos						He	
2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	Al	Si	Elementos de Transición				Oxalocófilos				Al	Si	P	S	Cl	A
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	Se	As	Sb	Pr	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ta	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Pegmatófilos				Siderófilos				Sulfocófilos							

FIG. 1.2

CLASIFICACION GEOQUIMICA DE LOS ELEMENTOS, SEGUN SZADECZKY-KARDOSS (1958).

Siderófilos: Capa electrónica externa incompleta; cationes abundantes en las fases metálicas de los meteoritos.

**Sulfocalcófilos:** Radio iónico grande; se combinan mediante enlaces covalentes o metálicos, y son frecuentes en las fases sulfuradas de los meteoritos, en las rocas básicas y en las soluciones hidrotermales.

**Oxicalcófilos:** Radio iónico mediano; su combinación con el oxígeno es relativamente común. Son más abundantes en la litósfera que los elementos del grupo anterior.

**Litófilos:** Valencia invariable y bajo potencial de ionización, cuando éste es alto (por ejemplo, silicio) forma con el oxígeno aniones complejos de muy bajo potencial que cristalizan combinados con los cationes de la misma familia. Los cationes de potencial intermedio ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) son más frecuentes en las rocas básicas, en tanto que los cationes de potencial más bajo y los capaces de formar aniones complejos, son frecuentes en las ácidas y alcalinas.

**Pegmátófilos:** Valencia variable y energía de ionización elevada; tiene gran movilidad, de ahí resulta su frecuencia en las pegmatitas.

**Elementos de transición:** Penúltimo nivel de energía en proceso de saturación; son abundantes en

las rocas básicas, donde reemplazan con facilidad al fierro y al magnesio.

**Sedimentófilos:** Potencial de ionización muy elevado; forman aniones que combinan y forman compuestos solubles que cristalizan a baja temperatura. Como poseen, en parte, valencia variable, son compatibles con varias fases.

**Atmófilos:** Químicamente indiferentes.

**Biófilos:** Elementos esenciales para el metabolismo celular.

Los metales de los grupos IB y IIB (Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg) tienen un comportamiento distinto del de los elementos de los grupos IA y IIA, a pesar de ser sus cargas y radios similares. Esto se debe a la naturaleza del enlace químico; covalente en los primeros, iónico en los segundos, en razón del superior potencial de ionización que poseen los elementos del subgrupo B. En consecuencia, -- los metales IB y IIB no pueden entrar en las redes cristalinas iónicas en vez del sodio, potasio, etc., sino que forman compuestos separados, principalmente en combinación con el azufre. El cobre y el zinc tienen tendencia a ligarse covalentemente con el azufre, el primero asociado con el fierro en el mineral calcopirita, el segundo en

el mineral blenda, así que -en caso de haber suficiente - cantidad de azufre- el cobre y el zinc se separan parcial- mente en las capas iniciales de la diferenciación. Sin - embargo, no todo el cobre de tales rocas forma sulfuros, - sino que, en buena parte, reemplaza al magnesio y al  $Fe^{2+}$  en los silicatos máficos. Como estos minerales prefieren el hierro antes que el cobre o el zinc, parte de estos -- últimos tienden a quedar concentrados en las fases fina- les de la diferenciación, y forman con el azufre comple- jos solubles que pasan a los líquidos hidrotermales, y - eventualmente pueden depositarse en concentraciones econó- micamente explotables. Los otros metales bases se compor- tan de manera similar, aunque su concentración es menor - en la corteza; la mayor parte queda retenida en los cuer- pos de rocas básicas, pero una parte acompaña al cobre y al zinc en las soluciones hidrotermales, y de ellas se -- precipitan principalmente en forma de sulfuros (González, 1972).

De acuerdo con lo anterior, el cobre no puede ser - considerado como un elemento raro en la corteza, se han - hecho cálculos para saber el contenido de cobre sobre la - corteza y se han encontrado 55 ppm; los cálculos han sido realizados por S.R. Taylor (1964); la cantidad obtenida - es muy semejante a la del cobalto, aunque menos que la -- del níquel y zinc. Se ha determinado que los porcentajes mayores se localizan en rocas ígneas. Este es el caso de

los granitos, granitos calco-alcálinos y granodioritas. Aunque es necesario considerar que en los basaltos también se concentra cobre, sólo que éste es desplazado por el fierro. El cobre, níquel y cobalto no son fáciles de desplazarse de las rocas ígneas ácidas, por lo que es posible encontrarlos en ellas. De lo antes expuesto se deduce que existen en los primeros kilómetros de la corteza, aproximadamente  $2 \times 10^{16}$  toneladas de cobre distribuido en ella.

El origen del cobre, es por supuesto de la parte caliente del interior del planeta, desde donde el cobre va a migrar a la superficie, pero sólo una fracción muy pequeña de éste va a ocurrir como concentrado, en otras palabras, como un yacimiento. Como el manganeso, el cobre se va a encontrar en grandes cantidades en las arcillas del fondo marino, pero van a ser en núcleos pequeños. La mayoría de las grandes concentraciones son depositados sobre los flancos de las zonas de subducción, entre una placa oceánica y una continental. La baja abundancia en zonas del fondo marino es atribuido al tiempo de estancia del elemento en el agua marina. Pequeñas cantidades son también para el cobalto, níquel, molibdeno, plomo y zinc.

El clarke del cobre, en los meteoritos de fierro-níquel, es de 172 gr/ton., entonces sobre la tierra se tienen 10 gr/ton. en las rocas ultrabásicas, pero 100 gr/ton.

en los basaltos. El valor se abate de nuevo a 10 gr/ton. en los granitos pobres en calcio.

En los sedimentos, las concentraciones máximas - - están en las arcillas: 68 gr/ton, alcanzando 250 gr/ton. en los grandes fondos oceánicos. Esto contrasta con los débiles valores constatados en las areniscas (2 gr/ton) y en las rocas calcáreas (20 gr/ton).

Así el cobre aparece, sobre la tierra, sobre todo - almacenado en las rocas básicas todavía feldespáticas. -- Pero los yacimientos ligados a éstas juegan un papel secundario (yacimientos de níquel-platino), el cobre siendo "expulsado" por las rocas medianamente básicas (yacimientos vulcano-sedimentarios de plomo-zinc) o sobre todo medianamente ácidas (granitos de los pórfidos cupríferos de cobre-molibdeno). En los dominios sedimentarios, el rol de concentración del medio se reduce en forma evidente.

Al lado del cobre nativo, el cobre existe en la naturaleza con las valencias 1 y 2 y su clarke es del orden de 55 gr/ton. Este elemento muestra una afinidad muy grande con el azufre y, en el momento de la cristalización de un magma, él tiende a acaparar todo el azufre disponible, comportándose por otra parte en esto como el molibdeno, al cual puede estar asociado (pórfido de cobre). Sin embargo, en tanto como la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), tiende a separarse --

antes que los otros sulfuros, los sulfuros de cobre y de hierro (calcopirita, hornita) se depositarán al último.

Estos sulfuros son fácilmente atacados por el  $H_2SO_4$  y el sulfato férrico, liberado por la oxidación de la pirita; el cobre pasa entonces en, solución bajo la forma, de sulfato cúprico. Estas soluciones podrán: por una parte descender y reaccionar con los sulfuros no descompuestos, depositándose cobre nativo y sulfuros supergénicos (covelita y calcocita) que se oxidarán a su entorno, dando, un enriquecimiento, a veces muy importante del cobre en la zona de cementación; por otra parte, las soluciones de sulfato cúprico, circulan por las rocas encajonantes (almacenadoras) y según los elementos presentes así como las condiciones de Eh y pH, dan nacimiento a los numerosos minerales secundarios de cobre (alrededor de 180 especies conocidas: carbonatos, arseniatos, fosfatos, silicatos, cloruros, sulfatos, etc.).

El cobre no se sustituye prácticamente con los otros cationes en los silicatos, y forma sus propios silicatos (sobre todo en estructura en cadena), pero esto solamente en la zona de oxidación de los yacimientos de cobre, y a condición de que la actividad del  $SiO_2$  sea importante. En ciertos minerales secundarios, el  $Cu_+^2$ , puede reemplazar al hierro más o menos parcialmente (melanterita, copiapita), así como al zinc (hemiedrita, adamita), -

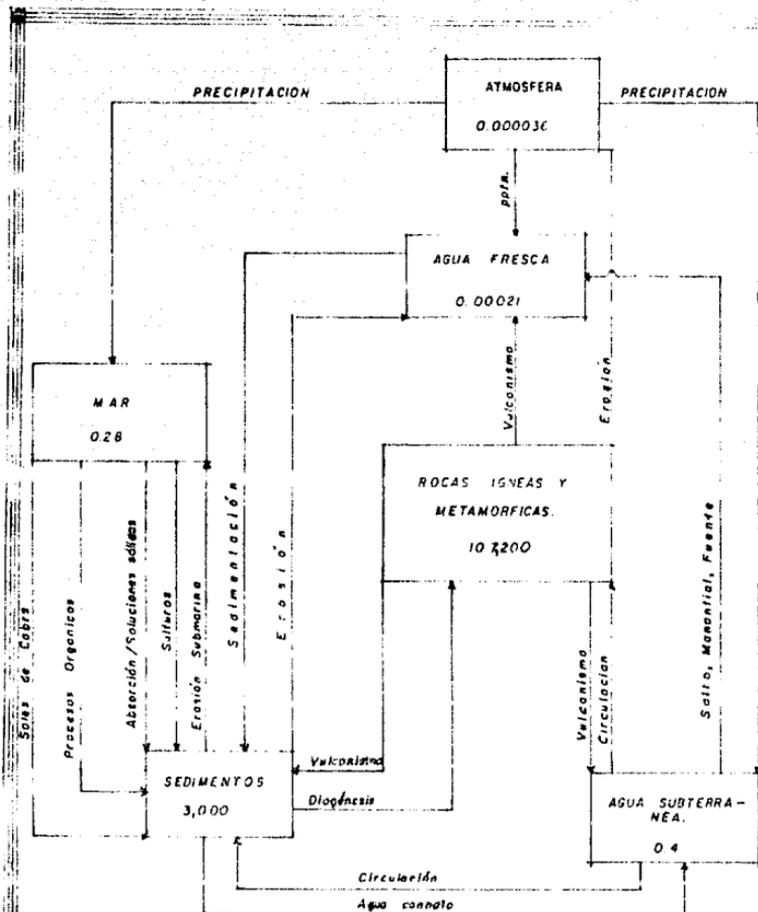
mientras que en los sulfuros el  $\text{Cu}^+$  puede a veces ser reemplazado por  $\text{Ag}^+$  (tetraedrita). (Bariand y Cesbron, 1978).

David T. Rickard ha considerado las relaciones del ciclo geoquímico del cobre y sus implicaciones geolitológicas (Fig. 1.3). De aquí se deduce que el 99% del cobre es localizado en la litósfera la mayoría en rocas ígneas máficas y rocas metamórficas. Esto va a ser sólo una cantidad muy pequeña de la que ocurre en los sedimentos. Extrañamente las concentraciones de cobre de los medios sedimentarios marinos exceden a la de la concentración de los océanos y de las rocas continentales máficas por un factor de dos y es, este factor, cinco veces mayor que la concentración en granitos continentales.

De lo anterior y de acuerdo con Arthur W. Rose, - - Herber E. Hawkes y John J. Webb (1979) se concluye acerca del cobre:

- a) Número atómico: 29
- b) Peso atómico: 63.54
- c) Rocas ígneas (med): Ultramáficas 42 ppm; Máficas 72 ppm; y Graníticas 12 ppm.
- d) Rocas sedimentarias (med): Calizas 5 ppm; Areniscas 10 ppm; y Lutitas 42 ppm.
- e) Suelos (med): 15 ppm.
- f) Cenizas de fábrica (med): 130 ppm.
- g) Agua dulce (‰): 3 ppb; agua de lluvia 1000 ppb.

- h) Asociaciones: Calcófilo; Pb, Zn, Mo, Ag, Au, Sb, Se, Ni, Pt, y As en depósitos de sulfuros.
- i) Minerales de rocas: Ferromagnesianos (moderadamente estables), Calcopirita (inestable,  $\text{CuFeS}_2$ ).
- j) Fuentes industriales: Calcopirita, Bornita - - ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ); Calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y minerales complejos Cu-As-So-S.
- k) Productos de erosión: Sulfuros, óxidos, carbonatos básicos, sulfatos y silicatos sobre menas de calcopirita; Mn-óxidos, limonita, materia orgánica, óxidos y carbonatos en suelos.
- l) Especies solubles:  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2^0$ ,  $\text{CuHCO}_3^{2-}$ , - -  $\text{CuCl}_3^{2-}$ ,  $\text{CuCl}_2^{-m,n}$
- m) Respuesta biológica: El cobre es uno de los elementos traza más importantes en la nutrición de las plantas. Cuando los suelos tienen menos de 10 ppm, síntomas de deficiencia pueden desarrollarse en la vegetación; por el contrario algunas veces concentraciones altas pueden ser tóxicas.
- n) Movilidad: Intermedia; controlada por adsorción de óxidos de  $\text{Fe}^-$  y  $\text{Mn}^-$  y materia orgánica; y precipitación por hidrólisis con un pH 5.0.



CICLO GEOQUIMICO DEL COBRE.

INTERRELACIONES ENTRE LAS UNIDADES MAYORES ENVUELTAS EN EL CICLO DEL COBRE (ANTES DAVID T. RICKARD, 1974). LAS FIGURAS REFIEREN A LAS MASAS ESTIMADAS DEL ELEMENTO EN  $10^{10}$  TONELADAS METRICAS. EL CICLO ESTA ABIERTO DENTRO DE LA HIDROSFERA Y LA SIMILITUD CON EL CICLO HIDROLOGICO ES APARENTE.

FIG. Nº 13

TESIS PROFESIONAL 1990.- ARROYO OSORNO E., BAUTISTA GONZALEZ A., CERON SANTILLAN C., GARCIA GARCIA H., RODRIGUEZ GUTIERREZ, A., RUBINSTEIN JIMENEZ F.H.

## II. CLASIFICACION DE LOS YACIMIENTOS DE COBRE

## II. CLASIFICACION DE LOS YACIMIENTOS DE COBRE

### II.1. CARACTERISTICAS

Siempre es difícil realizar una clasificación de yacimientos minerales útiles, sólo que aquí se trata de una agrupación de los mismos en función de la forma y condiciones del depósito de los cuerpos metalíferos de cobre; estas diferentes clasificaciones son tomadas de diversos autores, las cuales son agrupadas principalmente en tres aspectos: génesis, tectónica y mineralogía, hay que mencionar que éstas son simples y objetivas, buscan ante todo su fácil entendimiento. Las desventajas que pueden existir con estas clasificaciones de yacimientos es que algunas no encajan en los casilleros previamente enumerados por lo que se les toma por separado.

Los yacimientos agrupados desde el punto de vista genético son dos (Jacobsen, y Jensen y Bateman, 1975), otros dos se apoyan en el concepto de tectónica de placas (Mitchel, 1981 y Bowen, 1977), mientras que sólo un autor se basa en la composición mineralógica (UTEHA, 1955). Dos de las tres últimas clasificaciones, no se basan en una sola idea, de tal forma que Petrascheck, (1965), se basa en aspectos genéticos y estructurales, mientras que Smirnov (1982) se basa en aspectos genéticos y de tectónica de placas. Por último Routhier (1963) se basa sólo en la pe

trología para elaborar su clasificación.

## II.2. CLASIFICACION SEGUN JENSEN Y BATEMAN (1979)

Los autores manejan esta clasificación de acuerdo a aspectos genéticos. Evidentemente que los depósitos de cobre se originan por procesos diversos, pero todos son el resultado directo de la actividad ígnea o procesos de meteorización. La mayor parte de la producción mundial está asociada al tipo tres, según estos autores, los yacimientos son formados por soluciones hidrotermales, reemplazando y rellenando cavidades.

En general todos los depósitos tienen características similares; son de baja ley, y se explotan a gran escala mediante procedimientos de bajo costo.

1. Magmáticos: Depósitos de cobre-níquel: Insizwa, Sudáfrica; Merensky Reef, Transvaal; Sudbury, Ontario; Thompson, Manitoba; y The Duluth Gabbro, Minnesota.
2. Metasomatismo de Contacto: Depósitos viejos de Morenci, Arizona; Bingham Canyon, Utah; y Cananea, Sonora.
3. Hidrotermales: Estos se subdividen en dos:

- A. Rellenos de cavidades:
- A.1. Vetas de fisura: Butte, Montana; Walker, California.
  - A.2. Rellenos de brecha: Nacozari, Sonora; - Bisbee, Arizona; y Braden, Chile.
  - A.3. Relleno de cueva: Bisbee, Arizona
  - A.4. Relleno de poros: Depósitos rojos de New Mexico y Arizona.
  - A.5. Relleno de vesículas: Keweenawan, distrito del Lago Superior.
- B. Reemplazamientos:
- B.1. Masiva: Ducktown, Tennessee; Noranda, -- Quebec; Cerro de Pasco, Perú; Río Tinto, España; Granby, Columbia Británica.
  - B.2. Filón: Kennecott, Alaska.
  - B.3. Diseminado: Bingham, Utah; Ray Niami, -- Santa Rita, New Mexico.
4. Sedimentario: Kupershifer, Mansfeld, Alemania.
5. Exhalativos: Kid Creed, Ontario; Sullivan, Columbia Británica; Depósitos tipo Kuroko, -- Japón.
6. Bactereogénicos: Depósitos de cobre en Mont Island, Queen Island; Belt Cooper, Zambia; Sulliván, Columbia Británica; y Kupershifer, - Alemania.

### II.3. CLASIFICACION SEGUN JACOBSEN (1975)

Este autor propone una clasificación de yacimientos de cobre basado en aspectos genéticos, dividiéndolos en cuatro tipos:

a. PLUTONICOS: Incluye rocas de composición ultramáfica y complejos máficos, carbonatitas y pórfidos complejos así como a los skarn producto del metasomatismo de contacto.

b. HIDROTHERMALES: Incluye a las vetas o filones y todos los yacimientos donde el reemplazamiento es producto del hidrotermalismo como los yacimientos de brecha de chimenea.

c. VULCANOGENICOS: Abarca a los cuerpos estratiformes masivos compuestos por sulfuros y sulfuros diseminados, tanto en tobas como en intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias.

d. SEDIMENTARIOS: Esencialmente se localizan en depósitos continentales de sedimentos rojos, calcarenitas y lutitas.

En la siguiente gráfica se representa la relación que existe entre la producción de los diferentes tipos de

yacimientos con respecto a la edad geológica. (Fig. II.1)

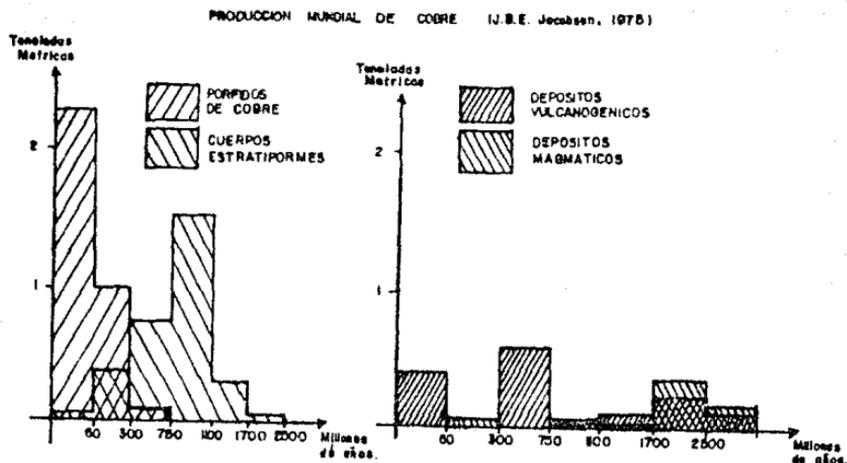


FIG. II.1

#### II.4. CLASIFICACION SEGUN BOWEN Y GUNATILAKA

La clasificación de los yacimientos de cobre que -- realizan estos autores está basada en la tectónica de placas y emplazamientos de las principales placas.

##### a. Yacimientos asociados a la expansión del piso oceánico.

1. Puntos calientes intracontinentales y zonas de apertura, probablemente Monte Isa, en Australia de --

edad Proterozoico medio.

2. Zonas de apertura intercontinental: Lodos rícos en cobre, como los depósitos de sedimentos rojos de edad Cuaternaria.

3. Crestas Mesoceánicas y piso oceánico: Los de tipo Chipre que son depósitos de sulfuros de cobre, -- plomo, zinc y nódulos de manganeso. Estos eventos se presentan en las cordilleras del Océano Pacífico de edad Cuaternaria.

b. Yacimientos emplazados en zonas de subducción.

1. Arcos de isla y franjas magmáticas: Los pórfidos de cobre-oro; los tipo Kuroko de zinc, cobre, plomo; los sulfuros masivos tipo Noranda y los tipo Besshi. Como ejemplos de los pórfidos cupríferos se tienen a las Islas Solomon, las Filipinas y Bougainville todas estas del Cenozoico Tardío. Para los tipo Kuroko se tienen a los yacimientos de Kosaka, Honshu, Vanua, Levu y Fidji -- del Mioceno. Dentro de los sulfuros masivos se tienen -- los yacimientos de Besshi, Japón del Mesozoico Temprano.

2. Tipo Andino y Franjas Magmáticas: Se aso--cian los yacimientos de pórfidos de cobre y molibdeno -- como los de El Teniente en Chile del Terciario.

c. Yacimientos relacionados a zonas de colisión.

1. Franjas tectónicas de colisión continental.

Asociados a franjas magmáticas de arcos de isla. Estos forman yacimientos de pórfidos de cobre como el de Coed-y-Brenin, Wales del Paleozoico, los sulfuros tipo Nfld Besshi de Monte Isa del Proterozoico, y los de tipo Kuroko como el de Buchans del Paleozoico.

2. Ofiolitas Obduccionadas: Asociadas a depósitos

de la parte trasera de los arcos del piso marino y -- cordillera oceánica. Los yacimientos de sulfuros tipo -- Chipre son característicos de estas zonas y se localizan asociados a nódulos de manganeso y cobre, como ejemplo se tienen: Oman, Lokken, Noruega, del Mesozoico Tardío.

3. Interior de continentes Subduccionados: Depósitos

estratiformes en los Himalayas de uranio, vanadio, cobre y los depósitos de plomo, zinc, cobre y baritas de Irlanda. Los depósitos de los Himalayas son del Cenozoico y los de Irlanda del Carbonífero Temprano.

d. Depósitos relacionados a fallas de transformación.

1. Fallas de transformación oceánica: Se forman

yacimientos polimetálicos en lodos, por ejemplo los del Mar Rojo del Cuaternario; sulfuros de cobre, níquel -

en rocas ultramáficas como en la Isla de St. John y Gabbro Akarem, Egipto del Proterozoico.

2. Fallas de transformación continental: La mineralización se presenta en carbonatitas de Angola del Mesozoico-Cenozoico y los pórfidos de cobre de Norte América y las Filipinas del Mesozoico-Cenozoico.

## II.5. CLASIFICACION SEGUN MITCHEL Y GARSON (1981)

Estos dos autores realizan su clasificación de yacimientos de cobre con base en la teoría de la Tectónica de Placas las cuales definen 5 ambientes, donde las condiciones geológicas dan lugar a la acumulación económica de este metal.

a. Depósitos minerales asociados a puntos calientes formados por disolución de una apertura intra continental y aulacógeno.

a.1. Asociación: Carbonatitas

Génesis: Metasomatismo magmático

Tipo de depósito: Apatita + vermiculita, Cu-Ubaddeleyita, pirocloro, tierras raras + estroncianita.

Ejemplos: Palabora, Sudáfrica (Proterozoico)

Oka, Canadá (Cretácico Tardío)

Chilwa, Kangankunde, Malawi (Cretácico Tardío).

a.2. Asociación: Intrusiones Básicas a Ultrabásicas

Génesis: Magmática

Tipos de depósito: Cr-Ni-Pt-Cu.

Ejemplos: Great Dyke, Zimbawe (Proterozoico Tardío).

Bushveld, Sudáfrica (Proterozoico Tardío)

Duluth Complex, Minnesota (Proterozoico Temprano).

a.3. Asociación: Lutitas comunmente calcáreas y bituminosas sobre discordancias y de bajo de evaporitas.

Génesis: Diagenética o epigenética, meteórica, hidrotermal.

Tipo de depósito: Estratiformes de cobre.

Ejemplos: Margen Atlántico de Africa (Aptiano)

Kupershifer, Europa (Pérmico)

Zambia y Zaire (Proterozoico Superior).

b. Depósitos de cobre característicos de las cordilleras mesoceánicas o dorsales.

b.1. Asociación: Basaltos y arcillas rojas pelágicas.

Génesis: Autigénesis

Tipo de depósitos: Nódulos de óxidos, hidróxidos e inclusiones de Mn, Ni, Co, Cu.

Ejemplos: Océano Atlántico, Pacífico e Indico (Reciente).

b.2. Asociación: Cordilleras oceánicas basálticas

Génesis: Hidrotermalismo exhalativo submarino, sedimentario.

Tipo de depósito: Cu, Fe, Zn, sulfuros.

Ejemplos: Cordillera del Pacífico del Este - -  
(Reciente)

Depósitos de sedimentos rojos marinos (Recientes).

Troodos, Chipre (Cretácico).

c. Depósitos minerales característicos de Arcos Magmáticos y otros arcos.

(Arcos Magmáticos)

c.1. Asociación: Tonalitas tipo "I", plutones y - -  
¿Shoshonitas?

Génesis: Magmático-meteorico, hidrotermal.

Tipo de depósito: Pórfidos de Cu-Au.

Pórfidos de Cu-Mo.

Pórfidos de Au.

Ejemplos: Filipinas (Terciario).

Andes, oeste de los Estados Unidos -  
(Mesozoico-Terciario).

c.2. Asociación: Vundu, Fidji (Cenozoico Tardío) --  
Riolitas vulcanoclasticas de ambiente submarino.

Génesis: Sulfuros exhalativos submarinos.

Tipo de depósito: Tipo Kuroko (Zn, Pb, Cu).

Ejemplos: Kosaka, Japón (Mioceno).

Venua Levu, Fidji (Plioceno).

El Buchans, Newfoundland (Ordovícico).

Captain Flat, Australia (Silúrico).

(Otros Arcos)

c.3. Asociación: Ofiolitas obduccionadas

Génesis: Submarino exhalativo, sulfuros sedimentarios.

Tipo de depósito: Tipo Chipre, estratiforme -  
Cu, Fe.

Ejemplos: Troodos, Chipre (Cretácico).

c.4. Asociación: Granodioritas.

Génesis: Magmático hidrotermal (con influencia de agua meteórica).

Tipo de depósito: Pórfidos de cobre.

Ejemplos: Sur de las Tierras Altas, Escocia -  
(Devónico Tardío).

d. Depósitos de cobre asociados a los hundimientos de las partes traseras de los arcos junto a las franjas de cinturones de corrimiento de los arcos.

d.1. Asociación: Pórfidos de cuarzo.

Génesis: Magmática, hidrotermal.

Tipo de depósito: Cu, Au, Ag.

Ejemplos: Butte, Montana (Cretácico Superior\_ al Paleoceno).

e. Cuencas marginales post-arco y depresiones de arco interno.

e.1. Asociación: Lavas almohadilladas

Génesis: Hidrotermal, exhalativo, sedimentario

Tipo de depósito: Sulfuros de Cu, Fe, Zn.

Ejemplos: Nuevo Sur, Gales (Paleozoico Infe---rior).

Escudo de Arabia (Paleozoico Infe---rior).

f. Franjas de colisión continental, zonas de sutu<sup>ra</sup> y deslizamientos de intramontaña.

f.1. Asociación: Levantamiento de complejos ofiolíticos.

Génesis: Sulfuros exhalativos, sulfuros sedi---mentarios.

Tipo de depósito: Estratiformes, Tipo Chipre y depósitos de Cu, Fe.

Ejemplos: Betts Cove, Newfoundland (Ordovícico).

f.2. Asociación: Molasa

Génesis: Diagenético o Epigenético.

Tipo de depósito: Areniscas estratiformes - -  
tipo U (Cu, V).

Ejemplos: Siwaliks, India y Pakistán (Terciario Superior).

f.3. Asociación: Clásticos terrígenos.

Génesis: Epigenético, meteórico, hidrotermal.

Tipo de depósito: U, Cu.

Ejemplos: Europa (Pérmico).

g. Depósitos de cobre asociados a fallas transformes y cordilleras transformes.

g.1. Asociación: Intrusiones de básicas a ultrabásicas.

Génesis: Magmática.

Tipo de depósito: Cu, Ni, Pt, Au, Ti.

Ejemplos: Freetown, Sierra Leona (Jurásico).  
SE del desierto de Egipto.

## II.6. CLASIFICACION DE YACIMIENTOS DE COBRE DE ACUERDO CON SU COMPOSICION MINERALOGICA. (UTEHA 1953)

Para su extracción los minerales de cobre se clasifican en tres categorías.

a. Minerales de cobre nativo. Los principales yacimientos se encuentran cerca del Lago Superior, Estados -

Unidos. El cobre de los lagos contiene 1% de pureza. En Colonia, Alemania también se localiza cobre nativo.

b. Minerales de óxidos de cobre. Son los menos extensos y los principales son: Cuprita (óxido rojo), Malaquita (carbonato verde hidratado), crisocola y atacamita. Los principales yacimientos se localizan en Estados Unidos, Chile, Rhodesia.

c. Minerales de sulfuros de cobre. Son los más definidos, el principal es la calcopirita o pirita cuprosa (sulfuro doble de cobre y hierro cuyo contenido de cobre llega al 4%). Los restantes minerales explotados son: La calcosita (sulfuro de cobre), la enargita (sulfuros complejos). Los principales yacimientos de sulfuros se localizan en E.U., Japón, URSS, y en escala más limitada en España y Alemania.

#### 11.7. CLASIFICACION SEGUN PETRASCHEK (1965)

Este autor soviético divide a los yacimientos de cobre esencialmente en cinco, tres por su origen genético y sólo dos los nombra por sus aspectos estructurales, dando como resultado la siguiente clasificación:

a. Neumatolíticos. Se presentan en filones de --

mena de cobre, cuarzo y turmalina. Como ejemplo se tienen Monte Maulato, Noruega, Columbia Británica y Chile.

b. Hidrotermales. Se subdividen por su forma y -- por el contenido mineral.

Por su forma:

- 1.- Impregnaciones
- 2.- Masas de mineral amorfo
- 3.- Filones

Por contenido mineral:

- 1.- Formación de pirita-calcopirita.
- 2.- Formación de Cu-As.
- 3.- Formación de minerales de cobre - en zeolitas.

c. Yacimientos con impregnaciones de Cu, Mo. Este tipo entra en una clasificación estructural, ya que los pu do nombrar como yacimientos plutónicos o quizá el hecho de que sólo nombre ejemplos de Rusia, adquiere una etiqueta - aparte.

Estos son asociados a rocas ígneas intrusivas como\_ pórfidos, sienitas, cuarzo-monzonitas. Ejemplos en el - - Transcáucaso, Kazakstan, Boschtschekul, Kounrad.

d. Yacimientos porfídicos de cobre diseminado. - -  
Aquí el autor lo clasifica como litológico y estructural.-  
Asociado a granodioritas y monzonitas, como ejemplo están\_  
las minas en: Arizona, California Clifton-Morenci, Miami;\_  
Ely, Nevada; Bingham, Utah; Sonora, México; Chuquicamata,-  
Chile.

e. Yacimientos sedimentarios. Se localizan esen-  
cialmente en rocas de grano fino como las areniscas rojas\_  
y lutitas, el cobre se encuentra diseminado. En calizas -  
se localiza en nódulos y en ocasiones en restos vegetales.  
Como ejemplo se tienen las menas de Uducán, Siberia y el -  
Boleo, México.

Yacimientos sedimentarios. Se forman con base en -  
la concentración de sustancias precipitadas de los organis\_  
mos muertos. Asociados a procesos diagenéticos, de reac-  
ción óxido-reducción. Las lutitas negras contienen disemi\_  
naciones de sulfuros de cobre, hierro, molibdeno, óxido de  
vanadio y vanadio que en ocasiones alcanzan concentracio-  
nes industriales, como ejemplo se tienen Mansfeld, R.D.A..

## II.8. CLASIFICACION DE YACIMIENTOS DE COBRE SEGUN SMIRNOV (1982)

Smirnov realiza un análisis de los yacimientos de cobre basado principalmente en sus aspectos genéticos, asociados a la teoría de los geosinclinales y sólo hace una breve introducción a la posible asociación tectónica, donde dos de los yacimientos de su clasificación los coloca dentro de los aspectos mineralógicos y litológicos.

A) Yacimientos magmáticos. Se forman de la diferenciación magmática a partir de composición ultrabásica, básica y alcalina. Al enfriarse tal fusión la acumulación de minerales formadores de mena se agrupan de tres formas: De licuefacción, magmáticos tempranos y magmáticos tardíos.

- Los yacimientos de licuefacción son los más importantes de este grupo en la producción de sulfuros de cobre y níquel en rocas básicas y ultrabásicas. Su formación está relacionada con los límites de áreas activas de las plataformas. Sus principales yacimientos son: Canadá (Thompson, Mystery, Lake), Estados Unidos (Alaska, Stillwater), Africa del Sur (Insiwa), URSS (Moncha-Tundra).

B) Yacimientos de tipo Skarn. Se forman metasomáticamente en la zona de contacto de los cuerpos intrusivos y rocas carbonatadas y en menor grado, con areniscas. La

mineralización de cobre en los yacimientos está bastante -  
difundida pero pocas veces alcanza valores económicos. El  
complejo de sulfuros suele formarse en el estadio de la -  
formación del skarn debido a la descomposición por hidra-  
tación. Como ejemplos se tienen: Turia en los Urales y -  
Clifton, Arizona.

C) Yacimientos piríticos. A estos pertenecen - -  
aquellas menas que están compuestas principalmente de sul-  
furos de cobre; estas menas se presentan en forma compac-  
ta o diseminada. Se tiene un predominio remarcado de pi-  
rita, pirrotita y en ocasiones marcasita a la cual se le\_  
asocia la calcopirita, bornita, esfalerita, galena y menas  
grises.

Estos yacimientos piríticos están asociados a la -  
formación vulcanogénica de diabasa-albitófidio o espili-  
ta-ceratófidio submarinas del estadio temprano del desarro-  
llo geológico de los eugeosinclinales. Ejemplos son: los  
yacimientos tipo Kuroko, Japón, los tipo Wakus, Noruega y  
Aledaide, Australia.

D) Yacimientos hidrotermales. Estos son forma-  
dos por soluciones mineralizadas gaseosas-líquidas que --  
circulan bajo la superficie de la tierra. Las acumulacio-  
nes de minerales se forman, a consecuencia de la disposi-  
ción de masas minerales en las oquedades de las rocas o -

por la sustitución de éstas. El autor propone tres subdivisiones de estos yacimientos hidrotermales.

- a. Plutógenos. Estos están asociados a rocas eruptivas, hipabisales y ácidas del estadio tardío del período geosinclinal, como en plataformas activas.
- b. Vulcanogénicos. Están asociados a vulcanismo andesítico del estadio temprano de la etapa geosinclinal. La característica de estos yacimientos es su asociación con los cráteres de la periferia de los volcanes.
- c. Amagmatógenos. Se les asocia con rocas sedimentarias y vulcanosedimentarias. Estas menos sufren transformaciones diagenéticas y catagenéticas, sucedida de aguas mineralizadas subterráneas calientes.

## II.9. CLASIFICACION SEGUN ROUTHIER (1963)

La clasificación de P. Routhier considera el aspecto petrológico como idea o contexto principal para formar su clasificación de los depósitos de cobre, quedando de la siguiente manera:

A. Depósitos en rocas sedimentarias sin relación - visible con plutónicas. Dominantemente estrafiformes:

1.- En formaciones detríticas grava-arenosas o arcillo-arenosas sobre todo, areniscas rojas (Réd beds).

Ejemplos: Corocoro (Bolivia); Oudokan, URSS.; N de Rhodesia, la mayor parte de Mufularia (cuarcitas).

Mineralogía: Cu nativo, calcocita, domeykita (CuAs), galena, barita, - yeso, celestita.

Oxidación y cementación: Cu nativo, cuprita, plata nativa y covelita.

2.- Tipo de depósito de lutita, más o menos bituminosa, más o menos carbonatadas, ocasionalmente con Pb, Zn, Co, U.:

Ejemplos: Mansfeld (Alemania-Kupferschiefer); Polonia, N de Rhodesia, la mayor parte en: Roan Antelope, Chambishi Yacimientos muy gruesos.

Mineralogía: Calcopirita, calcocita, bornita, pirita, galena, blenda, trazas de Co, Mo, Ni, V, etc. para los dos primeros y linneita, calcopirita, calcocita, bornita, pirita, blenda, minerales de U, - cuarzo, sericita, clorita, carbonatos, turmalina (raro).

3.- Tipo de depósito en rocas carbonatadas o -  
areno-arcillosas dolomíticas:

Nota.- Combinaciones e intermedias entre -  
los tres tipos son muy frecuentes.-  
Las formas de vetas son muy frecuent  
tes ejemplos: (Kipushi) Katanga. --  
Oxidación y cementación juegan un -  
papel muy importante, particularment  
te en Rhodesia y Katanga.

Ejemplos: Katanga; Mindouli-M Passa.

Mineralogía: Cementación de calcocita, co-  
velita, oxidación por hidróxid  
os de Co.

4.- Tipo asociado a las tobas volcánicas y - -  
otros sedimentos en regiones volcánicas --  
(andesitas, liparitas, etc.). A relacio--  
narse con el 11.

Ejemplos: Honshu, Japón; El Boleo, México.

Mineralogía: Minerales tipo "Kuroko": cal-  
copirita, pirita, galena, - -  
blenda, barita, oro, plata.

B. Asociado a los plutones graníticos, frecuente-  
mente monzoníticos:

B.1. Intraplutónicos:

5.- Tipo filoniano, con cobre arsenical, Zn,  
Pb, (mesotermal) redes filonianas cerra-  
das y complejas:

Ejemplos: Butte, Montana; yacimientos muy --  
gruesos; con cementación importan-

te; Chuquicamata, Chile.

Mineralogía: Calcopirita, calcocita, bornita, enargita, tenantita, tetraedrita, pirita, galena, blenda, plata y oro con minerales de cobre y plomo, para el primer ejemplo y cuarzo, carbonato y silicatos de Mn (diagilita, rodonita) para el segundo y la cementación para ambos es por calcocita y covelita.

6.- Tipo "pórfidos de cobre" (o diseminado); reticular de vetillas mineralizadas en monzonita alterada, igualmente mineralizadas, en posición apical. No arsenical.

Ejemplos: Globe, Miami, Arizona, Ely, Nevada; etc.; Bingham, Utah, la mayor parte de Kounrad, etc., Rusia; yacimientos muy gruesos sobre todo con cementación importante.

Mineralogía: Calcopirita, bornita, calcita y pirita.

## B.2. Marginales y periplutónicos:

7.- Tipo filonianos "Sub-tipos":

- a) Vetas de calcopirita, pasando en profundidad a filones estaníferos (hipotermiales).
- b) Filones de calcopirita, schelita, turmalina (transición a hipotermiales neumatolíticos).

c) Filones de calcopirita, pirrotita, magnetita, molibdenita, turmalina (transición hipotermal).

d) Filones con cobre gris dominante, muy frecuente Ni-Co con ganga carbonatada.

Ejemplos: Cornualles, Inglaterra; la mayor parte de Japón; Yakuoji, Japón; Cobar, Gales; muy frecuentes pero menos importantes.

Mineralogía: Calcopirita, galena, blenda, casiterita.

8.- Tipo de cuerpo irregular dominantes, en rocas carbonatadas en la zona pirometasmática o en los alrededores:

Ejemplos: En la mayor parte de Bingham; Clifton Morenci, Arizona; -- Tourinsk, Oural; Concepción del Oro, México; yacimientos muy gruesos.

Mineralogía: Rejular, oropimente, calcopirita, bornita, calcocita, enargita, tetraedrita, a veces oro, pirita, pirrotita, oligisto, cinabrio, molibdenita, cuarzo y calcita.

C. Asociados a rocas sub-volcánicas o volcánicas:

9.- Tipo diseminado (cf: pórfidos de cobre) - al ápice de intrusiones sub-volcánicas andesíticas-apical subvolcánicas:

Ejemplos: Majdan Pek, Yugoslavia.

Mineralogía: Pirita, pirita cuprífera, -  
pirrotita, magnetita, sericita, calcita y cuarzo.

- 10.- Tipo vulcano-sedimentario en lentes y capas en tobas sobreyaciendo derrames de riolitas. Sin duda relacionados al 13.

Ejemplos: Río Tinto, provincia de Huelva, España; Mount Lyell, Tasmania; grandes yacimientos; W -- del condado Shasta, California; etc.

Mineralogía: Pirita, calcopirita, cobre-gris, enargita, galena, - - blenda, mispiquel, plata, - oro. Ganga de cuarzo, clorita; cementación poco importante.

- 11.- Tipo filones o red de filones de lavas, sobretodo andesíticas-postorogénicas. -- Las lavas son frecuentemente propilitizadas. Ciertos yacimientos estratiformes en tobas asociadas a lavas (cf 4).

Ejemplos: Teniente, Branden, Chile; Bor, Yugoslavia; Cerro de Pasco, - Perú; la mayor parte de Japón; Algeria, ejemplo Tellorahais - (cobre y plomo); grandes yacimientos; El Boleo, México.

Mineralogía: Calcopirita, bornita, enargita, tenantita, panabase,-

cuarzo, turmalina (hipotermal volcánica). Cementación por calcocita, covelita, -- bornita. Los otros yacimientos son de grado térmico -- muy bajo.

- 12.- Tipo asociado a las lavas básicas (a menudo espilíticas) o a las rocas básicas granulares de la fase geosinclinal (ofiolitas).

Ejemplos: Monte Catini, Toscana; Lokken, Noruega; Corse; Sant-Veran, -- Hautes-Alpes; Grecia, etc; muy frecuentemente más pequeños.

Mineralogía: Calcopirita, bornita, calcocita, cobre gris, cobre nativo, a veces zeolitas. Cementación importante tras fenómenos mecánicos.

Véase tipo 7 de la pirita.

- 13.- Tipo asociado a las lavas ácidas a intermedias (dacitas, queratófidos, riolitas) y a las tobas de la fase geosinclinal. Metasomatismo de paredes silíceas en rocas con sericita, clorita, andalusita, - cordierita, estauroлита, almandino; con lentillas calcáreas en skarns. Sin duda una relación con el 10.

Ejemplos: Boliden, Suecia; Falun, Suecia; Rougn-Noranda, Canadá.

Mineralogía: Arsenopirita, pirrotita, ga

lena, pirita, calcopirita\_ o (15 gr/ton, en Boliden), argentita (44 gr/ton): un\_ poco de Bi; Te (tetradrimi\_ ta, telurobismutita), y Se.

- 14.- Tipo con cobre nativo, a veces zeolitas, diseminado en basaltos (a menudo espilf\_ ticos) = "Formación cuprífero zeolíti\_ ca" y concentrado en filones que esca\_ pan hacia terrenos sedimentarios. (Con\_ centraciones mediante el enfriamiento - de lavas o mediante plegamientos y meta\_ morfismo):

Ejemplos: Lago superior, USA; tipo fre\_ cuente pero raramente impor\_ tante, los Lago superior son\_ un monstruo cuantitativamen\_ te.

Mineralogía: Plata, cobre nativo, calco\_ sita, tetraedrita, tenanti\_ ta, cuarzo, zeolitas, zoi\_ sita, clorita y ortoclasa.

- 15.- Tipo vulcano-sedimentario ("exhalati\_ vo"), asociado a lavas básicas (a menu\_ do espilf\_ ticas).

Ejemplos: Ergani, Turquía; muchas de -- las piritas almacenadoras más o menos cupríferas; Leksdal y Stordo, Noruega; etc.

Mineralogía: Véase tipo 8 de la pirita.

D. Asociada a las rocas básicas granulares: noritas, gabros, diabasas, a veces en trampas (Siberia):

16.- Tipo Ni-Cu-Pt en la base o en el borde del aparato o dominante norítico, a veces gabros (olivino), frecuentemente transformados en anfibolitas. Sobre todo en escudos precámbricos.

Ejemplos: Sudbury, Ontario, Canadá; Bridger River, Manitoba, Canadá; Petsamo y Montchegorsk, URSS; Noruega; muchos de los pequeños almacénadores; Insizwa, Africa del Sur; Varallo, Piemon, Italia. En general yacimientos importantes.

Mineralogía: Calcopirita, cubanita, pirita, pirrotita, petlandita, polidimita, magnetita, esferilita, telururos de oro y plata; 14 elementos recuperados: Cu, Ni, Pt, Pd, Au, Ag, Rh, Ru, Ir, Co, Se, Te, Fe, SO<sub>2</sub> (ácido sulfúrico).

E. Asociado a las rocas ultrabásicas:

17.- Tipo a veces con un poco de Ni (y Co) o aproximados a serpentinas o gabros. Pasaría a Ni-Co como Bou-Azzer, Marruecos.

Ejemplos: Outokumpu, Finlandia

Nota: Es posible que los tipos 12, 13, 15, 16 están menos separados aunque no lo parezca según esta tabla.

Los depósitos cupríferos que se encuentran en o al contacto de rocas ultrabásicas (periodotitas, serpentinas) raramente presentan interés económico.

- F. Dentro de los terrenos metamórficos sin relación visible a veces con plutones.

Muchos de los tipos precedentes pueden estar incluso entre las series metamórficas.

Por ejemplo, ciertos yacimientos del N de Rhodesia (tipos 1 y 2, presentan la traza de un ligero metamorfismo).

Las lavas de los tipos 12, 14 y 15 a veces están con o sin rocas básicas granudas, son frecuentemente metamorfoseadas a anfibolitas y rocas cloritizadas ("Formación cuprífera cloritizada" de Schneiderhohn); a aquéllas del tipo 13 en leptitas, los del tipo 16 están frecuentemente metamorfoseadas.

Es seguro que un gran número de mineralizaciones cupríferas en terrenos metamórficos poseen el problema de su liga con plutones graníticos, con las lavas o con el metamorfismo.

### III. MODELOS PRINCIPALES DE YACIMIENTOS

### III. MODELOS PRINCIPALES DE YACIMIENTOS

#### III.1. PORFIDOS DE COBRE

##### III.1.1. CARACTERISTICAS

No existe una definición de los pórfidos de cobre - que haya sido aceptada universalmente. Kirkham (1971) propone una definición (que aunque) breve, frecuentemente - - aceptada: "Son enormes yacimientos, en donde los sulfuros hipogénicos son controlados por estructuras primarias y - - están especialmente relacionados a intrusiones porfídicas\_ félsicas o intermedias".

Titley (1966, 1972) y Lowel (1974) propusieron sus\_ definiciones para los pórfidos de cobre, pero no han - - sido totalmente aceptadas. Guilbert, et. al. (1986) proponen, una definición, la que hasta ahora ha sido aceptada - "Son yacimientos de gran tonelaje, principalmente de calco pirita y molibdenita, en el cual los sulfuros hipogénicos\_ y el zoneamiento silicatado abarcan el metasomatismo potásico-propilítico y la alteración hidrolítica félsica-argílica y tienen una relación, espacio-temporal con intrusiones porfídicas calco-alcalinas".

Para explicar la formación de los pórfidos de cobre, se ha utilizado el concepto de tectónica de placas, por - Dietz (1961), Hess (1962), Oliver y Sykes (1968), que--

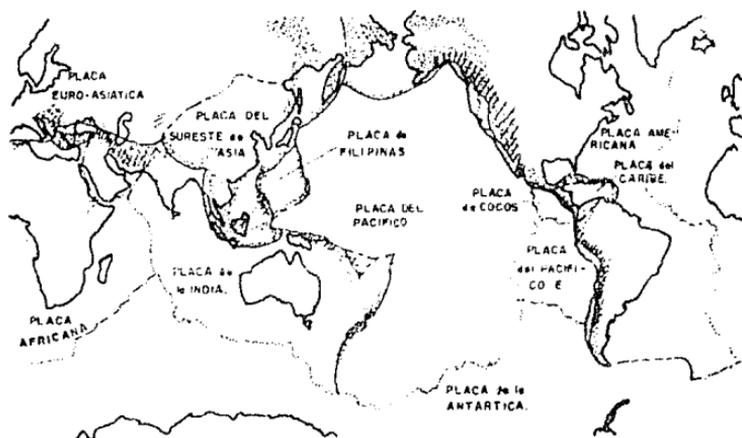
nes han utilizado los conceptos de la apertura del fondo marino, fallas de transformación y relaciones de márgenes continentales y arcos de isla, para explicar el emplazamiento de los pórfidos de cobre.

La mayoría de los yacimientos de pórfidos de cobre existen en el W del continente americano, SW del Pacífico y el cinturón Orogénico Alpino (Fig. III.1 y III.2).

El emplazamiento de los pórfidos de cobre depende de dos factores: el primero es el nivel de erosión de una cadena volcánica-intrusiva y el segundo constituye la habilidad de los metales de transportarse sobre una subyacente zona de subducción (Sillitoe, 1972). (Fig. III.3).

De acuerdo con lo anterior las edades de los pórfidos varían del Cretácico Superior al Paleoceno.

La explicación de que en algunos pórfidos exista una concentración de metales mayor que en otros, se basa posiblemente en la presencia de una distribución heterogénea de metales en la zona de velocidad baja del manto superior (Sillitoe, op. cit.).



5/ESCALA

- MARGENES DE PLACAS DIVERGENTES
- MARGENES DE PLACAS CONVERGENTES
- ⋯ MARGENES DE PLACAS DE NATURALEZA INDETERMINADA
- ▨ REGIONES CON DEPOSITOS PORFÍRICOS DE Cu Y Mo
- ⋯ CINTURON MONTAÑOSO DEL MESOZOICO-CEÑOZOICO

- MARGENES DE PLACAS DIVERGENTES
- MARGENES DE PLACAS CONVERGENTES
- ⋯ MARGENES DE PLACAS DE NATURALEZA INDETERMINADA
- ▨ REGIONES CON DEPOSITOS PORFÍRICOS DE Cu Y Mo

LINTEJONES DE FORJIDOS DE Cu EN RELACION A CINTURONES ORGENICOS Y LIMITES DE PLACAS

R. SILLITOE (1972)

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA.
	CIENCIAS DE LA TIERRA.
DISTRIBUCION DE LOS YACIMIENTOS DE Cu RELACIONADO A LAS PLACAS TECTONICAS.	
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.
TESIS PROFESIONAL	1990 FIG N° III

A)



FIG. III. 2 DISTRIBUCION DE LAS MAYORES PROVINCIAS DE PORFIDOS DE COBRE (S.R. TITLEY Y R. E. BEANE 1972)

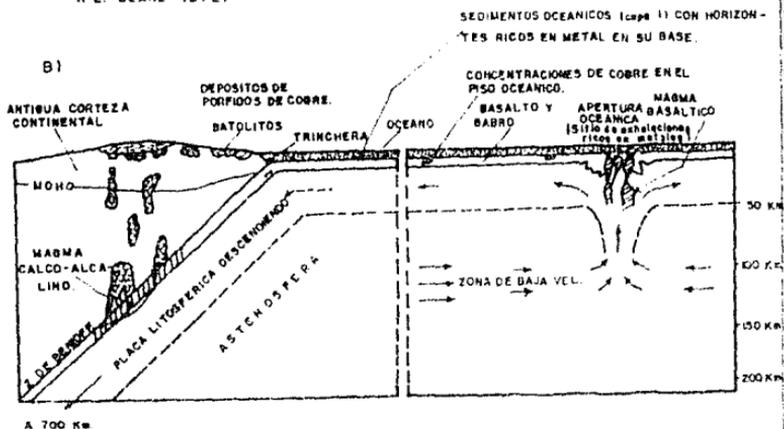


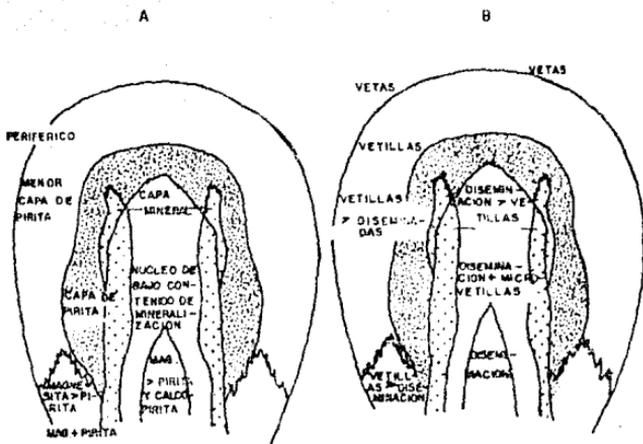
FIG III 3 RICHARD H. SILLITOE. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA GENESIS DE LOS DEPOSITOS DE PORFIDOS DE COBRE EN EL CONTEXTO DE PLACAS TECTONICAS (1972)

UNAM		FACULTAD DE INGENIERIA.	
		CIENCIAS DE LA TIERRA	
A) DISTRIBUCION DE LOS YACIMIENTOS DE COBRE.			
B) GENESIS DE LOS DEPOSITOS DE PORFIDOS DE COBRE.			
ARROYO OSORNO E.		GARCIA GARCIA H.	
BAUTISTA GONZALEZ A.		RODRIGUEZ GUTIERREZ A.	
CERON SANTILLAN C.		RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.	
TESIS PROFESIONAL		1990. FIG. Nº III 2/3	

### III.1.2. MINERALIZACION HIPOGENICA:

Existen dos tipos de emplazamientos minerales representados por sulfuros y óxidos, los que se encuentran -- distribuidos en zonas concéntricas al yacimiento. Ambos tipos de emplazamientos son muy cerrados, relacionados - en espacio y tiempo en muchos de los depósitos de pórfidos y, estos van a tener una organización paralela. Los minerales como el cobre hipogénico y los sulfuros de molibdeno existen en cantidades económicas importantes, -- principalmente en las zonas de alteración como la potásica y la félica; es precisamente entre estas dos zonas en donde se encuentran las mayores concentraciones de cobre y raramente se llega a extender a la zona de alteración argílica. Sin embargo, si se presenta en esta última, - siempre estará asociado con otros sulfuros, aunque la mineralización supergénica de cobre existe en las tres zonas. La zona de alteración propilítica es la zona estéril tanto de mineralización económica hipogénica como de sulfuros supergénicos.

La zona más profunda de mineralización (Fig. III.4) puede ser variable en espesor, pero generalmente llega a tener cientos de metros. El contenido de sulfuros es de bajo a moderado, aproximadamente con un 10% de contenido de pirita sobre toda la roca y con relaciones de pirita: calcopirita de 3:1; los depósitos hipogénicos están con-



- A) Dibujo esquemático de zonas de mineralización hipogénica de sulfuros-ácidos en un modelo de pórtidos propuesto por Lowell y Gilbert. (1970)
- B) Dibujo esquemático de la ocurrencia de sulfuros. Nota: la gradación de la mineralización diseminada al núcleo- diseminaciones y vetillas - vetillas y diseminaciones - vetillas y vetas a la zona periférica externa. (Es redibujado de Lowell y Gilbert, 1970).
- Capa mineral: pirita 1%, calcopirita 1a3%, molibdenita 0.03%.
- Núcleo de bajo grado: bajo contenido de sulfuros (calcopirita, pirita, molibdenita) Capa baja de pirita: 2%
- Capa de pirita: pirita 10%, calcopirita de 0 a 3%
- Zona periférica (calcopirita - galena - esfalerita-oro-plata).

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA.
	Ciencias de la Tierra.
ZONAS DE MINERALIZACION Y ALTERACION HIPUGENICA.	
ARROYO OSORHO E	GARCIA GARCIA M.
BAUTISTA CONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.M.
TESIS PROFESIONAL	1990 FIG. N° II.4

centrados dentro de esta zona. En la zona mineralizada se presentan sulfuros hipogénicos como la pirita-calcopirita-molibdenita-bornita y en menores cantidades se encuentran enargita, calcocita y digenita. Estos minerales se encuentran en forma diseminada y con una gradación progresiva en la distribución de los sulfuros hacia la parte externa del pórfido. Esta diseminación es producto del metasomatismo y recristalización de la roca huésped y cicatrización de las vetillas. La presencia de anhidrita en esta zona indica:

- a) Una gran proporción del total del azufre en los sistemas de los pórfidos de cobre es unido como sulfato.
- b) Las reacciones hidrotermales entre los silicatos, óxidos y sulfuros se desarrollan en sistemas con contenidos altos de azufre.
- c) Y una alta potencialidad de Eh (Redox) en el estado deutérico de un magmatismo tardío de la cristalización.

La zona fílica (Fig. III.4) envuelve a la zona potásica, formando en la zona de contacto el mayor depósito mineral. Esta zona contiene pirita y altos contenidos de sulfuros en las áreas sericitizadas, la pirita varía entre el 10% y el 16%, y la relación de pirita-calcopirita

ta es de 13:1. El principal mineral es, al igual que en la zona potásica, la pirita con porcentajes menores de calcopirita, molibdeno, bornita, cantidades mucho menores de esfalerita, magnetita y enargita. La actitud general de la mineralización es la pirita en vetillas y la calcopirita diseminada.

Ocasionalmente la mineralización hipogénica de la zona fílica traslapa a la existente en la zona argílica; sin embargo, en ésta, la relación de pirita: calcopirita es de 23:1, con menores cantidades de calcopirita, bornita y trazas de calcita, galena, enargita, esfalerita, molibdenita y tenantita. La mayoría de los sulfuros existen en vetas.

La última zona de mineralización corresponde con la zona periférica o externa (Fig. III.4), en la cual, la mineralización se reduce a vetas y vetillas de pirita -- con escasa calcopirita y trazas de bornita, molibdenita, magnetita, esfalerita, galena, rodocrosita, rodonita, espectralita, sulfosales y enargita, ocasionalmente vanadio, manganeso y altos grados de oro y plata en vetas. El contenido de pirita en las rocas es del 2-6%. Los minerales antes descritos se presentan diseminados en toda la parte exterior de la zona propilítica.

En forma general el zoncamiento vertical es casi --

desconocido, sin embargo, apesar de que el zoneamiento horizontal es mejor conocido, la distribución vertical de las alteraciones hidrotermales es en general similar al horizontal, o sea se tiene del centro a la periferia, las alteraciones potásica, fílica-argílica y propilítica.

Dentro de los sulfuros que se presentan en este tipo de yacimiento, la pirita es el más abundante, presentándose cantidades más pequeñas de calcopirita, bornita, enargita y molibdenita. La secuencia típica desde el centro hacía la periferia, de acuerdo con el modelo de Lowel y Guilbert es:

- 1.- Calcopirita-pirita-bornita y molibdenita
- 2.- Pirita-calcopirita-molibdenita-bornita
- 3.- Pirita-calcopirita
- 4.- Esfalerita-galena-plata-oro

### III.1.3. ROCAS ENCAJONANTES:

En los pórfidos de cobre existen ciertas zonas de alteración que tienen relación especial con la mineralización.

Así, Lowel y Guilbert proponen un modelo con las zonas de alteración-mineralización. Las zonas de altera

ción las dividen en cuatro:

- a) Zona Potásica
- b) Zona Fílica
- c) Zona Propilítica
- d) Zona Argílica

Todas ellas con características mineralógicas y geológicas distintas. (Fig. III.5).

#### Zona Potásica:

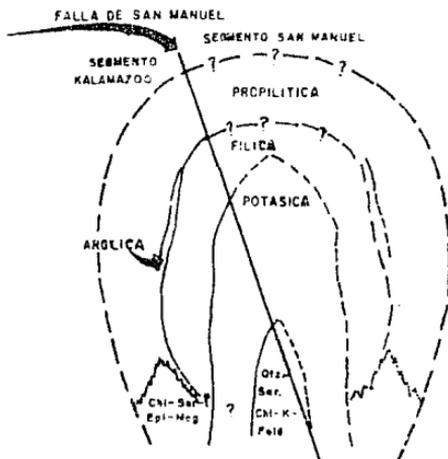
Se define así por la presencia de minerales como ortoclasa-biotita u ortoclasa-clorita, es muy raro que esta zona no se presente.

El reemplazamiento, en esta zona, de los minerales primarios es por clorita, feldespato potásico, cuarzo, sericita y anhidrita.

El límite entre la estabilidad de los feldespatos potásicos y la sericitización se encuentra entre las condiciones de magmatismo tardío e hidrotermalismo temprano.

La adición de Fe-Mg da como consecuencia la deposición de biotita-clorita-feldespato potásico-sericita-cuarzo-anhidrita, son los que generalmente se forman en la parte baja del centro de los pórfidos.

La alteración de la biotita ocurre como:



Modelo de zonamiento de alteración hidrotermal en un depósito típico de sulfuros de cobre del tipo Lowell-Guilbert. La alteración ocurre como zonas distintas concéntricas centradas alrededor de un stock porfírico (Lowell y Guilbert, 1970.)

ZONA POTÁSICA: CUARZO-FELDSPATO POTÁSICO-BIOTITA-SÉRICITA-ANORTOSITA.

ZONA FILÍCA: CUARZO-SÉRICITA-PIRITA.

ZONA PROPILÍTICA: CLORITA-EPIDOTA-ADULARIA-ALBITA.

ZONA ARGÍLICA: CUARZO-CAOLIN-CLORITA.

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA.	
	CIENCIAS DE LA TIERRA.	
ZONAS DE ALTERACION		
HIPOGENICA.		
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.	
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.	
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.	
64	TESIS PROFESIONAL, 1990	FIG. N° 15

- a) Relleno de vetilla muy fino
- b) Como reemplazamiento de cristales de plagioclasa.
- c) Por masas cuedrales muy similares a las biotitas primarias.
- d) Como reemplazamientos de grandes cantidades de feldespatos.

Por último la zona potásica en algunas ocasiones -- llega a mostrar trazas de carbonatos, apatita, rutilo y wolfranita los que van a depositarse en vetillas o microvetillas.

#### Zona Fílica:

Sobreyace parcialmente a la zona anterior, y nunca falta en los yacimientos porfídicos; los minerales que la caracterizan son: cuarzo, sericita-pirita, y cantidades menores de clorita, hidromica y rutilo. En esta zona el emplazamiento de pirita cubre el 20% de la roca, y por consiguiente sólo se presentan pequeñas cantidades de pirofilita y/o otros minerales sericíticos. A diferencia de las otras zonas, en ésta la región intermedia está dominada por minerales arcillosos, lo que significa una extensa sericitización de los silicatos. Por acción de la misma se generan grandes cantidades de cuarzo y -- por consiguiente una silicificación de la zona fílica, -- esta sericitización va a estar decreciendo de la zona fílica a la zona superior. El contacto entre la zona fílica

ca y potásica es gradacional, extendiéndose por docenas de metros y reflejándose en la diseminación de carbonatos y andidrita hacia la segunda zona.

El límite entre las zonas de alteración potásica y sericítica está siendo inferida de datos isotópicos de Oxígeno ( $O^{18}$ ) e Hidrógeno ( $H^3$ ) y que van a representar la actividad del agua meteórica en la mineralización.

Así que la mayoría de los fluidos magmáticos toman parte en la alteración potásica, es ampliamente mezclada y diluida con agua meteórica al viajar hacia arriba o -- hacia afuera del stock solidificado. La perción de los fluidos magmáticos transportados a la cuenca alta de los volcanes tienden a producir las fumarolas de altas temperaturas, que comunmente están cerca de las áreas que rodean las chimeneas. La separación de la fase volátil durante el transporte hacia arriba probablemente da resultado a la sublimación y su contenido metálico.

#### Zona Argílica:

A diferencia de las dos primeras, es posible que esta zona llegue a faltar en los yacimientos porfídicos; cuando se presenta, está caracterizada por la alteración de plagioclasas a caolín, cercano al cuerpo mineral, a montmorillonita, si se va alejando de éste. Esta zona -

ya no es alcanzada por la secuencia de alteración que --  
venía presentándose en las anteriores, dando como resul-  
tado que exista poca cantidad de pirita y feldespató po-  
tásico; la biotita estará parcialmente cloritizada o pue-  
de ser remanente de las zonas anteriores.

El contacto entre la zona fílica y la argílica, - -  
cuando llega a presentarse por lo común es indistinto. -  
La alteración argílica avanzada, envuelve a minerales --  
como pirofilita, dickita y topacio cuando ésta se llega\_  
a presentar.

#### Zona Propilítica:

Es la última zona en los pórfidos y siempre está --  
presente, aunque el emplazamiento de ésta no sea muy cla-  
ro, aunque si muy extensa. El mineral más común de esta  
zona es la clorita asociada a pirita, calcita y epidota;  
las plagioclasas que se llegan a encontrar están alterán-  
dose a arcillas, mientras que el cuarzo no es alterado.-  
Es raro encontrar calcopirita y la pirita ocupa el 3% --  
del total de la roca. La alteración se encuentra gra---  
duando horizontalmente dentro de las alteraciones antes\_  
expuestas; esta zona llega a alcanzar hasta cientos de -  
metros en extensión.

#### III.1.4. ESTRUCTURAS:

La secuencia vertical de mineralización sugiere que la pirita-calcopirita-molibdenita gradúan hacia arriba a pirita. Los sulfuros muestran una gradación dentro de la mineralización diseminada en la zona potásica; en la filica una diseminación semejante a la anterior y vetillas, mientras que en la argílica se presentan vetas - principalmente y disminución en la diseminación. En las dos últimas zonas, se presentan vetillas en la zona más externa y vetas en la zona periférica. La forma de los cuerpos mineralizados es circular u oval.

#### III.1.5. ASPECTOS ECONOMICOS:

R.H. Sillitoe (1972) expone que las concentraciones económicas de cobre-molibdeno existen en ambientes sub-volcánicos asociados a pequeños stocks y con un vulcanismo subaéreo calcoalcalino.

La mineralización de cobre-molibdeno está ampliamente asociado a stocks de textura porfídica, y esto al parecer, es una transición a cuerpos plutónicos de igual composición (ejemplo de pórfidos de dacita a cuerpos dióríticos). Esta área de cambios texturales, probablemente coincide con el incremento en el tamaño de mineraliza

ción en el stock a un plutón no mineralizado. En la parte basal de los depósitos existe un avance en la alteración de los silicatos potásicos con un decremento en biotita y emplazamiento de cuarzo, feldespatos potásicos, sericitita y clorita.

En dirección vertical la alteración sericitítica y argílica aumentan y las zonas de silicatos potásicos decrecen en extensión. Estos cambios corresponden a la parte de la mineralización hipogénica económica. Junto a la superestructura volcánica comagmática su alteración es irregular siendo ésta propilítica y argílica. De acuerdo a Hemley et. al. (1969) "esas dos áreas probablemente reflejen el movimiento ascendente de los fluidos hidrotermales".

Al parecer el límite de los pórfidos está denotado por el depósito de sulfuros, los que son producidos por altas temperaturas durante la fase fumarólica cuando los volcanes aún están activos, la pirita y marcasita están asociados con esta etapa. De acuerdo con todo lo anterior es posible establecer lo siguiente (Lowel y Guilbert, op. cit.):

1. La mineralización económica puede extenderse hasta 3 km. a partir del ápice del volcán.
2. La alteración tiene una extensión vertical de 1.4 km y la mineralización de 1.3 km.

3. En la zona no erosionada es posible que la extensión vertical sea hasta de 8 km.

### III.1.6. GENESIS E HISTORIA:

Los pórfidos son el producto de la acción física y geoquímica continua de condiciones magmáticas de baja temperatura para desarrollar un magmatismo hidrotermal. La fuerte intrusión de rocas calco-alcalinas o alcalinas producen rocas de composición cuarzo-monzoníticas a granodioríticas o dioríticas a sieníticas. Las zonas características de alteración-mineralización son desarrolladas con esos gradientes, que esencialmente reflejan condiciones de alteración deutérica a un magmatismo tardío. Estas condiciones magmáticas se desarrollan hacia arriba o hacia abajo con tiempo y con un decremento en temperatura dentro de las áreas de concentraciones altas de  $H^+$  y valores bajos de  $K^+/H^+$ . La distinción más importante de los pórfidos es su gran tamaño, comparado con otros depósitos hidrotermales. La forma, indica grandes controles estructurales y de mineralización. A continuación se enumeran los eventos en la formación de los diferentes pórfidos de cobre:

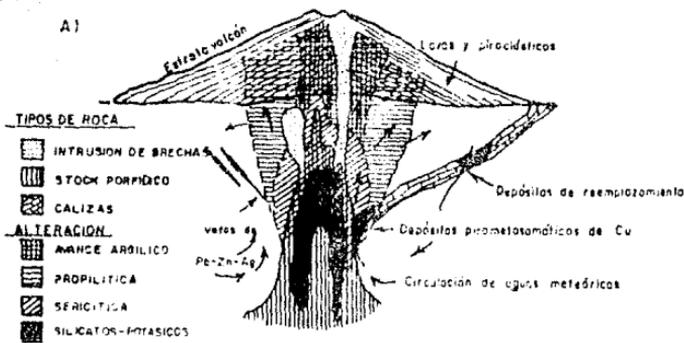
1. El emplazamiento del stock porfidico y diques es relativamente poco profundo, por lo que la zona más alta da un aporte a una masa batolítica grande.

2. Introducción metasomática de cobre y otros metales, azufre, álcalis y iones de  $H^+$  del flujo de cristalización hacia los stocks porfidicos y -- las rocas de la zona.
3. Decremento en temperatura y presión, una transición metasomática de álcalis a  $H^+$  e incremento en la actividad del ión de azufre en los flúidos mineralizantes.
4. La interacción de agua meteórica con el centro de mineralización.

Si el emplazamiento de minerales es al final y si el enfriamiento es lento, ocasiona que los procesos de mineralización-alteración se desarrollen totalmente. -- Para que exista un depósito económico de cobre durante el curso de los procesos de alteración-mineralización, -- dependerá del contenido de minerales dentro del magma -- original. (Fig. III.6).

#### III.1.7. EL MODELO DIORITICO:

V.F. Hollister (1975) reconoce un modelo diorítico, el cual es un tipo de pórfido de cobre que no está restringido a ningún ambiente tectónico específico. Este modelo puede asociarse a sianitas o plutones alcalinos. Geoquímicamente las bajas relaciones de  $SiO_2/Na_2O + K_2O$  en el plutón huésped, es poco importante porque las reacciones químicas modifican los efectos del metasomatismo de



Representación esquemática de un inferido sistema de pórfidos de cobre  
 NOTA relación a Skarn, Pirrometasomática, Reemplazamiento y depósitos de  
 vegas hidrotermales. (Redibujado de Sibille 1973.)

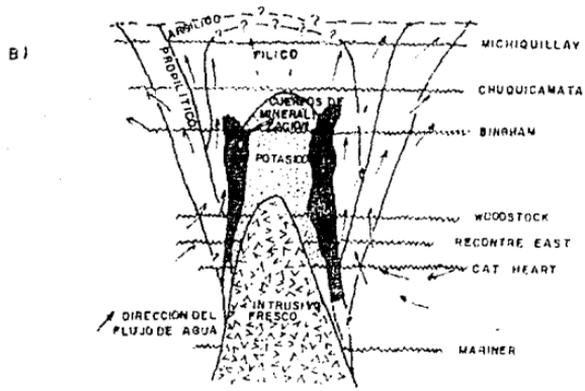


Diagrama esquemático mostrando la influencia de sistemas magmático-hidrotermal y meteorico-hidrotermal sobre un depósito de pórfidos propuesta por Lowell-Guilbert.  
 La mineralización de sulfuros primarios ocurre entre los dos sistemas hidrotermales.  
 Son mostrados en las figuras algunos depósitos de cobre representativos con sus respectivos niveles de erosión.

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA.	
	CIENCIAS DE LA TIERRA.	
a) SISTEMA DE PORFIDOS DE COBRE		
b) INFLUENCIA DE SISTEMAS MAGMÁTICO-HIDROTÉRMICO Y METEÓRICO-HIDROTÉRMICO.		
ARROYO OSORNO E	GARCIA GARCIA H	
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A	
CERON SANTILLAN C	HLSINGSTEIN JIMENEZ F.H	
72	TESIS PROFESIONAL	1990 FIG N° III.6

$K^+$ ,  $S^{4+}$  e  $H^+$  sobre un plutón deficiente en sílice. En el modelo diorítico el contenido de azufre de los fluidos hidrotermales es bajo y tiene mucho fierro, el cual no puede ser usado para formar pirita pero que será retenido por biotita, cloritas y magnetita.

La primera zona de mineralización-alteración en el modelo de Lowel y Guilbert, en este modelo, está representada por el emplazamiento de ortoclasa-biotita y/o ortoclasa-clorita. Si no se desarrolla ortoclasa con la biotita en la zona rica en potasio, su lugar es tomado por plagioclasas, porque el emplazamiento dominante de clorita de la zona propílitica puede ocurrir en lugar de la zona de cuarzo-sericita de la zona fílica.

Con respecto a la mineralización, este modelo distribuye la ocurrencia del oro en asociación con los sulfuros. La mineralización de cobre y oro, existe en la zona potásica, diseminado o en relleno de fracturas.

### III.1.8. EJEMPLOS:

- Provincia SW de USA:

Arizona: SW de N. México; y N de Sonora, corresponde al modelo de Lowel y Guilbert. Sus edades van del Terciario Superior (20 m.a.) al Mesozoico

co (163 m.a.) pero la mayoría son de la Larami-  
de (58-72 m.a.).

- Provincia de la Orogenia Apalacheana:

Son del Cámbrico al Ordovícico en los períodos\_  
del Devónico-Carbonífero. Mariner del Cámbrico-  
Precámbrico (580 m.a.) y el Cathart (457 --  
m.a.).

- El ambiente de Arcos de Isla del SW del Pacífico  
y la provincia de las Filipinas:

Ocurren juntos el tipo Diorítico y el de Lowel\_  
y Guilbert. Filipinas, Bougainville (16 m.a.)\_  
y otros como los de Taiwan, P. Rico y Ryukv-Bur  
ma son del mismo tipo.

- Provincia de Sur América:

Orogenia Andina, Perú (Cu-Ti); Uanucio, Chile\_  
(Cu-Tw); el primero corresponde al modelo de --  
Lowel y Guilbert (Chuquicamata) su edad va de \_  
4.3 - 58.7 m.a. del Pérmico.

- Orogenia Cordillerana:

Existen dos grupos:

a) Vancouver y Trembler Grup de edad Triásica,

localizadas en rocas volcánicas del Mesozoico Inferior.

- b) Depósitos Terciarios asociados con plutones cuarzo-monzoníticos, que rodean los flancos del Arco Skeena cercano a las rocas volcánicas del Terciario de asociación basalto-andesita-riolita así como sus equivalentes plutónicos.

Información obtenida en "Copper Geology and Economics", Robert Bowen y Ananda Gunatilaka; p. 64-114.

### III.2. YACIMIENTOS PIROMETASOMÁTICOS

#### III.2.1. PARAGENESIS, MINERALOGIA Y QUÍMICA

Los yacimientos pirometasomáticos o skarn, son bastante variados por la asociación mineral que se presenta en ellos, ya que se conocen menos de casi todos los metales a excepción de cromo, antimonio y mercurio (Smirnov - op. cit.). Con respecto al cobre, los yacimientos más comunes pertenecen a este tipo.

Desde el punto de vista mineralógico y de la roca encajonante se les asocia con rocas carbonatadas (calizas, margas y dolomías); en la inmensa mayoría de los casos estas rocas son transformadas a tactitas, skarns y rocas

silicatadas, derivadas de la zona de contacto de cuarzo-monzonitas o granodioritas con calizas.

Los minerales de mena son: calcopirita, esfalerita, pirrotita, molibdenita, arsenopirita, bornita, cubanita; como minerales de ganga: wollastonita, piroxenos, magnetita, granate, calcita, tremolita, escapolita, feldespato potásico, etc. Algunos elementos importantes con los que se asocian estos yacimientos son: fierro, plomo, --- zinc y molibdeno.

### III.2.2. ALTERACION SUPERGENICA

La alteración supergénica en los yacimientos pirometasomáticos se da por encima del nivel freático, donde el agua viene cargada de oxígeno y anhídrido carbónico atmosférico. Estos atacan a los compuestos contenidos en los minerales de las rocas y dan una zona alterada conocida como zona de oxidación.

Las reacciones que se producen entre los minerales del intrusivo, de la roca calcárea y del agua meteórica dan lugar al sulfato de cobre y al sílice coloidal que originan a la crisocola. La reacción química del sulfato de cobre y las rocas carbonatadas forman carbonatos de cobre como la malaquita y la azurita.

Estos minerales pueden ser eficientes guías mineralógicas, ya que aparecen generalmente arriba de los sulfuros secundarios que dan lugar a ricos yacimientos.

### III.2.3. LITOLOGIA

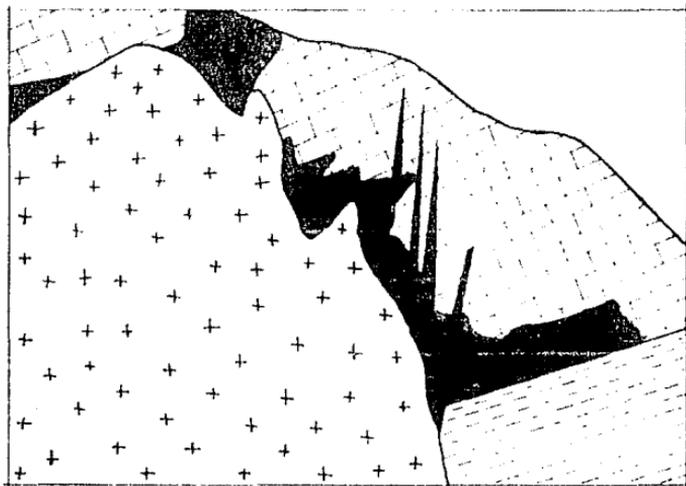
El metasomatismo de contacto que da origen a yacimientos de cobre está restringido a la composición, volumen y profundidad del intrusivo. Los cuerpos cupríferos están asociados a la zona de contacto de granodioritas, cuarzomonzonitas y plagiogranitos que constituyenlos derivados ácidos del magma basáltico. Como roca encajante se tienen principalmente dolomías y calizas aunque se han encontrado yacimientos asociados a rocas volcánicas carbonatadas. (Fig. III.7).

### III.2.4. ESTRUCTURAS

Los yacimientos pirometasomáticos no constituyen un anillo contínuo en torno al cuerpo intrusivo, se forman donde el contacto magmático atraviesa rocas más favorables para la formación del skarn, siempre y cuandol exista la estructura geológica garantizadora del proceso. Las rocas más favorables para la formación de menas de cobre son las rocas calcáreas, seguidas por rocas eruptivos con alto contenido de carbonatos.

CORTE TRANSVERSAL DE UN YACIMIENTO DE SKARN

(SEGUN SMIRNOV (1981))



SIN ESCALA.



CALIZAS



CUARZO DIORITAS.



PORFIRITAS EFUSIVAS Y SUS TOBAS.



SKARN CUPRIFERO



DIQUES PORFIRITICOS-DIORITICOS.

UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA.  
CIENCIAS DE LA TIERRA.

CORTE TRANSVERSAL DE UN YACI-  
MIENTO DE SKARN.

ARROYO OSORNO E.

GARCIA GARCIA H.

BAUTISTA GONZALEZ A.

RODRIGUEZ GUTIERREZ A.

CERON SANTILLAN C.

RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.

TESIS PROFESIONAL

1990

FIG. N° III 7

Los depósitos se encuentran diseminados irregularmente alrededor del contacto y tienden a una mayor acumulación donde la intrusión buza con mayor suavidad en relación a la estratificación.

De esta manera los yacimientos se localizan principalmente en los planos de estratificación o sea en distancias horizontales al contacto.

La estructura geológica del skarn la determinan -- elementos:

- a) La superficie de contacto de la roca intrusiva con la roca encajonante.
- b) La estratificación de las rocas encajonantes
- c) Las fisuras tectónicas que atraviesa tanto la roca calcárea como la encajonante en la zona de contacto.

Las menas de cobre asociadas a skarn son de explotación difícil, debido a su caprichosa distribución dentro de la aureola de contacto y a sus abruptas terminaciones, presentándose estratificadas, en forma lenticular o en chimeneas y stocks.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

### III.2.5. GEOLOGIA HISTORICA

Los yacimientos de skarn se forman a lo largo de todo el ciclo geosinclinal del desarrollo geológico y después de su terminación en condiciones de plataforma. Los depósitos de hierro, cobre y cobalto pertenecen al estadio temprano del desarrollo geosinclinal y se asocia con plagiogranitos y plagiocienitas que constituyen derivados ácidos y alcalinos del magma basáltico; estos cuerpos intrusivos se encuentran dentro de los límites de las fosas.

### III.2.6. GENESIS DEL YACIMIENTO

El skarn calcáreo es el más difundido de los yacimientos pirometasomáticos de cobre y se forma al combinarse las calizas con los cuerpos intrusivos silíceos con un elevado contenido de agua.

Puesto que el agua es en el magma, el principal recolector y transportador de metales, su poco contenido en las rocas básicas explica, los escasos yacimientos pirometasomáticos en contacto con éstas.

Los minerales económicos se forman como el resultado de la acción combinada del calor de la intrusión y -

las soluciones gaseosas mineralizadas.

Los yacimientos no sólo se desarrollan en la roca inmediata a los cuerpos intrusivos, sino también ellas mismas son sustituidas. Como resultado del contacto se forman, cuarcitas, mármoles y rocas skarn que es donde se localiza la mineralización.

Las temperaturas en el contacto inmediato de los magmas silíceos y calizas para la formación de minerales de cobre debe oscilar entre 500° y 1100°C. Lejos del contacto, la temperatura disminuye gradualmente debido al efecto de la roca calcárea, como también por el lento enfriamiento de la intrusión.

### III.2.7. PRINCIPALES EJEMPLOS

Clifton, Marisville, Morency, Bisbee y Bingham - - (E.U.A.) Cananea, Son., Concepción del Oro, Zac., La Negra, Qro., Santa María de la Paz, Matchuala, S.L.P. (México). Bonat (Rumania). Turia, Frolubsky (U.R.S.S.). - - Suan (Corea).

### III.3. YACIMIENTOS VULCANO-SEDIMENTARIOS

#### III.3.1. PARAGENESIS MINERALOGICA Y QUIMICA

Los yacimientos vulcano-sedimentarios o depósitos de sulfuros masivos tienen una amplia distribución en el tiempo y en el espacio, se encuentran del Precámbrico al Reciente.

Desde el punto de vista composicional los sulfuros masivos son aquellos que se encuentran constituidos por más de un 60% de sulfuros. Estos yacimientos incluyen otros minerales como óxidos, carbonatos, silicatos, etc.

Entre los principales elementos metálicos se encuentran: zinc, plomo, cobre, fierro, bario, cadmio, mercurio, bismuto, cobalto y estaño. Algunos yacimientos contienen todos estos elementos, pero en muchos otros, uno o más, están ausentes. Sin considerar el fierro que es el elemento más abundante, pero no el más económico de estas menas. Las relaciones Cobre-Zinc-Plomo son las más abundantes.

Los sulfuros más importantes son la pirita, la esferalerita, galena, pirrotita y la tetraedrita, la plata está contenida en la tetraedrita y es menos común en la

galena.

El oro al estar presente con valores económicos -- ocurre como metal nativo o electrum.

Como minerales de ganga se tienen el cuarzo, la -- calcita, la barita y en muchos depósitos la clorita y -- la sericita son los más comunes (Sato, 1977).

### III.3.2. ALTERACIONES SUPERGENICAS

Sí se acepta que los compuestos de cloro son el me -- dio de transporte principal de los metales de mena; el -- depósito y precipitación de estos puede ser causado por -- uno o por la combinación de los siguientes efectos:

- a) Disolución de las menas con relación al -- cloro.
- b) Descenso de temperatura
- c) Aumento del pH
- d) Aumento en la concentración de azufre

Se sabe poco acerca de las condiciones físico-quí -- micas de las soluciones que forman los depósitos de sul -- furos masivos. Una excepción son los depósitos tipo -- Kuroko para los que la naturaleza de las soluciones es -- bastante bien conocida. Tales soluciones tipo Kuroko -

se estima que tuvieron temperaturas variando de 200° a - 250°C. y pH entre neutral y ligeramente ácido.

Muy bajas fugacidades de oxígeno y concentraciones de cloro, dos o tres veces mayores que las del agua marina normal (Sato 1977).

Las soluciones al tener contacto con el agua de mar, son enfriadas y oxidadas; la disolución se verifica también cuando la solución de mena es más salina que el agua de mar. El descenso de temperatura es la causa más importante de los depósitos vulcano-sedimentarios, porque los efectos de la temperatura en la solubilidad de los sulfuros es muy grande.

### III.3.3. LITOLOGIA

Los yacimientos vulcano-sedimentarios están asociados en todas partes a la asociación vulcanogénica de espilita-ceratófido o de diabasa-albitófido submarinas del estadio temprano del desarrollo de los eugeosinclinales.

Este grupo abarca un amplio margen de ocurrencia -- que incluye depósitos encajonados por rocas sedimentarias marinas sin rocas volcánicas asociadas y depósitos asociados a rocas volcánicas y sedimentarias.

### III.3.4. ESTRUCTURAS

Estos yacimientos se localizan en franjas regionales de rocas vulcanogénicas controladas por fallas profundas, derivadas desde la zona de Benioff, que determina la posición geológica y las particularidades de su estructura interna. Son gargantas tectónicas que surgen en el estadio temprano del ciclo eugeosinclinal y dejan de existir hacia el estadio medio del ciclo geosinclinal (Smirnov, op. cit.).

Estas fallas de naturaleza tectónica-volcánica pueden ser longitudinales, transversales y diagonales respecto al plano general de las estructuras tectónicas. Su forma depende en general de la disposición de la unidad sedimentaria que la contiene y es común encontrarlos estratificados, formando lentes alineados de distintos tamaños. Algunas veces acompañados de un enrejado de vetillas o stokwork.

### III.3.5. GEOLOGIA HISTORICA

La formación de menas vulcano-sedimentarias sucede a lo largo de el estadio geosinclinal y abarca un período muy prolongado.

Estos yacimientos no se dan en forma continua, sino

de un modo intermitente con arreglo a la repetición de - los ciclos de actividad volcánica en las marcas del estadio temprano del ciclo geosinclinal, tales ciclos pueden repetirse hasta tres veces.

Las zonas de vulcanismo con el tiempo se desplazan de un bordo geosinclinal a otro, debido a esto, tiene lugar un corrimiento de las fajas de yacimientos de sulfuros que conforman series de cadenas metalíferas cada vez más jóvenes.

Las regiones volcánicamente activas son: arcos insulares, dorsales oceánicas, cuencas intracontinentales, - plataformas continentales; se localizan en provincias del Precámbrico Temprano, Escudo Canadiense y Australia.

### III.3.6. GENESIS

La característica que distingue a este grupo de yacimientos es la acumulación de sulfuros minerales estratiformes, los cuales se forman cerca o sobre el piso - - oceánico por precipitaciones próximas o distantes a los sitios de descarga.

En general, en la historia de los yacimientos vulcano-sedimentarios se distinguen tres etapas:

Primera Etapa: Está condicionada a soluciones gaseosas ácidas de alta temperatura que contienen agua, ácidos carbónicos y azufre. Se presentan en forma de  $S$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$  y  $CoS$ , como por cloro, flúor o hidrógeno. En ellos se encuentra disuelto silicio, aluminio, metales alcalinos y alcalinotérreos, así como elementos metálicos. En esta etapa no se produce un aporte notable de sustancias pero se da un agrupamiento intenso de la masa mineral de la roca vulcanogénica a través de las cuales fluyen las soluciones. Es aquí donde surge la columna metasomática de roca hidrotermalmente alterada, las cuales están representadas por cuatro zonas: la cuarcita, de cuarzo-sericita, de sericita-clorita y clorita o propilítica, esta va en función del canal conductor de la mena.

Segunda Etapa o Pirítica: Durante esta etapa se acumulan los sulfuros de fierro abajo de soluciones hidrotermales que siguen circulando a lo largo de las cuarcitas y las rocas cuarzo-sericíticas más lixiviadas, cuya porosidad aumenta con respecto a la roca inicial. Esta se eleva proporcionalmente al incremento de la clorita y sericita en la roca alterada hidrotermalmente. En esta etapa la química cambia radicalmente al comenzar las soluciones supersaturadas con iones de azufre y fierro y da lugar a la formación de marcasita, pirita y pirrotita.

A medida que disminuye la acidez del medio de formación de mena, los sulfuros de fierro son desplazados por los óxidos de fierro y quedan aún estables los sulfuros de cobre; lo cual puede traer consigo la transición de las menas de calcopirita y las de hematita-cobre que es característico para los flancos de ciertos yacimientos vulcano-sedimentarios.

Tercera Etapa: En ésta, las soluciones han reaccionado con compuestos sulfurosos de fierro acumulados en la segunda etapa de la formación de menas, estos son sustituidos en parte y redepositados en forma de sulfuros de cobre, zinc, plomo y cobres grises. (Fig. III.8).

### III.3.7. EJEMPLOS

Kuroko (Japón); Fúi (Filipinas); Columbia Británica; Tasmania; Escudo Canadiense, Río Tinto (España); Chipre; Captain Flat, Australia; y Copper King, La Dicha, (México).

## III.4. YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS

### III.4.1. PARAGENESIS, MINERALOGIA Y QUIMICA

Los materiales sedimentarios proceden principalmente de la meteorización de las rocas, así como de la meteoriza

- A- CAPA INTERMEDIA DE HEMATITA, CUARZO Y PIRITA
- B- CAPA DE SULFUROS SEDIMENTARIOS DE MENA KUROKO Y OKO
- C- MENA DE YESO (SEKKOKO)
- D- DEPOSITO EN STOCKWORK Y DE RELLENO DE FISURAS (KEIKO) Y MENA EMPLAZADA EN ROCA VOLCANICA.

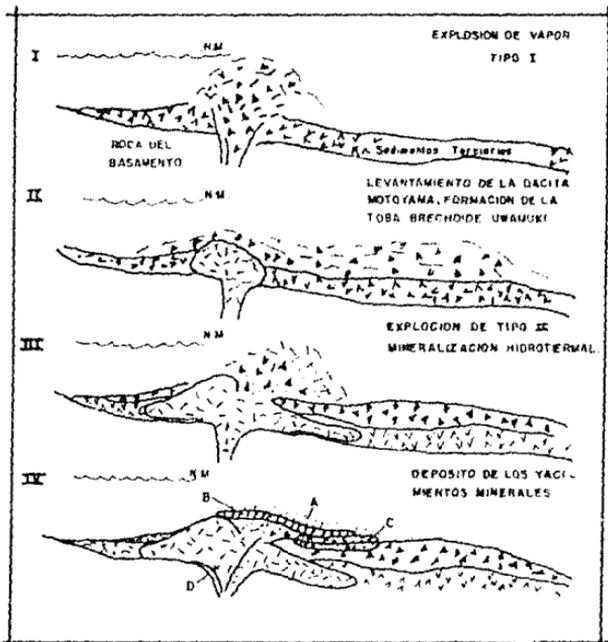


Fig III B FIGURA ESQUEMATICA QUE MUESTRA LA HISTORIA DEL DESARROLLO DEL VOLCAN KOSAKA Y LOS DEPOSITOS KUROKO ASOCIADOS A UN CICLO ERUPTIVO SIMPLE SEGUN HORIKOSHI.

(SEGUN TAKEO SATO, 1977)

TESIS PROFESIONAL: ARROYO OSORNO E., BAUTISTA GONZALEZ A., CERON SANTILLAN C., GARCIA GARCIA H., RODRIGUEZ GUTIERREZ A., RUBINSTEIN JIMENEZ F.M. 1990.

ción y oxidación de depósitos minerales anteriores y los últimos pueden pasar por una fase orgánica. La acumulación de sedimentos se realiza en el fondo de lagos, ríos, mares y pantanos que a la postre dan origen a yacimientos sedimentarios. Estos pueden ser de tipo mecánico, químico o bioquímico.

Esencialmente los yacimientos sedimentarios de cobre están asociados a la acumulación de grandes cantidades de materia orgánica, carbonatos, fosfatos y sílice. Simultáneamente se precipitan soluciones coloidales a las cuales se les van adicionando elementos como el cobre, fierro y manganeso.

Como minerales de mena finamente diseminados se hayan: bornita, esfalerita, calcocita, pirita, calcopirita, galena y menos frecuente plata nativa, argentita, además algunos elementos que entran en composición con minerales de mena que son: el vanadio, molibdeno, níquel, platino, paladio y reinio. Como minerales de ganga se tiene: calcita, anhidrita, cuarzo, calcedonia y arcillas.

#### III.4.2. ALTERACIONES SUPERGENICAS

El orden de precipitación de los diferentes compuestos en lagos, pantanos, mares y ríos depende de una serie

de factores químicos que incluyen el pH y el Eh del agua, descomposición bacteriana y la reducción de los sulfatos en solución.

La alteración supergénica se realiza en el período de la diagénesis, específicamente en la sindiagénesis que es donde empieza la transformación química del limo húmedo saturado de bacterias y la acumulación de componentes menores de la roca intemperizada. La diagénesis produce el equilibrio físico-químico del sedimento primario inestable en condiciones termodinámicas del fondo del mar.

El estadio o período más importante de la diagénesis es donde la acumulación de cobre se realiza por medio de organismos que absorben activamente, el oxígeno libre para luego reducir hidróxidos de  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ , en sulfatos, por ello el medio de oxidación se convierte en medio de reducción.

Las fases sólidas de  $SiO_2$ ,  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$  y  $SrCO_3$  y otras sustancias, presentes en el precipitado, al permanecer largo tiempo en el agua no saturada se disuelven poco a poco y alcanzan de este modo el estadio de soluciones saturadas.

Los cationes que son absorbidos por los coloides de los minerales arcillosos y los cationes de agua limosa, --

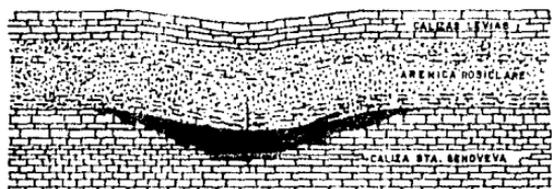
producen un intercambio que trae consigo soluciones limpias y muchos microelementos: como el cobre, que se enriquece con las soluciones referidas (Smirnov op. cit).

#### III.4.3. ASPECTOS ECONOMICOS

El mineral de cobre que se presenta en este tipo de yacimientos, en forma de sulfuros y cobre nativo, es económicamente explotable si tiene un contenido mayor de 0.02%, siendo el promedio mundial de 0.33% con algunos contenidos menores de cobalto, níquel, molibdeno, hierro, plomo y zinc.

#### III.4.4. LITOLOGIA

Estas condiciones de sedimentación se dan con cambios radicales primero: capas delgadas de areniscas calcáreas - seguidas de lutitas bituminosas y los minerales que constituyen los depósitos económicos continúan con estratos de caliza marina más o menos margosa. Generalmente se presentan en una serie sedimentaria transgresiva que va desde los epiclásticos gruesos hasta las evaporitas. (Fig. III.9).

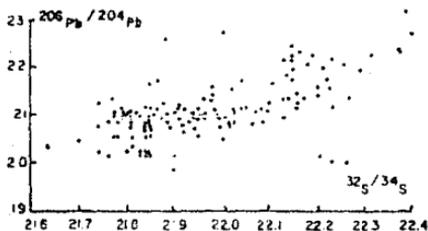


CUERPO MINERALIZADO SIMETRICO CERRADO A LA FIS CENTRAL



CUERPO MINERALIZADO A UN LADO DE LA MENOR FALLA 10 ESCALA

FIG. 9 SECCION ILUSTRATIVA QUE MUESTRA LA OCURRENCIA DE ALGUNOS YACIMIENTOS DE Pb - Zn EN CALIZAS EN LAS CUALES LA TECTONICA PARTICULAR Y LAS CONDICIONES SEDIMENTARIAS COINCIDEN, EJEMPLOS DE ESTE TIPO ES EN EL DISTRITO DE LA ROCA DEL SUR DE ILLINOIS



RELACION ENTRE  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  Y  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  EN UNA VARIEDAD DE EJEMPLOS DE CALEHA EN DEPOSITOS AL S.E. DE MISSOURI (MODIFICACION DE AULT Y KULP ECON.GEOL. 1960)

TESIS PROFESIONAL: ARROYO OSORNO E, BAUTISTA GONZALEZ A, CERON SANTILLAN C, GARCIA GARCIA H, RODRIGUEZ GUTIERREZ A, RUBINSTEIN JIMENEZ F.N. 1990

### III.4.5. ESTRUCTURAS

Los yacimientos de cobre sedimentario se presentan en capas de lutitas y limonitas de espesores que varían de 0.20 a 4 m producto de barros marinos, también en sedimentos tobáceos marinos dispuestos en pendientes suaves.

En los yacimientos de Mendalf, R.D.A. la mineralización se localiza en limonitas cuyos espesores van de 0.20 a 1.00 m con intercalaciones de areniscas y conglomerados en extensiones de varios kilómetros con diseminaciones de bornita, esfalerita, calcocita, tetraedrita y cobre gris\_ (Bateman Op. Cit).

Los yacimientos de El Boleo, en México, se localizan en una toba alterada con diseminaciones de calcocita, bornita y calcopirita, asociada con minerales de arcilla - - (Bateman, Op. Cit.).

Depósitos cupríferos denominados "Red Bed", U.S.A. - se les ha clasificado a menudo como sedimentarios, pero - como la mayoría de estos sedimentos presenta pruebas convincentes de que los minerales de cobre son de origen epigenético o hidrotermal, por ello en su clasificación todavía hay discrepancias.

### III.4.6. HISTORIA GEOLOGICA

Las condiciones de sedimentación se dan en barros marinos de poca profundidad o en zonas pantanosas, cerca de la costa donde las plantas terrestres son acarreadas a -- cuencas de putrefacción. Las soluciones cupríferas penetran probablemente en forma de sulfatos derivados de la -- oxidación de minerales producto del intemperismo de las -- montañas aledañas a la costa o cuencas de acumulación. -- Estas condiciones de sedimentación se dan con cambios radicales, primero: Capas delgadas de areniscas calcáreas -- seguidas de lutitas bituminosas y los minerales que constituyen los depósitos económicos continúan con estratos -- de caliza marina más o menos margosa. Generalmente se -- presentan en una serie sedimentaria transgresiva que va -- desde los epiclásticos gruesos hasta las evaporitas.

### III.4.7. GENESIS DEL YACIMIENTO

El origen sedimentario singenético sostiene que el mineral fue depositado en un mar poco profundo con vegetación en descomposición y precipitación de sustancias metálicas de los organismos marinos muertos.

Los limos negros donde se deposita este tipo de yacimientos contienen diseminaciones de sulfuros de fierro, -

cobre, molibdeno, óxidos de uranio y vanadio.

El origen del mineral es considerado como producto de la interacción del agua marina metalífera con materia sulfurizante del fondo del mar. Los limos cupríferos en algunos yacimientos se presentan en filones que aparentemente son producto de la actividad hidrotermal.

Para todos los ejemplos faltan datos que aseguren su origen ya que algunos autores opinan que el cobre fue extraído de capas superiores por aguas superficiales. El cobre fue depositado en las capas de arcilla como sulfuro, por ello su posible origen es hidrotermal.

#### III.4.8. PRINCIPALES EJEMPLOS

Las lutitas devónicas de la Formación Chintonga y los Red Bed, Estados Unidos; Kupershofer, Mansfeld, Alemania Democrática y el Bolco, México, este tipo de yacimientos de cobre son poco difundidos.

### III.5. MANTOS Y CHIMENEAS

#### III.5.1. INTRODUCCION

Un gran número de los yacimientos más conocidos e importantes del país están ubicados hacia el oriente, norte y noroeste. Estos yacimientos cuentan con una paragénesis polimetálica (Ag-Pb-Zn-Cu) y presentan estructuras en forma de mantos y chimeneas.

Con estos yacimientos se puede definir un modelo muy característico de mineralización donde también ocurre el cobre. Además de las estructuras, se caracterizan por la similitud en: rocas encajonantes, paragénesis, zoncamiento, asociaciones con rocas ígneas, historia geológica, -- etc.

En la mayoría de los distritos mineros, se presenta, también, la mineralización alojada en vetas; sin embargo, en muchas ocasiones estas no son explotables con rendimiento económico (Zimapán, Hgo.).

#### III.5.2. MINERALOGIA

La paragénesis de la mineralización en este modelo de yacimientos está conformada por una asociación de sulfuros que, en importancia relativa pueden ser mencionados

de la siguiente manera.

Galena, esfalerita, pirita, calcopirita, arsenopirita y en ocasiones marcasita. En la distribución de los minerales se presenta, a menudo, un zoneamiento vertical con abundancia de Pb-Ag en la superficie; con la profundidad se incrementa el zinc y se empobrece el plomo y la plata; posteriormente el contenido de zinc decrece y aumenta el cobre. En los niveles de mayor temperatura, pueden estar asociados a skarns y en este caso se presentan algunos minerales como: pirrotita, tenantita, tetraedrita, magnetita y oro. En las zonas de menor temperatura suelen ocurrir: acantita, cinabrio, estibinita, rejalgar y sulfosales de plata (platas rojas).

Aunque se presentan algunos minerales de plata (platas rojas, argentita, etc.), el mayor contenido de plata ocurre en la galena a manera de oligoelemento.

Los minerales de ganga se presentan comunmente en una asociación formada por carbonatos y cuarzo. En menor cantidad, también pueden presentarse: fluorita, barita, anhidrita y minerales más raros como adularia, paligorski ta, zeolitas, etc..

### III.5.3. ALTERACIONES:

Las alteraciones supergénicas son a menudo notables en este modelo de yacimientos y permiten su localización de una manera bastante sencilla. En tal caso es factible encontrar claramente una zona de oxidación o sombrero de hierro que corresponderá a la parte superior, intemperizada, de la mineralización con toda la asociación de minerales oxidados propios de esta zona. Posteriormente se presentará el área de enriquecimiento supergénico y con mayor profundidad la de sulfuros primarios. Con la aplicación de estos criterios, aunque de forma totalmente empírica, se descubrieron célebres distritos mineros en el país; como ejemplo pueden citarse Fresnillo, Zac., Santa María de la Paz, etc..

Sin embargo, no siempre se presentan estas características. Las chimeneas llegan a tener expresiones superficiales muy tenues, que sólo con estudios estructurales y litológicos muy cuidadosos podrán detectarse.

Entre los minerales de oxidación pueden señalarse además de la limonita los siguientes minerales de oxidación:

Cobre nativo  
Cuprita  
Tenorita  
Minio  
Zincita  
Cerusita

Malaquita  
Azurita  
Crisocola  
Brocantita  
Tenantita

Con esta asociación puede llevarse a cabo una prospección minera; debe analizarse con cuidado no sólo la mineralogía de las zonas alteradas sino también las estructuras, con objeto de detectar los "sombrosos desplazados".

#### III.5.4. LITOLOGIA:

Los yacimientos polimetálicos que ocurren en mantos y chimeneas se encuentran generalmente en rocas sedimentarias del Jurásico-Cretácico. A menudo se encuentran fuertemente plegadas y alcanzan varios miles de metros de espesor; en general, están formados por series de calizas monótonas, de plataforma con algo de dolomita diseminada. La mineralización ocurre en estas series calcáreas con principal incidencia en las áreas dolomitizadas.

El basamento de las series carbonatadas consiste en algunas ocasiones de un conglomerado rojo, de origen continental perteneciente al Triásico; tal es el caso de las mineralizaciones del oriente del país, como Concepción del Oro; en otras ocasiones, las rocas subyacentes son

series sedimentarias del Paleozoico o Precámbricos, a me  
nudo con un cierto metamorfismo.

Por otra parte, las series carbonatadas subyacen, -  
en algunos distritos mineros a un vulcanismo terciario -  
formado por series calco-alcalinas con rocas andesíticas  
y dacíticas y por un vulcanismo, explosivo de composi---  
ción riolítica (Ignimbritas). A menudo, estas ignimbri-  
tas descansan directamente sobre las series carbonatadas,  
como sucede en Santa Eulalia, Chih..

Por tanto, el marco geológico del modelo de yaci-  
mientos polimetálicos, se encuentran bien definido, por\_  
lo menos en los diferentes distritos mineros del territo-  
rio Nacional.

### III.5.5. ESTRUCTURAS:

Este modelo de yacimientos mineralizados se ha de-  
signado precisamente con el nombre de las estructuras --  
que presentan. Por tanto, las estructuras principales -  
son mantos y chimeneas. Es necesario señalar que, en la  
mayoría de los distritos existen también vetas. Sin - -  
embargo, en general estas últimas no tienen mucha impor-  
tancia económica. Por ejemplo: En Zimapan, Hgo., las ve  
tas no son explotadas por el alto costo que representan\_

los trabajos de minado subterráneo por el bajo tonelaje y las bajas leyes.

Las chimeneas son cuerpos tabulares con sección - aproximadamente circular y en ocasiones elíptica. Tienden a tener una posición vertical con una ligera inclinación. La sección horizontal de las chimeneas suele ser de unos cuantos metros hasta grandes cuerpos de - - cientos de metros cuadrados. Con respecto a su altura, también pueden ser de unos cuantos metros hasta mayores de mil metros como Concepción del Oro en Zacatecas.

Los mantos se presentan interestratificados con - el resto de la serie sedimentaria de la roca encajonante y pueden ocurrir en las variadas dimensiones, desde - lentes de unos cuantos metros, hasta verdaderos estratos de varias decenas de metros de largo y ancho. Además, su posición variará con la estructura particular - de las rocas encajonantes del yacimiento.

La mayoría de los yacimientos minerales que pertenecen a este modelo han sido considerados, por lo menos en México, como yacimientos de reemplazamiento; sin - - embargo, existen numerosas pruebas de que un gran número de ellos, se formaron por relleno de zonas kársticas.

Las diferentes estructuras pueden estar conecta--

das entre sí. Es decir, algunos mantos estarán conectados con vetas o con chimeneas: sin embargo, lo más común es que existan las estructuras aisladas dentro de los -- distritos mineros. Tanto chimeneas, como mantos y vetas se presentan diseminadas en los campos mineralizados. La localización de estos cuerpos está en función con los -- rasgos tectónicos, mineralógicos, etc., es decir, con -- los diferentes metalotectones particulares de cada distrito minero.

Por otra parte, es necesario señalar que existen algunas estructuras menores en diferentes distritos mineros que pueden ayudar para la prospección. Estas estructuras no están de ninguna manera generalizadas y por tanto, es necesario llevar a cabo una cuidadosa investigación en cada distrito pues, al ponerlas en evidencia, se adquieren excelentes criterios para la prospección. A -- continuación se mencionan algunas de ellas.

- En Zimapán, Hgo.:

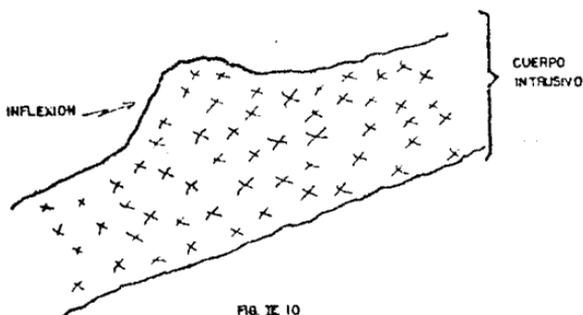
Precisamente en la mina de Lomo de Toro, en el -- área del Carrizal: una capa gruesa de la caliza de la -- Formación Doctor presenta óptimas condiciones para encerrar cuerpos mineralizados.

En el mismo distrito, pero en la zona de la Compañía San Miguel, un amontonamiento de vetillas rellenas --

de calcita, indica la vecindad inmediata de buenas chimeneas.

- En Santa Eulalia, Chih.:

En el área del Potosí ocurren en ocasiones ciertas inflexiones o tal vez ciertos incrementos locales, en los cuerpos intrusivos, como se observa en la (Fig. III. 10); estas irregularidades se presentan generalmente en la vecindad inmediata de los cuerpos mineralizados.



### Inflexión en el área de Potosí

En la prospección minera de este modelo de yacimiento será necesario hacer cuidadosas observaciones para poner en evidencia este tipo de rasgos que servirán para la localización de nuevos cuerpos mineralizados.

En el modelo de yacimientos asociados a mantos y chimeneas, es común encontrar diversas zonas en un mismo

distrito minero con respecto a la roca encajonante, temperatura y naturalmente en la estructura. En algunos depósitos es distintivo y claro el paso de la zona piroetasomática, formada por "skarn" más o menos mineralizado, a la zona llamada hidrotermalismo. En las áreas de "skarn" es común encontrar cuerpos bastante irregulares; posteriormente, en las partes no metamórficas, la mineralización pasa a las chimeneas o a los mantos; en ocasiones, las mismas estructuras se conectan en ambas zonas.

#### III.5.6. ORIGEN:

Desde un punto de vista que puede catalogarse como "clásico", este modelo de yacimientos minerales se ha considerado como hidrotermal de mediana temperatura o "mesotermiales" según la terminología de W. Lindgren y sus seguidores. En esta teoría, se propone la mineralización que es emitida por un cuerpo granítico, en numerosas ocasiones hipotético; los granitos "sensus latius", serían las emisiones de ciertas soluciones hidrotermales creadoras de los cuerpos mineralizados.

Las concepciones modernas a cerca de la génesis, para estos cuerpos mineralizados, están ya muy lejos de las ideas anteriores. En un estudio sobre Fresnillo en el estado de Zacatecas, el Dr. Eduardo González Partida (1) -- (1) GEOMIMET 1984.

analiza el problema genético. Aunque puede haber variaciones, se piensa que la génesis descrita es bastante -- ilustrativa a cerca de las ideas modernas que ya se tiene para la formación de estas mineralizaciones. En este -- trabajo se analiza cuidadosamente la termometría por medio de inclusiones fluídas y se llega a los siguientes - resultados:

Chimeneas	206°C a 383°C $\pm$ 55°C
Mantos	228°C a 300°C $\pm$ 5 °C
Diseminados	165°C a 295°C $\pm$ 5 °C
Vetas	146°C a 286°C $\pm$ 5 °C

Entre las hipótesis que menciona, según otros autores, el origen de los fluídos estaría en relación con una recirculación de aguas meteóricas a régimen convectivo -- activadas por el intrusivo cuarzo-monzonítico. Aunque se expresan algunas dudas, el autor afirma que en la literatura, en este tipo de yacimientos, el fluido hidrotermal\_ es de origen meteórico.

De aquí que los depósitos muestren un amplio rango\_ en sus rasgos geométricos de caras concéntricas de mineralizaciones cerradas, envolviendo stocks y diques. Los -- controles de mineralización que crearon estos yacimientos de interacciones entre las percolaciones de los fluidos:\_ son controles estructurales y unidades carbonatadas espe--

cíficas. Los principales elementos estructurales incluyen fracturas, fallas, fisuras, ejes de foliación, zonas de brechiación y contactos intrusivos. Los fluidos minerales son interpretados como migraciones verticales y laterales a lo largo de estas estructuras interconectadas, y la mineralización ocurre por la difusión interna de los fluidos y la reacción con las rocas carbonatadas almacenadoras. El relleno de los espacios abiertos sólo es de importancia local. Algunos autores como Norton (1988, Cuttite) concluyen que la permeabilidad de las redes de percolación serán muy significantes entre los sistemas y que la extensión y composición de la mineralización resultante, serán una función de su permeabilidad.

Es posible que lo más importante de estos depósitos sea el desarrollo de yacimientos extensos en intervalos estratigráficos limitados. La mineralización generalmente se encuentra bajo de demostrables capas impermeables, que se encuentran para confinar soluciones mineralizantes, junto a unidades carbonatadas. Estas barreras incluyen algunas unidades carbonatadas menos permeables, sills, horizontes de lutitas, y recubrimientos de rocas volcánicas. Algunas premineralizaciones, un poco más común fallas y fracturas estériles, atraviesan esas barreras.

Se ha determinado, en general, que los contrastes

de permabilidad entre las unidades son un factor dominante y el incremento de la permeabilidad secundaria es esencial para la formación de grandes cuerpos minerales.

Aunque los mantos están abrumadoramente compuestos de sulfuros masivos, minerales calco-silicatados están local y aisladamente presentes. Todas las chimeneas están compuestas enteramente de sulfuros masivos, pero algunas otras están formadas por cuerpos irregulares de silicatos de Fe y Ca.

### III.5.7. EJEMPLOS:

Moresnet, Bélgica, Luxemburgo; Rhenish y Sileria, Prusia; The Alpin Trias, Austria; Santander, España; Aspen y Leadville, Colorado; Eureka, Nevada; Lake Valley, New Mexico; Elkhorn, Montana; Park City y Tintic, Utah; Santa Eulalia y Naica, Chihuahua; Zimapán, Hidalgo; Providencia-Concepción del Oro y San Martín, Zacatecas; Charcas, Catorce y Cerro San Pedro, San Luis Potosí; Veillardaña y Mapimí, Durango; Sierra Mojada, Coahuila; y Taxco, Guerrero; etc., México.

### III.6. MODELO MISSISSIPPI VALLEY

#### III.6.1. GENERALIDADES

En el modelo del Valle de Mississippi (Mississippi Valley) el cobre no es un elemento muy abundante; sin embargo, como puede estar presente en pequeñas proporciones, se considera necesario exponer sus características en el presente trabajo.

El factor principal para la localización de estos depósitos es regional, y se refiere sobre todo a la paleogeografía (Antiguas líneas de costa, tipografía kárstica o del fondo marino, etc.). En algunos casos, se ha reconocido la presencia de grandes fallas que afectan el basamento, y que estuvieron activas durante y después de la sedimentación.

El desarrollo de superficies kársticas supone una cuenca carbonatada que se ensancha por hundimientos progresivos de los bordes, en donde se desarrolla una red de cavidades debidas al drenaje hacia la cuenca. Por tanto, es necesario definir una red kárstica.

La red kárstica.- Se considera como el conjunto de cavidades de erosión y disolución en una región determinada.

Lagay (1976) define dos tipos de redes paleokársticas de acuerdo a la morfología de la cuenca.

- 1.- Basamento Plegado: Las redes se originan a partir de discontinuidades de la estratificación inclinada y en las fracturas, la porosidad de las rocas (baja a muy baja) no juega un papel importante en el proceso de disolución.
  
- 2.- Paleokarst de las series de cobertura epicontinental: Las redes kársticas están dispuestas paralelamente a la estratificación de la roca encajonante.

Los yacimientos del Valle del Mississippi se presentan principalmente como cuerpos de relleno dentro de calizas del Paleozoico Inferior al Mesozoico Superior. La mayor parte de estos yacimientos ocurren en rocas calcáreas y bajo superficies de discordancia tanto angular como paralela, y una pequeña proporción en rocas arenosas y arcillosas; además, pueden formarse con mayor o menor intensidad de acuerdo a la actividad climática. Comúnmente la roca calcárea puede ser un arrecife (Biohermas), una brecha retrabajada o una calcarenita en las partes marginales de un arrecife.

Al parecer, ciertas soluciones portadoras de metales escasos Pb, Zn, Cu, etc. han disuelto las calizas y lentamente han depositado la galena, esfalerita y pirita que a menudo forman cristales grandes y hermosos. Hay -

que considerar, la posibilidad de migraciones durante la diagénesis de la cobertura sedimentaria transgresiva - - hacia el sustratum. Por lo general los yacimientos están lejos de cualquier actividad ígnea evidente.

Este modelo de yacimientos minerales fue definido por primera vez en el Valle del Mississippi, de ahí su nombre. Además, puede decirse que ha sido muy bien estudiado. En esta forma se determinó una provincia bien definida con la mineralización descrita.

La provincia se extiende desde Oklahoma y Missouri hasta el sur de Wisconsin. Se han identificado yacimientos afines en varias partes de Europa, norte de Africa, norte de Australia, la U.R.S.S., y más recientemente, - - Pine Point, en territorio del norte de Canadá.

Este último quizá sea el yacimiento más grande - - jamás descubierto, y puede pertenecer a la misma provincia metalogénica que los depósitos de los Estados Unidos.

Los depósitos ocurren en horizontes estratigráficos muy localizados en estructuras sedimentarias tales como arrecifes, zonas de cambios de facies, estructuras de compactación, en acuñamientos estratigráficos, en brechas de deslizamientos o de talud, en brechas de disolución - - (topografía Kárstica), etc.

Los minerales característicos de estos depósitos son: galena, esfalerita, barita y fluorita. Minerales -- accesorios comunes son la pirita y marcasita. La calcopi rita es común como componente menor o en trazas. Los mi- nerales de ganga son: calcita, aragonita, dolomita, y en - ocasiones, siderita, ankerita y sílice coloforme.

### III.6.2. ALTERACIONES DE LA ROCA ENCAJONANTE

Las cavidades paleokársticas se ven frecuentemente afectadas por una dolomitización y una silicificación más o menos acentuadas. Las dolomitizaciones, en la mayoría\_ de los casos, se consideran continentales y algunos auto- res suelen considerarlas como excelentes índices de pros- pección minera.

DOLOMITIZACION.- La dolomitización de las calizas\_ ocurre bajo un clima cálido y con una salmuera cuya rela- ción de Mg/Ca es de alrededor de 30. Es necesario una -- fuente de magnesio próxima a las áreas de dolomitización; la transferencia podría ocurrir por circulaciones hidráu- licas en un medio mal drenado y reductor. La dolomitiza-- ción de las calizas puede limitarse a la superficie de -- erosión de espesor variable. Estas características son - ampliamente observadas en Mississippi Valley, especialmen te en los distritos de Tennessee, en donde la mineraliza--

ción ocurre en las dolomitas con cuarzo y no en las calizas.

SILICIFICACION.- La silificación está ligada a superficies de erosión continental. Millot (1959) concluye que la silificación de las calizas se efectúa habitualmente en la calcedonia en las depresiones topográficas -- (en zonas de abatimiento o bajos), en condiciones semejantes a las del fenómeno de dolomitización.

### III.6.3. ALGUNAS CONSIDERACIONES RELACIONADAS CON LA MORFOLOGIA Y LA GENESIS DE ESTOS YACIMIENTOS.

- 1.- Los sulfuros tienden a favorecer sólo algunos horizontes o facies particulares, y a estar ausentes del resto de las masas carbonatadas.
- 2.- Las grandes fallas de escala regional pueden o no estar asociadas a estos yacimientos.
- 3.- Estudios de inclusiones fluídas (liquid inclusions), indican que las temperaturas de formación, abarcan un rango de 50° a 150°C, raramente sobrepasan los 200°C y comunmente son menores a 100°C. Además, los líquidos de los cuales se precipitan los sulfuros, eran altamente salinos (15% a 25% de sal) principalmente Na-Ca-Cl (Roeder, 1967).

- 4.- Algunas inclusiones fluídas poseen un alto contenido de metales pesados.
- 5.- Los principales sulfuros metálicos son de Pb y Zn (con fierro).
- 6.- La roca huésped contiene como accesorio materia orgánica.
- 7.- Los cocientes  $S^{32}/S^{34}$  no son los del azufre ígneo ( $S^{34} S + 0$ ) ni del azufre sedimentario ( $S^{34} S$  tiende a valores negativos). Estos son pesados y variables.
- 8.- La abundancia de isótopos de plomo sugiere una historia simple en algunos casos, y más compleja en algunos otros. (involucran contaminación migracional).
- 9.- Las fronteras de los granos de sulfuros son del tipo acrecional y de choque (impingement), no son "estructuras de equilibrio" indican que las temperaturas para formarlas (200°C para la galena) no han sido alcanzadas.

Staton (1972) toma en consideración estos hechos y concluye que las principales causas del origen son:

- 1.- Relacionadas a la sedimentación.
  - a).- Precipitación directa a partir del agua de mar.

- b).- Precipitación directa de exhalaciones submarinas.
  - c).- Sedimentación detrítica.
  - d).- Movimiento de material sedimentario de líquidos en los espacios porosos durante la compactación y subsecuente redepositación.
- 2.- Relacionadas a la actividad de soluciones exógenas.
- a).- Soluciones ígneas.
  - b).- Otras soluciones portadoras de metales de origen profundo.

#### III.6.4. ALGUNOS EJEMPLOS MEXICANOS DE ESTE TIPO DE YACIMIENTOS

Es difícil precisar la existencia de estos depósitos en el país, sobre todo en razón de estudios suficiente mente documentados que permitan definirlos; sin embargo, en la República Mexicana existen algunas áreas cuya edad abarca desde el Paleozoico hasta el Cretácico y que pueden estar relacionados con este modelo de yacimientos minerales.

Para el Paleozoico Superior pueden incluirse:

Los yacimientos de Pb-Zn del Lajerio, Chiapas, en calizas carboníferas, el ambiente de depósito de la barita de Sonora situada en calizas del Devónico podría tener relación con mineralización de este tipo.

El Mesozoico por su amplia distribución en México\_ contiene un gran potencial que se confirma con las numero\_ sas mineralizaciones observadas.

En la región de Plomosas en el estado de Hidalgo, \_ en la mina la Negra existe una cavidad paleokárstica re-- llena de minerales de Pb,Zn,Mn, limos y arcillas calcáreas en la caliza El Abra, situada casi en contacto con la For\_ mación Méndez. La mineralización se presenta estratifica\_ da en ciertos lugares de la cavidad, principalmente en la base, las capas de caliza El Abra presentan una inclina-- ción de 25° a 35°, mientras que la sedimentación intra-- kárstica es horizontal, una falla parece haber jugado un - papel muy importante en el desarrollo de la cavidad.

Las similitudes de la mina La Negra con la descrip\_ ción general paleokárstica son:

- a) Se localiza bajo una paleosuperficie de ero-- sión.
- b) La cavidad hasta donde ha sido observada pre-- senta una extensión más vertical que horizon-- tal y aún no se conocen todos sus límites.
- c) La dolomitización está presente en la caliza - en contacto con el karst.

Al norte de Ixmiquilpan, Hidalgo (sierra del Cardo\_ nal), existen unas calizas posiblemente de la Formación - El Abra (Albiano-Cenomaniano) que aparentemente contienen

mineralización paleokárstica de Pb, Zn y una gran cantidad de óxidos de Fe. Brechas de colapso con cementantes de óxido de Fe son comunes, los elementos de brecha varían en tamaño desde 1 cm hasta 1 metro. Las huellas de disolución en la caliza son claras (abundantes drusas); aquí, la extensión parece ser sobre todo más horizontal que vertical, la sedimentación intrakárstica es claramente observable y la dolomitización no es muy clara por la alteración pardo rojiza del Fe.

En el estado de Coahuila, específicamente en el área de Puerto Rico (al NW de Coahuila), la mineralización Pb-Zn-Ba, se encuentra asociada a los planos de estratificación en una estructura homoclinal; la disolución y fallamiento secundario en los planos es notable y llegan a formar cavidades con brechas de colapso en la caliza Cupido que es la que presenta las principales ocurrencias de mineralización, aunque se observan en menor proporción en la Formación Glenrose por lo que esta localidad sería un ejemplo de mineralización interstratos de acuerdo con Lagny (op. cit.).

Estos ejemplos aún cuando están muy lejanos unos de los otros, presentan características comunes entre sí:

- a) Se localizan bajo superficies de discordancia en períodos de actividad tectónica (epirogénica) importante.

- b) Las Formaciones El Abra, Cupido o sus equivalentes en edad se muestran favorables para con tener este tipo de yacimientos.
  
- c) El clima ha jugado un papel sumamente importan te en su formación.

### III.7. VETAS EN VOLCANICAS

#### III.7.1. INTRODUCCION

Muchos de los depósitos más grandes de metales base y metales preciosos, del mundo, ocurren como rellenos de fisura o depósitos de vetas polimetálicas, no necesariamente relacionados genéticamente con emplazamientos plutónicos (granitos); sin embargo, tienen una relación especial muy estrecha con rocas extrusivas de composición calco-alcalina. Tal es el caso de "Vetas en rocas volcánicas".

En el presente subtema serán analizados los yacimientos minerales asociados a rocas andesíticas y dacíticas del Terciario en México. Es necesario hacer notar que estos yacimientos son eminentemente argentíferos o auroargentíferos pero cuentan con la presencia de la asociación llamada "polimetálica" (Pb-Zn-Cu-Ag-Au).

#### III.7.2. MINERALOGIA

Los minerales de mena que se presentan en este tipo de depósito son los siguientes: Oro y plata nativos, sulfosales de plata, blenda, galena, calcopirita, cobres grises y bornita. La calcocita y la covelita ocurren como altera

ciones supergénicas.

El principal mineral de ganga es el cuarzo, la pirita, la cual también es un mineral de ganga, por lo general está parcialmente reemplazada por los demás sulfuros; aunque también se presentan arsenopirita, clorita, calcita, yeso y limonita.

### III.7.3. ALTERACIONES

- a) Hipogénicas: a menudo propilitización, cloritización, etc.
- b) Supergénicas, creación de sombreros de Fe: Au y nativos (además de los hipogénicos). Facilita la prospección.

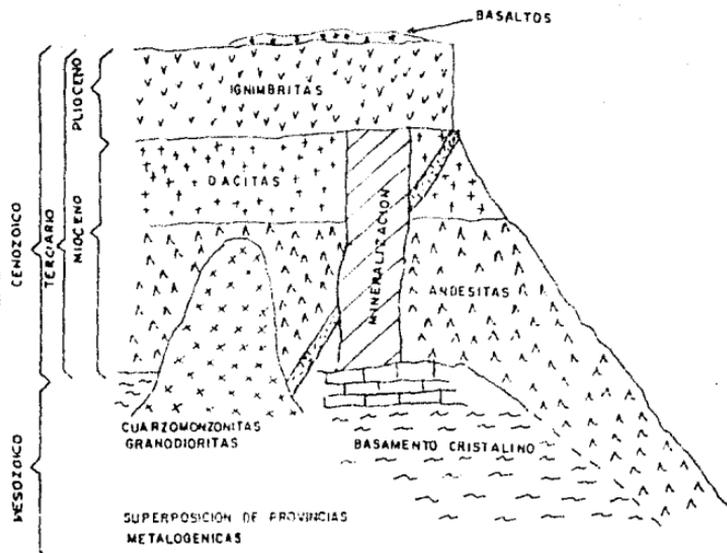
### III.7.4. GENESIS

Este tipo de depósito se encuentra enmarcado por rocas volcánicas pos-tectónicas en las zonas dentro de las cadenas circumpacíficas.

La mineralización es de carácter hidrotermal asociada al vulcanismo que tiene lugar en el momento de finalizar las extrusiones de tipo intermedio (andesítico-dacítico) y con anterioridad a las rocas ignimbríticas por tan-

to estas vetas se encuentran encajonadas en rocas volcánicas, calcoalcalinas y coronadas por las ignimbritas.

Los eventos que dan forma a estos yacimientos se suceden de la siguiente forma: sobre un basamento cristalino, sedimentario calcáreo, de tipo metamórfico se tiene el depósito de derrames lávicos (andesíticos) de carácter postectónico durante el Terciario Inferior. Dentro de estas andesitas se tiene el emplazamiento de los cuerpos plutónicos asociados a la mineralización cuprífera "pórfidos de cobre" (probablemente del Mioceno). Posteriormente continúan los derrames volcánicos pero ahora con composición predominantemente dacítica. Durante todos los eventos antes expuestos, el tectonismo fue sumamente violento en el área, lo que dio como consecuencia la formación de fallas a menudo rellenas de millonita (salbanda). Como consecuencia de este vulcanismo en las fases postdacíticas, se produce el emplazamiento de la mineralización a partir de fluidos hidrotermales y por último una fase final de tipo explosiva, de la cual se depositarán rocas de tipo ignimbrítico, las que finalmente servirán como tapón a la mineralización. (Fig. III.11).



Fuente: Trabajo inédito del Distrito Minero de  
Tahuehueto, Curango del Ing Germán A G  
1981

Sin escala

122

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CIENCIAS DE LA TIERRA.	
ESQUEMA GEOLOGICO GENERAL DE LOS YACIMIENTOS AUROARGENTIFEROS DEL TERCARIO VOLCANICO		
ARROYO OSORNO E	GARCIA GARCIA H	
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A	
CERON SANTILLAN C	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.	
TESIS PROFESIONAL	1990	FIG. N° III-II

### III.7.5. EJEMPLOS

Tahuehueto, Tayoltita, Durango; Cocula, Guerrero, -  
Ontario-Tintic-Mayflower, Utah; Front Range, Colorado; --  
Coeur D'Alene, Idaho; Quiruvilca-San Cristóbal-Casapalca-  
-Cerro de Pasco-Julcani-Morococha-Otras, Perú; Pachuca; -  
Guanajuato y Zacatecas.

### III.8. PRINCIPALES MODELOS DE YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MEXICO.

Con base en los diferentes modelos principales de -  
yacimientos, se han agrupado a los diferentes distritos -  
mineros mexicanos productores de cobre.

Se describen y agrupan a los diferentes depósitos -  
cupríferos dentro de un cuadro geológico que, aunque su-  
cinto, sea de lo más completo posible, con el propósito -  
de tener una idea clara de cada tipo de yacimiento y al --  
mismo tiempo puede que sea una buena ayuda para orientar -  
la prospección. (Fig. III.12 a III.18).

### III.8.1. PORFIDOS DE COBRE:

	<u>Mina</u>	<u>Estado</u>	<u>Mena</u>
1.	Caborca	Sonora	Cu
2.	Cananea	Sonora	Cu-Ag
3.	La Caridad	Sonora	Cu
4.	La Verde	Sonora	Cu
5.	Tecoripa	Sonora	Cu
6.	Alamos	Sonora	Cu
7.	Moctezuma	Sonora	Cu
8.	Nuevo Churumaco	Michoacán	Cu
9.	Inguarán	Michoacán	Cu
10.	San Isidro	Michoacán	Cu
11.	La Verde	Michoacán	Cu

### III.8.2. VETAS EN VOLCANICAS:

	<u>Mina</u>	<u>Estado</u>	<u>Mena</u>
12.	Quiriega o Peñas Verdes	Sonora	Cu
13.	San Martín	Zacatecas	Cu
14.	Minitas	Guerrero	Au-Cu
15.	Coyuquilla	Guerrero	Au-Cu
16.	Pueblo Viejo	Guerrero	Cu
17.	Ajuchitán	Guerrero	Cu

18.	Cerro Pinto	Guerrero	Au-Ag-Cu
19.	Olinalá (?)	Guerrero	Au-Cu
20.	La Dicha (?)	Guerrero	Au-Cu
21.	Ayutla	Jalisco	Cu
22.	Ameca	Jalisco	Cu
23.	El Barqueño	Jalisco	Cu
24.	Arteaga	Michoacán	Cu-Au
25.	El Marqués	Michoacán	Ag-Pb-Cu-Zn
26.	Oropeo	Michoacán	Cu
27.	Huetamo	Michoacán	Cu
28.	Tiámaro	Michoacán	Cu-Au
29.	Santa María del Oro	Durango	Au-Ag-Pb-Zn-Cu
30.	San Miguel de C.	Durango	Ag-Pb-Zn-Cu
31.	San Miguel	Durango	Cu-Sn
32.	Guanaceví	Durango	Ag-Au-Zn-Mn-Cu
33.	Terrero	Aguascalientes	Au-Ag-Cu
34.	Rincón de Ramos	Aguascalientes	Cu-Sn
35.	Tepezalá	Aguascalientes	Qz-Sn-Fosforita Cu-Au-Ag-Pb-Zn
36.	Asientos	Aguascalientes	Cu-Au-Ag-Pb-Zn-Sn
37.	El Chical	Colima	Cu
38.	Zacualpan	Colima	Cu
39.	Naica	Chihuahua	Cu-Ag-Pb-Zn
40.	Huautla	Morelos	Ag-Pb-Cu-Zn
41.	Mina Cuchara	Nayarit	Cu
42.	Cobre Grande	Oaxaca	Cu
43.	Natividad	Oaxaca	Au-Ag-Pb-Cu

44.	Teziutlán	Puebla	Cu-Ag
45.	Zautlán	Puebla	Ag-Au-Cu
46.	Acatlán	Puebla	Cu-Talco-Cr
47.	Temeapa	Sinaloa	Cu-Mo
48.	Tobora	Sinaloa	Au-Ag-Cu-Tu
49.	Concordia	Sinaloa	Au-Ag-Cu
50.	San Marcos	Sinaloa	Cu

### III.8.3. PIROMETASOMATICOS

<u>Mina</u>	<u>Estado</u>	<u>Mena</u>
51. Bustamante	Tamaulipas	Cu-Pb-Zn
52. Las Minas y Tatatila	Veracruz	Fe-Cu-Au
53. Concepción del Oro	Zacatecas	Au-Ag-Pb-Cu-Zn-Barita
54. Mezcala	Guerrero	Ag-Au-Cu
55. Velardeña	Durango	Ag-Pb-Zn-Cu-Sb
56. Cuencamé	Durango	Ag-Pb-Cu-Sb
57. El Sacrificio	Durango	Cu
58. Saforis	Durango	Fe-Cu
59. Encarnación	Hidalgo	Fe-Cu
60. Santa Fe	Chiapas	Fe-Cu-Ag-Au-Wollastonita
61. Simojovel	Chiapas	Cu-Ag-Au-Wollastonita
62. Santa Eulalia	Chihuahua	Au-Ag-Pb-Zn-Cu
63. Peña Miller	Querétaro	Ag-Pb-Zn-Cu
64. La Negra	Querétaro	Ag-Pb-Zn-Au-Cu-Hg
65. Pinal de Amoles	Querétaro	Hg-Au-Ag-Pb-Zn-Cu

66.	El Doctor	Querétaro	Hg-Au-Ag-Pb-Zn-Cu
67.	La Paz	San Luis Potosí	Au-Ag-Pb-Zn-Cu
68.	Guadalcazar	San Luis Potosí	Cu-Sn-Hg-Yeso-Arcillas aluminosas
69.	Chicharrones	Sinaloa	Cu-Mo
70.	Choix	Sinaloa	Cu-Fe
71.	Badiraguato	Sinaloa	Cu-Ni-Mo

#### III.8.4. VULCANO-SEDIMENTARIOS:

	<u>Mina</u>	<u>Estado</u>	<u>Mena</u>
72.	Cerro Pinto	Guerrero	Au-Ag-Cu
73.	Copper King	Guerrero	Cu
74.	San Nicolás del Oro	Guerrero	Au-Ag-Cu
75.	Campo Morado	Guerrero	Au-Ag-Pb-Cu
76.	Xochipala	Guerrero	Cu
77.	Cuale	Jalisco	Cu
78.	La Minita	Michoacán	Cu
79.	Santa Rosalía	Baja California	Cu
80.	Las Vigas	Chihuahua	Cu
81.	Cuchillo Parado	Chihuahua	Sal-Cu

#### III.8.5. MANTOS Y CHIMENEAS

	<u>Mina</u>	<u>Estado</u>	<u>Mena</u>
82.	Noche Buena	Zacatecas	Au-Ag-Pb-Cu-Zn

83.	Fresnillo	Zacatecas	Ag-Pb-Zn-Cu
84.	El Bote	Zacatecas	Ag-Pb-Zn-Cu
85.	Real de Guadalupe	Guerrero	Cu
86.	Mezcala	Guerrero	Ag-Au-Cu
87.	Taxco	Guerrero	Ag-Pb-Zn-Cu
88.	La Flor	Durango	Cu-Sa1
89.	Villa Hidalgo	Durango	BaSO <sub>4</sub> -Cu
90.	Mapimí	Durango	Ag-Pb-Cu-Mn-Qz
91.	San José Sextín	Durango	Ag-Pb-Cu
92.	Santa María del Oro	Durango	Au-Ag-Pb-Zn-Cu
93.	Guadalupe Victoria	Durango	Au-Ag-Pb-Zn-Cu-Sn
94.	10 de Octubre	Durango	Ag-Pb-Zn-Cu-Sn
95.	Xichú	Guanajuato	Au-Ag-Cu-Pb-Zn-Caliza
96.	La Margara	Guanajuato	Cu-Au-Ag
97.	Zimapán	Hidalgo	Pb-Cu-Ag-Zn
98.	Encarnación	Hidalgo	Fe-Cu
99.	Rincón de Ramos	Aguascalientes	Cu-Sn
100.	Santa Rosalía	Baja California	Cu
101.	Puerto Rico	Coahuila	Pb-Zn-Cu
102.	Esmeralda	Coahuila	Ag-Pb-Zn-Cu
103.	San Marcos	Coahuila	Cu
104.	Pánuco	Coahuila	Cu-Mo
105.	Canoela	Coahuila	Cu
106.	Urique	Chihuahua	Ag-Au-Pb-Zn-Cu
107.	S. de Coman	Nuevo León	Ag-Pb-Cu-Zn

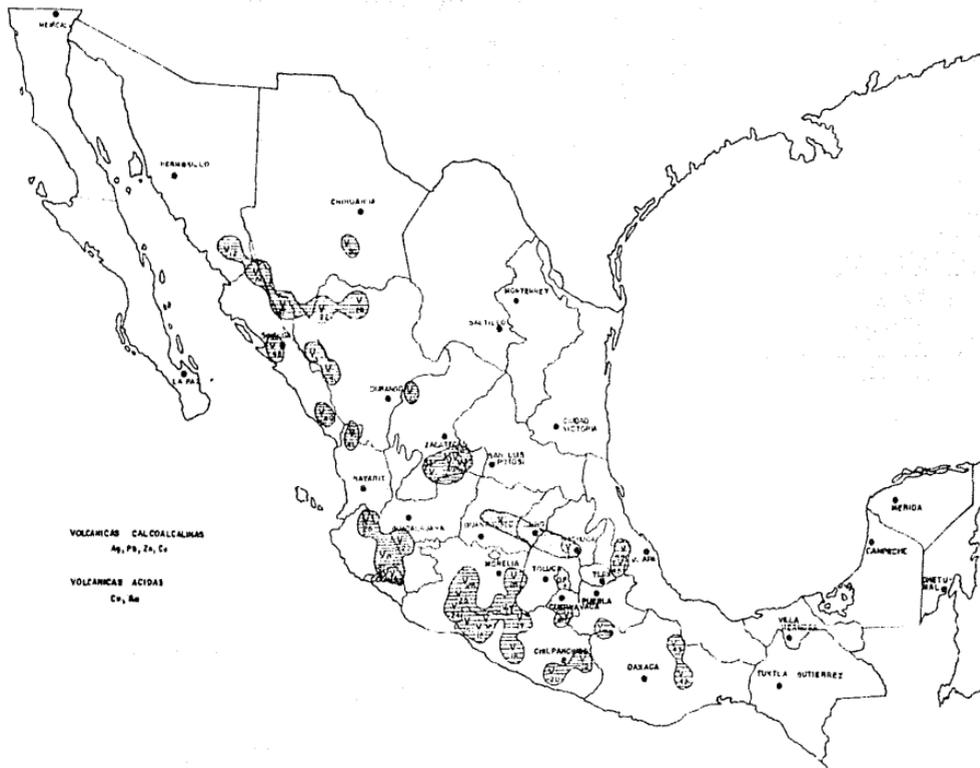


**SIMBOLOGIA**

- Yacimientos de Piritas de Cobre
- ◻ Zonas productoras de cobre de este tipo de depósito.

- 1- MINA CARANCA
- 2- MINA CARANCA
- 3- MINA LA GARIBAY
- 4- MINA LA VERDE
- 5- MINA TACORNA
- 6- MINA EL PANTO
- 7- MINA MOCTEZUMA
- 8- MINA BUEN CALIBANCO
- 9- MINA MOCTEZUMA
- 10- MINA SAN JORD
- 11- MINA LA VERDE

<b>UNAM</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
<b>Ciencias de la Tierra</b>	
LOCALIZACION DE YACIMIENTOS DE TIPO PORFIDIO DE COBRE	
ALVARO OSORIO E.	MARCELA SANCHA H.
RAULITA SORSALEZ A. RODRIGUEZ I. RUIZGOMEZ	
CERON SANTILLAN C. RUBENHIDALGO JIMENEZ P.	
TEMA PROFESIONAL 1090	FIG. N° 22.12



**SIMBOLOGIA**

V Yacimientos Veices en Volcanicos

Zonas productoras de cobre de este tipo de depósitos

- |                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| 17 MINA CUERREZA O        | 20 MINA SAN MIGUEL      |
| 18 MINA VENEDOS           | 21 MINA SAN RAFAEL      |
| 19 MINA SAN MARTIN        | 22 MINA TERNEROS        |
| 23 MINA ORETES            | 24 MINA REGION DE RAMOS |
| 25 MINA COTUIQUELA        | 26 MINA TERCIPALA       |
| 27 MINA PUEBLO VIEJO      | 28 MINA SAMAYTES        |
| 29 MINA LAQUILERA         | 30 MINA EL CIRIACAL     |
| 31 MINA CERRO PUESTO      | 32 MINA FACULTEME       |
| 33 MINA OURELA            | 34 MINA MEXCA           |
| 35 MINA LA DIGNA          | 36 MINA MANUTLA         |
| 37 MINA ANITLA            | 37 MINA CUCUCAL         |
| 38 MINA AMEICA            | 38 MINA CONDE SANJULIE  |
| 39 MINA EL BARRIO ENDO    | 39 MINA BELLEFONDO      |
| 40 MINA ARETAMA           | 40 MINA TEZAUTLAN       |
| 41 MINA EL IMPONERZ       | 41 MINA ZAUTLAN         |
| 42 MINA ORORE             | 42 MINA ACATELAN        |
| 43 MINA HUITTADO          | 43 MINA TAMERANA        |
| 44 MINA TIRABAND          | 44 MINA TORDUA          |
| 45 MINA SAN JUAN DEL VADO | 45 MINA CONCORDIA       |
| 46 MINA SAN MIGUEL DE C   | 46 MINA SAN MARIANO     |

**VOLCANICAS CALCOALCINAS**  
Ag, Pb, Zn, Cu

**VOLCANICAS ACIDAS**  
Cu, Sn

**UNAM** FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENTIFICAS DE LA TIERRA

LOCALIZACION DE YACIMIENTOS  
DE TIPO VETAS EN VOLCANICAS

ARRIVO GONZALO E. BARRA GARCIA M.  
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ SUAREZ  
CERON SANTILLAN C. RODRIGUEZ JIMENEZ P.

TESIS PROFESIONAL 1990 P. 40



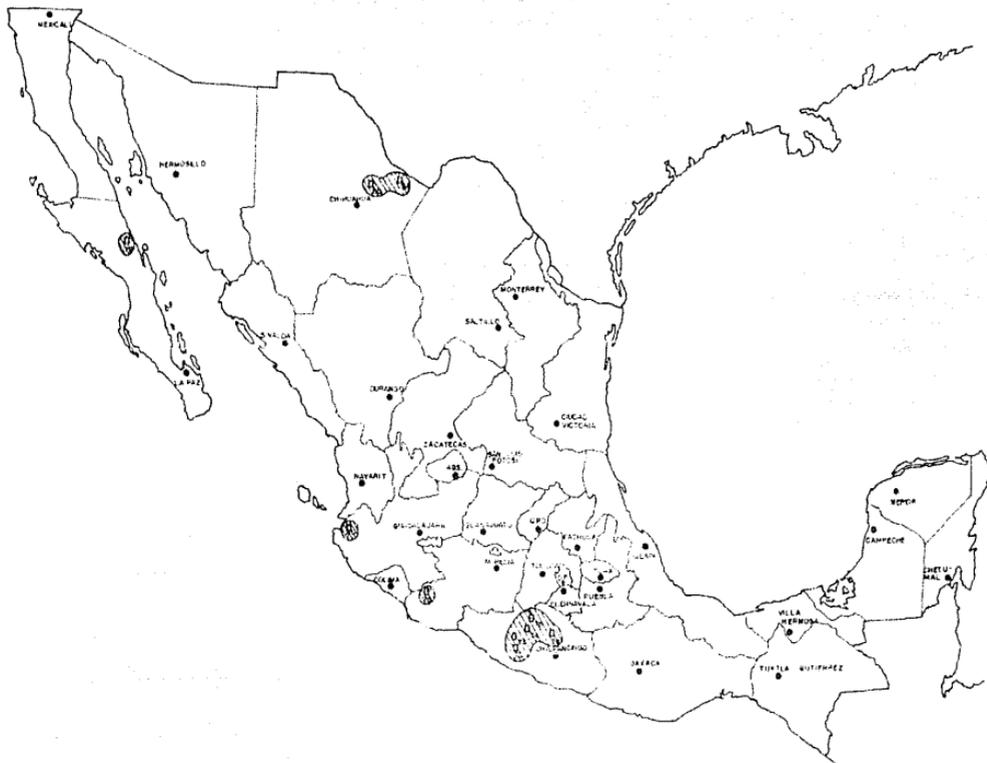
**SIMBOLOGIA**

▲ Yacimientos porfirícuos

● Zonas productoras de cobre de este tipo de yacimiento

- 01- MINA BUSTAMANTE
- 02- MINA LOS MINES Y TATATILA
- 03- MINA CONCEPCION DEL ORO
- 04- MINA MECAL
- 05- MINA VELAZQUEZ
- 06- MINA CUERNAVACA
- 07- MINA EL SACRIFICIO
- 08- MINA SAFONS
- 09- MINA ENCARNACION
- 10- MINA ST. P. C.
- 11- MINA SIMOCHI
- 12- MINA ST. GUILLERMO
- 13- MINA PERA VALLER
- 14- MINA LA NEGRA
- 15- MINA PITAL DE ANDES
- 16- MINA EL SOCOR
- 17- MINA LA PAZ
- 18- MINA HUACALEZAN
- 19- MINA TONTOCIN
- 20- MINA ENCIE
- 21- MINA BACHWAGUATU

<b>UNAM</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA CIENCIAS DE LA TIERRA</b>
	LOCALIZACION DE YACIMIENTOS DE TIPO PORFIRICUSMATICOS
AROCHO USIANO E GARCIA GARCIA H BAUTISTA GONZALEZ A RODRIGUEZ GUTIERREZ A CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ F.R.	
TERCIO PROFESIONAL 1990   FIG. N° 314	



### SIMBOLOGIA

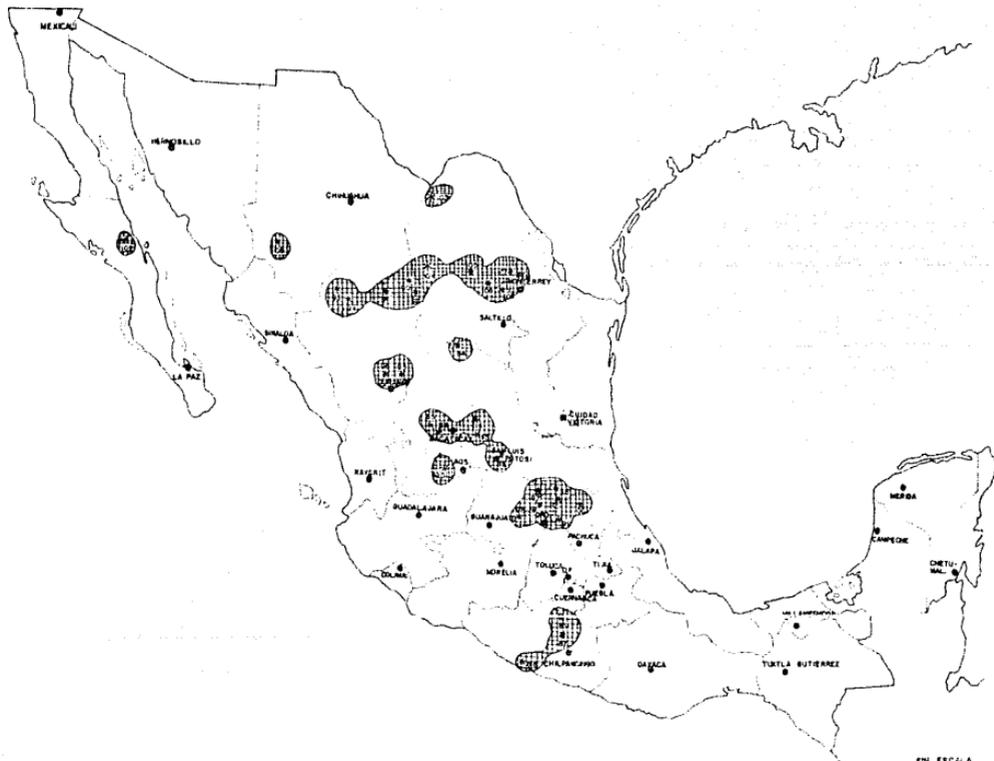
1) Volcanes Vulkano-Sedimentarios



Zonas productoras de cobre de este tipo de yacimiento

- 12 Mex. Cerro Pata
- 13 Mex. Cerro Pata
- 14 Mex. Cerro Pata
- 15 Mex. Cerro Pata
- 16 Mex. Cerro Pata
- 17 Mex. Cerro Pata
- 18 Mex. Cerro Pata
- 19 Mex. Cerro Pata
- 20 Mex. Cerro Pata
- 21 Mex. Cerro Pata

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA
	Ciencias de la Tierra
LOCALIZACION DE YACIMIENTOS DE TIPO VULCANICO-SEDIMENTARIO	
AYOHO OSORIO E. GARCIA GARCIA M.	
BAUTISTA RODRIGUEZ A. RODRIGUEZ BOUTCHER A.	
CERON SANTILLAN C. RUBENSTEIN JIMENEZ FA.	
TESIS PROFESIONAL 1990	FIG. N° 12.15



**SIMBOLOGIA**

\* Yacimientos En Mantos y Chimeneas

● Zonas productoras de cobre de este tipo de yacimiento

82	Mina	Nuevo Pinar	108	Mina	S. de M. M.
83	Mina	Trinidad	109	Mina	P. de M.
84	Mina	El Buit	110	Mina	P. de M.
85	Mina	Real de Guadalupe	111	Mina	El Gallo
86	Mina	María	112	Mina	Colonia
87	Mina	Tanqui	113	Mina	San Mateo
88	Mina	San Mateo	114	Mina	San Mateo
89	Mina	V. de M.	115	Mina	San Mateo
90	Mina	V. de M.	116	Mina	San Mateo
91	Mina	San Mateo	117	Mina	San Mateo
92	Mina	San Mateo	118	Mina	San Mateo
93	Mina	San Mateo	119	Mina	San Mateo
94	Mina	San Mateo	120	Mina	San Mateo
95	Mina	San Mateo	121	Mina	San Mateo
96	Mina	San Mateo	122	Mina	San Mateo
97	Mina	San Mateo	123	Mina	San Mateo
98	Mina	San Mateo	124	Mina	San Mateo
99	Mina	San Mateo	125	Mina	San Mateo
100	Mina	San Mateo	126	Mina	San Mateo
101	Mina	San Mateo	127	Mina	San Mateo
102	Mina	San Mateo	128	Mina	San Mateo
103	Mina	San Mateo	129	Mina	San Mateo
104	Mina	San Mateo	130	Mina	San Mateo
105	Mina	San Mateo	131	Mina	San Mateo
106	Mina	San Mateo	132	Mina	San Mateo
107	Mina	San Mateo	133	Mina	San Mateo

**UNAM** FACULTAD DE INGENIERIA.

Ciencias de la Tierra.

LOCALIZACION DE YACIMIENTOS DE TIPO MANTOS Y CHIMENEAS.

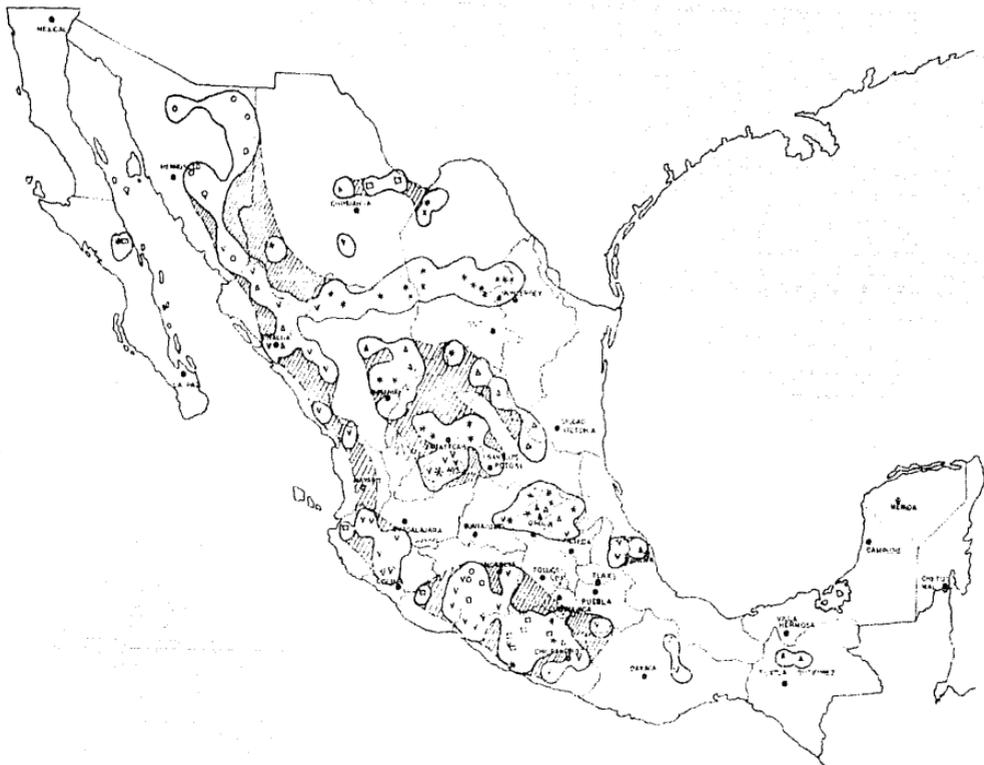
ANJOYO OSORNO E GARCIA GARCIA M.  
 BAUTISTA GONZALEZ A RODRIGUEZ SUAREZ A.  
 CERON SANTILLAN C ALONSO JIMENEZ P.H.  
 TERS PROFESIONAL 1990 FIG. N.º 16



**SIMBOLOGIA**

- Yacimientos kársticos (Tipo Mississippi Valley)
  - Zonas productoras de carbón de este tipo de depósito
- 117 Mina Puerto Rico  
 118 Mina Esmeralda  
 119 Mina San Marcos  
 120 Mina Pólvora  
 121 Mina Carosa

FACULTAD DE INGENIERIA  
**UNAM** CIENCIAS DE LA TIERRA.  
 LOCALIZACION DE YACIMIENTOS  
 DE TIPO KARST.  
 ARROJO OSORNO E GARCIA GARCIA M  
 BAUTISTA GONZALEZ A FIGUEROA SUAREZ A  
 CERON SANTILLAN C RIVERO JIMENEZ FN  
 TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. N.º 17



**SIMBOLOGIA**

-  Zonas productoras de cobre tanto dentro como fuera de los límites actuales.
-  Zonas recomendadas para exploración de cobre.
-  Pófitos de Cobre
-  Venas en Volcanes.
-  Prometasmóticas.
-  Vulcanos Sedimentarios.
-  Mantos y Chenamenes.
-  Karst (tipo Mississippi Valley).

**UNAM FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA**

LOCALIZACION DE ZONA RECOMENDABLES PARA EXPLORACION DE COBRE

JUNYATO OSORHO E    GARCIA GARCIA H.

BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ OTERREZ A.

CERON BASTILLAN C.    ROBERTON JIMENEZ P.H.

TENS PROFESIONAL    1990    716    1161815

#### IV. LA PROSPECCION

## IV.1. INTRODUCCION

El término "Prospección minera" es utilizado para -  
indicar los trabajos que se refieren a la búsqueda siste-  
mática de la concentración de un determinado mineral fac-  
tible de ser explotado con rendimiento económico. En el  
presente trabajo se realiza un análisis, lo más exhausti-  
vo posible, de las técnicas susceptibles de ser aplica-  
das para la localización de minerales de "cobre". Para-  
llevar a cabo esta tarea se efectúa entre otras labores,  
una minuciosa revisión de los diversos metalotectones --  
que han contribuido a la edificación de una mineraliza-  
ción cuprífera. Tal acumulación, puede considerarse --  
como una "entidad" que ha sido constituida por diversos-  
metalotectones que pueden agruparse dentro de ciertos ti-  
pos y asociados a los grandes fenómenos geológicos que -  
afectan la corteza terrestre; y no sólo se refieren a fe-  
nómenos genéticos, donde puede haber ambigüedad, y por -  
tanto, originar conclusiones erróneas. Así pues, para -  
la clasificación de los tipos de yacimientos, es necesari-  
o tomar en cuenta los diversos metalotectones que han-  
concurrido a la creación de ese depósito; de ello se ob-  
tiene mayor eficacia al tipificar el fenómeno natural de  
acuerdo al concepto de "Modelos de Yacimientos Minerales"  
(Wolf in Wolf, 1976), (entitled).

facilitan su prospección (vulcanismo, pliegues, fisuras, fallas, intrusivos, etc...)

- Guías mineralógicas.- Es el conjunto de minerales que se encuentran en la vecindad inmediata de un yacimiento mineral, y que por tanto, sirven para la localización del mismo.

- Prospección geoquímica.- Es un método basado en una medida sistemática de la dispersión de los elementos en la corteza terrestre.

- Prospección geofísica.- Son los métodos que se basan en la medida sistemática de ciertas propiedades físicas de las rocas o de los minerales.

Se definirá como Guía a cualquier rasgo o conjunto de rasgos que pueden ayudar al descubrimiento de un cuerpo mineral nuevo, o bien, para el incremento de reservas minerales en un yacimiento ya conocido, y las cuales pueden ser regionales o locales, y que son criterios de tipo estratigráfico y litológico, tectónico, magmático, paleoclimático, geomorfológico, hidrogeológico, geofísico, geoquímico, etc..

- Guías fisiográficas y paleogeográficas.- Son cualquier rasgo del modelo de la superficie terrestre que sirven para encontrar un yacimiento mineral (salientes del terreno, depresiones, llanuras, etc.).

- Guías litológicas.- Es aquella roca o conjunto de rocas que se encuentran asociadas, directa o indirectamente a los yacimientos minerales y, que sirven para su localización.

- Guías estratigráficas.- Son aquellas capas, miembros, formaciones o grupos, que marcan o conducen, directamente o indirectamente a la existencia de una mineralización.

- Guías estructurales.- Es el conjunto de rasgos estructurales que se encuentran directa o indirectamente asociados a los yacimientos minerales y que, por tanto,-

facilitan su prospección (vulcanismo, pliegues, fisuras, fallas, intrusivos, etc...)

- Guías mineralógicas.- Es el conjunto de minerales que se encuentran en la vecindad inmediata de un yacimiento mineral, y que por tanto, sirven para la localización del mismo.

- Prospección geoquímica.- Es un método basado en una medida sistemática de la dispersión de los elementos en la corteza terrestre.

- Prospección geofísica.- Son los métodos que se basan en la medida sistemática de ciertas propiedades físicas de las rocas o de los minerales.

## IV.2. GUIAS FISIOGRAFICAS Y PALEOGEOGRAFICAS

### IV.2.1. PORFIDOS CUPRIFEROS

### IV.2.2. PIROMETASOMATICOS

### IV.2.3. MANTOS Y CHIMENEAS

### IV.2.4. VOLCANICOS

### IV.2.5. ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS

### IV.2.6. SULFUROS VULCANO-SEDIMENTARIOS

### IV.2.7. COBRE SEDIMENTARIO

Las guías fisiográficas y paleogeográficas son los rasgos superficiales de que dispone el geólogo minero como ayuda para el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales. A continuación, serán analizados los rasgos fisiográficos y paleogeográficos asociados a los principales modelos de yacimientos de cobre.

En forma general, puede decirse que las guías fisiográficas estarán en relación directa con las formas topográficas de la región estudiada. Se debe tener presente que cualquier forma de la superficie de la corteza terrestre puede estar directamente conectada con un cuerpo mineralizado. En cada caso será necesario llevar a cabo un análisis cuidadoso para determinar si en verdad existe esa relación. Las formas más comunes del relieve son:

- Salientes del terreno
- Depresiones del terreno
- Peneplanicies

IV.2.1. Los yacimientos de pórfidos cupríferos presentan generalmente una combinación de salientes y depresiones en el terreno. En lo que se refiere a las prominencias, se debe tener en cuenta, que con frecuencia las zonas mineralizadas suelen tener abundante cuarzo y, por tanto, ser más resistentes al intemperismo que las rocas encajonantes. Tal es el caso de algunos yacimientos del oeste americano, y en particular, a lo largo de la Sierra Madre Occidental, donde se observa una marcada diferencia en el relieve.

Por otra parte, a menudo las zonas de oxidación se transforman en áreas de hundimiento, tanto por la lixiviación que han sufrido, como por una mayor erosión - dadas las características de menor resistencia y mayor solubilidad que las rocas circundantes. Por tanto, se puede usar en la prospección minera este criterio que combina la coloración característica de los sombreros de fierro con una depresión en el terreno.

La combinación de rasgos prominentes con depresiones en forma de ondonadas es típico en los pórfidos cupríferos.

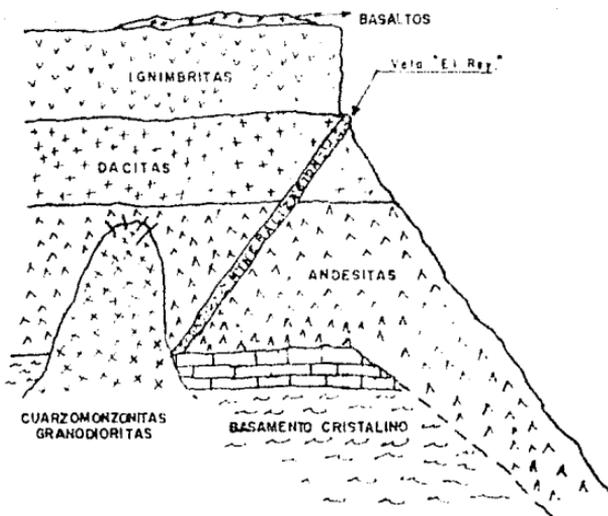
IV.2.2. Para los yacimientos de tipo pirometasomático, son comunes las formas salientes en el terreno, tal es el caso de Santa María de la Paz, donde la mineraliza

ción debida a hidrotermalismo se presenta en la parte baja de prominencias bastante visibles.

IV.2.3. En el caso de los yacimientos de mantos y chimeneas, al igual que en los casos anteriores, las formas en el relieve que se presentan son prominencias de cuerpos silicificados, de forma irregular y con frecuencia, presentan gran cantidad de vetillas de mineralización, tal como el ejemplo de Zimapán, Hidalgo.

IV.2.4. Para los yacimientos volcánicos son características las formas salientes en el terreno, tanto fisiográfica como paleogeográficamente. También deben señalarse el caso de algunas vetas que sobresalen igualmente por su contenido mineralógico. Tal es el caso de Tahuehueto<sup>(1)</sup> en Durango; en este yacimiento no se han encontrado aún grandes reservas; sin embargo, desde el punto de vista geológico, presentan características sumamente notables, como la superposición de dos provincias metálicas diferentes. En lo que se refiere a la fisiografía, una estructura sobresale notablemente sobre el terreno, conocida como "la veta el rey". Además, el perfil general del terreno puede esquematizarse de la siguiente manera (Fig. IV.1).

(1) Distrito minero de Tehuehueto, Dgo. Trabajo inédito (CRMNR).



Superposición de provincias metalogénicas



UNAM FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

ESQUEMA GEOLOGICO GENERAL DE LOS  
YACIMIENTOS AURÍFEROS DEL TERCERO  
CICLO VOLCANICO.

ARROYO OSORNO E. GARCIA GARCIA H.  
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ FN.

TESIS PROFESIONAL 1990 FIG N° IV-1

Fuente: Trabajo inédito del Distrito Minero de  
Tahuehueto, Durango del Ing. German AG  
1981.

Sin escala

IV.2.5. Los yacimientos asociados a rocas básicas y ultrabásicas tienen fisiográfica y paleogeográficamente - enmascarados los rasgos que presenta este tipo de mineralización; además, debe insistirse en que para cada región - deberán ser precisados los rasgos útiles en la prospección minera.

IV.2.6. Los yacimientos vulcano-sedimentarios al -- igual que los de rocas básicas y ultrabásicas, no presentan aflorando dichos rasgos porque las múltiples sucesiones de capas de rocas que se han depositado a lo largo del tiempo, los han cubierto, enmascarando las formas topográficas formadas en los principios de dichos yacimientos.

IV.2.7. Desde el punto de vista paleogeográfico - - existen rasgos que pueden ser claramente definidos, cartografiables y con una relación directa con los yacimientos minerales. En particular, en lo que se refiere a los modelos de yacimientos sedimentarios de cobre, asociados a - - rocas arcillo-arenosas (tipo "red beds"). Los depósitos - mineralizados se formaron en la desembocadura de los ríos,

ya sea en lagos poco profundos o en bahías. Por tanto, es indispensable, en los distritos cupríferos sedimentarios, llevar a cabo una cartografía geológica muy cuidadosa, con objeto de precisar los diferentes accidentes paleogeográficos que guardan una relación con las mineralizaciones.

En los yacimientos de tipo "Cooper Schiffer", el cobre se presenta acompañado por otros metales, como: V, Mo, Pb, Zn, Ni, Au, Pt, Pd, Rh y, algunas veces por plata, por ejemplo: en los esquistos Mansfeld en Alemania, y los depósitos de Lubin-Polkowice en Polonia. Los metales individuales alcanzan su máxima concentración en diferentes horizontes de capas del mismo complejo.

Este modelo de yacimientos se origina en la desembocadura de los ríos asociados a golfos, en condiciones reductoras; por tanto, también se pueden precisar los rasgos que servirán en la prospección minera regional.

### IV.3. GUIAS LITOLOGICAS

IV.3.1. PORFIDOS CUPRIFEROS

IV.3.2. PIROMETASOMATICOS

IV.3.3. MANTOS Y CHIMENEAS

IV.3.4. VOLCANICOS

IV.3.5. ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS

IV.3.6. SULFUROS VULCANO-SEDIMENTARIOS

IV.3.7. COBRE SEDIMENTARIO

Un yacimiento mineral queda enmarcado dentro de un cuadro geológico definido, con rocas encajonantes de una composición específica.

Por granito, debe entenderse todo tipo de rocas ácidas: granito alcalino, granito calco-alcalino, cuarzomonzonita, granodiorita, y cuarzodiorita. Apegado a ello, - puede hablarse de algunas asociaciones mas o menos constantes:

- En granitos alcalinos y calco-alcalinos. Pegmatitas y neumatolitas, en donde se encuentra el molibdeno asociado al cobre.

Cuarzomonzonitas y granodioritas, las cuales son - una guía importante en los pórfidos cupríferos.

IV.3.1. y 2. Para su análisis, se tomará en cuenta tanto a los pórfidos cupríferos, como a los yacimientos pirometasmáticos.

Las rocas encajonantes que predominan en la mineralización son: carbonatos (caliza, margas y dolomías), en ocasiones lutitas, areniscas, y posiblemente rocas volcánicas calcáreas; las cuales son intrusionadas por cuerpos de composición cuarzomonzonítica, granodiorítica o plagiocénica; produce así, en el área de contacto un metamorfismo que transforma a la roca encajonante en roca silicatada (tactitas y skarn). Regionalmente se encuentran en escudos (cratones), plataformas o geosinclinales. Localmente las menas y los intrusivos están asociados a esquistos, gneises, granitos; en ambientes eugeosinclinales, sedimentos de origen no geosinclinal y rocas volcánicas intermedias y silíceas (Jerome y Cook).

La presencia de rocas carbonatadas (encajonantes) - alrededor de los emplazamientos graníticos son extremadamente favorables para la generación de yacimientos de cobre, estaño, tungsteno, bismuto y molibdeno.

Por lo menos cuatro propiedades de las rocas pueden ser favorables para la mineralización:

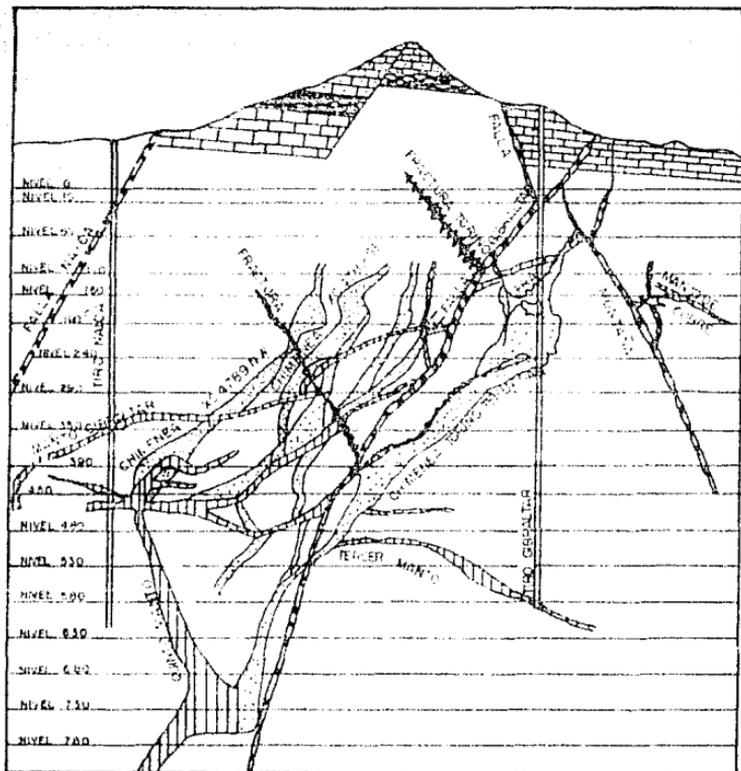
1).- Permeabilidad. (areniscas, conglomerados, lavas porosas, rocas destruidas tectónicamente, etc.).

2).- Reactivación química. (una reacción con soluciones hidrotermales, la precipitación de minerales de mena es inducida, etc.).

3).- Fragilidad. (rocas ígneas, cuarcitas, dolomías contrastando con calizas y lutitas).

4).- Incremento en el contenido de magnesio. En numerosos yacimientos minerales, las zonas mineralizadas están asociadas a rocas dolomíticas.

IV.3.3. Los yacimientos polimetálicos que ocurren en el modelo de mantos y chimeneas están casi siempre - asociados a secuencias de rocas sedimentarias del Jurásico-Cretácico, que presentan una dolomitización incipiente debido a que han estado expuestas en un ambiente de plataforma; subyacidas por un basamento calcáreo con algo de metamorfismo de edad Precámbrica o Paleozoica, o bien, por un conglomerado rojo de origen continental de edad Triásica. Sobreyacen a ellas rocas volcánicas terciarias, unas de composición calco-alcalina y otras de composición riolítica. (Fig. IV.2.)



-  ALUVIACION
-  CALIZA LOMA DE PLATA
-  LUTITAS BENAVIDES
-  CALIZA AURORA
-  CHIMENEAS
-  MANTOS
-  FRACTURA MICRALIZADA
-  FRACTURA PUMINERAL

SIN ESCALA

Fuente Tesis Profesional, Manuel Aragon A.  
1990

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

SECCION GEOLOGICA ESQUEMATIZADA  
DEL YACIMIENTO DE NAICA, CHIH.

ARROYO OSORIO E. GARCIA GARCIA H.  
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.

TESIS PROFESIONAL | 1990 | FIG. N° IV 2

IV.3.4. Volcánicos.- En México es un criterio de suma importancia. Además de ser un rasgo sobresaliente, en lo que se refiere a sus composiciones y estructuras que lo enmarcan; pero a la vez la mineralización puede ser enmascarada por los llamados accidentes geológicos, -- que pueden encubrir su real asociación con este metalotectón.

Estos yacimientos pueden ser de tipo congnado (donde los minerales de mena tienen la misma fuente que la roca encajonante), o alienígenos (donde la fuente de -- ambos es diferente), en la mayoría de los volcánicos se presentan los de tipo congnado. Una asociación frecuente en México, está relacionada con los depósitos auro-argentíferos que a menudo se alojan en rocas volcánicas, -- sobre todo en andesitas y dacitas, en las que se encuentra en menor proporción la paragénesis Pb-Zn-Cu.

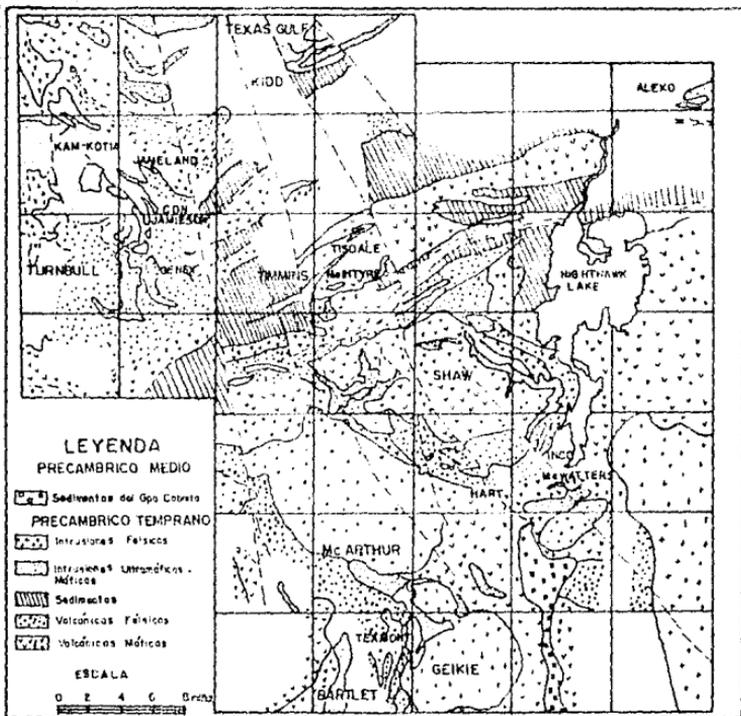
Otra de las asociaciones comunes en nuestro país -- son las paragénesis de Au-Cu en yacimientos de wolframio en los estados de Jalisco y Nayarit; encontrándose en estructuras tabulares (zonas de falla) silicificadas, asociadas a ignimbritas. (Fig. III.11).

IV.3.5. Asociados a rocas básicas y ultrabásicas. El cobre, el níquel y el cobalto se encuentran en forma de sulfuros en rocas noríticas.

La paragénesis Ni-Cu-Pt se encuentra en noritas y gabros (de olivino) frecuentemente transformada en anfibolitas. (Fig. IV.3).

IV.3.6. Los sulfuros vulcano-sedimentarios son -- mencionados por Smirnov V.I., (1976), en el grupo de depósitos piritosos, que se han formado en un ambiente volcánico con un pequeño acarreo y depósito, y que se consideran como resultantes metamórficos de un depósito de materia sulfurosa. La composición de las rocas varía desde basaltos hasta riolitas; T. Sato, (1974) define los yacimientos de tipo Kuroko entre ellos, pero la composición de estos varía solamente en un rango de rocas félsicas y de yacimientos polimetálicos. (Fig. IV.4).

IV.3.7. En cuanto a los yacimientos sedimentarios, se puede decir que los materiales sedimentarios proceden de la meteorización de rocas de diversas composiciones o de depósitos minerales pre-existentes, originando así yacimientos muy variables.



(JENSEN M, 1976)

UNAM

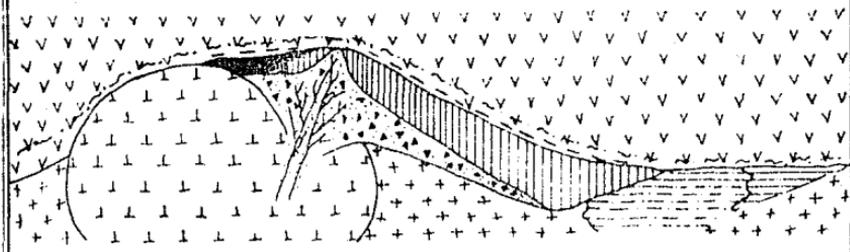
FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

YACIMIENTOS ASOCIADOS A ROCAS BASICAS  
Y ULTRABASICAS.

ARROYO OSORNO E GARCIA GARCIA H.  
DAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ F.L.

152

TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. No IV. 3



- |   |  |   |                                   |
|---|--|---|-----------------------------------|
|  | Mena de barita   |   |                                   |
|  | Mena negra de galena, esfalerita, barita, calcopirita, pirita. | } Mena estratiforme   |                                   |
|  | Mena amarilla de pirita, calcopirita.                          |   |                                   |
|  | Mena en stockwork (mena silicea) pirita, calcopirita y yeso    |   |                                   |
|  | Mena de yeso   |  | Veñías de pirita, calcopirita, q. |
|  | Arcillo  |  | Zona de pedernal ferruginoso.     |
|  | Toba ácida   |  | Brecha de explosión.              |
|  | Domo de roca blanca  |  | Toba brecha ácida.                |

Sato, 1977.

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CIENCIAS DE LA TIERRA.	
SECCION ESQUEMATICA TIPICA DE UN YACIMIENTO DE TIPO KUROKO.		
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.	
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A	
CERON SANTILLAN C	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N	
TESIS PROFESIONAL	1990	FIG. Nº IV 4

Algunos depósitos sedimentarios están cubiertos o sobreyaciendo sobre rocas particulares; en este caso se pueden mencionar capas de lutitas o limonitas, producto de barro marinos; o bien, sedimentos marinos de tipo - tobáceo dispuestos en pendientes suaves.

A este tipo de depósitos pertenecen los "red beds" (capas rojas), que están asociados a calizas que contienen cementante calcáreo.

Las rocas encajonantes sugieren un depósito en secuencia transgresiva, donde la sedimentación se lleva a cabo en una serie de capas delgadas de arenisca calcárea, seguidas por lutitas bituminosas (donde se deposita la mineralización) y, sucesivamente estratos de calizas marinas, en parte margosas.

Aquí se encuentra la zona de sulfuros: cobre nativo, asociados con Ni, Co, Mo, Fe, Pb y Zn.

En conclusión se puede decir, que la mayoría de los depósitos minerales están localizados en rocas con feldespatos alcalinos o en rocas carbonatadas, siendo poco comunes en lutitas arcillosas, filitas y esquistos de mica.

La experiencia en prospección ha mostrado que las

rocas carbonatadas no contienen mayores concentraciones de estaño, oro y cobre (en contraste al plomo-zinc) que los depósitos teletermales de cobre del tipo "Capas rojas" los cuales no son del todo considerados como sedimentarios, pues están asociados con areniscas; en contraste con los depósitos teletermales de Pb-Zn que prefieren rocas carbonatadas.

La litología de las rocas es de gran importancia para los depósitos de tipo de placeres. En depresiones, en los lechos de los ríos son producidas por la erosión selectiva de rocas litológicamente variables, en el lavado del material se lleva a cabo la acumulación de minerales pesados, y por tanto, la formación de placeres.

#### IV.4. GUIAS ESTRATIGRAFICAS

IV.4.1. PORFIDOS DE CUPRIFEROS

IV.4.2. PIROMETASOMATICOS

IV.4.3. MANTOS Y CHIMENEAS

IV.4.4. VOLCANICOS

IV.4.5. ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS

IV.4.6. SULFUROS VULCANO-SEDIMENTARIOS

IV.4.7. COBRE SEDIMENTARIO

En este caso la tarea de la prospección consiste en determinar la presencia y sucesión de rocas presentes en la superficie, así como la extensión de los horizontes mapeados. Este criterio es importante, sobre todo en la explotación de depósitos sedimentarios y depósitos hipogénicos que estén asociados a capas de rocas litológicamente favorables.

Si se considera la cordillera montañosa que va desde Alaska hasta Chile, la edad de casi todos los intrusivos es del Mesozoico Tardío y Terciario Medio. Algunos de los cuales fueron generados en el período Nevadiano del plegamiento isoclinal, con metamorfismo e invasión batolítica (granitización). Los ejemplos estudiados sirven para correlacionar; aunque muchos intrusivos son más jóvenes y en ocasiones, sus paredes están mejor mineralizadas y con mayor concentración; los más

antiguos sirven como guías o base para la prospección. Los efectos químicos y termales de la intrusión se observan en la formación de minerales silicatados de contacto, característicos de las rocas carbonatadas y en menor grado, de lutitas, areniscas líticas y rocas volcánicas. Si los intrusivos entran a terrenos graníticos o volcánicos ricos en sílice, los efectos pirometamórficos dan otra tonalidad y textura a la roca.

La calcopirita ocurre frecuentemente cerca de la magnetita en cantidades apreciables, con ello se infiere la edad y la relación estructural entre las dos. La magnetita puede ser una guía para pórfidos y otros tipos de menas de cobre, donde se puede hacer una datación de las rocas en las que se encuentra.

Para el caso de los tres primeros yacimientos pueden mencionarse algunas de las 3 secuencias estratigráficas presentes en la mayor parte de la Sierra Madre Occidental y de la Mesa Central.

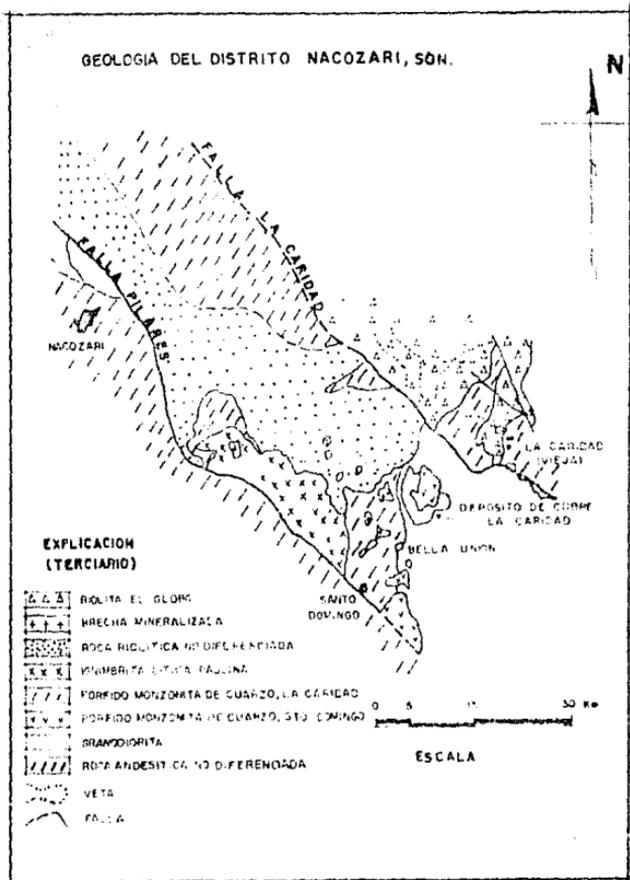
IV.4.1. En lo que se refiere a los pórfidos cupríferos los intrusivos tienen una composición de alcalina a intermedia, y la mayoría son del Terciario Medio; estos intrusionan o se emplazan dentro de un plutonismo o vulcanismo de edad más antigua, o bien, en calizas del Cretácico. Como un ejemplo típico se encuentra el depósito de La Caridad.

Los tipos de rocas que bordean el depósito de la Ca-  
ridad son predominantemente rocas volcánicas y consisten-  
en una gruesa secuencia de flujos de latitas y andesitas\_  
de probable edad cretácica, cubiertas por tobas y flujos\_  
de riolitas más jóvenes que posiblemente son del Terciario  
Medio. Las rocas volcánicas más antiguas, en el distrito  
son intrusionadas por plutones graníticos de probable épo-  
ca Laramídica. El depósito se encuentra afectado por un\_  
intrusivo cuarzomonzonítico. (Fig. IV.5).

El mapeo detallado ha hecho posible definir las si-  
guientes unidades preminerales de rocas ígneas dentro de -  
las cuales se incluyen las estructuras brechadas: dioritas,  
andesitas, brecha tardía, pórfido temprano, pórfido de tex-  
tura gruesa, pórfido crema y pegmatita. Esta clasificación  
indica un evento de intrusión múltiple. (Fig. IV.6).

También puede mencionarse el distrito minero de - -  
Tahuehueto, Dgo., tal como se menciona en la prospección -  
de yacimientos volcánicos.

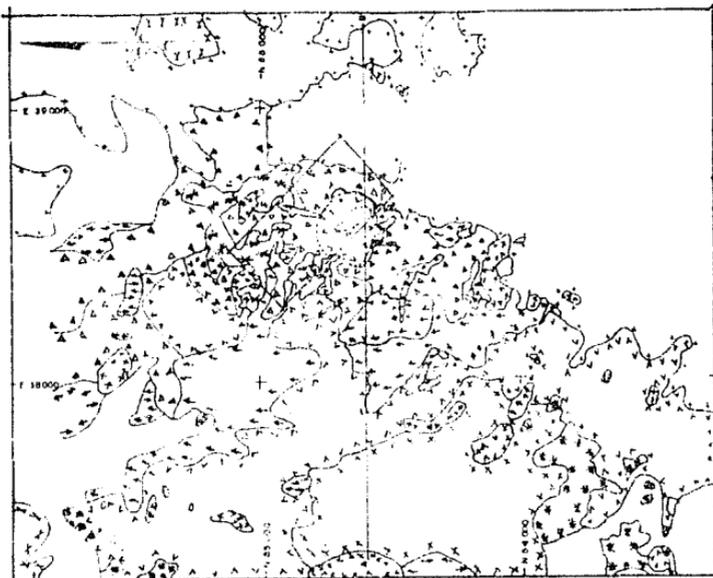
IV.4.2. Para el tipo de yacimientos pirometasomáticos se --  
pueden observar las siguientes columnas estratigráficas y\_  
cuales son o podrán ser las rocas favorables para este - -  
tipo de depósito; para lo cual se expondrán los siguientes  
ejemplos:



<b>UNAM</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA CIENCIAS DE LA TIERRA</b>
<b>GEOLOGIA DEL DISTRITO NACOZARI, SON.</b>	
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ EH.
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	<b>1980 FIG. IV.5</b>

Fuente: "Minas Mexicanas" Jorge E. Ordóñez (1987)

GEOLOGIA DEL DEPOSITO "LA CARIDAD", SGM



LITOLOGIA

[Symbol]	Calizas
[Symbol]	Grutas de Anadita
[Symbol]	Pegmatita
[Symbol]	Pérfido Tenoroso
[Symbol]	Pérfido Claro
[Symbol]	Leptito
[Symbol]	Leptito Text. Grupo
[Symbol]	Leptito Brazahe Tonal
[Symbol]	Leptito Brazahe Anaranjado
[Symbol]	Leptito Brazahe de Pérfido
[Symbol]	Porfido de Tonal Fm.
[Symbol]	Trenca; Licor de Apilite
[Symbol]	Cuadro albita
[Symbol]	Monocisto de Cuarzo
[Symbol]	Granodiorita
[Symbol]	Hidro Carbazon
[Symbol]	Andesita
[Symbol]	Granito
[Symbol]	Granito Cuarzo. Anar. 87%

ESCALA 1:10,000



UNAM FACULTA DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

GEOLOGIA DEL DEPOSITO  
LA CARIDAD, SON

ARROYO OSORNO E. GARCIA GARCIA H.  
DAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ C. A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN J. F. N.  
TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. N° 16

Fuente: Minas Mexicanas Jorge Orozco (1987)

- a) La Negra
- b) Concepción del Oro
- c) Cananea
- d) Fresnillo

a) La Negra.- Las rocas que afloran en la región pertenecen a la secuencia estratigráfica mesozoica que constituye la provincia geológica denominada Plataforma el Doctor. Las rocas más antiguas conocidas ahí pertenecen a la Formación Chilar, constituida por lutitas y grauvacas del Triásico; podrían pertenecer al Paleozoico. Discordantemente sobreyace la Formación Las Trancas, compuesta de una alternancia de calizas, lutitas carbonosas y grauvacas del Jurásico Superior.

El sistema cretácico está constituido por dos formaciones concordantes entre sí. La Formación El Doctor del Cretácico Medio y la Formación Soyatal del Cretácico Superior (Turoniano).

La primera está representada por cuatro unidades calcáreas de plataforma y, lagunar: "Unidad La Negra", compuesta por capas muy delgadas de caliza laminar con intercalaciones de bandas de pedernal negro. Es donde se encuentra encajonados todos los cuerpos mineralizados conocidos en la mina La Negra, y reconocida como facies favorable. "Unidad San Joaquín" compuesta por

calizas de estratos medios a gruesos con nódulos de peder-  
nal negro. "Unidad Socavón", las cuales son calcarenitas\_  
y conglomerados calcáreos. Por último se encuentra la --  
"Unidad Cerro Ladrón", que consiste de bancos y lentes ma-  
sivos muy gruesos. Mientras que la Formación Soyatal es\_  
una alternancia rítmica de calcarenitas, calizas lamina--  
das y lutitas.

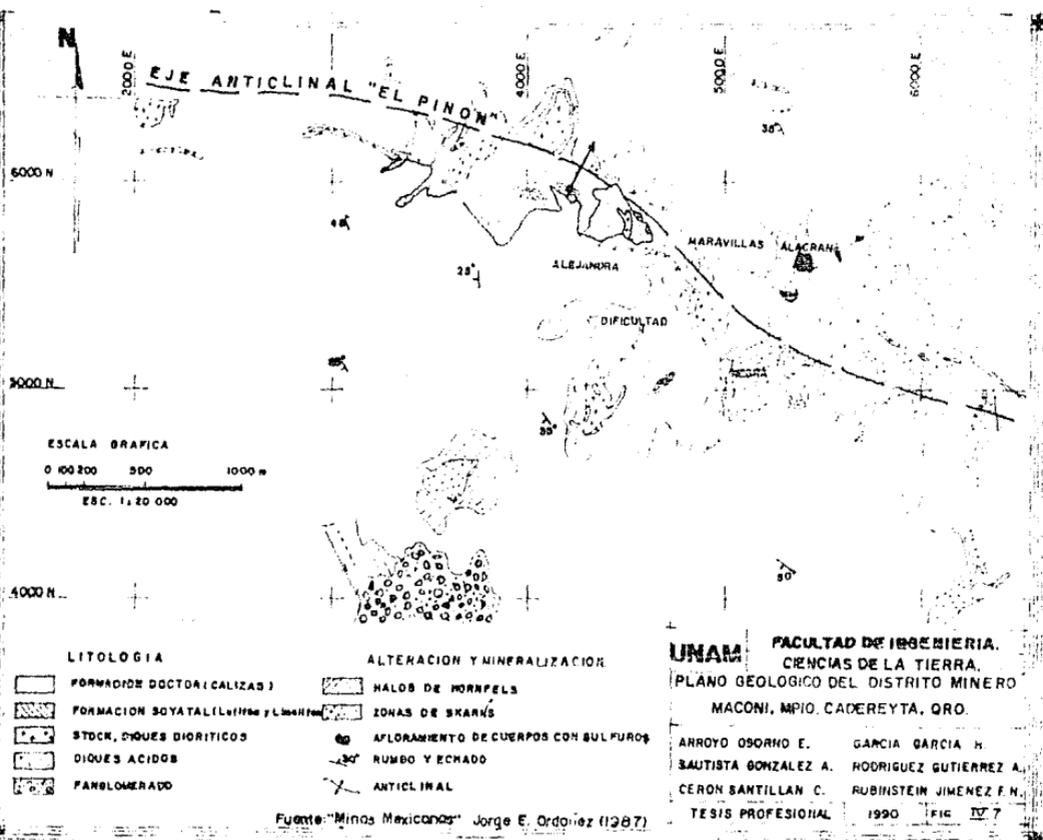
Los yacimientos minerales en el área de La Negra --  
pertenecen al tipo conocido como hidrotermal en skarn y -  
por su forma se relacionan con los tipos chimenea-manto -  
del norte de México. El borde del stock intrusivo, así -  
como los sistemas de diques, uno diorítico y otro aplíti-  
co existentes en el área parecen controlar en cierto gra-  
do la ubicación y naturaleza de los cuerpos minerales. --  
(Fig. IV.7).

NOTA: Se usa el nombre de Unidad en lugar de Facies. Este  
último se emplea en las tomos de Ordóñez erróneamente. --  
Facies es un término para definir un ambiente y no una ro-  
ca.

b) Concepción del Oro, Zacatecas.

Unidades más antiguas a la Formación Zuloaga, no --  
afloran.

La Formación Zuloaga consiste en calizas de ostra--



tos gruesos con nódulos de pedernal negro y le corresponde una edad del Jurásico Superior-Oxfordiano. Después se encuentra la Formación La Caja con cuatro unidades -- que van del Kimmeridgiano al Portlandiano. El miembro "A" consiste de calizas arcillosas lajosas, de estratificación delgada intercalada con lutitas limosas. El miembro "B" está formado con calizas intercaladas con capas muy delgadas de limolitas calcáreas. El miembro "C" consiste de lutitas limosas interestratificadas con calizas arcillosas y en el "D" son recristalizadas, en seguida -- hubo un hiatus en el Tithoniano-Berriasiano y no se observa su contacto con la Formación Taraises, que consiste de calizas y margas. Sobreyaciendo a ésta y sin conocer, de igual manera, su contacto se encuentra la Formación Cupido del Barremiano. Sobreyacen en forma concordante a ésta la Formación La Peña y de la misma forma se encuentra la Caliza Aurora que cambia a facies Cuesta del Cura de la Formación con estratificación ondulada y estructura laminar del Albiano. Subyace también en forma concordante a éstas, la Formación Indidura del Cenomaniano-Turoniano, y del mismo modo se encuentra la Formación Caracol del Coniaciano-Santoniano y que cambia de facies de la Formación Lutitas Parras en el Santoniano, y después de ella existe un hiatus hasta el Reciente. En la (Fig. IV.8) se muestra la columna estratigráfica del distrito de Concepción del Oro.

EPOCAS	EUROPA		DISTRITO DE CONCEPCION DEL ZACATECAS	CONFINES (1)	ESPE-SOR.	CARACTERISTICAS	
	PISOS	SUBPISOS					
CRETACICO SUPERIOR	DANIANO		Luzitania Paxinos Fm. Carrizal	1300m	800m	Lutitas coloradas de color negro, contiene algunas capas de areniscos.	
	MAESTRICHTIANO						
	SENONIANO	CAMPANIANO					
		SANTONIANO					
	CONIACIANO						
	TURONIANO						
CRETACICO INFERIOR	CENOMANIANO		Formación Indurra Cuesta del Cura Cz Aurero	180 m	310 m	Carca azul oscuro con abundantes lentillas de yeso, hacia la parte superior unestratificación lenticular y estratificación lenticular.	
	ALBIANO	SUPERIOR					
		MEDIO					
		INFERIOR					
	NECOMIANO OPTIANO	GARGASIANO					
		BECULIANO					
BARREMIANO							
HAUTERVIANO							
CRETACICO SUPERIOR	VALANGINEANO		Formación Teranes hiatus Unidad D Unidad C Unidad B Unidad A	120 m	340 m	Carca de color gris claro con nodulos de yeso gris y concreciones de sílice.	
	BERRIASIANO						
	TITHONIANO						
	PORTLANDIANO						
	BORONDIANO	HAYRIANO					
		SECUREANO					
JURASICO SUPERIOR	OXFORDIANO	ARCOVIANO		40-50 m	400m	Carca de color gris claro con estratos de yeso y lentillas de yeso, hacia la parte superior unestratificación lenticular y estratificación lenticular.	
		DIVESEANO					
		CALLOVIANO					

(1) IMLAY Y ROGERS

Fuente: Conjunto de fósiles naturales no renovables. Boletín 10, 1964 por E. Mapes Vazquez y otros

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

COLUMNA ESTRATIGRAFICA DEL DISTRITO  
NÚMERO DE CONCEPCION DEL ORD.  
ZACATECAS.

ARROYO OSORNO E GARCIA GARCIA M.  
BAUTISTA GONZALEZ A RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ FN.

TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. N.º IV. B

En la Formación Zuloaga se presenta la mineralización.

c) Cananea

En el distrito de Cananea han sido explotadas muchas minas, entre ellas se encuentran: La mina Cobre - Grande. El Capote Oversight, La Colorada. Este ha producido grandes cantidades de cobre que han ayudado al país en algunas crisis, además de ser una mina importante para este tipo de depósitos, siendo su estratigrafía la siguiente:

Las rocas más antiguas en el distrito minero de Cananea son de edad paleozoica y fueron depositadas sobre un basamento precámbrico granítico; por correlación de estas calizas Cananea con las de las montañas más próximas, se han definido las siguientes formaciones paleozoicas: Bolsa (Cámbrico), Abrigo (Cámbrico), Martín (Devónico) Escabrosa (Mississípico) y Horguilla (Pensilvánico).

Posteriormente, se encuentran tres formaciones pertenecientes a rocas volcánicas, que son: Elenita, Henrietta y Mesa, de la más antigua a la más joven, respectivamente. La edad de las acumulaciones volcánicas es Post-Paleozoica, probablemente del Mesozoico Superior al Cenozoico Inferior.

Entre los cuerpos intrusivos, equigranulares de -- origen abisal, se han reconocido los siguientes tipos en orden cronológico: Cuitaca, sienita Torre, diorita Tinaja y granito Cananea. Su edad es evidentemente Post-volcánica.

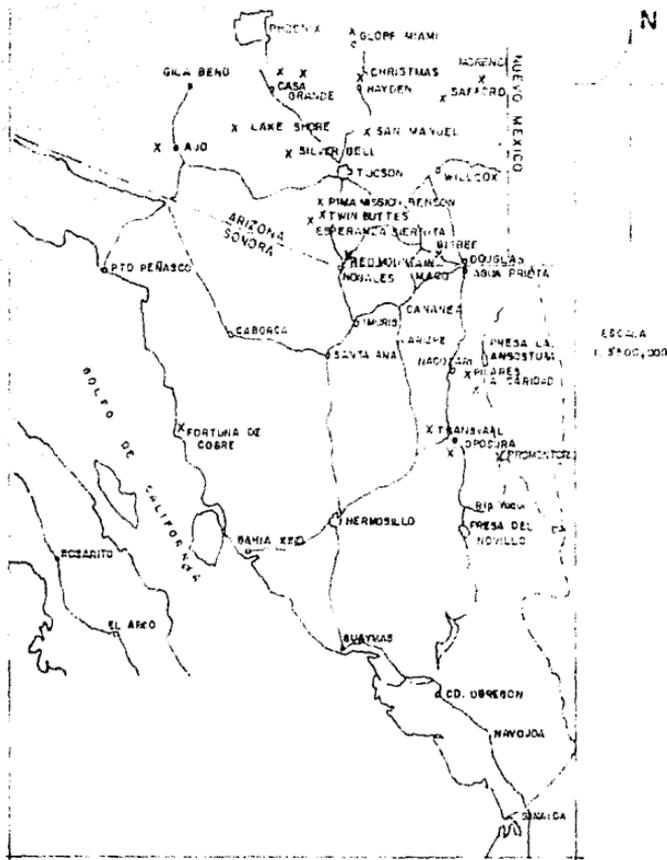
Los cuerpos intrusivos de origen poco profundo -- están representados por diabasa y gabro Campana, y los numerosos pórfidos cuarzo-monzoníticos y cuarcíferos. La diabasa y el gabro se encuentran en forma de diques.

Los pórfidos se representan como stocks o cuerpos -- relativamente pequeños e irregulares y ocasionalmente en forma de diques. Observándose la representación de las -- unidades en el plano geológico de la (Fig. IV.9).

Existe una franja de yacimientos cupríferos importantes entre Arizona y Sonora; la cual se muestra en la -- (Fig. IV.10) y se menciona a continuación los ejemplos -- localizados en esa área:

- Globe Miami, Casa Grande, Christmas, Morenci, - Sahord, San Manuel Lake Shore, Ajo, Silver Bell, Pima -- Mission, Twin Buttes, Esperanza Sierrita, Bisbee, Red - Mountain, Cananea, Fortuna de Cobre, Pilares, La Caridad, Transvaal, Oposuras y Promontorio.





PLANO DE LOCALIZACION DE LAS MINAS MAS IMPORTANTES Y LOS DESCUBRIMIENTOS MAS RELEVANTES EN ARIZONA Y SONORA.

X MINA

Fuente "Minas Mexicanas" Jorge E. Ordoñez (1988)

UNAM		FACULTAD DE INGENIERIA.	
		CIENCIAS DE LA TIERRA.	
FRANJA DE YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN ARIZONA Y SONORA			
ARROYO OSORNO E	GARCIA GARCIA M		
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A		
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ FN.		
TESIS PROFESIONAL.	1990	FIG. N° IV.10	

## FRESNILLO

Las rocas más antiguas que se conocen dentro del área son de tipo sedimentario, suprayacidas por un paquete formado de andesitas de estructura almohadillada con intercalaciones de sedimentos correspondientes al Cretácico; el Terciario está representado por una brecha sedimentaria, una serie de rocas volcánicas y un intrusivo cuarzozononítico; y por último, el aluvi6n correspondiente al Cuaternario.

Grupo Proaño. Es una secuencia de rocas sedimentarias que consta de grauvaca inferior, lutitas calcáreas y carbonosas y grauvaca superior; pertenecientes al Cretácico.

Formación Chilitos. Consiste de rocas volcánicas como andesitas y aglomerados andesíticos con intercalaciones de sedimentos como limolitas, areniscas y lentes de margas; pertenecientes al Cretácico Temprano, específicamente al Valanginiano-Hauteriviano.

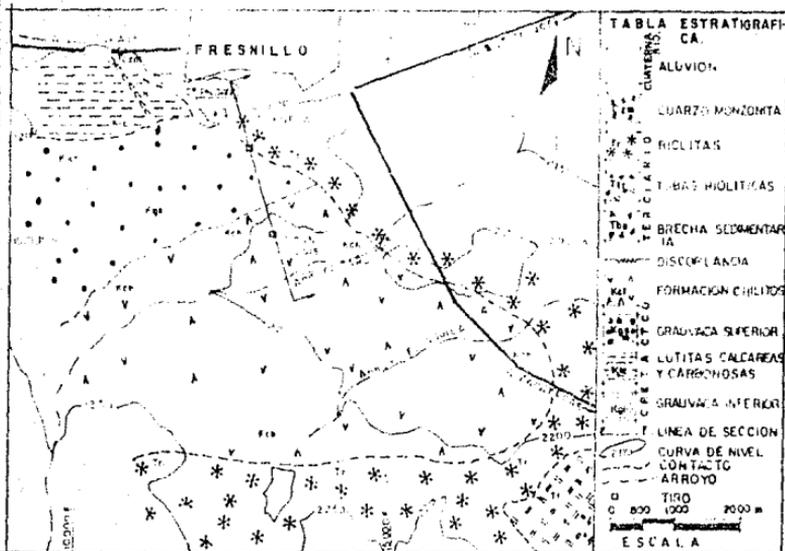
Sobreyacente a la Formación Chilitos existe un hiatus y luego se encuentra una brecha sedimentaria, la cual presenta fragmentos de areniscas, lutitas calcáreas y calizas.

Sobreyace a la brecha una toba riolítica del Oligoceno. Encima de las anteriores, se encuentran rocas que están constituidas por fenocristales de cuarzo, biotita y feldespato, contenidos en una matriz afanítica con vidrio volcánico.

También de edad oligocénica se encuentra un intrusivo de composición cuarzomonzónica que afecta a las grauvacas y a las lutitas calcáreas y carbonosas.

El aluvión cubre la mayor parte del distrito minero, y está compuesto por los sedimentos continentales -- que se han formado desde el momento de la emersión inicial en la región, hasta la actualidad. (Fig. IV.11).

IV.4.3. Mantos y Chimeneas. En el caso de los yacimientos de mantos y chimeneas son de importancia las mismas secuencias estratigráficas de los ejemplos de Concepción del Oro y Fresnillo, Zacatecas. Así también, deben tomarse en cuenta aquellas secuencias presentes en los distritos mineros de Charcas y Catorce, S.L.P.; Vellardeña, Durango; Santa Eulalia y Naica, Chihuahua; Zimapán, Hidalgo; Cuatro Ciénegas y La Encantada, Coahuila; etc., de las cuales pueden retomarse los siguientes ejemplos:



<b>UNAM</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>CIENCIAS DE LA TIERRA.</b>
<b>PLANO GEOLOGICO DEL DISTRITO.</b>	
<b>MINERO DE FRESNILLO.</b>	
ARCOYO OSORNO E	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	MOHIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.H.
<b>TESIS PROFESIONAL 1990</b>	<b>FIG. N.º II</b>

Fuente: "Minas Mexicanas" Jorge E. Ordoñez (1987)

CUATRO CIENEGAS, COAHUILA. - En esta área afloran rocas ígneas y rocas sedimentarias. Su estratigrafía -- está representada por la siguiente secuencia:

Grupo Zuloaga. En la Formación La Gloria dentro - de este grupo, se encuentran calizas en estratos gruesos con intercalaciones de arenisca de grano medio a grueso del Jurásico Superior-Oxfordiano.

Grupo La Casita. Específicamente en la Formación La Casita, se observan horizontes de lutita calcárea carbonosa con intercalaciones de caliza y arenisca, también del Jurásico Superior, pero en particular del Tithoniano.

Formación San Marcos. Constituida por una arcosa conglomerática, cloritizada, con estratos intercalados que presentan valores de cobre. Se le asigna una edad del Neocomiano.

Formación Las Vigas. Es correlacionable con la Formación San Marcos y no aflora en el área de estudio. Se trata de una arenisca calcárea de grano grueso, de estratificación mediana a gruesa y con intercalaciones de lutita. Hauteriviano Tardío-Barremiano.

Formación Cupido. Hauteriviano Superior-Aptiano -

Inferior. Consta de calcilutitas y calcarenitas de estr  
tificación mediana a gruesa, con estilolitas y nódulos -  
de pedernal.

Formación La Peña. Representada por calizas arcil-  
losas de estratificación delgada, con intercalaciones de  
lutitas. A la cual se le asigna una edad del Aptiano Su  
perior.

Formación Aurora. Constituída por calcilutitas y  
calcarenitas de estratificación mediana a gruesa pertene-  
cientes al Albiano.

Las rocas ígneas que afectan a las anteriores son  
intrusivas: pórfido granodiorítico y pórfido cuarzomonzó-  
nítico de probable edad terciaria.

Este yacimiento pertenece al modelo de mantos y --  
chimeneas con hidrotermalismo y está íntimamente relacio-  
nado con los pórfidos. Dentro de la Formación San Mar-  
cos se ubican unas series de mantos y lentes mineraliza-  
dos de cobre, además de existir mineralizaciones en for-  
ma de vetas-falla.

NAICA, CHIHUAHUA.- En esta región se encuentran -  
los tres diferentes tipos de rocas:

Metamórficas. De las cuales se distinguen dos dife-  
rentes: mármol y skarn con granate.

Sedimentarias. Las que presentan la siguiente se-  
cuencia: La Formación Aurora compuesta por tres miembros;  
el primero constituido por una caliza masiva con un hori-  
zonte de lutitas cerca de la cima, de edad Cretácico In-  
ferior, además se encuentra marmolizada, en el miembro me-  
dio se encuentran calizas en parte marmolizadas interca-  
ladas con otras que no están afectadas por el metamorfis-  
mo y, es donde se encuentra la mayoría de los cuerpos mi-  
nerales. El miembro superior consta de calizas con abun-  
dantes fósiles. Le sobreyace una unidad compuesta por -  
margas, lutitas calcáreas y arcillas, las cuales apare-  
cen directamente sobre el área mineralizada, de posible-  
edad Albiano Superior. Sobre esta unidad margosa se en-  
cuentran unas calizas masivas posiblemente del Cenomania-  
no.

Igneas. Las rocas ígneas que afloran en el área -  
son en forma de placolitos y diques angostos y lenticula-  
res, con frecuente piritización, indicados como félsicos  
y que afectan a la caliza Aurora; sobre la anterior se -  
encuentran tres tipos diferentes de rocas efusivas áci-  
das de probable edad terciaria: emisiones riolíticas y -  
tobas riolíticas.

El yacimiento se considera de mantos, chimeneas y vetas en sulfuros masivos con reemplazamiento hidrotermal en calizas.

MINA LA ENCANTADA, COAHUILA.- La estratigrafía local hace mención sólo a dos formaciones, sin embargo, se sabe que la mayoría de las masas montañosas del área están compuestas por calizas del Cretácico Inferior, mientras que los valles consisten de rocas del Cretácico Superior.

Formación Aurora. Constituida por tres unidades.- En la primera se encuentra una caliza masiva con alteraciones como recristalización, disolución, brechamiento y oxidación. En esta primera unidad se encuentra un conglomerado "intraformacional". La unidad dos está compuesta por calcilutita (caliza con nódulos de sílice). - La unidad tres la constituye una caliza arcillosa en la parte inferior, de estratificación delgada a gruesa, la cual se delimita de la anterior por un horizonte margoso, con nódulos de pedernal o de hematita botroidal o cristalizada del Albiano-Cenomaniano.

Formación Kiamichi. Compuesta por lutitas intercaladas con calizas de estratificación delgada y con nódulos de hematita botroidal.

Las rocas ígneas que afloran en el área son intrusivos riolíticos y andesíticos y diabasas, los cuales parecen tener relación y mineralización, la misma que se presenta en forma de mantos y chimeneas.

En conclusión, para las guías estratigráficas de los tres modelos tratados puede decirse lo siguiente:

- Pórfidos cupríferos.- Están emplazados en la cordillera del oeste americano, desde Alaska hasta Chile. Por tanto, el oeste mexicano es una zona que cuenta con grandes perspectivas para localizar este tipo de yacimientos.

Es conveniente realizar prospecciones mineras detalladas en aquellas áreas de la región mencionada que cuenten con emplazamientos de cuerpos plutónicos en rocas mesozoicas y cenozoicas, generalmente sedimentarias y volcánicas respectivamente.

- Yacimientos pirometasomáticos.- Esta forma se refiere sobre todo al aspecto genético, ya que puede ocurrir en diferentes modelos de yacimientos cupríferos. Una de ellas se relaciona con los pórfidos cupríferos mencionados, donde puede presentarse un paso gradual del pórfido propiamente dicho a la zona de skarn, como sucede en Cananea, Sonora. Por otra parte, existen emplaza-

mientos de cuerpos plutónicos en las calizas del Jurásico y Cretácico donde se forman aureolas bien definidas de metamorfismo de contacto; tal es el caso de Concepción del Oro, Zacatecas y, de La Negra, Querétaro.

- Yacimientos de mantos y chimeneas.- También - - aquí se alude a una forma genética que igualmente atañen a varios modelos de los yacimientos minerales. Entre -- los principales, se presenta el pasaje natural de los ya cimientos pirometasomáticos a hidrotermales en forma de mantos y chimeneas; en este caso se presentan las chimeneas, mantos y vetas con yacimientos polimetálicos en -- las calizas del Mesozoico. Desde el punto de vista estratigráfico, las siguientes formaciones son propicias - para contener mineralizaciones: Zuloaga, Caracol, El - - Abra, El Doctor. Todas ellas del oriente y norte del -- país, constituyen guías excelentes en la prospección de yacimientos de mantos y chimeneas. Como ejemplos pueden citarse: Zimapán, Hidalgo; Santa María de la Paz, Char-- cas, S.L.P.; Fresnillo, Zacatecas.

IV.4.4. Yacimientos Volcánicos. Dentro de los ya cimientos volcánicos pueden citarse los siguientes ejemplos, que abarcan desde el Precámbrico hasta el Reciente, y que incluyen una gran variedad de rocas volcánicas:

a) Mar de Plata en el distrito de Pachuca-Real del

Monte, Hidalgo. La secuencia estratigráfica presente en el distrito es:

Formación Doctor, compuesta por calizas de tipo -- arrecifal de estratificación mediana a gruesa; es la más antigua que aflora en la zona, con una edad del Aptiano Superior-Albiano. Sobreyace la Formación Soyatal, constituida por capas medianas a gruesas de caliza del tipo de la calcarenita, con algunas intercalaciones de lutitas y calizas arcillosas del Turoniano-Coniaciano y subyace a la Formación Mezcala, la cual consta de limolitas y lutitas con intercalaciones de grauvacas y margas, y está ubicada dentro del período Coniaciano-Maestrinchiano. También ésta, subyace a la Formación El Morro del Eoceno Superior-Oligoceno Medio, el cual fue definido (I) como un conglomerado calcáreo de origen continental, con algunas intercalaciones de material de composición basáltica y andesítica; es la primera unidad terciaria, siendo ambos contactos discordantes. Sobreyace a ésta el Grupo Pachuca del Oligoceno-Plioceno, y que incluye a la Formación Santiago del Oligoceno Inferior y que consiste de derrames de lava, brechas y tobas interestratificadas con una composición que varía de andesítica a riolítica. Sobre de ella se encuentra la Formación Corteza del Oligoceno Medio-Superior, y se define como una serie de derrames andesíticos y basálticos con un miembro tobáceo

---

(I) Segerston, (1961).

basal. Arriba se encuentra ubicada la Formación Pachuca del Oligoceno Superior-Mioceno Medio, la cual consiste - de un miembro vulcanosedimentario en la base y, cubierto por derrames andesíticos y dacíticos interestratificados con varios miembros tobáceos lenticulares, alternados -- con brechas y aglomerados volcánicos. En el Mioceno Inferior-Medio se encuentra la Formación Real del Monte -- constituida por brechas volcánicas andesítico-dacíticas, con interestratificaciones de tobas y rocas volcánicas - de la misma composición.

Cronológicamente le subyace el miembro clástico de la Formación Santa Gertrudis, aunque la que descansa discordantemente es la Formación Vizcaína. La primera del Mioceno Medio-Superior, corresponde a rocas volcánicas - andesítico-dacíticas con productos piroclásticos; mientras que la segunda está compuesta por derrames de lava y capas de brecha andesítico-dacíticas, y que también -- tienen una franja compuesta por tobas de composición intermedia. Esta Formación subyace a la Formación Cerezo del Mioceno Superior-Plioceno Inferior, compuesta de derrames lávicos, así como brechas volcánicas de tipo andesítico y dacítico y hasta riodacítico. Del Plioceno Inferior se encuentra la Formación Tezuantla, la cual consta de una serie de derrames de lava dacítica, los cuales muestran un bandeamiento coloreado producido por alteración y fluidez. Y ésta subyace a la Formación Zumate --

del Plioceno Medio, la cual está representada por una sucesión de derrames dacíticos, brechas y aglomerados de la misma composición, además de ignimbritas. Por último, se encuentra la Formación San Cristóbal del Plioceno Superior, y está constituida por derrames de andesitas de olivino (I), con algunas intercalaciones de tobas de composición andesítica.

Localmente, la estratigrafía que aflora en el área, pertenece a la Formación Viscaína (Fig. IV.12), la cual forma parte del Grupo Pachuca y que está constituida por rocas de tipo andesítico a dacítico, con algunas brechas y tobas de la misma composición; además, a nivel regional se presentan las siguientes alteraciones: oxidación, propilitización, cloritización y carbonatación. Y aquí es donde se presenta la mineralización en forma de vetas paralelas.

b) El Distrito Minero de Tahuehueto, Durango está compuesto por la siguiente columna estratigráfica:

Rocas andesíticas, las cuales ocurren en la parte inferior de la columna, en parte como roca encajonante de la mineralización. Regionalmente sobreyacen al complejo cristalino.

---

(I) Coyne et. al. (Publicación CRMNR).



Rocas dacíticas que presentan una alteración bastante fuerte, de tal manera, que sólo es posible observar la textura. Se presentan intercaladas dentro de las andesitas, como rocas encajonantes de la mineralización.

Rocas riolíticas. Estas rocas se presentan al final de la columna estratigráfica en la región, coronando las partes superiores de la sierra del distrito de Tahuhueto.

Rocas cuarzomonzoníticas y granodioríticas, las cuales se encuentran intrusionando a rocas andesíticas y dacíticas; en parte se presentan como encajonantes de la mineralización; por tanto, estas rocas son post-tectónicas y pre-ignimbríticas. Y por último se encuentran las ignimbritas.

Los cuerpos mineralizados se encuentran alojados en estructuras en forma de vetas. Las rocas encajonantes de la mineralización son de tipo andesítico, dacítico, cuarzomonzonítico y granodiorítico, todas ellas pertenecientes al Terciario.

En el distrito existen dos tipos de alteraciones con origen aparentemente diferente. La primera asociada a la mineralización cuprífera existente dentro de los cuerpos plutónicos (turmalina-clorita, sericita, cuarzo,

pirita). El segundo tipo se encuentra directamente asociado a la mineralización presente en las vetas (cuarzo, sericita, clorita y calcita).

Así mismo, la mineralización puede clasificarse en dos tipos diferentes: una de carácter pneumatolítico e hidrotermal que se enmarca dentro de los emplazamientos plutónicos y que pertenece al tipo de pórfidos de cobre; y que se presenta como disseminaciones y en finas microvetillas dentro de los plutones. La otra de carácter hidrotermal asociada al vulcanismo y que tiene lugar en el momento de finalizar las extrusiones (andesítico-dacíticas) y con anterioridad a las ignimbritas; estas vetas se encuentran encajonadas por todo el Terciario.

c) Mineral de Dolores, municipio de Madera, Chihuahua. Las rocas más antiguas de la región consisten en una sucesión de areniscas cuarcíticas con intercalaciones delgadas de lutitas y conglomerados, así como areniscas y lutitas con intercalaciones de carbón, pertenecientes todas ellas al Grupo Barranca del Triásico-Jurásico.

Las calizas Cretácicas afloran en el mineral de Guaynopita, Chihuahua, y son consideradas de la Formación Tarahumara.

Rocas volcánicas en derrames y piroclastos terciarios de composición andesítica y riolítica descansan sobre basamento Pre-Terciario del distrito minero; subyacen a la secuencia volcánica de basalto y conglomerados contemporáneos:

- Las andesitas son las rocas más antiguas que se observan en el distrito y pertenecen al Oligoceno.

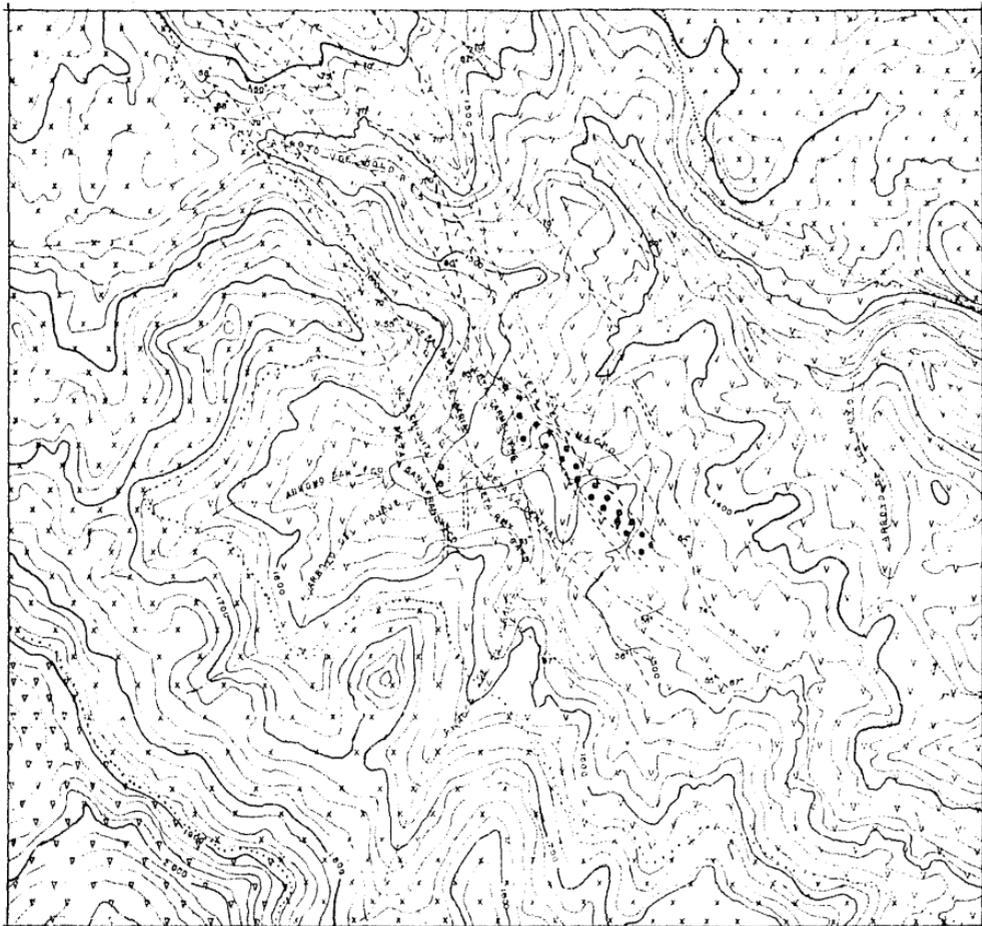
- Tobas andesíticas, las cuales inician el depósito con capas de materiales piroclásticos, con cenizas volcánicas y con pseudoestratificación. Se presenta posteriormente un aglomerado andesítico. Las últimas emanaciones de material piroclástico son tobas pseudoestratificadas, de edad miocénica.

- Sobreyacen a las anteriores unas tobas de naturaleza riolítica, ignimbritas del Mioceno Tardío.

- Por último, se encuentran derrames de tipo basáltico a los que les corresponde una edad del Plioceno.

- Existen diques básicos y brechoideos de composición granítica y diorítica post-Oligocénicos. (Fig. - - IV.13).

Las andesitas son las rocas donde se encuentra alo



LEYENDA

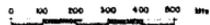
SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS.

- PUNTO TOPOGRÁFICO ..... 
- CURVA DE NIVEL ..... 
- ARROYO ..... 
- MINA ..... 

SÍMBOLOS GEOLÓGICOS.

- VETA ..... 
- VETA PROYECTADA ..... 
- RUMBO Y ECHADO ..... 
- FALLA ..... 
- CONTACTO GEOLÓGICO OBSERVADO ..... 
- BASALTO ..... 
- TOBA RIOLÍTICA ..... 
- TOBA ANDÉSITICA ..... 
- DIQUE ..... 

ESC 1:3000



UNAM FACULTAD DE INGENIERIA.  
CIENCIAS DE LA TIERRA.

PLANO GEOLÓGICO-TOPOGRÁFICO DEL MINE-  
RAL DE DOLORÉS, MIO. DE MADERA, CHH.

ARROYO OSORNO E. GARCÍA GARCÍA H.  
BAUTISTA GONZÁLEZ A. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ A.  
CERÓN SANTILLÁN C. RUINSTEIN JIMÉNEZ FN.  
TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. N.º 13

jada la mineralización, las cuales se encuentran alteradas hidrotermalmente (propilitización, silicificación) y lixiviadas por intemperismo; además presentan un alto grado de facturamiento.

En superficie presentan una coloración rojiza debido a los óxidos de hierro derivados, en parte, de la alteración de los minerales ferromagnesianos. Esta roca también presenta piritización, la cual aumenta al aproximarse a las estructuras mineralizadas (vetas), que constituyen parte de un sistema de relleno de fracturas y fallas, formando clavos o rosarios.

EL BARQUEÑO, JALISCO.- En la región se encuentran tobas alteradas: silicificadas, cloritizadas y caolinizadas; las cuales descansan sobre paquetes volcánicos y sedimentarios de edad cretácica. Estas unidades se encuentran intrusionadas por una diorita muy compacta. Como último evento volcánico se tienen derrames basálticos y rocas de composición riolítica, consideradas como de una fase Oligo-Miocénica; para finalizar en el Cuaternario con depósitos residuales y aluvión, que cubren la mayor parte de la zona.

En la unidad de las tobas se tiene un potente paquete de piroclastos, que varía desde aglomerados hasta tobas finas, brechas volcánicas, tobas de lapilli y tobas -

gruesas, (Fig. IV.14).

La estructura mineralizada tiene un espesor de aproximadamente 20 m. Consiste en una franja de cisallamiento con la mineralización aurífera diseminada en un promedio de 3 gr/ton dentro de la zona de oxidación. En la zona de minerales primarios, la cantidad de oro decrece a unas cuantas décimas de gr/ton, y el cobre se incrementa (calcopirita) hasta 2.5 y 3%.

En resumen, los yacimientos volcánicos asociados al cobre se presentan con mayor frecuencia en la franja del Eje Neovolcánico, gran parte de la Sierra Madre Occidental, así como en el extremo sur de la Sierra Madre Oriental y, en la parte norte de la República Mexicana, como son los estados de Chihuahua, Sonora y Sinaloa. Si se observa en un mapa de provincias fisiográficas (I) de la República Mexicana, el lineamiento de los distritos mineros en este modelo en las regiones mencionadas, puede seguirse por una orientación W-NW al norte del Eje Neovolcánico y, posteriormente, en dirección NW/SE en la misma orientación de la Sierra Madre Occidental.

IV.4.5. Yacimientos asociados a rocas básicas y ultrabásicas.- No se menciona por no existir un ejemplo que sirva de guía.

---

(I) Raisz. Mapa de provincias fisiográficas.



IV.4.6. Yacimientos Vulcano-Sedimentarios.- En lo que se refiere a este tipo de yacimientos, se consideran que han sido depositados en forma intermitente desde el Precámbrico con períodos de actividad ígnea y períodos de sedimentación en diferentes épocas, y de los cuales pueden diferenciarse dos tipos: uno sin metamorfismo y el otro con un metamorfismo de bajo grado.

Refiriéndose al primer tipo de depósito, se considera la formación de un arco de islas con cuenca marginal, creada a partir de una tectónica distensiva en la zona de post-arco. La edad del arco es Cretácico Temprano. Este marco geológico contiene los sulfuros masivos polimetálicos más importantes de México. Se propone el nombre de "Secuencia volcansedimentaria no Metamórfica" para este conjunto litológico.

Para el segundo caso, está la formación de un arco volcánico submarino con alto contenido de pelíticos en la zona de post-arco. La mineralización es sinsedimentaria de cobre-pirrotita en el arco y polimetálica en el post-arco. Estas rocas están afectadas por un metamorfismo epizonal de las facies esquistos verdes. Se propone el nombre de "Secuencia volcansedimentaria Metamorfizada" para estas rocas cuya edad es Permo-Triásica.(1)

---

(1) Estas secuencias fueron definidas por González y Torres.

La secuencia volcanosedimentaria no metamórfica se divide en 3 partes:

1. Noroccidental, donde afloran rocas carbonatadas correspondientes a una facies arrecifal del Albiano-Cenomaniano, perteneciente a la plataforma Morelos-Guerrero.- Esta caliza presenta varios cambios de facies, en ocasiones es arcillosa y, a veces, pasa a lutita negra, las cuales están intercaladas con rocas volcánicas de composición riolítica-riodacítica (2). Estas rocas sobreyacen a tobas arenosas y conglomerados en algunas regiones.

2. Centro-Oriental.- Entre el sur del Eje Neovolcánico y la Cuenca del río Balsas, aparece una secuencia de derrames de lava, tobas y lahares de composición andesítico-dacítica, interestratificados con sedimentos terrígenos (lutitas, areniscas y conglomerados).

3. Suroccidental.- Aquí existen numerosos afloramientos de rocas volcánicas andesíticas, calizas, lutitas, areniscas, tobas y conglomerados; en algunas porciones -- aparecen extensos afloramientos de rocas volcánicas submarinas andesíticas, basaltos almohadillados interestratificados con capas de limolitas, conglomerados volcánicos y capas de caliza sub-arrecifal.

---

(2) Ortigoza (1983)

Para la secuencia volcanosedimentaria metamórfica - son evidentes algunas unidades volcánicas submarinas con abundantes pelíticos, metamorfizadas a facies de esquistos verdes, de edad Pre-Jurásica.

Las rocas de la Formación Chapolapa son filitas, -- conglomerados rojos, brechas, tobas, lavas y areniscas, - afectados todos por un metamorfismo de facies de esquistos verdes.

Enseguida se proponen dos ejemplos para estos tipos de yacimientos:

DISTRITO MINERO DE CUALE, JALISCO.- Este yacimiento pertenece a los vulcanosedimentarios de tipo Kuroko. - Se caracteriza por la presencia de un paquete de rocas metasedimentarias correspondientes a filitas, posiblemente del Triásico Tardío-Jurásico Temprano. Esta unidad sólo sirve de base para la secuencia. A ella, le sobreyace -- discordantemente un depósito volcanosedimentario que está compuesto por una alternancia de lutitas negras e igualmente líticas con rocas volcánicas ácidas, de posible -- edad Oxfordiano-Albiano. En el camino de Puerto Vallarta a San Sebastián, Jalisco (1) se descubrió una secuencia - de riolitas del Cretácico Tardío. Del Cretácico Medio al

---

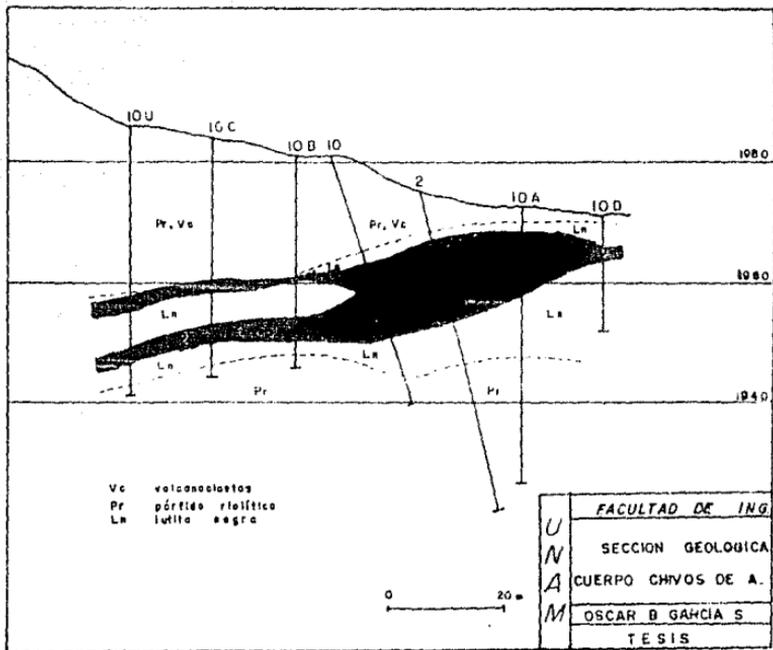
(1) Jensky, (1975).

Tardío se inicia el emplazamiento de los batolitos, constituidos por granitos y granodioritas. Para el Terciario sucede el emplazamiento de un pórfido riolítico, una secuencia volcanoclástica, sobreyacida por tobas y limolitas y, coronadas éstas por riolitas.

La mineralización se encuentra emplazada en las lutitas negras y tobas félsicas, las cuales presentan alteraciones como: silicificación, argilización, sericitización, cloritización, caolinización y oxidación. Normalmente se presentan en stockwork o en cuerpos estratificados formando lentes alineados de distintos tamaños; los primeros en los pórfidos y, los segundos en estratos tobáceos, arenas y lutitas. (Fig. IV.15).

Estos depósitos son similares a los del tipo "Kuroko" y tienen una amplia distribución en tiempo y espacio; se los encuentra desde el Paleozoico hasta el Reciente. Tienen importancia en algunas franjas eugeosinclinales del Paleozoico como: Canadá (Newfoundland), Australia (Rosebery) y Europa (Norwegian Caledonics, Mansfeld, Río Tinto, España).

TLANILPA-AZULAQUEZ, GUERRERO.- Dentro de los yacimientos vulcanosedimentarios metamórficos se hace mención de la secuencia estratigráfica del área de Tlanilpa-Azulaquez, Guerrero, la cual queda definida de la siguiente --



FUENTE: Tesis Profesional de OSCAR B. GARCIA S., 1987

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA  
SECCION GEOLOGICA  
CUERPO CHIVOS DE A., Cuernavaca, Jalisco.  
ARROYO OSORNO E. GARCIA GARCIA H.  
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ FN.  
TESIS PROFESIONAL 1980 FIG. N° IV 15

forma:

Esquiste Taxco, es la unidad más antigua de la región y forma el basamento sobre el cual se depositaron todas las demás unidades. Esta consiste de rocas meta-volcánicas y metasedimentarias y representa una secuencia que originalmente eran lutitas, grauvacas y rocas volcánicas, cuya edad corresponde al Precámbrico Tardío; las rocas más comunes son: esquistos de sericita y cuarzo, esquistos grafiticos, pizarras negras, metaignimbritas, metatobas; afectadas por un metamorfismo en facies de esquistos verdes, indicado por la presencia de sericita, clorita y epidota. Sobreyace a éste, la Rocaverde Taxco Viejo que se compone principalmente de una secuencia de derrames de lava y tobas, de composición intermedia a básica y con algunos intervalos de grauvacas y pizarras negras, del Triásico. Para el Cretácico, la primera Formación que aflora es la Acuitlapán, la cual consiste en una serie de capas delgadas arcillosas y limosas, con intercalaciones de capas de caliza negra delgadas y afectadas con cambios metamórficos a filita pizarrosa del Neocomiano. Suprayace a la anterior la Formación Xochicalco, definida como una secuencia de calizas de estratificación delgada a mediana e intercalada con limolitas calcáreas y lutitas y pedernal negro, perteneciente al Aptiano. Del Albiano-Cenomaniano se encuentra la Formación Morelos que está constituida por una suce-

sión de capas de calizas y dolomías con anhidrita y peder-  
nal. Entre ésta y la Formación Mezcala se tiene una uni-  
dad informal (I) de calizas del tipo calcarenitas a cal-  
ciruditas, de estratos delgados. La Formación Mezcala -  
compuesta en la base por calizas, y en la parte superior  
por lutitas y grauvacas, pertenece al Turoniano-Coniacia-  
no. Para el Terciario se tiene el Grupo Balsas, que con-  
siste de una secuencia continental formada de conglomerados  
de calizas y de rocas metamórficas y volcánicas anti-  
guas, arcosas y limolitas; así como de calizas de agua -  
dulce junto con derrames basálticos interestratificados,  
a la cual se le atribuye una edad del Eoceno Medio al ---  
Oligoceno Temprano. Suprayace a la anterior la Riolita -  
Tilzapotla, que son rocas piroclásticas y derrames volcá-  
nicos asociados, de composición riolítica y riodacítica,  
con un espesor que varía de 100 a 300 m, y que correspon-  
de al Oligoceno Tardío.

Posteriormente se tiene la presencia de una serie -  
de depósitos y derrames volcánicos que están comprendidos  
en las siguientes unidades litoestratigráficas:

- Andesita Buenavista (Mioceno)
- Tobas, brechas volcánicas y lahares (Mioceno Tar-  
dío).
- Formación Tepoztlán (Mioceno)

---

(I) De Cserna, (1976).

- Andesita Zempoala (Plioceno Tardío-Pleistoceno)
- Andesita (Pleistoceno)
- Formación Chontalcoatlán (Plioceno Medio)
- Formación Cuernavaca (Plioceno Tardío)
- Basaltos y Aluvial (Cuaternario)

Los cuerpos mineralizados se presentan en mantos, de forma lenticular o de rosario, que conservan siempre el paralelismo con la foliación; la roca encajonante es la secuencia de rocas metasedimentarias del Esquisto Taxco; específicamente un horizonte de pizarras negras, donde el material arcilloso presente se encuentra sericitizado y silicificado, con material bituminoso y cuarzo. (Fig. IV.16).

El paquete de rocas sedimentarias de esquistos del Esquisto Taxco, constituye una guía importante para la búsqueda de este mineral en este tipo de yacimientos.

Estos yacimientos se originaron a partir de un vulcanismo ácido-intermedio, en un medio marino, con una sedimentación pelítica penecontemporánea, en un ambiente eugeosinclinal.

E D A D		FORMACION	ESPESOR	DESCRIPCION GENERAL	
PLEISTOCENO RECIENTE		0 CONTINENTALES	0 - 30	ALUVION	
OLIGOCENO SUPERIOR		RIOLITA TILZAPOTLA	0 - 300	SECUENCIA DE ROCAS PIROCLASTICAS Y DERRAMES VOLCANICOS ASOCIADOS DE COMPOSICION RIOLITICA A RIODAGITICA	
OLIGOCENO INFERIOR EOCENO MEDIO		GRUPO BALBAS	0 - 380	CONGLOMERADOS DE CALIZA, ROCAS METAMORFICAS Y VOLCANICAS ANTIGUAS, ARCOSAS Y LIMOLITAS, ALGUNOS DERRAMES BASALTICOS INTERESTRAFICADOS.	
O U T A R C E N O	CORIACIANO		FORMACION MEXCALA	0 - 600	LA PARTE INFERIOR CONSISTE DE CALIZAS DELGADAS A MEDIANAS, CAMBIANDO HACIA ARRIBA A UNA SECUENCIA DE LUTITAS CALCAREAS Y ORAUVACAS.
	TUNOHIANO				
	CENOMANIANO		FORMACION MORELOS	0 - 1400	SUCESSION DE CAPAS DE CALIZA Y DOLOMITA INTERESTRAFICADAS, CANTIDADES VARIABLES DE PEDERNA EN FORMA DE MODULOS, LENTES Y GRANOS.
	ALBIANO				
	APTIANO		FORMACION BOCHICALCO	0 - 180	CALIZA GRIS OSCURA CON INTERCALACIONES DE LUTITA Y LIMONITA CALCAREA, LOCALMENTE PEDERNA NEGRO.
	NEOCOMIANO		FORMACION ACUITLAPAN	0 - 180	LUTITAS, LIMOLITAS Y CAPAS DELGADAS DE CALIZA, RECRISTALIZA EN PARTE A FILITA PIZARROSA.
TRIASICO		ROCAVERDE TAXCO VIEJO	0 - 300	TODAS, BRECHAS, PORFIDOS ANDESITICOS Y ARENISCAS SE PRESENTA COMO UNA ROCA VERDE CLORITICA ALTERNADA Y FOLIADA.	
CRETACICO SUP.		ESQUISTO TAXCO	0 - 300	ALTERNANCIA DE ROCAS METASEDIMENTARIAS Y METAVOLCANICAS, QUE SE PRESENTAN COMO ESQUISTOS DE SERICITA, PIZARRAS BITUMINOSAS CALCAREAS Y ESQUISTOS CUARZO-FELOSPA-TICOS, METATODAS, PORFIDOS RIOLITICOS Y META SANMITAS.	

UNAM		FACULTAD DE INGENIERIA	
		CIENCIAS DE LA TIERRA.	
		COLUMNA ESTRATIGRAFICA DE TLANILPA - AZULAOQUEZ, GRO.	
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA M.		
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.		
CERON SANTILLAN C.	RODRIGUEZ JIMENEZ EN.		
TESIS PROFESIONAL.	1980	FIG. N.º	XXII

IV.4.7. Cobre Sedimentario.- En general, los depósitos sedimentarios son definidos dentro de horizontes estratigráficos desde el Proterozoico; existen también en el Cámbrico, Ordovícico, Devónico, Carbonífero, Pérmico, seguidos en el Triásico Temprano, Cretácico Inferior, en el Mioceno y en el Plioceno. Se distribuyen en diversos sitios de la tierra, y con diferentes contenidos o concentraciones de minerales y elementos. Este tipo de depósitos son originados en períodos donde disminuyen los movimientos orogénicos y basado en el principio de transgresiones, con secuencias de capas de lutitas y limolitas, con espesores de 20 a 400 cm, producto de barreros marinos dispuestos en pendientes suaves, con areniscas calcáreas y calizas marinas, en parte margosas.

No se conocen localidades en el país de yacimientos característicos de este modelo.

Por otra parte, Routhier (pp; 898) menciona un tipo de yacimiento sedimentario asociado a areniscas rojas (red beds) en formaciones detríticas gruesas, arenosas y arcillo-arenosas. Tampoco de este tipo existe un yacimiento bien definido en el país; sin embargo, se puede mencionar la Formación "Las Vigas" en el norte de Chihuahua (I). En esta Formación se encontró una arenisca con

---

(I) Informe inédito de Fernando de la Fuente Lavalle (CRIMR).

calcopirita diseminada, aparentemente de origen ingené  
tico a la roca. No obstante, a la fecha, no se conocen  
trabajos de más detalle sobre tal formación.

#### IV.5. GUIAS ESTRUCTURALES

IV.5.1. PORFIDOS CUPRIFEROS

IV.5.2. PIROMETASOMATICOS

IV.5.3. MANTOS Y CHIMENEAS

IV.5.4. VOLCANICOS

IV.5.5. ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS

IV.5.6. SULFUROS VULCANO-SEDIMENTARIOS

IV.5.7. COBRE SEDIMENTARIO

De los yacimientos de pórfidos cupríferos existe -- una transición a los yacimientos pirometasomáticos y de estos a su vez, pueden pasar a yacimientos hidrotermales. Para lo cual es necesario recordar algunos términos:

1. MANTOS.- Son mineralizaciones que siguen los planos de menor resistencia de las rocas encajonantes, tales como: estratificación, esquistosidad, etc., y que son paralelas a la dirección de sedimentación.

2. CHIMENEAS.- Son cuerpos mineralizados de forma tubular, verticales o muy inclinados, con secciones más o menos circulares o elípticas.

3. VETAS.- Son cuerpos tabulares de caras más o menos paralelas, de poco espesor respecto a las otras dimensiones; se forma al seguir zonas de fallas o fracturas

y las cuales son generalmente el resultado de su relleno. En ellas se puede presentar algo de reemplazamiento. Este tipo de estructuras se definen por medio de cuatro datos estructurales: Rumbo, echado, pitch y plunge.

IV.5.1. Las estructuras que se presentan en los pórfidos cupríferos pueden ser chimeneas brechadas y stockworks, dentro de los intrusivos.

IV.5.2. En ocasiones los yacimientos pirometasomáticos pueden conservar la estructura estratiforme de las rocas encajonantes y por lo tanto ser cuerpos estratiformes; lo mismo puede suceder cuando son disseminaciones, o los que se presentan en forma lenticular.

IV.5.3. En los yacimientos de tipo epigenético las estructuras superpuestas a las rocas han ejercido gran influencia en particular: las fallas, fracturas y pliegues, lo que da origen a estructuras mineralizadas (mantos, chimeneas y vetas) que se forman posteriormente a la roca almacenadora y las cuales pueden definirse como yacimientos de mantos y chimeneas.

IV.5.4. En los yacimientos de tipo volcánico normalmente las mineralizaciones forman cuerpos estratiformes, o bien, en forma disseminada dentro de los tipos de

yacimientos singenéticos. Pero en ocasiones forman vetas, pues los fluidos mineralizantes siguen los planos de fallas o fractura, formando así yacimientos epigenéticos como vetas, filones y stockworks.

IV.5.5. Los asociados a rocas básicas y ultrabásicas presentan normalmente vetas, filones y stockworks, o bien, en forma diseminada.

IV.5.6. Estos depósitos son localizados en franjas regionales de rocas vulcanogénicas controladas por fallas profundas desde la zona de Benioff, las cuales pueden ser longitudinales, transversales o diagonales respecto al plano general de las estructuras tectónicas. Pudiendo mencionarse como de naturaleza tectónico-volcánica.

Puede decirse que son gargantas tectónicas que surgen en el estadio temprano del ciclo eugeosinclinal, y dejan de existir hacia el estadio medio del ciclo geosinclinal (Smirnov).

Su forma depende en general, de la disposición de la unidad sedimentaria que la contiene, por lo que pueden ser cuerpos estratiformes que forman lentes alineados con dimensiones diversas y stockworks al mismo tiempo.

IV.5.7. Los yacimientos de cobre sedimentario se presentan en forma singenética como diseminaciones, pero en algunos casos se forman como filones que aparentemente son producto de actividad hidrotermal, dando yacimientos de tipo epigenético.

## IV.6. GUIAS MINERALOGICAS

### IV.6.1. PORFIDOS CUPRIFEROS

### IV.6.2. PIROMETASOMATICOS

### IV.6.3. MANTOS Y CHIMENEAS

### IV.6.4. VOLCANICOS

### IV.6.5. ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS

### IV.6.6. SULFUROS VULCANO-SEDIMENTARIOS

### IV.6.7. COBRE SEDIMENTARIO

IV.6.1. En este tipo de guías de suma importancia tomar en cuenta las condiciones climáticas, así - - como el grado de erosión. Si se consideran condiciones áridas y un drenaje moderado de erosión, el nivel freático desciende y los procesos de solución y depositación de cobre son retenidos hasta una cubierta sub-horizantal de sulfuros de cobre secundarios, que normalmente presentan una gradación ascendente de material primario; por ello se crea una zona de enriquecimiento secundario que depende de varios factores: clima, mineralización, fisiografía, etc. La zona enriquecida está cubierta por otra irregular, en la cual los minerales de cobre supergénicos: como carbonatos, óxidos, silicatos, etc. se encuentran asociados; estos ocurren dentro de una zona lixiviada y oxidada. La mena secundaria puede mostrar productos limolíticos derivados de la pirita y de la oxidación y re-oxidación de la cubierta de calco-

cita. Sobre la combinación de las menas primarias y secundarias, se produce la oxidación de la pirita, sulfuros de cobre primarios y secundarios y la molibdenita.

Dentro de esta prospección son tomadas en cuenta las coloraciones de las rocas, como guías para ciertos minerales (y zonas). Por ejemplo, la lixiviación de la cubierta puede mostrar un color azul o verde, con parches pardos y manchas de minerales de cobre secundario y óxidos de hierro, aunque no siempre sirven como diagnóstico para encontrar el depósito.

La magnetita puede ser una guía para pórfidos y otros tipos de menas de cobre.

También en este caso se tratarán los yacimientos de pórfidos, junto con los pirometasomáticos, mantos y chimeneas. Y para un mejor entendimiento, se definirán primero los siguientes términos:

Paragénesis.- Fue creado por Breithaupt, (1849). Es la asociación de minerales resultantes de un proceso geológico determinado. Un mismo depósito puede presentar varias paragénesis que no son contemporáneas, y que si están yuxtapuestas.

Sucesión.- Según Routhier, se define como el - -

orden en que se depositaron los diferentes minerales de una paragénesis durante el desarrollo de un proceso geológico.

Alteración.- Son los cambios que sufren las rocas o minerales en cuanto a su composición química, textura, dureza, color, etc. De las cuales existen dos tipos: supergénicas (en las que se muestra el diagrama de Emmons y/o Fersman) y las hipogénicas.

Otra aclaración que debe tenerse presente en estos yacimientos son los términos descriptivos de "lode" y -diseminado, lo cual se resume de la siguiente manera:

#### Paragénesis y Sucesión

"Lode"	Diseminado
Enargita y bornita como minerales de ganga. <u>Pi</u> rita abundante.	Calcopirita como mineral de mena, pirita menos abundante y tardía.
Esfalerita ubicada en la zona de cobre, y que procede la mineralización.	Esfalerita rara en la zona de cobre.

Sn-W-Bi como minerales  
traza en la zona de co  
bre central.

Molibdenita común en la  
zona central de cobre y,  
más profunda.

Zonamiento lateral de los principales minerales  
opacos

CENTRAL.- Pirita-Enar-  
gita con minerales traza  
za: Sn-W-Bi

CENTRAL.- Bornita-Calco-  
pirita Magnetita o piri-  
ta-calcopirita con molibdenita.

INTERMEDIA.- Pirita-Bor-  
nita-Calcopirita-Tenan-  
tita, con menor grado -  
de esfalerita.

INTERMEDIA.- Pirita-Cal-  
copirita.

PERIFERICA.- Pirita-Cal-  
copirita-Tenantita-Esfa-  
lerita-Galena, menor --  
cantidad de hematita.

PERIFERICA.- Pirita con\_  
menor cantidad de calco-  
pirita, tenantita, esfa-  
lerita, galena y hemati-  
ta.

CALIZA.- Pirita, Borni-  
ta, Calcopirita, Tenan-  
tita, Esfalerita, gale-  
na, en menor proporción  
galena y hematita.

CALIZA.- Pirita, Calcopi-  
rita Magnetita, en menor  
cantidad esfalerita, Te-  
nantita y Pirrotita.

## Minerales de Ganga Principales

---

Cuarzo, pirita, sericita, caolinita, alunita-bari-- ta, carbonatos.	Feldespatos, biotita, -- cuarzo, anhidrita y seri- cita.
--	--

---

### Zonacamiento lateral en cuanto a tipos de Alteración

---

CENTRAL.- Argilización y - silicificación avanzada -- (pirofilita o caolinita -- reemplaza a la sericita).	CENTRAL.- Potásica (bio- tita reemplaza hornblen- da, ortoclasa reemplaza_ a plagioclasa).
INTERMEDIA.- Sericítica -- (sericita reemplaza a mont morillonita y ortoclasa).	INTERMEDIA.- Sericítica_ (sericita reemplaza a -- feldespatos).
PERIFERICA.- Grados de ar- gilización intermedia, bien desarrollados (montmorillo nita reemplaza a máficos).	PERIFERIA.- Argilización casi ausente; gradúa a - propilítica.
CALIZA.- Cuerpos masivos - de cuarzo pirita; mantos - que contienen siderita, -- calcita, especularita, mag netita, clorita y arcillas.	CALIZA.- Skarns zoncados con andradita-diópsida;_ actinolita, clorita, ar- cillas y pirita.

Los tres principales tipos de alteración para es  
tos yacimientos son:

1. Potasio-silicato.- Caracterizada por moscovita (sericita), biotita, feldespatos y otros minerales no diagnósticos.

2. Argílica.- Caracterizada por moscovita (sericita), caolinita y minerales arcillosos (dickita, montmorillonita, etc.)

3. Propilítica.- Caracterizada por moscovita (sericita), epidota, clorita, minerales carbonatados, etc.

Estas alteraciones son presentadas en el modelo propuesto por Lowell y Gilbert de la Fig. III.5.

Estas alteraciones se presentan en forma zonada con variaciones químicas y mineralógicas bien marcadas que delimitan zonas de diferente composición en los yacimientos minerales, (Spurr, 1907), y las cuales pueden ser verticales y horizontales, a partir de los cuerpos intrusivos graníticos; existe una cierta concordancia con los esquemas de Emmons y Fersman.

IV.6.2. En particular para los yacimientos piro-metasomáticos, la paragénesis se caracteriza por:

- Minerales de mena.- Calcopirita, pirrotita - esfalerita, molibdenita, arsenopirita, bornita o cubanita.

- Minerales de ganga.- Wollastonita, piroxenos, magnetita, granate, calcita, tremolita, escapolita y feldespatos K. Asociados con elementos como: Fe, Zn, Mo. Para ello deben tomarse en cuenta, las condiciones físicas y químicas de la roca encajonante, así como de los fluidos que circulan en ella, y de la composición, volumen y profundidad del intrusivo.

Los minerales como malaquita y azurita se encuentran arriba de la zona de sulfuros secundarios.

IV.6.3. Específicamente, para el caso del modelo de mantos y chimeneas, se presentan los siguientes minerales en forma nativa como característicos: Ag, Pb, Zn, Cu, con galena, esfalerita, pirita, arsenopirita y en ocasiones marcasita.

El zoncamiento que sirve como base para la prospección:

En la parte inferior se encuentra la zona de sulfuros primarios, donde se localizan los minerales anteriores, acompañados por minerales de ganga como: carbonatos y cuarzo; y en menor cantidad fluorita, barita, anhidrita, adularia, paligorskita, zeolitas, etc. La cual, al encontrarse asociada a skarns (en ocasiones), presenta en las zonas de mayor temperatura a: pirrotita, tenantita, tetraedrita, magnetita y oro, mientras que en la zona de menor temperatura estarán presentes minerales como: acantita, cinabrio, estibinita, rejalgar y sulfosales de plata.

Sobreyaciendo a esta zona se encuentra la de - - enriquecimiento supergénico, donde se observan zonas de transición en donde el cobre aumenta y decrece el zinc, enseguida el zinc decrece y se presentan plomo, plata (en poca proporción), siendo que en superficie hay abundancia de Pb-Ag.

Y para la zona de oxidación son importantes la limonita, cobre nativo, cuprita, tenantita, zincita, cerusita, malaquita, azurita, crisocola, brocantita, atacamita y tenantita, pertenecientes a los llamados sombreros oxidados.

IV.6.4. En los yacimientos volcánicos los minerales que pueden servir como guía en los depósitos volcánicos son: oro, cobre, estaño y plata; existiendo también cobre nativo, calcopirita, bornita, calcocita y enargita.

En algunas regiones, la actividad ígnea ha formado depósitos originales de cobre (en concentraciones muy bajas). El agua subterránea ha disuelto el cobre y lo ha llevado hacia abajo, para depositarlo en una zona de enriquecimiento.

IV.6.5. Los minerales que sirven como diagnóstico en los yacimientos asociados a rocas básicas y ultrabásicas son: Ni, Co, Cr, Ti, Pt (y su grupo) y diamante.

La paragénesis Ni-Co-Cu en sulfuros se asocian a noritas.

IV.6.6. En los yacimientos vulcano-sedimentarios los sulfuros que pueden encontrarse son: pirita, esfalerita, galena, pirrotita y tetraedrita; la plata está contenida en la tetraedrita o en la galena. El oro puede presentarse en forma nativa o en electrum.

Los minerales de ganga comunes son: cuarzo, calcita, barita, clorita y sericita.

IV.6.7. En los depósitos de cobre sedimentario, se originan dentro de secuencias minerales de cobre, plata nativa y argentita; y adicionándose minerales de ganga como: calcita, anhidrita, cuarzo, calcedonia y arcillas.

#### IV.7. EXPLORACION GEOQUIMICA APLICADA A LOS YACIMIENTOS DE COBRE

Tanto los términos de "prospección geoquímica", "exploración geoquímica" y "aplicación de la geoquímica" se usan como sinónimos y se les define como: cualquier método apoyado en la exploración mineral, basado en una medida sistemática de una o más propiedades químicas de los materiales naturales como son: los elementos, compuestos o mezclas: los cuales son los componentes de una roca, un sedimento, de la vegetación, el agua, la tierra, etc.

En este método de tipo geoquímico, lo que se busca es una anomalía, que represente un estado donde la cantidad de metal a encontrar esté "fuera de equilibrio" con sus alrededores.

El reconocimiento de una anomalía es más fácil cuando se siguen los principios de Goldschmidt, los cuales se entienden como la "determinación de la relativa y absoluta abundancia de los elementos en la Tierra" y el "Estudio de la distribución y migración de los elementos individuales en varias partes de la Tierra, en sus rocas y minerales, con el objeto de descubrir los principios que gobiernan dicha migración y distribución".

El promedio de los elementos traza en rocas - ígneas, areniscas, lutitas y calizas, ayudan a la localización de ciertos depósitos.

El elemento más conocido geoquímicamente es el cobre, y a la vez es uno de los mejores estudiados, por lo que se conoce su distribución en la corteza, resumiéndolo de la siguiente manera:

- Rocas ígneas	Cu (ppm)
en promedio	70
ultramáficas	80
máficas	140
félsicas	30
- Rocas sedimentarias	
calizas	5-20
areniscas	10-40
lutitas	30-150
lutitas negras	20-300

En la Fig. IV.17 se muestra la localización de los principales yacimientos cupríferos discutidos para esta prospección.

Para este propósito existen diferentes técnicas, usadas sobre todo en pórfidos de cobre, y las cuales -

se mencionan a continuación:

- MUESTREO DE ROCAS

Los posibles niveles de erosión, para el sistema de pórfidos de cobre, varía desde las raíces profundas (Fig. IV.18 A), a aquellos donde queda expuesto el halo de pirita (Fig. IV.18 B), a los que muestran la alteración hipogénica o a la aparente roca sana (niveles C y D). Un sistema de pórfido de cobre presenta alrededor rocas que han sido afectadas por los procesos de mineralización. Las zonas de alteración-mineralización han sido reconocidas en los pórfidos y han servido para el descubrimiento de un gran número de depósitos de cobre, incluyendo algunos de los cuales, la zona rica en cobre no ha sido expuesta en superficie.

El zonamiento de elementos ha sido analizado en muestras de roca a diferentes profundidades de las zonas de pórfidos de Kalamazoo en San Manuel, Arizona. Las mineralizaciones están en un batolito cuarzomonzónico del Precámbrico y un stock pórfido cuarzomonzónico, Cretácico que intrusión al primero. El tope de la mineralización (0.5% Cu) está a una profundidad de 1130 m, y el resultado se presenta en la (Fig. IV.19). Esto indica que los intervalos de alta o baja concentración de los 21 elementos están espacialmente

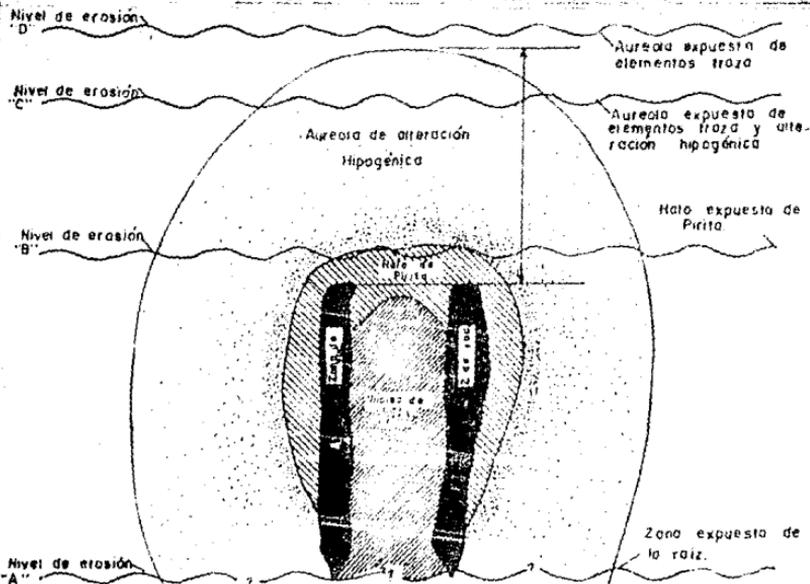


Fig IV.18 Diagrama esquemático de un sistema de Pórfido de Cobre mostrando los niveles hipotéticos de erosión Modificado por Lowell y Guilbert (1970).



Fig IV.17 Localización de los principales yacimientos cupríferos (discutidos en este tipo de prospección).

FUENTE: ADVANCES IN GEOLOGY OF THE PORPHYRY COPPER DEPOSITS, SOUTHWESTERN NORTH AMERICA, BRUCE H. TITLEY, EDITOR.

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA.  
 CIENCIAS DE LA TIERRA.  
 NIVELES DE EROSION HIPOTETICOS  
 EN LOS PORFIDOS DE COBRE Y LOS  
 EJEMPLOS PRINCIPALES TRATADOS EN ES-  
 TE SUBTEMA.

ARROYO OSORNO E. GARCIA GARCIA H.  
 BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
 CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.

TESIS PROFESIONAL. 1990 FIG. Nº 27.13

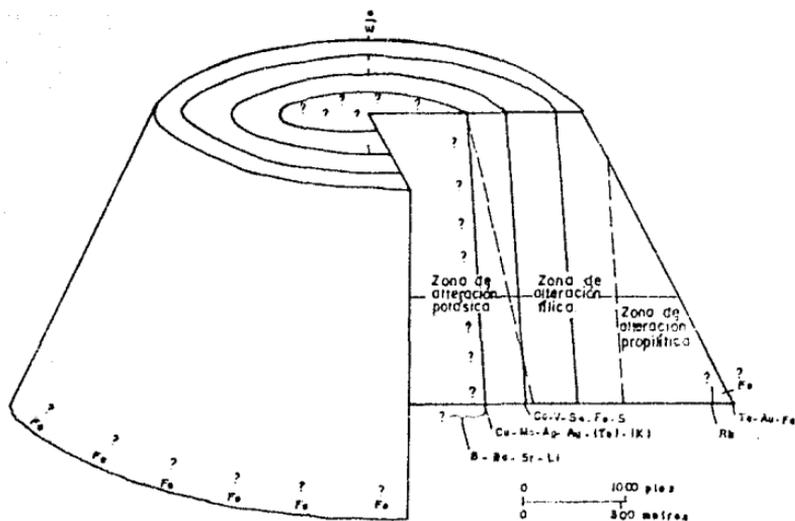


Fig. IV 19 Modelo geoquímico de los depósitos de Pórfidos de Cobre de Kalamazoo - San Manuel. Muestra las diferentes zonas de alteración y la distribución de los 21 elementos dentro de las mismas.

FUENTE: ADVANCE IN GEOLOGY OF THE PORPHYRY COPPER DEPOSITS  
SOUTHWESTERN NORTH AMERICA.  
SPENCER A. TITLEY, EDITOR.

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA.  
CIENCIAS DE LA TIERRA.

MODELO GEOQUIMICO DE LOS DEPOSITOS DE PORFIDOS DE COBRE DE KALAMAZOO.

ARROYO OSORNO E. GARCIA GARCIA H.  
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.

TESIS PROFESIONAL | 1990 | FIG. N° IV 19

relacionados con las zonas minerales conocidas. En la zona de mena están contenidos el cobre, molibdeno, plata y oro (1).

Algunos minerales tienden a concentrar ciertos elementos en la zona de mena, mientras otros lo hacen fuera del sistema de pórfido.

Para depósitos de cobre no visibles en superficie se pueden utilizar parámetros físicos en función del contenido de elementos traza de minerales accesorios, como son el apatito y el rutilo, los cuales relacionan los paquetes rocosos que los contienen con los cuerpos minerales.

Otros ejemplos de rocas que sirven para esta proyección son los que presentan capas de óxidos de hierro o de manganeso, gossans, capas lixiviadas; así como las inclusiones fluidas presentes en ellas.

#### - MUESTREO DE SUELOS

Los análisis químicos de muestras de suelos residuales pueden indicar la presencia de uno o más elementos prospectados y pueden definir las diferentes aureo

---

(1) Chaffe, (1976, 1982).

las en el sistema de pórfidos de cobre; en Vekol fueron detectadas sólo en superficie.

Algunos tipos especiales de la relación material-suelo, han sido usados en mediciones geoquímicas; de estos probablemente sólo 2 son importantes: el caliche y el barniz del desierto, especialmente en ambientes semi-áridos. El caliche es un material rico en carbonato de calcio que se desarrolla por procesos formadores de suelos en muchas regiones áridas. Para el propósito de la prospección geoquímica, el caliche se forma en capas directamente sobre la superficie de la roca, o bien, en la proximidad inmediata de ésta; el cobre se presenta en la parte superior cubierto por el caliche, en donde se ha concentrado o movilizado este elemento, o bien, puede ser también cementado por el mismo caliche.

El barniz del desierto es un óxido rico en Fe y Mg, el cual se forma en la superficie de la roca que queda expuesta, dentro de un ambiente árido o semi-árido. Este es conocido por concentrar varios elementos, y es más usado que el caliche. Usualmente es encontrado en áreas restringidas.

Una gran colección de sedimentos en canales de arroyos activos han sido usados sucesivamente en el mundo para determinaciones geoquímicas. Este tipo de prospección tiene la ventaja de tener un alto relativo porcentaje de rocas expuestas y que generalmente, son de fácil acceso. Este tipo de muestreo ha sido usado en el SW de E.U. Existen algunas complicaciones que afectan el valor de las muestras de sedimentos de arroyo en ambientes áridos. En áreas desiertas el material es erosionado de los afloramientos, y es transportado y depositado en canales de arroyo únicamente durante períodos (poco frecuentes) de lluvia extraordinaria. Estos sedimentos que permanecen en los canales durante largos períodos pueden estar contaminados por material de depósitos de arroyo o por materiales como son: la rezaga de las minas u otras actividades humanas.

Este reconocimiento geoquímico ha sido comunmente usado en regiones áridas. En el norte de México se realizó un programa para localizar depósitos de pórfidos de cobre, que tuvo como resultado el descubrimiento de La Caridad. Este depósito ocurre en un stock cuarzomonzónico Terciario que intrusión viejas rocas plutónicas y volcánicas. Comparado entre muchos -

otros depósitos de pórfidos, el relieve en la vecindad inmediata de La Caridad es inusualmente alto, sobre -- 1000 m. Este factor, junto con el gran tamaño y el alto grado de los depósitos, así como la buena integración del drenaje, hacen de esta área un buen lugar para el estudio de la migración de los elementos en sedimentos de arroyo en la vecindad del depósito, y el -- cual conduce a conocer más sobre la superficie geoquímica del área, que por otro lado, esta medición detallada ha sido afectada por los disturbios de las obras mineras.

Las muestras colectadas fueron analizadas en más de 37 elementos; de ellos, en el análisis por cobre total, cobre caliente extractable, Mo, Zn, Ag y Tungsteno producen anomalías que pueden relacionarse con lo -- ya conocido de estos depósitos.

En las montañas de la Patagonia, al sur de Arizona se realizaron estudios regionales en sedimentos de arroyo para conocer más sobre las características geoquímicas de una porción de la provincia de cobre en -- Arizona, así como para determinar cuáles elementos estaban mejor definidos en las profundidades de este sistema de pórfido. Los resultados de estas investigaciones indican que las muestras contienen una combinación de altas concentraciones de Mo, Pb y Te y bajas concen

traciones de Mn, definiendo mejor la localización del sistema de Red Beds. Los resultados son relativos - para aplicarse a otras partes del sur de Arizona. Dichos elementos han sido usados para definir los límites de áreas que contienen pórfidos de cobre no descubiertos en el sur de Arizona.

En lo que se refiere a los depósitos de La Caridad, los análisis químicos indicaron que únicamente el Cu, Mo y Tungsteno producen anomalías relacionadas a este depósito, y las cuales son continuas en 11 Km donde siguen los afloramientos, y se aplican especialmente al Tungsteno (Fig. IV.20).

Adicionalmente a las anomalías anteriores presentes en los depósitos de La Caridad, existen otras más significativas, como son las de Zn, Mo y Ag, añadidas a las anomalías de Cu. Estos resultados sugieren que la determinación de un elemento en adición al Cu, ayudan en la evaluación de otras áreas con potencial en este tipo de depósitos; si se asume que muchos de los depósitos expuestos en estas partes que ya han sido descubiertos, entonces las mediciones en depósitos de arroyo probablemente pueden ser utilizadas para elementos como: Au, Pb, Zn, Te, Ce y Rb, los cuales son concentrados en aureolas fuera de la zona rica en Cu de un sistema de pórfido. Entonces, la presencia de -

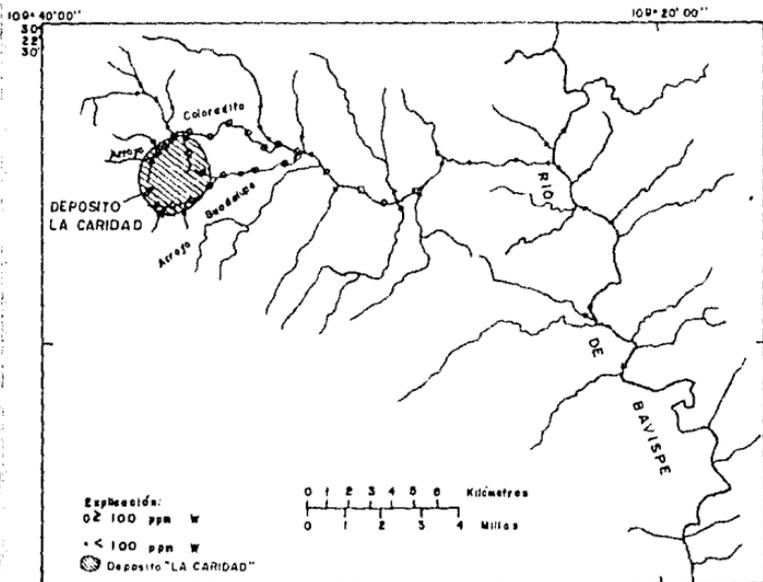


Fig. IV-20 Localización de anomalías de tungsteno, (Cu-Mo) en muestras de arroyo colectadas en el depósito de la Caridad, Sonora. Modificado por Chaffee (1976)

UNAM FACULTAD DE INGENIERIA  
CIENCIAS DE LA TIERRA

MAPA GEOQUIMICO PARA LA LOCALIZACION DE ANOMALIAS DEL W EN LA CARIDAD, SON.

ARROYO OSORNO E. GARCIA GARCIA H.  
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.  
CERON SANTILLAN C. RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.

TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. Nº IV-20

estas anomalías pueden ayudar a indicar áreas con paquetes de rocas expuestos conteniendo depósitos de Cu.

#### - MUESTREO DE VEGETACION

La geobotánica y la biogeoquímica son técnicas de prospección usadas en la búsqueda de nuevos depósitos de pórfidos; únicamente algunos informes de las aplicaciones de estas técnicas en el SW de E.U. y norte de México han sido publicados.

En el muestreo geobotánico se tiene un dato como indicador de Cu, el cual consiste en tomar algunas especies de plantas que se utilizan para relacionarse con algunas concentraciones de Cu en materiales superficiales. Estas especies "poppy californiana" (*Eschscholtzia mexicana*) se ha reconocido que crecen en suelos ricos en cobre cercanos a los depósitos. Un yacimiento donde estas especies han sido encontradas es el mineral Butte, Arizona. Un mapa generalizado (Fig. IV.21 A) presenta pequeños depósitos de Cu asociados a un stock cuarzomonzonítico con biotita de edad Cretácica y que ha intrusionado a un granito Precámbrico. Las concentraciones de Cu fueron determinadas con muestras de roca y de suelos colectadas sobre el depósito y alrededor del mismo. La abundancia de las plantas "poppy" fueron mapeadas en esta área (Fig. IV.21 B).

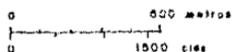
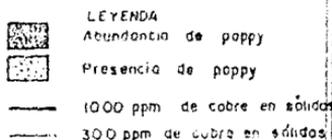
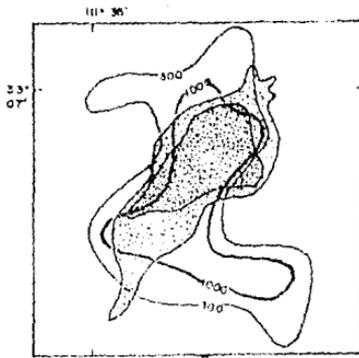
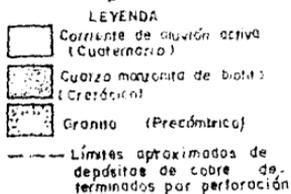
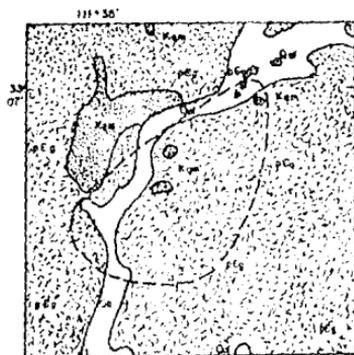


Fig. IV 21A Mapa geológico generalizado y localización aproximada del depósito de Mineral Butte.

Fig. IV 21B Distribución de cobre en ejemplos de sólidos residuales y comparados con la distribución de plantas poppy en la vecindad de los depósitos de Mineral Butte. Modificado por Chaffin (1976).

FUENTE: ADVANCE IN GEOLOGY OF THE POPPERY COPPER DEPOSITS, SOUTHWESTERN NORTH AMERICA, SPENCER R. TITLEY, EDITOR.

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA
	CIENCIAS DE LA TIERRA
A- MAPA GEOLOGICO DE LOS CERROS DE MINERAL BUTTE	
B- DISTRIBUCION DE COBRE Y PLANTAS POPPY	
ARROYO OSORNO A. GARCIA GARCIA H.	
BAUTISTA GONZALEZ A. RODRIGUEZ GUTIERREZ A.	
CERON SANTILLAN C. RUBENSTEIN JIMENEZ EN.	
TESIS PROFESIONAL	1990 FIG. N.º 21

El mapeo revela la relación de un alto contenido de Cu en las muestras de suelos en el área, así como el contenido de altas densidades de estas plantas para la misma área.

Los métodos geobotánicos se han limitado solamente a la exploración en el SW de E.U. y norte de México. Además, son utilizadas algunas plantas indicadoras en la exploración de elementos comunes asociados a este tipo de depósitos; especialmente aquellos elementos que ocurren en aureolas fuera de la zona rica en Cu, tales como: Mn, Zn, Au, sulfuros (o sulfatos), Se y Te; tal es el caso de los estudios geoquímicos de Kalamazoo.

En el caso de los métodos biogeoquímicos, han sido estudiados los depósitos de Mineral Butte, en donde las muestras contienen el concentrado de Cu que han sido lavadas de las hojas y ramas del mezquite (*Prosopis juliflora*) y la cactácea (acácea gregi). Las dos especies (Fig. IV.22) se utilizaron como el mejor indicador para estos depósitos. Esta combinación de planta-elemento da anomalías de 2 Km alrededor de los cuerpos mineralizados.

Clarke menciona que los robles cercanos a la zona de mineralización, captan parte del cobre y pre-

sentan anomalías de este metal en las hojas.

En los depósitos de Vekol un número de elementos - (Cu, Mo, Mn, Zn, Pb, Ag, Cd y Bi) son utilizados para -- anomalías en suelos y rocas. El Cu, Mo, Zn y Ag son altamente anómalos en las hojas de muchas especies de plantas, incluyendo el mezquite, la acácea, el palo verde y... el "ironwood" colectadas en los canales de arroyos que drenan en las inmediaciones del depósito.

Las muestras colectadas en otros canales promedian concentraciones bajas; un ejemplo (Fig. IV.23): se observa la distribución del Zn en las cenizas de las hojas y tallos del "ironwood" (árboles comunes de regiones desérticas), y aún así, presentan anomalías de planta-elemento a más de 7 Km.

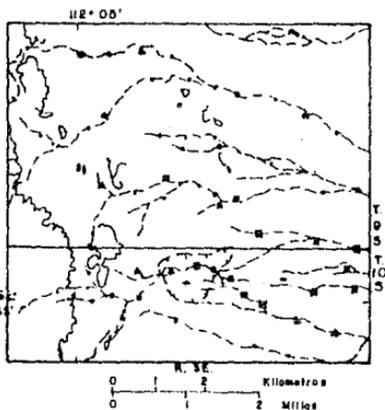
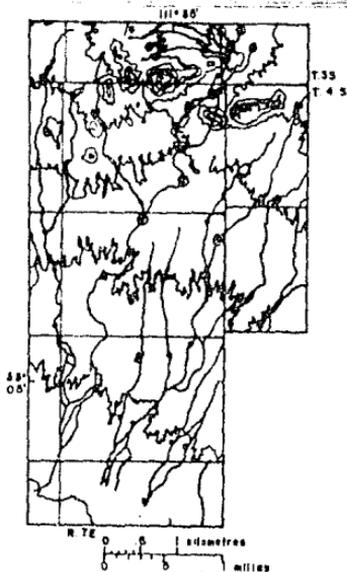
En los depósitos de La Caridad, las concentraciones anómalas de Mo, Cu, Zn y Ag, se presentan en las cenizas de ejemplares del mezquite y el roble. Las anomalías del primer elemento se presentan a más de 15 Km río abajo de los depósitos. La (Fig. IV.24) muestra las anomalías de Cu en ejemplares de las dos especies de plantas.

Lo encontrado en los depósitos de Mineral Butte, - Vekol y La Caridad, así como en sus inmediaciones, indican que las mediciones biogeoquímicas pueden localizar -

## LEYENDA

- Sólo valores de background, análisis de hojas y troncos
- ▲ Valores anómalos, sólo análisis de hojas
- Valores anómalos, sólo análisis de troncos.
- ⊙ Valores anómalos de hojas y análisis de troncos
- Límites aproximados de depósitos de cobre determinados por perforaciones

Fig IV.22 Distribución de cobre en las cenizas del lavado de hojas y troncos del Mezquite en los depósitos de Mineral Butte, mostrando las anomalías más significativas. Chaffe (1976).



- Corriente Intermitente
- - - Contorno aproximado del depósito Vekol
- Sin anomalías de plantas para el Zn
- Sólo niveles de anomalías (200 ppm Zn.)
- ▲ Sólo anomalías de troncos (500 ppm Zn)

Fig IV.23 Distribución de anomalías de Zn en el "Ironwood". En los depósitos de Vekol. Chaffe (1977).

<b>UNAM</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA.</b>
	<b>CIENCIAS DE LA TIERRA.</b>
-FIG. DISTRIBUCION DE ANOMALIAS DE COBRE EN EL MEZQUITE EN MINERAL, BUTTE	
-FIG. DISTRIBUCION DE ANOMALIAS DE ZINC EN EL IRONWOOD EN VEKOL.	
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ BUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.
<b>TESIS PROFESIONAL.</b>	
1980	FIG. N.º IV.22.2

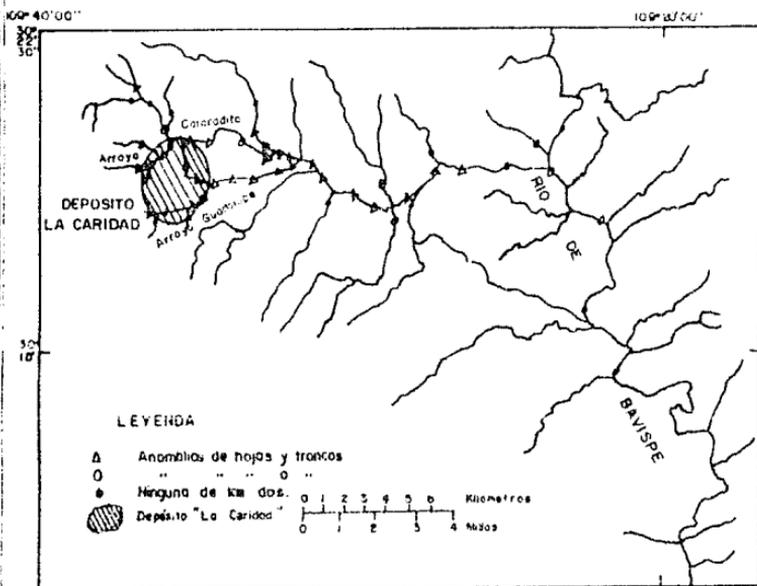


Fig. IV. 24 Anomalías de cobre presentes en el Mezquite y el Roble en los depósitos de La Caridad, Sonora Chaffe (1976)

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CIENCIAS DE LA TIERRA	
MAPA GEOQUIMICO QUE PRESENTA LAS ANOMALIAS DE COBRE EN EL MEZQUITE Y EL ROBLE EN LA CARIDAD, Son.		
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.	
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZA	
CERON SANTILLAN C	RUBINSTEIN JIMENEZ F.	
TESIS PROFESIONAL	1990	FIG N° IV. 24

depósitos de Cu en ejemplares de las dos especies de - -  
plantas a considerable distancia río abajo de donde aflo  
ra la mineralización.

Muchas de estas mediciones, en tierras áridas, se efectúan en especies de plantas del tipo freatophitas, -  
las cuales tienen profundas raíces, en donde se encuentra  
permanentemente el nivel de agua. La concentración de  
estas medidas en las cenizas de estas especies está, -  
quizá, relacionada directamente con los contenidos de --  
elementos de las aguas subterráneas de las que se nutren  
estas plantas. Estas nacen en gravas de piamonte y son permeables;  
sus raíces llegan a tener una profundidad de  
15 m. Con los ejemplos de Vekol, Lakeshore, Zacatón y -  
Postón Butte que no afloran más abajo de los 15 m en los  
alrededores de las gravas, se da una estadística donde -  
depósitos aún no descubiertos pudieran localizarse a 15 m  
o menos del borde de la mineralización.

Estas dos técnicas se diferencian en que, la primera  
utiliza una relación "planta-suelo", donde se observa  
la presencia de ciertas especies de plantas en suelos ri  
cos en Cu; mientras que la segunda, tiene una relación -  
"planta-elemento", donde las concentraciones de éste en las  
hojas, raíces y tallos, indican en sus cenizas el --  
contenido del elemento.

#### - MUESTREO DE AGUA SUBTERRANEA

Estas son analizadas por su contenido de elementos traza. Estudios geoquímicos en manantiales en el SW de E.U. concluyeron que las concentraciones de Mo, sulfato y el total de sólidos disueltos, fueron los parámetros más usados. Para mejores resultados, se debe de incluir el estudio de un número suficiente de aguas tomadas de esa área, así como el uso de bombas para obtener muestras a diferentes profundidades. Se nota que la química de las plantas mencionadas con anterioridad, las cuales se alimentan de las aguas subterráneas, reflejan la química de las mismas, obteniéndose mejores resultados si estos dos estudios se combinan.

#### - MUESTREO DE GAS EN SUELOS

Otra técnica geoquímica utilizada en la exploración de depósitos de pórfidos de cobre, es la medición de la concentración de varios gases que se presentan en la superficie. Los elementos volátiles y sus componentes se han visto en los depósitos minerales citados por Chaffe.- Los gases buscados son: dióxido de sulfuro, ( $SO_2$ ), ácido sulfhídrico o mercurio, los cuales han sido formados por la oxidación sulfhídrica de los depósitos.

Algunos de estos gases dirigen su migración hacia regiones más húmedas, por lo que la prospección geoquímica muchas veces no tiene éxito como una buena guía en la búsqueda de nuevos depósitos de cobre, ya que estos se localizan sobre todo en regiones áridas y por ello tienden a "evaporarse".

#### IV.8. PROSPECCION GEOFISICA

La prospección geofísica es la medida sistemática de las propiedades físicas de las rocas, basada en observaciones de las características y de fenómenos naturales que se manifiestan en la superficie de la tierra, así como en el subsuelo. Pueden ser visibles o no visibles, y por ello son utilizados instrumentos que los detecten y los cuantifiquen.

Para una adecuada interpretación de la geofísica, se debe contar con estudios geológicos, adecuados y completos.

Los métodos de prospección geofísica están encaminados a localizar estructuras geológicas y litológicas que sean favorables para depósitos minerales de valor comercial; en este caso, de cobre; o relacionadas con obras de infraestructura.

Dichos métodos se basan en ciertas propiedades de las rocas, como son: densidad, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica, variación en la temperatura, variación en la radioactividad, etc.; a cada propiedad se le asigna un método correlativo, entre los cuales se tienen:

I. Método gravimétrico.- Estudia las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre, para deducir la distribución y naturaleza general del subsuelo.

Exige numerosas correcciones (geográficas y topográficas). Es útil para determinar la existencia de fallas importantes, que pongan en contacto rocas de diferentes densidades, y para delimitar la estructura del basamento en estudios regionales.

La interpretación cuantitativa, siempre aproximada, parte de la aceptación de una hipotética configuración de las masas perturbadoras del valor regional medio de la gravedad y de la comparación de los datos obtenidos con los teóricos supuestos. Se procede a calcular la anomalía teórica con la simulación de la estructura geológica con un cuerpo geométrico, del cual se conoce la ecuación para determinar la componente vertical de la gravedad. De esta manera se puede determinar el valor aproximado de la amplitud y extensión de la anomalía gravitacional.

Lo anterior se hace con el objeto de establecer la distancia entre estaciones y líneas de observación, de tal manera que se esté en condiciones de tener suficientes puntos que permitan construir la gráfica de la anomalía. Posteriormente se selecciona el rumbo de las lí---

neas, las que deben de predominar en el sentido de la di  
rección de máxima pendiente del cuerpo geológico, y las  
cuales habrán de programarse para formar retículas.

El trabajo de observación de campo debe iniciarse en  
en la estación base de referencia, donde se conoce el va  
lor absoluto de la gravedad, midiendo posteriormente las  
respectivas lecturas a cada una de las estaciones (en --  
las que deberá tomarse en cuenta el tiempo).

II. Método magnético.- De acuerdo con su suscepti  
bilidad magnética, los terrenos se clasifican en: para--  
magnéticos (con susceptibilidad positiva) o diamagnéti--  
cos (con susceptibilidad negativa). Su presencia modifi  
ca la distribución del campo magnético terrestre, lo que  
permite identificar cualitativamente su situación en el sub  
suelo.

Es el método más antiguo de la prospección, en el siglo  
siglo XVIII se utilizó para localizar minerales magnéti--  
cos. A partir de 1950, el magnetómetro discriminador de  
flujo y el magnetómetro nuclear, potenciaron este método  
por la mayor rapidez y maniobrabilidad que la balanza de  
Schmidt.

Substancias como el fierro, el níquel y ciertas --  
aleaciones, atraen los campos magnéticos con mucha inten

sidad y se les conoce como ferromagnéticos.

En la superficie de la tierra, la intensidad magnética, varía de acuerdo a la imantación y a la permeabilidad de las rocas.

La intensidad de magnetización depende de una propiedad conocida como susceptibilidad magnética. En las rocas, ésta depende del contenido de magnetita; en términos generales, se comporta de la siguiente manera:

Las rocas sedimentarias como diamagnéticas  
Las rocas metamórficas como paramagnéticas y,  
Las rocas ígneas como ferromagnéticas.

Los valores típicos de la susceptibilidad magnética de algunas rocas y minerales en orden decreciente, es - - como sigue: magnetita, pirrotita, hematita, cuarzo, sal de roca, calcita, basalto, diabasa, gabro, gneis, areniscas, pizarra y dolomita.

La teoría más aceptable acerca del campo magnético terrestre, es la que indica que el campo magnético terrestre se debe a corrientes eléctricas que circulan en el núcleo metálico, creando el efecto de una enorme bobina, aunque no se ha aclarado el mecanismo por medio del cual se mantienen esas corrientes. Junto con esta teoría está

la del dínamo, la cual sugiere una autoexcitación del núcleo de la Tierra producida en las líneas de flujo por la rotación.

Las variaciones que este campo puede tener, son las seculares y las diurnas (las cuales dependen de la latitud).

### III. Métodos eléctricos.- Se dividen en:

a) Corrientes telúricas.- En la superficie terrestre se observan corrientes eléctricas de débil intensidad, originadas por fenómenos aun no bien determinados. Varían constantemente y están influenciadas, entre otras cosas, por la posición del sol.

La medida simultánea de los potenciales en varios puntos de la superficie permite deducir la resistividad del terreno y su distribución general en el subsuelo.

b) Potencial propio.- En el terreno existen diferencias de potencial de origen natural; la oxidación de los minerales conductores es comparable a una pila eléctrica, con el polo positivo en la zona próxima a la superficie; dos terrenos diferentes en contacto, con presencia de agua, motivan desequilibrios iónicos con potenciales eléctricos en el contacto; la propia circulación

de agua implica un transporte iónico y potenciales eléctricos, al igual que cuando una solución electrolítica atraviesa una membrana porosa.

En el caso de minerales conductores, se han controlado diferencias de potencial superiores a 1.5 voltios, con gradientes de 1 a  $6 \times 10$  voltios/metro.

Los potenciales engendrados por el movimiento del agua a través de una membrana porosa se rigen por la - -

ecuación: 
$$V_e = A \frac{Bm}{\mu K_e}$$

A.- Coeficiente que depende del electrolito y de la naturaleza química de la membrana.

B.- Constante dieléctrica

m.- Porosidad

$\mu$ .- Coeficiente de viscosidad

$K_e$ .- Conductibilidad específica.

El descenso del agua en el terreno origina voltajes negativos en las zonas elevadas, al arrastrar el agua de las cargas positivas, con valores de hasta 0.200 voltios.

Es útil para definir en forma cualitativa la distribución del terreno a poca profundidad.

Para aplicarlo se emplean dos electrodos; uno fijo llamado base, y el otro móvil. Fijados en el terreno - -

miden la diferencia de potencial entre ellos; se asigna el valor obtenido al punto de terreno donde se ha fijado el electrodo móvil. Con base en estos valores, se construyen planos de líneas equipotenciales, cuya forma y -- distribución permiten una interpretación cualitativa de la distribución del terreno.

Los electrodos no deberán de polarizarse, cuidando la igualdad de sus temperaturas, variables, si uno de -- ellos está al sol y el otro a la sombra.

c) Potencial inducido.- El método anterior utiliza los potenciales eléctricos naturales, con el inconveniente de no conocer su origen o cuantía. En el método de potencial inducido, se crea un potencial en el terreno a través de un electrodo o una línea. El campo creado es superior al natural en una amplia zona, en función del valor utilizado.

La distribución de potenciales se ajusta a leyes bien conocidas y fáciles, en el caso de un terreno homogéneo. Las variaciones sobre la distribución teórica son debidas a cambios en la naturaleza o características del terreno, cuya existencia y situación pueden deducirse -- cualitativamente. El agua subterránea actúa como un conducto enterrado, y de baja conductibilidad.

d) Método de resistividad.- La característica física que utiliza es la resistividad o resistencia (eléctrica) de los diferentes terrenos. En superficie se efectúan una serie de medidas, que permiten obtener resistividades aparentes, en función de la línea de emisión u otro parámetro lineal. Las parejas de valores se representan gráficamente en una curva que recibe el nombre de sondeo eléctrico vertical (SEV) y se interpreta según varios métodos.

Resistividad en el terreno.- Si en un terreno, se induce una corriente eléctrica, ésta se propaga de forma tal que se puede asignar al terreno una resistencia, una capacidad y una inductancia. Si la corriente eléctrica es continua (se incluyen los intervalos inicial o final de la apertura y cierre del circuito) se tendrá la resistencia como único parámetro.

La unidad de resistividad es el ohmio-metro, que corresponde a la de un conductor que, con sección de un metro cuadrado y longitud de un metro, permite pasar la intensidad de un amperio cuando se aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de un voltio.

Sólo son conductores los materiales metálicos y algunas de sus sales; por tanto, el terreno en general es aislante o de resistividad muy alta. Pero en todos los

materiales del terreno existen poros saturados o no, de agua, pero siempre con una cierta humedad.

El agua, por la presencia de las sales disueltas, en proporción que depende de la temperatura, actúa como un conductor, cuya resistividad oscila en la práctica -- entre 0.03 ohmios-metro (agua de mar) y 3000 (agua extraordinariamente pura, destilada con precauciones especiales).

La resistividad de las rocas dependerá, por tanto, del volumen de poros, de su distribución y de la resistividad del líquido que los rellena.

Si los poros estuviesen acumulados en tubos capilares rectilíneos y paralelos, la resistencia entre las dos caras sería:

$$\rho_t = \frac{\rho_w}{\phi}$$

$\rho_t$  - resistividad del terreno  
 $\rho_w$  - resistividad del agua  
 $\phi$  - porosidad.

En la naturaleza, la porosidad no corresponde a huecos distribuidos en la forma indicada, por tanto, es necesario introducir el llamado Factor de formación:

$$F = \frac{\rho t}{\epsilon w} = \frac{a}{\phi m}$$

F - factor de formación

a - Coeficiente que varía entre 0.81 para la arena y 1.0 para las rocas compactas.

m - factor de cementación -- (1.5-3.0)

$\phi$  - porosidad.

Las fórmulas empleadas dan la resistividad real -- del terreno, si éste es homogéneo e isótropo; pero si el terreno tiene resistividades diferentes, se obtendrá una resistividad aparente.

En la práctica se procede de igual modo, por lo -- que se obtienen curvas que relacionan para un mismo punto, centro del dispositivo, la resistividad aparente -- (Fig. IV.25 AyB).

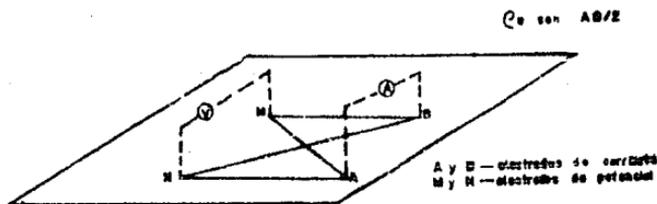


FIG. IX 25A

Arreglo de electrodos

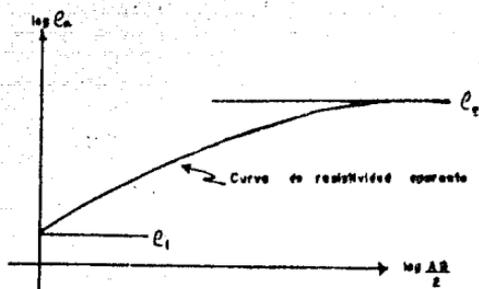


FIG. IV.26B

CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE.

En el caso anterior es sólo para una capa; pero si existen dos, se puede utilizar la siguiente fórmula; don de en la Fig. IV.26 se muestran los datos obtenidos para ella:

$$e_a = e_1 \left[ 1 + 4 \frac{\sum_{n=1}^{n=\infty} \left( \frac{e_2 - e_1}{e_2 + e_1} \right)^n \cdot \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{2n\pi h}{a} \right)^2} - \frac{1}{4 + \left( \frac{2n\pi h}{a} \right)^2} \right) \right]$$

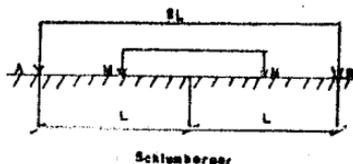
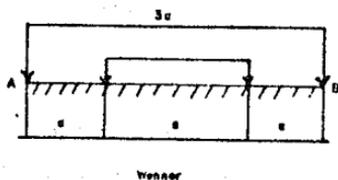


FIG. IV.29

ARREGLO DE ELECTRODOS.

## Wenner

Arreglo de electrodos en el dispositivo de Wenner.

$\rho_a$  - resistividad aparente

$\rho_1$  - resistividad de la 1ra. capa

## Schlumberger

Arreglo de electrodos en el dispositivo de Schlumberger.

$\rho_2$  - resistividad 2da. capa

h - espesor 1ra. capa

n - números naturales

a - separación de electrodos.

Con estas fórmulas se han podido abordar y calcular curvas teóricas para el caso de varias capas; las cuales se dibujan en papel logarítmico transparente y se superponen sobre las curvas patrón de las colecciones -- que se posean, hasta encontrar coincidencias.

El equipo que se utiliza es el siguiente:

- Una fuente de energía de corriente continua o alterna.
- Cables
- Un equipo de medida constituido por un galvanómetro, un amperímetro y un milivoltímetro.

Los circuitos potenciométricos equilibran el potencial existente en el terreno, con una pequeña fuente de energía incorporada al equipo, y miden el potencial crea

do mediante otro circuito interno, que se opone hasta --  
equilibrar el externo.

e) Caída de potencial.- Utiliza cinco electrodos al  
alineados. Uno de corriente se sitúa a una distancia --  
prácticamente infinita. Junto al otro se sitúan tres --  
electrodos entre los que se mide el potencial creado. --  
Las relaciones entre las diferencias de potencial medi--  
das, permiten deducir los espesores de capa.

f) Método de polarización inducida.- Este método es  
es el más importante en la prospección del cobre; se --  
aplica sobre todo a pórfidos cupríferos.

- Principio físico.- Al introducir corrientes --  
eléctricas en el subsuelo, el voltaje crece en forma rá--  
pida hasta que se estabiliza; pero al cesar la excita---  
ción externa, el voltaje no decae instantáneamente a --  
cero, sino que lo hace con tendencia exponencial a cier--  
to tiempo (varía de algunos segundos hasta un par de mi--  
nutos, si la excitación fue prolongada), a este fenómeno  
se le denomina "polarización inducida".

Se estima que la polarización inducida es de ori--  
gen fundamentalmente electroquímico, dependiendo más de la  
la polarización espontánea que de la resistividad del ma  
terial del subsuelo.

La polarización se genera básicamente de dos maneras:

a) Polarización de membrana o electrolítica.- Producida por variaciones en la movilidad de los iones contenidos en los electrolitos, a través de la estructura de las rocas.

b) Polarización de electrodo o sobretensión.- Producida por variaciones entre las conductividades iónicas y electrónicas, cuando hay presencia de minerales metálicos, existiendo además una reacción química en la interface definida por el mineral y la solución.

En los extremos cargados del mineral se produce una acumulación de iones en el electrolito adyacente a ellos, generándose un efecto electrolítico cuando pasa la corriente, originando un intercambio de electrones entre el metal y los iones de la solución en la interface (Fig. IV.27).

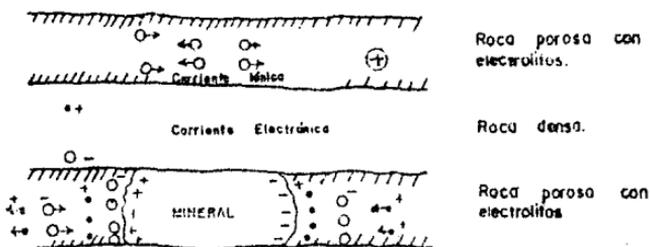


FIG. IV 27

Esquema que muestra las variaciones de conductividades iónicas y electrónicas en la polarización de electrodo.

- Arreglos de electrodos.- Las distribuciones de electrodos más comunes son el de Schlumberger o de gradiente, y los denominados polo-dipolo y dipolo doble - - (Fig. IV.28).

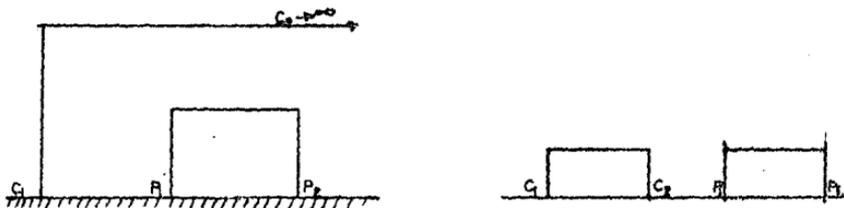
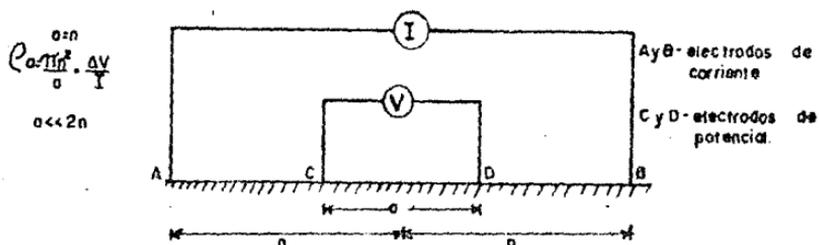


FIG. IV 28

Distribución de electrodos de los dispositivos Schlumberger, polo-dipolo y dipolo doble.

- Parámetros observados.- Las mediciones de la P.I. pueden efectuarse en el dominio del tiempo o de la frecuencia, se denominan como "transitoria de impulso" y de "variaciones de frecuencia", respectivamente.

Las mediciones transitorias de impulso pueden rea-

lizarse de varias maneras y consisten básicamente en lo siguiente:

+ Medir la tensión residual  $V(t)$  durante un tiempo  $t$  después de que se interrumpe el paso de la corriente, - la que se compara con el valor constante  $V(c)$  que se obtiene durante el tiempo que está fluyendo la corriente y se encuentra estabilizado.

Los resultados se expresan porcentualmente:

$$\% PI = \frac{100 V(t)}{V(c)} \quad V(t) \ll V(c)$$

generalmente se expresan en milivolts/volt o en porcentaje.

+ Medir el potencial integrado para un intervalo - definido de tiempo durante la caída de tensión, (Fig. -- IV.29).

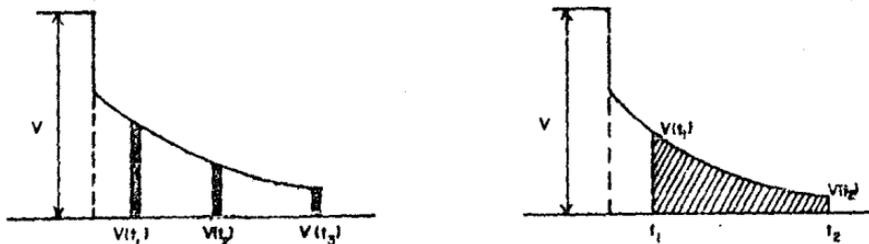


FIG. IV 29

Curvas de potencial integrado

Si se muestrea la curva de caída en varios puntos, los valores de la integral corresponden a la medida del potencial existente en varios momentos.

+ Determinar la "Cargabilidad" en función de  $V(t)$  y  $V(c)$ , la que se define como:

$$M = \frac{I}{V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) \cdot dt$$

En las mediciones por medio de variaciones de frecuencias, se obtienen los siguientes parámetros:

+ Se mide la resistividad aparente para dos o más frecuencias, y se determina el efecto de frecuencia (EF) o el porcentaje de efecto de frecuencia (PEF):

$$EF = \frac{\rho_{cc} - \rho_{ca}}{\rho_{ca}} = \frac{\rho_{cc}}{\rho_{ca}} - 1$$

$$PEF = 100 \frac{\rho_{cc} - \rho_{ca}}{\rho_{ca}} \quad \rho_{ca} < \rho_{cc}$$

donde:

$\rho_{cc}$  - resistividad aparente para corriente continua (baja frecuencia).

$\rho_{ca}$  - resistividad aparente para frecuencias altas

El rango de frecuencias que se utiliza es de 0.1 a 10 Hz.

+ Determinar el parámetro de "factor metálico", -- que depende de la resistividad efectiva de la roca ma-- tríz.

$$FM = 10^5 EF \frac{I}{\rho_{cc}/2 \pi} = 10^3 \frac{PEF}{\rho_{cc}/2 \pi}$$

Las resistividades aparentes se expresan general-- mente en ohmios/metro, y se definen como:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

$\rho$  - resistividad en ohmio/metro

I - corriente eléctrica en Amperios = coulombio/seg.

$\Delta V$  - diferencia de potencial en voltios

K -  $8.98742 \times 10^9$

- Representación de la información.- Con las fórmulas mencionadas en el inciso anterior se han podido -- calcular curvas teóricas, las cuales se dibujan en papel

logarítmico transparente y se superponen sobre las curvas patrón de las colecciones existentes, tal como se muestra en las figuras mostradas a continuación y con ello se procede a la interpretación, (Fig. IV.30)

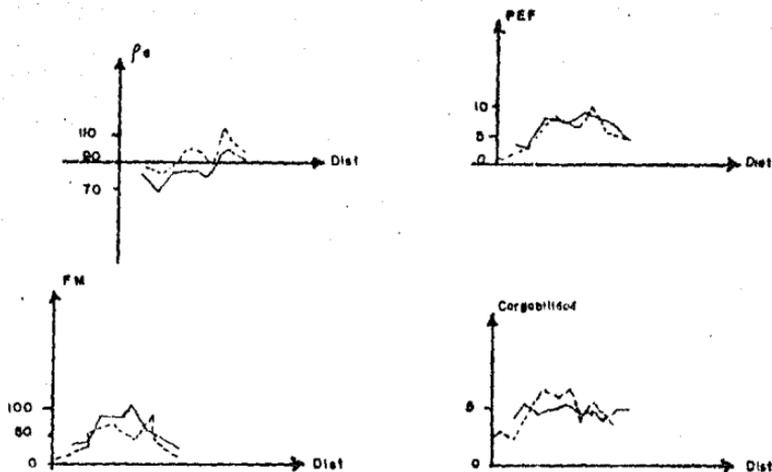


FIG. IV.30

Representación de curvas teóricas comparadas con las curvas patrón.

- Interpretación de resultados.- La interpretación de la información obtenida se realiza por medio de la comparación de curvas patrón apoyadas en datos ya conocidos con aquellas que resultan de la configuración de los datos obtenidos. Esta interpretación es de tipo cualitativo; pero la tendencia actual es de realizar interpretaciones cuantitativas por medio de modelado, los cuales se --

ajustan a los datos medidos por aproximaciones sucesivas.

- Ejemplo:

Dentro de los casos históricos en la exploración del cobre diseminado apoyados en métodos geofísicos, cabe mencionar el ejemplo de Columbia Británica, localizado a 130 millas aéreas al NE de Vancouver.

En él, se realizaron los siguientes estudios:

+ Análisis magnetométrico.- El dato magnético aéreo sirvió como información auxiliar para determinar la distribución de los tipos de roca dentro del plutón.

Parte del suelo magnético medido se analizó en laboratorio por medio de la balanza tipo Schmidt. Se utilizó una retícula de 400 pies con espaciamientos en las estaciones de 100 pies.

La medición tuvo un doble propósito. Por una parte, se realizó, esperando que algunas zonas del intrusivo joven y/o, zonas mineralizadas presentaran valores magnéticos bajos. La segunda fue para definir el área exenta de la cubierta de rocas volcánicas miocénicas presentes en la zona, ya que éstas presentan valores altos

en el perfil magnético.

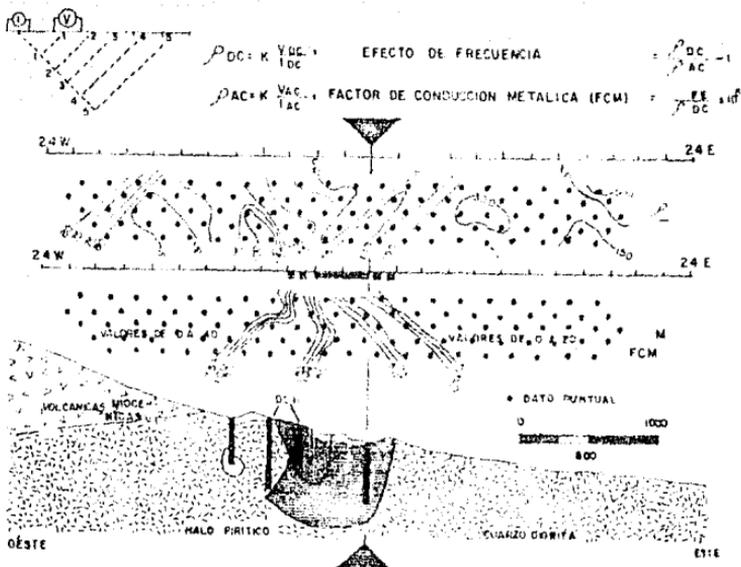
+ Análisis de potencial medio.- Las variaciones de potencial medio cercanas a la zona de mineralización no son diagnósticas. La ausencia de esta anomalía es atribuida a la presencia de un índice bajo de oxidación en la zona de sulfuros dentro del depósito. Dichas mediciones no fueron útiles en este caso.

+ Análisis de polarización inducida.- Estas mediciones se realizaron con el método de doble frecuencia junto con el desarrollo de una configuración del electrodo litran. El arreglo del dipolo y la presentación de resultados se indican en la siguiente figura (IV.31), que muestra el perfil de polarización inducida.

Los datos obtenidos fueron: la resistividad de la corriente directa, la de la corriente alterna, el porcentaje de el efecto de frecuencia, y el factor de conducción metálica. Su representación se observa en el perfil de la misma figura, al mismo tiempo que se compara con la sección geológica.

Los valores de baja resistividad se correlacionan con las rocas volcánicas y los valores altos con las rocas plutónicas, (Fig. IV.31).

EXPLORACION DE COBRE DISEMINADO.



Perfil de polarización inducida, línea norte 48, depósitos de flujos, Columbia Británica

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CIENCIAS DE LA TIERRA	
PERFIL DE POLARIZACION INDUCIDA.		
ARRIAGA OSORNO S	GARCIA GARCIA M	
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A	
CERON SANTILLAN C	RUBINSTEIN JIMENEZ F N	
TESIS PROFESIONAL 1990		FIS. N.º 31

IV. Métodos electromagnéticos.- Cuando en un cable o en una bobina fluye una corriente alterna, se produce un campo magnético alternante, que si se propaga a través del suelo, induce corrientes eléctricas en cualquier conductor que se encuentre en su trayectoria.

Las corrientes inducidas en forma secundaria fluyen de tal manera, que su campo electromagnético se opone al campo inductor, y cuando se extiende en el espacio, modifica las características del campo primario.

La intensidad de las corrientes inducidas depende, entre otros factores, de la resistividad eléctrica del material conductor que está presente, y de la frecuencia alternante del campo primario que está inducido.

Para tal objetivo se utilizan dos tipos de bobinas: una transmisora y otra receptora.

Los estudios de los campos electromagnéticos sugieren que la relación entre los voltajes de la corriente alterna y los campos magnéticos asociados, puede ser relacionada como una función de las frecuencias.

Cuando una onda electromagnética se propaga a través del subsuelo, su energía es continuamente absorbida

por las rocas de acuerdo a su conductividad eléctrica, y se puede establecer que la profundidad de penetración depende de la frecuencia de las variaciones de los campos.

Su estudio, está basado pues, en la influencia -- del terreno sobre un campo electromagnético artificial.

V. Método geotérmico.- Es un método que se basa en el gradiente geotérmico natural. Con el geotermómetro se mide a diferentes profundidades la temperatura de la Tierra. El gradiente geotérmico va aumentando -- con la profundidad 30°C por kilómetro.

VI. Método radioactivo.- Se basa en la variación de la radioactividad de ciertos minerales o rocas, y en el cual no se hará énfasis, ya que es de menor importancia para la prospección del cobre.

En los párrafos siguientes se tratará de dar una breve introducción a la interpretación de los métodos más importantes dentro de la prospección de yacimientos cupríferos:

La representación de las curvas mencionadas a continuación se muestra en la (Fig. IV,32).

La curva de polarización inducida en la que se -- puede observar que las mediciones geofísicas están convertidas en un "factor metal aparente", basado en datos de la distribución de un folleto hecho por McPhar, donde se observa un cuerpo mineralizado en forma diseminada. Por medio de la polarización inducida no se puede distinguir el tipo de sulfuros, pero se puede saber el tipo de sulfuros conductores en cuerpos mineralizados - primarios y secundarios.

La curva se puede correlacionar con el factor metálico aparente en la zona de sulfuros primarios.

Este método no es recomendable para zonas que contienen agua o materiales conductores que no sean sulfuros.

La curva de potencial medio presenta un porcentaje de potencial negativo mayor en la zona de sulfuros primarios oxidados, y uno menor, pero equivalente porcentaje negativo en las zonas oxidadas, de los cuerpos mineralizados por zinc hacia el lado derecho de la sección. Las anomalías de potencial medio ocurren por una variación de las condiciones, las cuales son producidas por reacciones electroquímicas a poca profundidad.

Los métodos de inducción normalmente no son apli-

cados a pórfidos cupríferos, pero se utilizan para vetas con concentraciones ricas de sulfuros en la zona primaria, o para la localización de cuerpos mineralizados.

En la curva de resistividad se presenta un decremento en la resistencia o un incremento en la conductibilidad, dependiendo de cuanto uno prefiere al otro; cuando está próximo al cuerpo mineralizado primario, proyecta una correlación con un incremento en la conductibilidad de sulfuros, y un incremento en el electrolitos en rocas más porosas, alteradas y frágiles. La curva está un poco ondulada, debido a cambios locales abruptos por masas irregulares de material de conductibilidad.

Las curvas de gravedad local presentan cuatro elevaciones, expresando la posición de los cuerpos mineralizados por zinc y por hierro. La gravedad central se correlaciona con las zonas de gran alteración con intrusivos y reflejan el decrecimiento de la densidad y el incremento de la porosidad.

Al examinar los resultados de la magnetometría de la Tierra y correlacionarlos con los de laboratorio, se encuentran algunas variaciones al analizar la curva magnética de izquierda a derecha: el nivel bajo de las - -

oscilaciones es suave y se relaciona con la roca relativamente no magnética. La primera oscilación marcada puede presentar cuerpos de zinc, pero en la correlación podrían no existir minerales de zinc acompañados por magnetita como accesorio. El incremento irregular, o el contraste es marcado en la zona silicatada por minerales ferromagnéticos. La situación presenta un caso de simetría; de un lado presenta cuerpos mineralizados con magnetita, y del otro lado el intrusivo; pero también depende de las variaciones de las condiciones geológicas, lo cual puede presentar magnéticamente asimetría.

La curva de termoluminiscencia es discutida para calizas, y menciona a los feldespatos potásicos. Un intrusivo caliente puede destruir la termoluminiscencia de las calizas invadidas, lo cual varía gradualmente al incrementarse la distancia hacia el intrusivo. Las alteraciones argílicas y propilíticas destruirían los feldespatos originales y entonces concurren a la termoluminiscencia, pero los efectos en las facies de alteración K-sflice son diferentes, ya que la roca es reconstruida.

En algunos casos la termoluminiscencia es activada por la presencia de cobre, plata y manganeso en este caso, los feldespatos son materiales ideales para el objetivo.

## EXPRESSION GEOFISICA

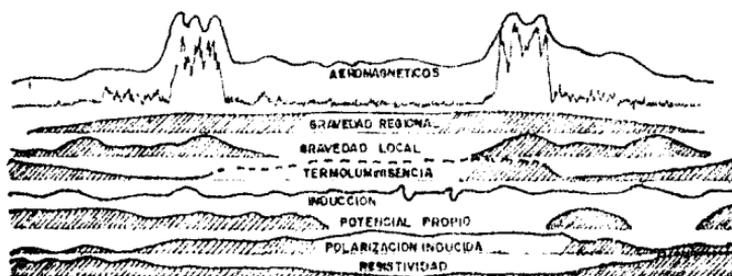


Fig. IV. 32

Expresión gráfica de los métodos geofísicos utilizados en la prospección del cobre.

## V. PRINCIPALES METODOS DE EXPLOTACION

## CAPITULO V. PRINCIPALES METODOS DE EXPLOTACION

### V.1. REBAJES ABIERTOS

V.1.1. Preparación

V.1.2. Explotación

V.1.3. Extracción

### V.2. SALONES Y PILARES

V.2.1. Preparación

V.2.2. Explotación

V.2.3. Extracción

### V.3. TUMBE POR SUBNIVELES

V.3.1. Preparación

V.3.2. Explotación

V.3.3. Extracción

### V.4. CORTE Y RELLENO HIDRAULICO

V.4.1. Preparación

V.4.2. Explotación

V.4.3. Extracción

### V.5. CORTE Y RELLENO CON TEPETATE

V.5.1. Preparación

V.5.2. Explotación

V.5.3. Extracción

**V.6. TUMBE SOBRE CARGA**

V.6.1. Preparación

V.6.2. Explotación

V.6.3. Extracción

**V.7. HUNDIMIENTO POR BLOQUES**

V.7.1. Preparación

V.7.2. Explotación

V.7.3. Extracción

**V.8. A TAJO ABIERTO**

V.8.1. Planeación y Diseño del Tajo

V.8.2. Preparación

V.8.3. Explotación

V.8.4. Extracción

## V. PRINCIPALES METODOS DE EXPLOTACION

Los métodos de explotación de cobre se dividen --  
en:

- Subterráneos, y
- Superficiales.

Los subterráneos a su vez se clasifican en:

Métodos con soporte natural: es necesario que la roca encajonante sea consistente; se utilizan los siguientes métodos: rebajes abiertos, salones y pilares, y tumbes por subniveles.

Métodos de tumbe con soporte artificial: se aplican a yacimientos con roca encajonante, consistente o semiconsistente; los más usuales para la extracción del cobre son: tumbe sobre carga, corte y relleno con tepetate, y corte y relleno hidráulico.

Métodos de hundimiento: se caracterizan porque al extraer el mineral, el terreno queda sin fortificación y se provoca el hundimiento. El método utilizado de esta clasificación para la extracción del cobre, es el de hundimiento por bloques.

Los métodos de explotación superficial más importantes son: a tajo abierto y lixiviación.

Por lo general, los métodos de explotación de minas se realizan en tres etapas: preparación, explotación y extracción. En el presente capítulo, se exponen las características esenciales de estos métodos.

## V.1. REBAJES ABIERTOS

El método es considerado como uno de los más antiguos; para su aplicación es indispensable que el mineral y la roca encajonante sean consistentes, así como con un gran buzamiento.

Un rebaje es una obra minera de forma rectangular realizada sobre mineral. El método se caracteriza por dejar pilares del mismo mineral conforme avanza la explotación, llegando a ser estos de un 15% a un 20% del volumen del rebaje; no se requiere dejar fortificación artificial.

Este método tiene dos variantes, la de rebajes abiertos de techo y rebajes abiertos de piso: la explotación del primero se lleva a cabo en forma escalonada ascendente y, el segundo en forma escalonada descendente.

La explotación consiste en etapas de: preparación, explotación y extracción. Terminada la explotación del rebaje o de la mina, en algunos casos se recuperan los pilares.

### V.1.1. Preparación

Para llevar a cabo una buena explotación en todos los métodos de minado, y antes de realizar las obras de preparación, es necesario conocer el yacimiento y tomar en cuenta principalmente: su profundidad, forma, dimensiones, desarrollo, roca encajonante, distribución de leyes, equipo a utilizar y producción deseada, así como una comparación entre los posibles métodos a aplicar, sus costos de minado e inversión requerida. Una vez analizadas las posibles alternativas, se selecciona la más adecuada, se prosigue con un estudio de planeación de la mina, se indica la secuencia a seguir del minado. En la mayoría de los métodos de explotación subterráneos, la obra minera de donde se extrae el mineral recibe el nombre de rebajes; éste se realiza en la parte mineralizada a extraer del yacimiento, es delimitado por sus partes, superior e inferior por obras mineras horizontales llamadas niveles, y a sus lados por obras mineras verticales llamadas contrapozos; para yacimientos angostos, la altura del rebaje es de 30 a 50 m y su longitud de 30 a 100 m.

Para llegar a los rebajes se requiere la construcción de varias obras mineras, mencionando a continuación las más importantes:

**Tiro:** Obra vertical o inclinada construida de arribahacia abajo, y que tiene comunicaciones a diferentes alturas con las obras de explotación. Funciona como medio de transporte y de ventilación.

**Frente:** Obra sensiblemente horizontal, que puede estar localizada dentro o fuera del depósito mineral, pero siguiendo el rumbo general del mismo.

**Nivel:** Obra sensiblemente horizontal que inicialmente se le denominó frente, pero que ya ha sido ventilada y equipada para el transporte.

**Crucero:** Es una obra normal al rumbo de la frente o nivel.

**Contrapozo:** Obra vertical con cierta inclinación excavada de abajo hacia arriba.

**Túnel:** Obra sensiblemente horizontal con dos comunicaciones al exterior.

**Socavón:** Obra principal sensiblemente horizontal con una salida al exterior, que sigue la dirección de la mineralización.

**Contratiro:** Es un tiro interior, con las mis-

mas funciones de un tiro pero con ciertas limitaciones.  
Nunca tiene salida al exterior.

Estas obras se realizan de acuerdo a las características del yacimiento y del terreno.

En la parte interior de la mina se construyen - - otras instalaciones como son: polvorines, talleres de mantenimiento, comedores, y almacenes, entre otras. Además las obras necesarias para que exista un buen circuito de ventilación, colocando puertas o lonas para no -- contaminar el aire limpio.

Para el método de rebajes abiertos, se construye un número suficiente de contrapozos para el transporte de personal, mineral y tepetate (roca sin valor económico), así como uno adicional al centro del rebaje llamado contrapozo ranura, que servirá para dar salida a la voladura y como transporte de mineral.

En caso de contar con equipo montado sobre orugas o llantas, se construyen rampas para el acceso.

### V.1.2. Explotación

Delimitado el rebaje, se procede a su explotación, consistente en ciclos de barrenación, cargado de explo-

sivos, voladura, ventilación, amacizado y rezagado.

Este método tiene dos variantes: rebajes de techo y rebajes de piso. En el primero, la explotación se realiza en forma ascendente escalonada, y en el segundo, en forma descendente escalonada (bancos); la altura del banco depende del equipo de barrenación, - siendo muy usuales las máquinas perforadoras de pier-na neumática.

En la variante de techo, se realiza un corte en la parte inferior del rebaje, y conservando un pilar\_ entre éste y el nivel inferior; se inicia la explota-ción en forma ascendente escalonada y simétrica con - relación al contrapozo ranura, éste da salida a la vo-ladura. Conforme avanza la explotación y para poder\_ continuar laborando, se colocan entarimados con troncos de madera apoyados en las paredes del yacimiento\_ y tablonés; esto servirá de piso a la perforadora y - su operador, así como para la carga de explosivos y - efectuar la voladura, tratándose de recuperar los - - troncos conforme avanza la explotación.

En la variante de piso, se realiza un corte en\_ la parte superior del rebaje, conservando un pilar en- tre éste y el nivel superior; iniciando la explota--- ción en dicho corte y en el contrapozo ranura, el - -

cual funciona como cara libre para dar salida a la voladura y como metalera para el transporte del mineral. La explotación se realiza en bancos descendentes escalonados y simétricos con relación al contrapozo ranura.

La plantilla de barrenación y la cantidad de explosivos a utilizar, depende del grado de fractura---miento del mineral.

### V.1.3. Extracción

Para el método de rebaje de techo, el mineral -cae por su propio peso y es transportado a los contraposos denominados metaleras y de estos se transporta en góndolas o camiones hacia el tiro, por el que -se extrae al exterior de la mina por el bote de manteo llamado skip; puede también ser extraído por un -socavón.

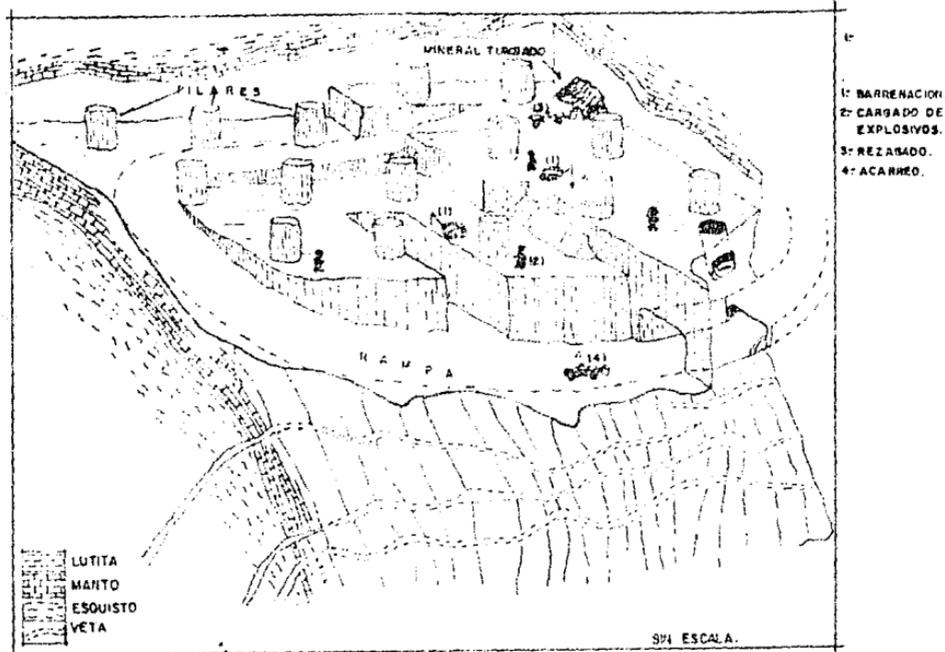
En el caso de los rebajes de piso, el mineral -cae por gravedad o es transportado por escrepas o carretillas a las metaleras, de estas se transporta en góndolas o camiones hacia el tiro, para ser enviado -al exterior de la mina o directamente por un socavón.

Cuando las metaleras no excedan el ángulo de re  
poso del mineral, se utilizan escrepas. La quebrado-  
ra primaria puede encontrarse ubicada en el interior\_  
de la mina.

## V.2. SALONES Y PILARES

Este método es similar al del mismo nombre usado en la minería de carbón. Es aplicable a yacimientos minerales con desarrollo horizontal o con poca inclinación, principalmente mantos, cuya potencia varía de 3 m a 35 m, a veces aún mayor, y con roca encajonante al alto consistente; siendo el principal método subterráneo de extracción para yacimientos con este desarrollo. En algunos distritos mineros como son: Taxco, Gro., Cuale, Jal. y Lampazos, Son., existen cuerpos mineralizados con desarrollo horizontal y vertical, y se utiliza este método para los primeros, y en los de desarrollo vertical, los métodos de corte y relleno con tepetate y tumba sobre carga principalmente.

La explotación consiste en extraer el mineral y dejar pilares del mismo repartidos uniformemente o estratégicamente. Puede realizarse con equipo tradicional o altamente mecanizado, dependiendo básicamente de la potencia del manto y producción deseada; la explotación se lleva a cabo en etapas de: preparación, explotación y extracción (Fig. V.1).



### METODO DE SALONES Y PILARES.

TESIS PROFESIONAL. 1990.- ARROYO OSORNO EMILIANO, BAUTISTA GONZALEZ ARTURO, CERON SANTIILLAN CARLOS,  
GARCIA GARCIA HECTOR, RODRIGUEZ GUTIERREZ ALEJANDRO, RUBINSTEIN JIMENEZ FRIDA N.

FUENTE: MINAS MEXICANAS, TOMO 2, 1986, JORGE E. ORDÓÑEZ CORTEZ.

FIG. II-1

### V.2.1. Preparación

Comunicado el exterior de la mina con el área a minar, se realizan las obras necesarias sobre mineral como son: frentes de acceso, cruceros y contrapozos - para servicio y ventilación, colocando puertas o llo-nas para mantener un buen sistema de ventilación. Se construyen rampas de acceso en caso de que el equipo\_ esté montado sobre orugas o llantas.

Estas obras se sitúan basándose en la informa-ción geológica obtenida con barrenos a diamante y - - obras directas.

### V.2.2. Explotación

Dependiendo del espesor del yacimiento y el - - equipo que se tenga para barrenar, se determina la al-tura de los bancos que pueden ser uno o varios: en ca-so de que sean más de uno, se puede explotar de dos - formas: en bancos ascendentes y en bancos descenden-tes.

Para los bancos descendentes, se explota y - - extrae el mineral del banco superior y, al finalizar\_ éste o llevar un avance se continúa con el inmediato\_ superior y así sucesivamente.

Para los bancos ascendentes, se explota y extrae el mineral del banco inferior, a continuación se explota el nivel inmediato superior, pero no se extrae el mineral ya que éste servirá de piso para el equipo de barrenación.

El espaciamiento entre pilares en estos casos será uniforme, y su diámetro así como la distancia entre estos depende de las características de la roca encajante y del mineral, así como de las condiciones locales del terreno.

Dependerá del grado de fracturamiento del mineral y caras libres que se tengan para determinar la plantilla de barrenación y carga de explosivos necesaria. Cargados los barrenos con explosivos se procede a su detonación, es importante que realizada la voladura se deje ventilar el lugar antes de entrar a laborar nuevamente; se amaciza el lugar de trabajo, golpeando las rocas del cielo para saber cuales son las rocas que están a punto de caer y tirarlas. En caso de que las rocas del cielo no sean consistentes, se procede a introducir anclas, que consisten en varillas de acero corrugado cementadas en un barreno, con la finalidad de controlar la estabilidad del terreno.

El ciclo de explotación es: barrenación, carga -

de explosivos, voladura, ventilación, amacizado, anclaje y rezagado.

Como ejemplo se menciona el caso del distrito minero de Cuale en el estado de Jalisco, donde se aplicó este método y fue restringido a depósitos tabulares, - con techo consistente y echado hasta de 20 grados, dejando pilares a intervalos para soportar el techo; la distribución de los pilares dependerá de la regularidad de los valores, situándose estos en forma sistemática o al azar.

Las obras de explotación se efectúan dentro del cuerpo a rumbo del echado, barrenando de frente y desbordando lateralmente y de cabeza para formar un salón máximo de 8 m; simultáneamente, se cuelan cruceros laterales para ir delimitando los pilares que tienen una sección de 5 x 5 m, quedando como tales zonas estériles del manto cuando es posible. Cuando la vida de la mina llegue a su término, se intentarán recuperar los pilares que quedaron en mineral.

Al ir explotando y delimitando pilares se busca una manera lógica para lograr flexibilidad al tener varios lugares de ataque, logrando así el más alto ritmo de extracción del mineral.

Preferentemente, el tumbé debe iniciarse del -- contacto del alto del manto hacia el bajo del mismo, -- sobre todo cuando la potencia del cuerpo mineral es -- mayor de 4 m. En el caso de la mina Naricero, la -- guía más formal la constituye un paquete de lutitas -- negras, en el contacto del bajo del manto, por lo que actualmente el tumbé se inicia en dicho contacto.

Para la realización de los trabajos mencionados se emplean máquinas perforadoras de pierna neumática, y para el rezagado, equipo diesel montado sobre llantas con capacidad de 1.5 metros cúbicos. La recuperación del mineral es del 70%; la dilución es del orden del 10%; la ventilación es natural.

### V.2.3. Extracción

Para el transporte del mineral, se puede tener -- desde palas y carretillas de mano hasta cargadores -- frontales y camiones mineros, lo que dependerá del ta -- maño del yacimiento y producción deseada.

El mineral es transportado al exterior de la mi -- na por niveles, rampas, socavones, tiros o túncles; -- pasando generalmente antes por parrillas para contro -- lar su granulometría; en caso de no pasar por éstas, -- se barrena y fractura la roca con explosivos.

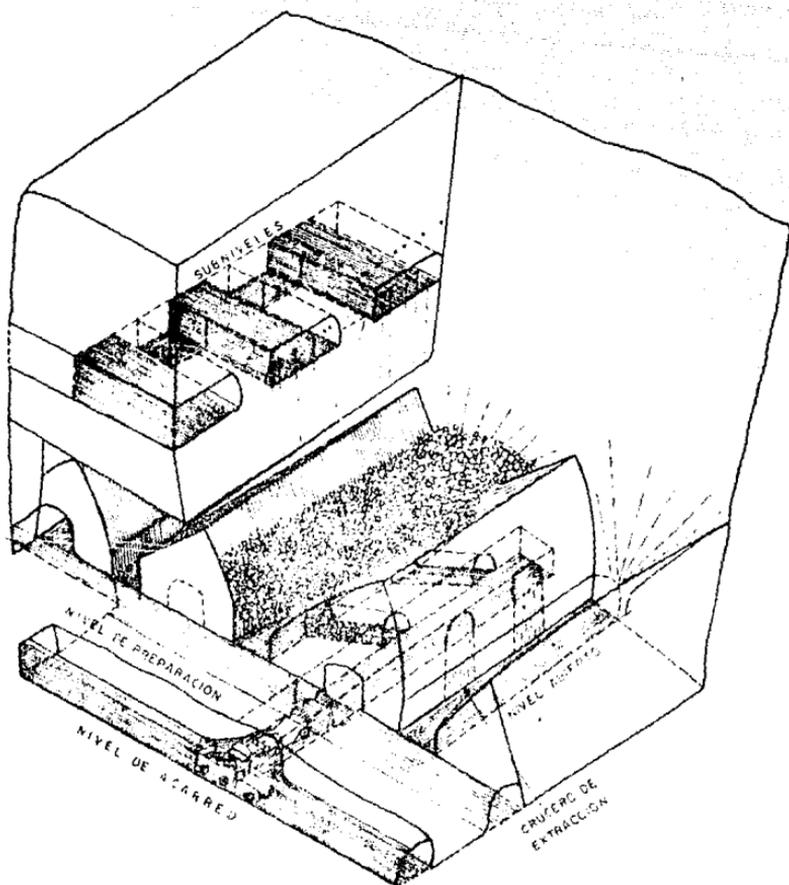
### V.3. TUMBE POR SUBNIVELES

Es aplicable a cuerpos mineralizados relativamente grandes, de buen espesor y que están claramente definidos de forma regular; la roca encajonante debe ser consistente, y no requiere madera ni relleno para los espacios vacíos. La inclinación del yacimiento debe exceder el ángulo de reposo del mineral, preferentemente mayor de 70 grados, se utiliza la fuerza de gravedad para que el mineral tumbado baje a la parte inferior del bloque; debido a las grandes dimensiones el área de extracción de mineral no recibe el nombre de rebaje sino de bloque.

Es una variante del método de rebajes abiertos, pero se diferencia por un alto grado de mecanización. Aumenta la producción, reduce los costos de explotación; permite una alta recuperación con baja dilución de mineral. Se caracteriza por una gran cantidad de obras a realizar durante la etapa de preparación, las que en su mayoría son sobre mineral (Fig. V.2 y V. 2-A).

#### V.3.1. Preparación

Cuando se ha obtenido la información correspondiente a la fase exploratoria, se determinan los parámetros que regirán al proceso de explotación, tales como dimensiones del bloque a minar, altura de los subniveles, - -



UNAM FACULTAD DE INGENIERIA.  
CIENCIAS DE LA TIERRA.

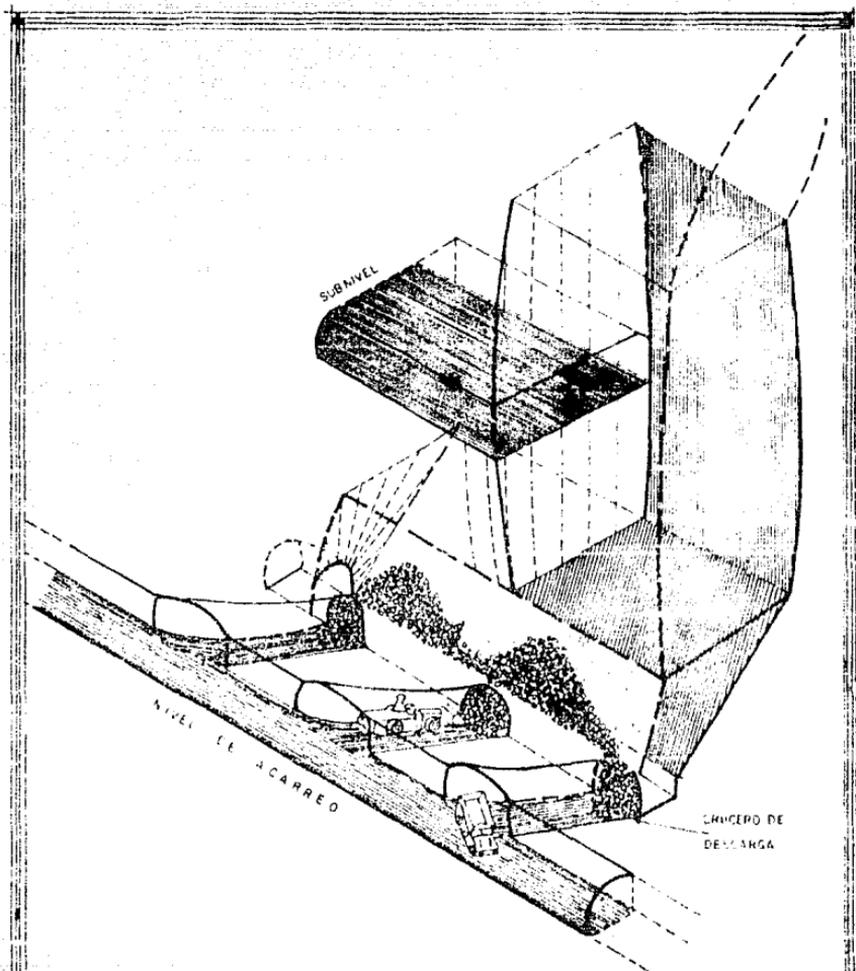
TUMBE POR SUBNIVELES.

ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.

SIN ESCALA.

281

TEBIS PROFESIONAL. 1990 FIG. V-2



**UNAM** FACULTAD DE INGENIERIA.  
CIENCIAS DE LA TIERRA.

**TUMBE POR SUBNIVELES.**

ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.H.

TEBIS PROFESIONAL. 1900 FIG. X-1-A

obras de acceso, ventilación, extracción, plantillas de barrenación y equipo a utilizar.

El bloque a minar es delimitado por niveles en su parte superior e inferior y contrapozos en sus extremos, los que se utilizan para el acceso de personal y equipo: en la mayoría de los casos el equipo está montado sobre orugas o llantas, por lo que es necesario construir rampas de acceso que comuniquen a diferentes alturas del bloque (subniveles).

En México existen algunos distritos mineros donde es aplicado este método, como es en Santa Bárbara, Chihuahua, Zimapán, Hidalgo y La Negra, en el estado de Querétaro; en este último la preparación se inicia en la parte inferior del cuerpo con la rampa de acceso ascendente, contrapozos de ventilación y preferentemente un contrapozo Robbins a la superficie. La rampa puede estar al alto o al bajo del cuerpo, prefiriéndose el contacto mejor definido manteniéndola a 10 m, retirado del mismo. El contrapozo Robbins se ubica por lo general en el cuerpo. Se procede a colar los cruceros de extracción en el nivel principal y a la apertura del primer subnivel inmediato superior o subnivel de "conos"; se cuelan contrapozos para comunicar los cruceros a dicho subnivel y dejar listo para formar los conos. El cuele de la rampa se continúa así como la apertura de

los subniveles superiores.

### V.3.2. Explotación

Se inicia con la formación de los conos de captación; realizados los subniveles se tienen delimitados - pequeños bloques de mineral llamados bancos. La explotación puede ser en forma ascendente y descendente, llevándose en forma escalonada, por lo que los bancos son barrenados, cargados con explosivos y detonados: debe iniciarse en el contrapozo ranura colado en un extremo o al centro del bloque a minar.

El uso de detonantes con retardo hacen más factible la voladura múltiple, en función de la fragmentación.

La barrenación de los bancos puede hacerse con máquinas perforadoras de pierna neumática, siendo más usual el uso de jumbos de barrenación. La barrenación puede ser: paralela, en forma de abanico, o en forma de anillos, lo que dependerá de la fragmentación del mineral.

Este método es bastante seguro por la consistencia de la roca y además se tiene protegida la parte superior del banco donde se labora.

### V.3.3. Extracción

El mineral cae por su propio peso de los subniveles por las metaleras hacia las obras mineras en forma de conos, donde se almacena y descarga el mineral al subnivel de extracción, y se saca por los cruceros al nivel de acarreo, con escrapas o cargadoras frontales articulados de perfil bajo (scoop-tram), que descargan en camiones mineros del mismo perfil o en góndolas accionadas por locomotoras que conducen el mineral hacia las tolvas que eliminan el bote de manto ubicado en el tiro, que lo extrae al exterior de la mina. La quebradora primaria puede ubicarse en el interior de la mina.

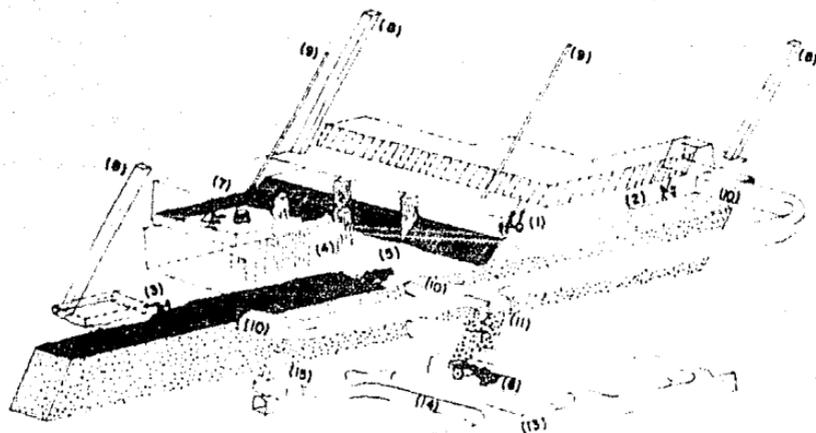
#### V.4. CORTE Y RELLENO HIDRAULICO

Es considerado dentro de los métodos de relleno;\_ deja al descubierto sólo provisionalmente el área de -- trabajo entre el mineral y el relleno. El relleno está constituido por las arenas de desecho de la planta de - beneficio llamado "jal", que funcionan como medio prin- cipal para sostener las paredes del yacimiento y como - piso para proseguir la explotación del rebaje; las ro- cas encajonantes deben ser desde consistentes a semicon- sistentes. El buzamiento del yacimiento debe ser prefe- rentemente de 70 a 90 grados. Puede ser selectivo con\_ altas recuperaciones de mineral, y la dilución ser con- trolada a un nivel aceptable (Figs. V.3 y V.4).

##### V.4.1. Preparación

El exterior de la mina se comunica con el área a - minar y se procede a delimitar el rebaje con contrapozos y niveles, los que servirán de acceso, ventilación y los niveles para acarreo; estas obras se conservan durante - la explotación por medio de pilares.

Para yacimientos con espesores mayores de 5 ó 6 me- tros, se acostumbran construir, sobre el mineral estéril, rampas de acceso con una pendiente del 8% al 12% para el transporte del equipo de barrenación, carga y acarreo --



SIN ESCALA.

- 1- BARRENACION CON TRICICLO
- 2- CARGADO DE BARRENOS DE TRICICLO
- 3- RASURADA DE TECHO  
(Corte angosto horizontal)
- 4- ANCLAJE
- 5- HEZAGADO
- 6- ACARREO
- 7- RELLENE CON COLAS DE MOLINO (del Hidráulico)

FUENTE: MINAS MEXICANAS, TOMO B, 1986, JONAS E GONZÁLEZ CORTÉS.

- 8- CONTRAPOZOS DE VENTILACION, HAZARA TUBERIAS AGUA, AIRE, Y MANGUERAS JAL
- 9- BARRENOS DE CONDUCCION DE JAL
- 10- ACCESO PARA REDAJE (PIVOTEO)
- 11- METALERA
- 12- NIVEL DE ACARREO
- 13- ACCESO NIVEL DE DRENAJE
- 14- MAMPARA ACENTAMIENTO SOLIDOS
- 15- CONTRAFOZO DE DRENAJE.

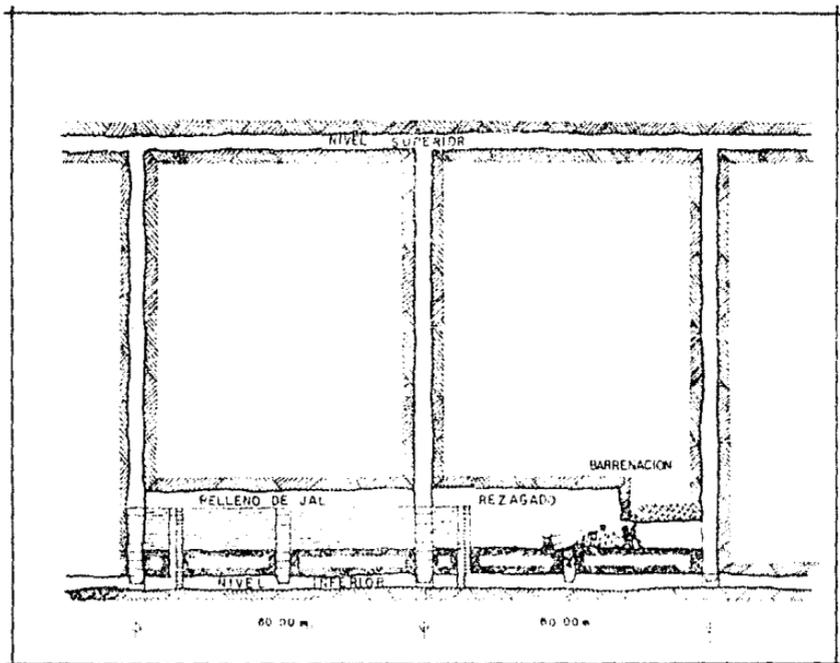
UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA.  
CIENCIAS DE LA TIERRA.METODO DE CORTE Y RELLENO HIDRAULICO  
PARA YACIMIENTOS ANCHOS

ARROYO OSORNO E	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ EN
TESIS PROFESIONAL.	1990

FIG. V-3

METODO DE CORTE Y RELLENO PARA YACIMIENTOS ANGOSTOS.



SIN ESCALA

TESIS PROFESIONAL. 1900.- ARROYO OSORNO EMILIANO, BAUTISTA GONZALEZ ARTURO, CERON SANTILLAN CARLOS,  
GARCIA GARCIA HECTOR, RODRIGUEZ GUTIERREZ ALEJANDRO, RUBINSTEIN JIMENEZ FRIDA N.

FUENTE: MINAS MEXICANAS, TOMO I, 1966, JORGE E. ORDÓÑEZ CORTEZ.

FIG. V-4

que esté montado sobre orugas o llantas; con estos equipos se obtiene una mayor producción. Así mismo, las metaleras son construidas sobre estéril y están conectadas en su parte inferior con el nivel de acarreo por cruceros de extracción. Para yacimientos con estos espesores es indispensable dejar pilares.

En yacimientos con poco espesor no se construyen rampas, ya que los mismos contrapozos sirven de acceso para introducir el equipo, que generalmente son máquinas perforadoras de pierna neumática para barrenar y escrepas para el acarreo del mineral hacia las metaleras, las que se construyen con madera conforme avanza el relleno y descargan en el nivel de acarreo.

Una vez delimitado el rebaje que en algunas ocasiones llega a exceder los 100 metros de longitud, se procede a realizar el primer corte y se conserva un pilar entre éste y el nivel inferior. En el piso del primer corte se coloca una losa de concreto armado (concreto y mallacero), anclada a las paredes del rebaje y de los pilares (en caso de que los hubiese), con una pendiente del 1 ó 2% hacia las obras de decantación, consistentes en torres de madera de sección cuadrada y en forma de anillos recubiertas de henoquén tejido (yute); las torres descansan sobre la losa en la dirección de la inclinación del yacimiento y con un sistema de --

tuberías de drenaje, paralelas a éstas conectadas entre sí. Se incrementa la altura de las torres y de la tubería conforme avanza la explotación.

#### V.4.2. Explotación

Una vez realizadas las obras de preparación, se prosigue, con los ciclos de explotación; para esto, es necesario dividir el rebaje en tres áreas iguales, con objeto de que los tonelajes a extraer de cada una de ellas sean similares; el ciclo es dividido en tres etapas.

La primera etapa se conoce como "tumba". Consiste en la barrenación: Se elabora la plantilla de barrenación para determinar la distancia entre barrenos; estos son cargados con explosivos y detonados. Para dar salida a la voladura de cualquier sección, es necesario realizar una ranura o contar con una cara libre; finalmente se deja ventilar y se prosigue con la siguiente etapa.

En la segunda etapa se "amaciza": esto es, se desprenden las rocas del techo (cielo) que estén por caer; en algunos casos, cuando el mineral de cobre no es consistente se colocan anclas en el cielo, por medio de varillas de acero corrugado de 3/4" a 5/8" y el largo según las necesidades del terreno, así como la separación entre una y otra; esto se realiza para no tener caídas de mineral durante el desarrollo de los trabajos y para seguridad del personal y equipo; finalmente se extrae -

el mineral, que es transportado hacia las metaleras.

La última etapa consiste en "rellenar" el área minada con arenas de desecho provenientes de la planta de beneficio (jal); es importante el control de la granulometría de dichas arenas; se trata de que no contengan muchos finos. Los jales clasificados por ciclones son introducidos al rebaje por medio de mangueras de neopreno y a través de un barremo.

Conforme avanza la explotación se incrementa la altura de las torres y de la tubería de decantación, según la inclinación del yacimiento.

#### V.4.3. Extracción

Para yacimientos de gran potencia el mineral es extraído con cargadores frontales de perfil bajo y camiones mineros del mismo perfil; estos últimos transportan el mineral hacia las metaleras que descargan a los cruceros de extracción comunicados con el nivel inferior de acarreo, donde el mineral puede ser transportado por locomotoras con góndolas o con camiones mineros de perfil bajo, hasta las parrilas ubicadas en el tiro. Es común que en estos yacimientos exista una quebradora primaria antes de ser extraído el mineral por el bote -

de manteo (skip) a través del tiro.

En el caso de yacimientos con poco espesor, el mineral es transportado hacia las metaleras por medio de escrepas, las que descargan en el nivel de acarreo y lo transportan al tiro generalmente en góndolas.

Este método se emplea en los distritos mineros -- de: Guanajuato, Edo. de Gto.; Fresnillo, San Martín y - La Colorada en el Edo. de Zacatecas; Santa Bárbara, - - Naica y Santa Eulalia en el Edo. de Chihuahua; Charcas\_ y Real de Catorce en el Edo. de San Luis Potosí; Taxco\_ y Real de Guadalupe en el Edo. de Guerrero; y Velardeña en el Edo. de Durango, entre otros.

## V.5. CORTE Y RELLENO CON TEPETATE

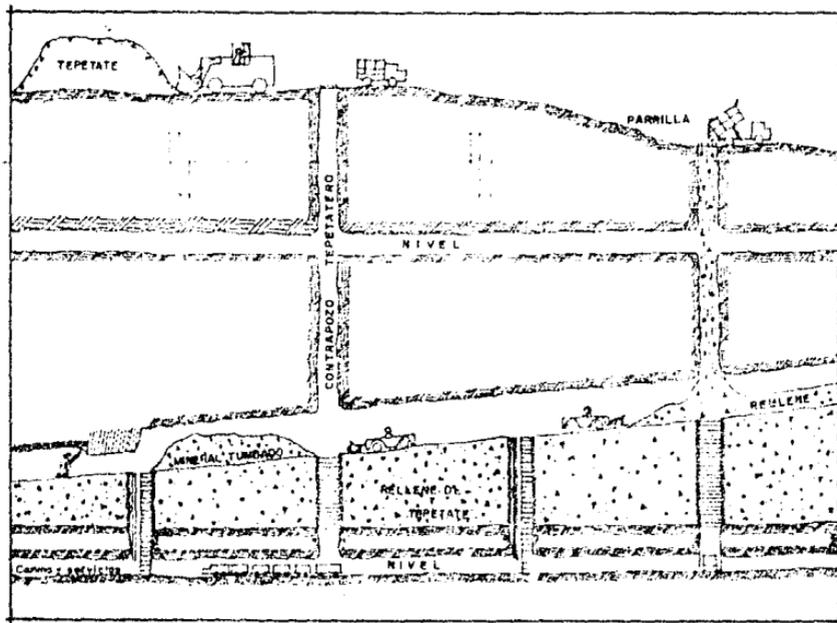
Este puede ser aplicado transversalmente o longitudinalmente en cuerpos minerales de anchos variables e inclinación desde vertical hasta horizontal, sin embargo, la mejor es de 70 a 90 grados. Es muy flexible y fácilmente adaptable a casi todos los cuerpos minerales; la roca encajonante debe ser de consistente a semicon-sistente; es idéntico el método anterior, pero a diferencia que el relleno es roca sin valor económico (tepetate). Es común que para yacimientos angostos el tepetate se extrae del interior de la mina, y para yacimientos con gran potencia proviene del exterior.

El método puede ser aplicado usando equipo convencional o mecanizado (diesel y neumático); es selectivo con altas recuperaciones de mineral y la dilución puede ser controlada a un nivel aceptable, (Fig. V.5).

### V.5.1. Preparación

Se comunica el exterior de la mina con el área a minar y se delimita el rebaje con contrapozos y niveles. Para la construcción de las obras restantes se debe tomar en cuenta el lugar de extracción del tepetate.

METODO DE CORTE Y RELLENO CON TEPETATE.



TESIS PROFESIONAL. 1990- ARROYO OSORNO EMILIANO, BAUTISTA GONZALEZ ARTURO, CERON SANTILLAN CARLOS,  
GARCIA GARCIA HECTOR, RODRIGUEZ GUTIERREZ ALEJANDRO, RUBINSTEIN JIMENEZ FRIDA H.

FUENTE: MINAS MEXICANAS, TOMO 4, 1988, JORGE E. ORDOÑEZ CORTEZ.

FIG. IX-5

Para yacimientos anchos, se construye un contrapozo denominado tepetatera que comunica el exterior de la mina con el rebaje, así como la construcción de rampas para el equipo mecanizado; para el transporte de mineral se construyen metaleras que pueden ser dentro o fuera del yacimiento. Como ejemplo se menciona el caso de la mina de Taxco, Gro. donde una vez explorado con obra directa al rebaje de mineral a explotar, se cuecla un contrapozo Robbins de 2.4 m de diámetro para ventilación en un extremo, dándose también dos contrapozos similares de 1.8 m de diámetro al centro y al bajo de la estructura para tepetatera y metalera; el primero desde superficie hasta el desplante del rebaje y el segundo del nivel superior al nivel principal de acarreo. En paralelo a estas obras, se desarrolla una rampa de acceso y servicios al bajo de la veta, con dimensiones de 4.0 m y 3.5 m, y pendiente de 12%; un con tracañón para acceso a la frente de explotación y de exploración y un contrapozo de servicios en el extremo opuesto del Robbins de ventilación. Al colarse la rampa, ésta se comunica con un contrapozo convencional para ventilar el tope y ahorrar grandes longitudes de tubería.

Para yacimientos angostos se necesita tener roca encajonante consistente en alguna de las paredes, y de preferencia al alto (para caer por gravedad); el tepe-

tate es extraído por el método de rebajes abiertos, y es enviado al rebaje por topetateras. El acceso para el personal y equipo convencional se realiza por los contrapozos, los que además funcionan para la ventilación. Como ejemplo de este caso, se menciona la mina Candelaria, ubicada en el distrito minero de La Colorada, Edo. de Zacatecas, donde las vetas tienen un ancho desde 40 cm hasta 1 m en promedio, con inclinaciones mayores de 50 grados, y longitudes de 50 a 75 m por rebaje. Se dan contrapozos sobre tepetate al alto de la veta, de manera tal que se realicen dos o tres cortes antes de rellenar.

Para yacimientos muy angostos se utiliza el método de descoste (resuing), lo que es usual en vetas auro-argentíferas con contenido de cobre, donde se obtiene el tepetate del mismo rebaje. A manera de ejemplo se menciona la mina El Burro, ubicada a 45 km al norte de Zihuatanejo, Edo. de Gro., donde se tienen vetas de 0.15 a 0.40 m de espesor, y una vez comprobada la existencia de la estructura mineralizada por obra directa, en este caso una frente de longitud variable (50 a 200 m), se procede a desarrollar contrapozos cada 20 m con respecto al centro de los mismos, con secciones de 1.8 y 1.8 m y longitud vertical de 5.5 m; lo que es suficiente para dejar pilares de 3 m entre la frente de exploración y el nuevo subnivel de prepa-

ración. De estos mismos contrapozos se desplanta la tolva y camino de madera de 1.8 m en forma de huacal, que sirve de acceso para el personal, servicios y metálera durante la explotación del rebaje. Se desarrollan contrapozos que generalmente son de nivel a nivel, con separación de 40 a 60 m, lo que depende del rebaje explorado. El objetivo de los mismos es de comprobar reservas, ventilación de los rebajes, servicios, en algún momento para transportar tepetate o conducir jal por tubería, en caso de que el ancho de la veta o rebaje supere lo normal, da más versatilidad al sistema de minado; la posición de este contrapozo se escoge de manera que sirva para dar salida a la voladura de la barrenación vertical, durante la etapa de tumbé.

### V.5.2. Explotación

En todos los casos, cuando ha sido delimitado el rebaje, se procede a realizar el primer corte, conservando un pilar entre este y el nivel inferior. La explotación se realiza en etapas, para lo cual es necesario dividir el rebaje en tres áreas iguales, con objeto de que los tonclajes a extraer sean similares. La primera etapa consiste en barrenación, carga de explosivos y voladura; para dar salida a esta última, es necesario contar con una ranura o cara libre; se deja ventilar el lugar después de la voladura. En la segun

da etapa se amaciza, y en caso de ser necesario se introducen anclas para conservar la estabilidad del terreno; finalmente el mineral se acarrea hacia las meta<sup>l</sup>eras; la tercera etapa consiste en rellenar con tepetate el volumen de mineral extraído, el que debe de contar con un control granulométrico y se debe tener precaución en todo momento, de no contaminar el mineral con tepetate.

En el ejemplo de la mina de Taxco para yacimientos anchos; se forma un corte de 3 m de altura, teniendo el relleno a 3 m del techo, se parte del centro del rebaje a un extremo, se barrena horizontalmente con máquina perforadora Gardner Denver, modelo S 83 F y longitud de barrenos de 2.4 m. El ciclo completo comprende de tumba y rezagado en una mitad, mientras que la otra es rellena. Es importante que para yacimientos anchos se conserven pilares según las necesidades del terreno. Para el rezagado de mineral y tepetate, se emplean dos scoop-trams, uno de 5 yd y otro de 3 yd, una vez terminado el relleno se empareja perfectamente con un tractor D-4. El material de relleno es vaciado de la superficie al rebaje con un tractor D-7. Durante el minado se desarrolla la rampa de servicios a una posición estratégica, de la que parten cruceros a rampas de acceso directo al rebaje con una pendiente máxima de 15% de tal forma que al ascender el minado se --

desborden del techo hasta lograr una posición horizontal y, posteriormente, con una pendiente de 15% que se requiere para tres cortes de tumba. El número de accesos depende de las variaciones geológicas de la ve  
ta.

Para el ejemplo de yacimientos angostos en la mi  
na Candelaria; se barrená con máquina de pierna neumática y la extracción se realiza por medio de chutes -- que descargan sobre carros de vía, utilizando escrepas dentro del rebaje para mover el mineral y el tepetate.

El ejemplo de la mina El Burro es para yacimientos muy angostos; la perforación se efectúa con perforadoras de pierna neumática BBC-46 con ángulo de incli  
nación de 80 grados, acero cónico de 11 grados y broca de gavilanes con diámetro de 1.5"; la plantilla utilizada de barrenos es a "tres bolillo" con separación de 0.5 m de centro a centro. Se usan dos escalas de acero para barrenar; de 1.2 m y 1.8 m, con una longitud vertical de 1.6 m y 70 grados de inclinación.

### V.5.3. Extracción

El mineral es transportado hacia las metaleras -- que lo conducen al nivel de acarreo, donde es transpor  
tado hasta las parrillas, en algunos casos pasa por --

una quebradora primaria, o directamente es transportado al exterior de la mina por el bote de manteo ubicado en el tiro.

En la mina Candelaria, el acarreo se realiza por medio de locomotoras de 3 y 1.5 tons. y carros concha de 1.2 tons. de capacidad. En los niveles principales de la mina se cuenta con 2 locomotoras de baterías de 1.5 tons. que arrastran conchas de 1.2 tons. de capacidad.

En la mina El Burro, se acarrea el mineral en carros tipo concha de 1.2 ton. de capacidad hasta las metaleras. De las tolvas se mantea per el tiro hasta el nivel superior, donde una locomotora diesel de 15 ton. de capacidad lo transporta a la planta de beneficio.

## V.6. TUMBE SOBRE CARGA

El método es aplicado a yacimientos regulares -- bien definidos, con espesores desde muy angostos hasta muy potentes, con buena estabilidad de la roca encajonante (que no se desplomen los respaldos sobre todo al alto, principalmente cuando se vacía el rebaje), y de gran buzamiento preferentemente de 70 a 90 grados para extraer el mineral por gravedad; para yacimientos con buzamiento entre 45 y 50 grados, es recomendable usar el método de rebajes abiertos. El mineral no debe ser propenso a la aglutinación, oxidación, ni flamación -- espontánea.

El mineral tumbado queda almacenado temporalmente en el rebaje, y ofrece un piso para continuar con la explotación, además soporta parcial y temporalmente las paredes del rebaje durante las etapas de minado. Al tumbar el mineral, éste ocupa un volumen mayor que el anterior (llamado abundamiento), por lo que es necesario extraer de un 30 a un 40% del mineral periódicamente conforme avanza la explotación del rebaje. Terminada la explotación del rebaje, el mineral es extraído totalmente, lo que se puede considerar como desventaja del método al no tener disponibilidad inmediata de todo el mineral tumbado. El rebaje explotado permanece sin soporte, pero con el tiempo se produce el - -

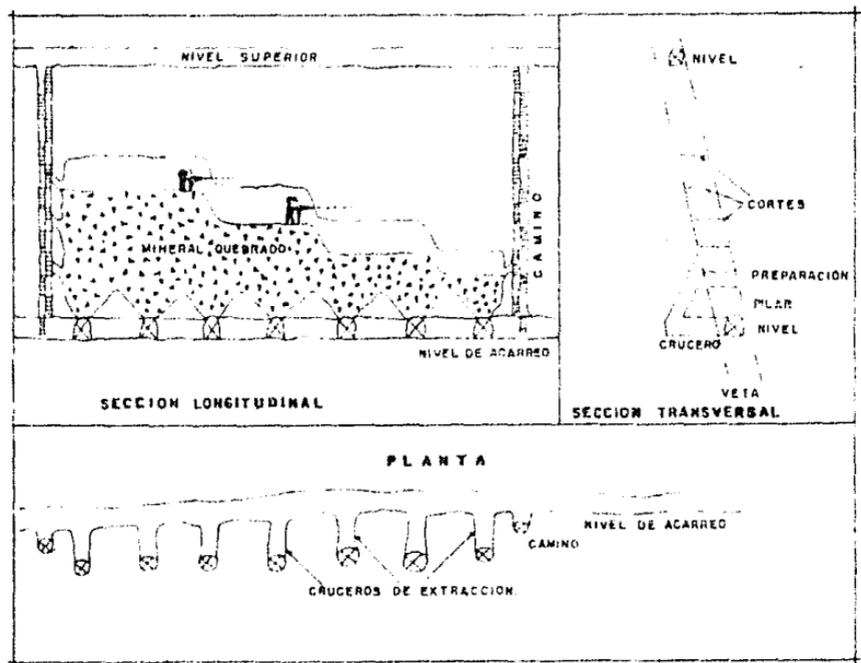
derrumbe espontáneo o su hundimiento forzoso; en ocasiones se rellena parcialmente (Fig. V.6).

#### V.6.1. Preparación

Una vez comunicado el exterior de la mina con el área a minar, se delimita el rebaje horizontalmente -- por niveles y verticalmente con contrapozos. Existen algunas variantes de este método, principalmente en -- las obras de extracción; como ejemplo se menciona el -- caso de algunas unidades mineras:

En la mina de Taxco, Gro. existen dos variantes; en la primera el tumbado del mineral se efectúa desde el desplante de la frente lo que significa que no se deja pilar de cabeza como una protección del nivel. Esta alternativa es considerada cuando el mineral que no se deja de pilar es muy rico, y las obras de soporte artificial alcanzan a pagar con los valores de mineral que se dejaría como pilar. Inicialmente se construye un -- contracañón en tepetate al bajo de la veta y paralelo a la frente con una separación entre ambos de 7 metros; a partir de dicho contracañón se construyen cruceros -- espaciados 10 metros de centro a centro para comunicar con la frente, que servirán posteriormente como cruceros de extracción del mineral tumbado; también se dan -- dos contrapozos para ventilación y servicios del reba-

METODO DE TUMBE SOBRE CARGA.



SIN ESCALA.

304

TESIS PROFESIONAL 1990: ARROYO OSORNO EMILIANO, BAUTISTA GONZALEZ ARTURO, CERON SANTILLAN CARLOS,  
 GARCIA GARCIA HECTOR, RODRIGUEZ GUTIERREZ ALEJANDRO, RUBINSTEIN JIMENEZ FRIDA M.  
 FUENTE: MINAS MEXICANAS, TOMO 2, 1966, JORGE E. ORDOÑEZ CORTEZ.

FIG. 5-6

je, uno en cada extremo, los que pueden ser dados con máquina contrapocera Robbins o convencionales. El rebajedelimitado para su explotación es de 100 m de largo por60 m de alto. Una vez terminada la preparación se continúa con el tumbe del mineral, el que se efectúa por medio de cortes partiendo de cada contrapozo hacia el centro del rebaje.

En la segunda variante de la mina de Taxco, y a diferencia de la anterior, se deja un pilar de protección. Este sistema es usado en niveles sobre vía por ser más rápida su preparación en estas condiciones. Primeramente se construyen cruceros a partir de la misma frente ycon una separación entre crucero y crucero de 10 m de centro, dichos cruceros están al bajo de la veta y con una longitud de 7 m; a partir de cada crucero se construyen contrapozos de 45 grados de inclinación hasta cortar la veta y, posteriormente, a partir de esa altura se inicia el tumbe del mineral, dejando así un pilar de protección al nivel.

En la mina de Tayoltita, Dgo., este método se efectúa normalmente en cuerpos angostos, con respaldos firmes y echado muy próximo a la vertical con el fin de obtener en la extracción el mínimo de dilución. Dado que las condiciones son distintas, se aplican diferentes variantes: En la primera, se realiza un subnivel (como -

primer corte), se conserva un pilar entre éste y el nivel inferior, así como el cuele de tolvas entre estos para extracción; contrapozos para acceso y servicios en los extremos del rebaje, y contrapozos de ventilación distribuidos con el tamaño del rebaje. En la segunda variante, se hace una preparación con subnivel y contrapozos de extracción al bajo de la veta; caminos en los extremos del rebaje y ventilación por medio de contrapozos distribuidos de acuerdo al tamaño del rebaje. En la tercera variante, se preparan contrafrentes al bajo de la veta, cruceros y contrapozos de extracción para pala neumática o scoop tram, así como contrapozos en los extremos para acceso y ventilación.

En la mina de Fresnillo, Zac., además de contar con vetas cuenta con mantos y chimeneas; para explotar estas últimas se parte de una rampa construida al bajo de los cuerpos, se abre un sill en el nivel inferior y otro en el nivel superior; ambos se comunican con un contrapozo construido en el contacto del bajo que sirve para ventilación y suministro de servicios al rebaje.

#### V.6.2. Explotación

Esta etapa consiste en ciclos de: barrenación, cargado de explosivos, voladura, ventilación, amacizado, anclaje (en caso de tornarse débil la roca encajonante) y

extracción del mineral, que como se mencionó, únicamente se extrae de un 30 a 40%; cuando el mineral provocado -- por el abudamiento es extraído por la parte inferior -- del rebaje, ya sea por las tolvas o por los contrapozos de extracción, se conoce como tumbe sobre carga dinámico. Cuando dicho mineral es enviado del área de trabajo a la parte inferior del rebaje por un contrapozo, recibe el nombre de tumbe sobre carga estático. Es indispensable tener un espacio de trabajo suficiente para poder continuar con la explotación del rebaje; el equipo de barrenación empleado normalmente, son máquinas perforadoras de pierna neumática, pero pueden usarse perforadoras montadas sobre orugas o llantas. Dentro del rebaje se puede contar con una escropa, para mantener nivelado el piso de trabajo.

Es importante tener un buen control de la granulometría del mineral, para que no existan obstrucciones al extraerlo.

### V.6.3. Extracción

Terminada la explotación, el mineral se extrae por las tolvas o cruceros de extracción colados en la parte inferior del rebaje que comunican al nivel de acarreo, donde es transportado en camiones mineros de perfil bajo o góndolas. En el caso de los cruceros de extracción, -

el mineral es transportado al nivel de acarreo por palas neumáticas o cargadores frontales del perfil bajo (scoop tram). Finalmente el mineral es transportado por los niveles de acarreo hacia el tiro, para ser enviado al exterior por el bote de manteo.

Es frecuente que durante la extracción del mineral se presenten encampanamientos (bloqueo de tolvas), debido al mal control del tamaño de mineral durante la explotación.

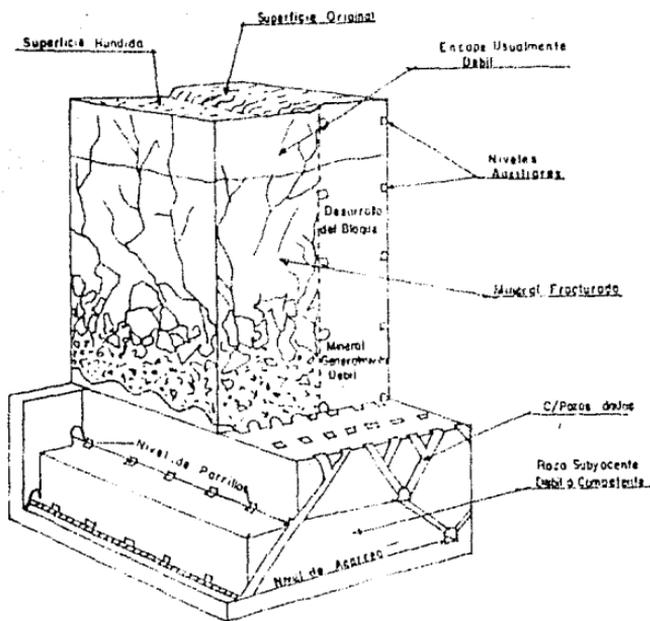
Finalmente, para este método se recomienda contar con tres rebajes: uno que esté en preparación, otro en explotación, y el restante en la etapa de extracción de mineral. Lo anterior para tener una producción constante.

## V.7. HUNDIMIENTO POR BLOQUES

Este método es aplicado a yacimientos minerales de gran dimensión, con rocas semiconsistentes, propensas al derrumbe espontáneo en razón de su fracturamiento, esquistosidad o crucero: la presencia de rocas encajonantes consistentes dificulta el empleo de este método, ya que hacen necesario su derrumbe, aumenta así la preparación y los costos de producción. Es aplicado a yacimientos minerales con contenidos de cobre de baja ley, debido a las pérdidas considerables (10% a 15%) y dilución del mineral; además de minerales que no estén propensos a la inflamación espontánea.

Consiste en delimitar bloques por todos sus lados, cargarlos con explosivos y provocar su hundimiento; al extraer el mineral por la parte inferior del bloque, las rocas de la superficie se hunden rellenando el espacio explotado.

Este método no es empleado en México, pero sí en otros países del mundo con gran éxito, ya que alcanza una gran producción casi comparada con el método de mina a tajo abierto, pero con altas diluciones. Entre otros países es utilizado en Estados Unidos de Norteamérica y Canadá (Fig. V.7).



UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA
	CIENCIAS DE LA TIERRA.
HUNDIMIENTO POR BLOQUES.	
ARROYO OSORNO E	GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A	RODRIGUEZ GUTIERREZ A
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F. N.
TESIS PROFESIONAL	1900
FIG. N° V-7	

### V.7.1. Preparación

Establecida el área a minar, se realizan las obras para delimitar y preparar el bloque para su explotación y posteriormente para la extracción del mineral, con las siguientes obras:

1. Niveles de arrastre o acarreo (Haulaga level), repartidos equidistantemente bajo el bloque.
2. Cruceiros de extracción (Draw points); a partir del nivel de arrastre se realizan perpendicularmente estos cruceiros.
3. Construcción de contrapozos de extracción o de transferencia.
4. Contrapozos rampa, construidos a partir de los anteriores.
5. Nivel de parrillas o cribas: Es aquí donde se controlarán las dimensiones del mineral tumbado: en caso de que existan rocas de gran volumen, se reducirán de tamaño con el uso de explosivos. Este nivel se localiza en la parte superior del nivel de acarreo.
6. Contrapozos dedo: Comunican el nivel de parrillas con la base inferior del bloque.

Los trabajos antes mencionados se realizan sobre material estéril; pero si las dimensiones del yacimiento mineral son muy grandes, estos trabajos pueden ser sobre mineral.

Para conocer las dimensiones del bloque se debe tomar en cuenta lo siguiente: La altura, dependerá del espesor del yacimiento y, además, de la inclinación o echado de éste, así como de las características del encape y del mineral; en algunos casos llegan a tener una altura hasta 1,200 m. Por lo que se refiere al área horizontal, ésta deberá ser lo suficientemente grande para que provoque el hundimiento, pero lo suficientemente pequeña para no sobrecargar las obras mineras.

Finalmente se delimita el bloque en su parte inferior con galerías autosostenibles a base de pilares. A los lados del bloque se construyen contrapozos y subniveles, estos para debilitar las paredes del bloque: la cantidad de estas obras dependerá del contacto que existe entre el mineral y la roca encajonante, para que al momento de la voladura se desprenda fácilmente el mineral.

Por lo antes expuesto, es fácil observar que este método requiere de muchas obras de preparación, por lo que se requiere demasiado tiempo y una fuerte inversión

antes de poder extraer el mineral.

### V.7.2. Explotación

Una vez dividido el yacimiento mineral en bloques, y realizadas las obras de preparación, el yacimiento es explotado como un todo.

Como se mencionó, en la parte inferior del bloque y arriba de los contrapozos dedo, se construyen galerías en las que se dejan pilares a intervalos regulares para soportar el bloque; estos pilares son reducidos en su sección lo más posible, son barrenados, cargados con explosivos y detonados simultáneamente. El peso propio del bloque provoca el fracturamiento del mineral, para que éste sea transportado por los contrapozos dedo hasta el nivel de parrillas, en este nivel, en caso de existir rocas de gran volumen, se fragmentan con una barrenación secundaria y el uso de explosivos hasta pasar por la parrilla, de donde es transportado el mineral por los contrapozos de extracción hasta los cruceros del mismo nombre.

Debe tomarse muy en cuenta que el hundimiento sea uniforme y bien controlado, para que no exista dilución del mineral.

### V.7.3. Extracción

Por los cruceros de extracción se saca el mineral con cargadores frontales que descargan en camiones mineros, que lo transportan por el nivel de acarreo hacia - el tiro o socavón de extracción.

## V.8. A TAJO ABIERTO

Una mina a tajo abierto es una excavación hecha en la superficie del terreno, con el propósito de explotar mineral, pero es necesario extraer en la mayoría de los casos, grandes cantidades de tepetate (mineral sin valor económico).

La planeación se basa en los datos obtenidos de la exploración, a través de la barrenación, con lo que se determina la forma, profundidad y dimensiones del yacimiento así como la distribución de los contenidos de cobre y de otros elementos existentes.

Además indica las áreas a explotar y el tiempo -- programado, los caminos a construir, rampas, instalaciones auxiliares y áreas donde se depositará el tepetate.

El método de explotación a seguir es: barrenación, cargados de explosivos y voladura. La etapa de extracción consiste en el rezagado (cargado en los camiones) de mineral o tepetate, y el acarreo de mineral o tepetate hacia la quebradora primaria.

### V.8.1. Planeación y diseño del tajo

La planeación se desarrolla principalmente con ba se en tres factores:

- a) La estimación de reservas de mineral
- b) El estudio de minado óptimo, y,
- c) La evaluación financiera.

La primera etapa aporta las reservas de mineral lo más completo posible, consistente en:

1. Secciones horizontales del yacimiento
2. Las reservas del yacimiento y el tepetate - (son representados en forma de bloques).

La segunda etapa comprende:

1. La optimización del diseño del tajo
2. Determinación de la relación de descapote, y
3. Secuencia de minado.

La tercera etapa consiste en analizar el flujo de capital, estudio de valor presente, así como otras consideraciones tales como financiamiento, posibilidad de obtención de créditos y otros aspectos económicos.

Algunos de los principales factores que apoyan la utilización del minado a tajo abierto son:

- a) Forma del yacimiento
- b) Posición del yacimiento
- c) Cercanía a la superficie.

Los conceptos que determinan la aplicación entre el método de minado a tajo abierto y un método subterráneo, son los costos de minado y la recuperación y dilución del mineral (los costos de minado incluyen el costo de extracción de tepetate que sea necesario).

La relación de descapote (tepetate: mineral), es por tanto un factor que determina la aplicabilidad de un minado a tajo abierto o subterráneo.

La siguiente ecuación determina el límite económico en la relación de descapote, la que puede ser aplicada para establecer los límites del tajo. Esta relación limita la geometría del tajo a ciertas ganancias marginales y asegura una ganancia mínima en la explotación del mineral.

$$\text{VALOR RECUPERABLE/TON. MIN.} - \frac{\left[ \frac{\text{COSTO OPERACION}}{\text{TON. MIN.}} + \frac{\text{GANANCIA MINIMA}}{\text{TON. MIN.}} \right]}{\text{COSTO DE DESCAPOTE / TON. DE TEPETATE}}$$

Esta fórmula es útil en el diseño del tajo, y puede ser aplicada en las diferentes etapas de descapote, para obtener la decisión de minar o abandonar un bloque de mineral.

Algunas veces se utilizarán los dos tipos de minado (subterráneo o superficial), debido a que económicamente ya no es aplicable el método superficial por la relación de descapote, para determinar dicha relación, se hace de la siguiente forma:

$$\text{P.E.D.} = \frac{\text{MINADO SUBTERRANEO (\$/TON)} - \text{MINADO A TAJO ABIERTO (\$/TON)}}{\text{DESCAPOTE DE TEPETATE (\$/TON.)}}$$

Donde P.E.D. es el punto de equilibrio de la relación de descapote.

Ejemplo:

Costo de minado subterráneo \$10.00/Ton.

Costo de minado a tajo abierto \$2.00/Ton.

Costo de descapote de tepetate \$2.25/Ton.

P.E.D. =  $(10.00 - 2.00) / 2.25 = 3.56$

P.E.D. = 3.56 (tepetate): 1 (mineral)

Esto representa, que solamente las zonas del cuerpo mineral donde la relación de descapote no exceda

de 3.56 de tepetate a una de mineral, puede ser minada a tajo abierto, en cambio, cuando la relación sea mayor el minado debe ser subterráneo.

La determinación óptima de las pendientes de los taludes y su configuración general son aspectos importantes en el diseño del tajo. El objeto principal en el diseño, es lograr la extracción del mineral eficientemente, a un mínimo costo y con máxima seguridad.

Es indispensable el estudio de la estabilidad de los taludes, tomando en consideración los aspectos geológicos relacionados con la estructura, flujos de agua, in<sup>temperismo</sup> y otras condiciones naturales. Además de las relaciones que guardan las fuerzas que tienden a resistir los desplazamientos y las fuerzas que tienden a ocasionarlos, para lo cual, es necesario la aplicación de estudios de mecánica de rocas, y tomar en cuenta el factor de seguridad.

En la práctica es muy usual que el ángulo del talud sea de 45 grados.

## V.8.2. Preparación

Una vez delimitada el área a minar y la secuencia a seguir, se procede a construir los caminos de acceso (previa selección del equipo de carga y acarreo), tomando en consideración lo siguiente:

- 1.- Pendiente: como regla general, la pendiente adecuada de un camino es de 8 a 12%, que permite la resistencia normal de rodamiento. -- Cuando las condiciones climatológicas son extremas, es recomendable reducir la pendiente y evitar las pendientes en contracarga.

La pendiente y velocidad de los caminos, se establece de acuerdo a la siguiente tabla -- (pudiendo variar de acuerdo a las especificaciones del fabricante):

Ejemplo:

Pendiente	Velocidad (M.P.H.)
-10%	15
- 3%	20
0%	20
+ 3%	20
+10%	15

2.- Anchura: Esta deberá ser cuando menos de 3.5 veces la del equipo más ancho que circulará por el camino; se incrementa esta relación en las curvas, y se construyen además, las cunetas y bordos de seguridad a los lados del camino; los caminos deberán tener una ligera pendiente hacia las cunetas.

3.- Localización: Los caminos cambiarán conforme avanza la explotación; deben ser lo más corto posible y estar terminados cuanto antes, a fin de evitar la construcción de caminos temporales.

### V.8.3. Explotación

El ciclo de explotación consiste en:

- 1.- Barrenación
- 2.- Cargado de explosivos y voladura.

Para iniciar la explotación, es necesario obtener el cálculo de los siguientes parámetros:

- Bordo: Es la distancia perpendicular entre hilas de barrenos y la cara libre.
- Espaciamiento entre barrenos: distancia entre barrenos de una misma hilera.

- Altura de banco: Es la altura real entre banco y banco del tajo.
- Profundidad del barreno: longitud total del barreno.
- Carga de fondo: Cantidad de explosivos de alta densidad, de gran potencia y de resistencia al agua. Para vencer el esfuerzo cortante, en la parte inferior del barreno.
- Carga de columna: Agente explosivo de baja densidad (nitrato de amonio y diesel) colocada sobre la carga de fondo, cuya función es ayudar a la carga de fondo durante la explosión, volteando y fragmentando la roca.
- Taco: es la parte superior del barreno, que se deja sin carga de explosivo y generalmente se utiliza el material de barrenación para su relleno.

Para el cálculo de los parámetros anteriores, se recomienda seguir las siguientes reglas:

- Bordo teórico (V) m: Puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{dp}{33} \sqrt{\frac{P \times s}{C \times f \times (E / V)}}$$

donde:

dp = Diámetro de la barrenación (m m).

P = Densidad de carga (grado de compactación) --  
(kg/dm<sup>3</sup>).

s = Fuerza del explosivo / unidad de peso.

f = Factor de inclinación de los barrenos.

verticales  $f = 1$

inclinación (3:1)  $f = 0.9$

inclinación (2:1)  $f = 0.35$

- Subarrenación (m): Siempre es necesario llevar a cabo, para evitar que la pala encuentre el piso levantado por falta de acción del explosivo.

- E/V: Relación de espaciamiento y bordo, normalmente 1.25.

- c: Constante de la roca, es la mínima cantidad de explosivo (kg) que se necesita para extraer un metro cúbico de roca. En la roca dura, (granito)  $c = 0.4 \text{ Kg/m}^3$ , este valor se incrementa para rocas suaves.

BORDO PRACTICO (V1) m: En la práctica, siempre existen errores de barrenación, tales como el alineamiento y la boca del barreno (broca), por tanto se debe considerar el cálculo del bordo práctico.

$$V1 = V - (0.03 \times H)$$

- Cuando la altura del banco es aproximadamente tres veces el bordo, el bordo práctico puede ser calculado simplemente por:

$$V1 = 0.04 d$$

donde  $d$  = diámetro de la barra (mm)

- CALCULO DEL ESPACIAMIENTO (E) m

$$E = 1.25 V1$$

El valor de 1.25 puede variar dependiendo del tipo de roca. En algunos casos el espaciamiento puede ser de 4 a 8 veces el bordo.

- BARRENACION:  $S_p = 0.3 V$ .

- LONGITUD DEL BARRENO:  $H = K + 0.3V + H_j$  (m)

Donde  $H_j$  = es el incremento en la longitud del barreno debido a la inclinación.

Para una inclinación de 3:1,  $H = 1.055 K + 0.3 V$ .

- Volumen:  $Vol = V1 \times E \times H$  (m<sup>3</sup>)

Una vez realizados los cálculos de la barrenación, se procede a realizar los cálculos para la carga de explo

sivos, con las fórmulas siguientes:

a)  $P_b = c \times V^2$

Peso de la carga de fondo por metro de barreno (Kg/m).

b)  $h_b = 1.3 \times V$

Longitud de la carga de fondo (Kg).

c)  $Q_b = 1.3 \times V \times P_b$

Peso de la carga de fondo (Kg).

d)  $P_c = 0.4 \times P_b$

Peso de la carga de columna por metro de barreno (Kg/m).

e)  $h_c = H - (2.3 \times V)$

Longitud de la carga de columna (m).

f)  $Q_c = h_c \times P_c$

Peso de la carga de columna (Kg).

g)  $Q_t = Q_b + Q_c$

Carga total del barreno (Kg).

h)  $h_t = h_b + h_c$

Longitud total de la carga (m).

i)  $q = \frac{Q_t}{V_l \times E \times K}$

Carga específica (Kg/m<sup>3</sup>) (Factor de carga).

Realizados los cálculos de la carga de explosivos por barreno, se procede a cargarlos, estos son conectados entre sí, y detonados provocando la voladura.

#### V.8.4. Extracción

Una vez provocada la voladura, el mineral fragmentado es cargado (generalmente con cargadores frontales o palas mecánicas) a los camiones, que lo transportan a la quebradora primaria y el tepetate hacia los terreros.

Si el volumen a extraer de tepetate es lo suficientemente grande y poco consolidado, es posible el uso de rippers.

Para seleccionar el equipo de rezagado, acarreo de mineral y tepetate, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) La vida de la mina
- b) La producción diaria esperada
- c) La relación de descapote
- d) El capital disponible
- e) Las distancias de acarreo
- f) La altura de los bancos

- g) El área de trabajo, y
- h) Las condiciones climáticas.

Es importante realizar el cálculo del número de camiones a usar.

Existen además otros equipos auxiliares, como son: tractores, motoconformadoras y pipas para el riego de agua principalmente, que realizan la construcción de caminos, su mantenimiento y ayudan en algunos casos a la explotación.

## VI. BENEFICIO

## CAPITULO VI. BENEFICIO

### VI.1. CONCENTRACION

VI.1.1. Trituración

VI.1.2. Molienda

VI.1.3. Flotación

### VI.2. TOSTACION

VI.2.1. Secado

VI.2.2. Calcinación

VI.2.3. Tostación Sulfatante y Oxidante

VI.2.4. Nodulización

### VI.3. FUSION

VI.3.1. Fusión en horno de reverbero

### VI.4. CONVERSION

### VI.5. REFINACION

VI.5.1. Pirometalúrgica

VI.5.2. Electrolítica

### VI.6. LIXIVIACION

VI.6.1. Lixiviación por soluciones

VI.6.2. Métodos de lixiviación

VI.6.3. Lixiviación bacteriológica

## VI. BENEFICIO

Para la obtención del cobre existen dos procesos: el primero llamado pirometalúrgico, que parte del mineral contenido en sulfuros de cobre y con una ley de 0.5 a 2% de cobre; por un proceso de concentración se obtiene un producto llamado concentrado, que contiene de 15 a 26% de cobre, el cual se pasa a una tostación en un horno de reverbero para controlar el contenido de azufre antes de pasar a la fusión. Al fundir el producto tostado se obtiene otro llamado mata con un 46% aproximado de contenido de cobre. La mata se coloca en un convertidor al que se le inyecta aire a través de toberas, lo que provoca la oxidación del sulfuro ferroso y el anhídrido sulfuroso generado escapa por la boca del convertidor; el óxido ferroso reacciona con la sílice de la carga o con el revestimiento del horno para formar una escoria que flota en la superficie; cuando todo el azufre asociado al fierro se ha oxidado, se inicia la formación de un cobre denominado blister con una pureza de 99% a 99.4% de cobre, con impurezas que son eliminadas durante la refinación.

El cobre blister pasa a un horno de reverbero donde se eliminan algunas impurezas como el azufre; se obtienen ánodos de cobre que pasan a la refinación electrolítica, colocados en cubas del mismo nombre (tinajas), intercaladas con cátodos iniciadores de cobre previamente obteni

dos en otras tinajas; contienen además una solución electrolítica. Finalmente se obtiene el cobre con una pureza de 99.95% o más, llamado cobre catódico, el que pasa al mercado en forma de lingotes.

El segundo método llamado lixiviación o hidrometalúrgico, se aplica preferentemente a minerales de cobre de baja ley, que generalmente por vía pirometalúrgica, no es rentable su extracción. Además, el cobre puede estar contenido en sulfuros, carbonatos, silicatos, óxidos o sulfatos, lo que representa una ventaja sobre el proceso pirometalúrgico que parte generalmente de minerales sulfurados. Es aplicable además a yacimientos minerales in-situ, terreros o montones, o bien, se extrae el mineral y se tritura.

La extracción se hace con solventes que pueden ser desde agua, ácido sulfúrico, e inclusive productos comerciales específicos para cada caso.

Existe un proceso denominado lixiviación bacteriológica, que aprovecha el metabolismo de las bacterias llamadas tiobacillus ferrooxidans, que reduce el consumo de solventes mediante la formación de iones ferrosos para formar iones férricos, los que actúan como solventes para los minerales, hasta hacer prácticamente nulo el consumo de solventes.

Finalmente la solución rica en cobre es generalmente cementada con chatarra de fierro, y pasa a un proceso de refinación.

En este capítulo se mencionan algunas características de dichos procesos.

## VI.1. CONCENTRACION

Los yacimientos de cobre son de concentraciones bajas y no se pueden fundir directamente, sino que el mineral debe ser concentrado previamente; si el mineral fuera de alta ley, se podría fundir directamente, pero este tipo de yacimientos cada día son más escasos. En un determinado depósito, el método de concentración dependerá de las condiciones específicas del mineral, consideraciones tecnológicas y posibilidades económicas. En general, los minerales de sulfuros se concentran, se funden y refinan; mientras que para minerales oxidados, es más conveniente someterlos a una lixiviación sin ser concentrados. El sistema de concentración por flotación es el usual en México, y es el más utilizado en todo el mundo.

Para aplicar el proceso de flotación, es necesario preparar el mineral; se tritura, se muele hasta convertirlo en polvo. Posteriormente se mezcla con agua y ciertos reactivos (tratados posteriormente), y se introduce en máquinas llamadas celdas de flotación; el principio de estas celdas es la agitación y aereación, lo que provoca burbujas. Debido a la acción de los reactivos, tienden a adherirse las partículas de mineral de cobre a las burbujas que son transportadas a la superficie de la celda y derramadas en un canal con el mineral de cobre,-

que finalmente es secado y enviado a la fundición. Dentro de la celda de flotación, el mineral sin valor económico tiende a quedar en el interior de ella, pero debido al flujo existente, es enviada al exterior de ésta, hacia la presa de jales, o en el caso del método de explotación de minas llamado corte y relleno hidráulico, el jal es introducido a los rebajes.

### VI.1.1. Trituración

El mineral extraído de la mina es almacenado en tolvas llamadas de gruesos; estas tolvas alimentan por banda transportadora a la quebradora primaria que generalmente se ubica en el exterior de la mina (puede estar en el interior de la mina) y es una quebradora de quijada, que tiene una placa metálica fija intercambiable de acero especial llamado lana y otra móvil accionada por un volante; la abertura de descarga es del orden de 3"; el mineral pasa a una criba vibratoria cuya abertura dependerá del tamaño al que se desea la trituración final. Estas cribas por lo regular tienen una abertura de 3/8" a 1/2", que es el tamaño de alimentación al molino. El mineral que no pasa por la criba vibratoria, pasa a una trituración secundaria, la cual tiene normalmente una quebradora de forma cónica con movimiento excéntrico, llamada quebradora de cono, con una abertura de descarga de 3/8" a 1/2"; el mineral - -

obtenido pasa nuevamente por la criba vibratoria; se establece así un circuito cerrado de clasificación que garantiza un tamaño uniforme de alimentación al molino.

Cuando el tamaño del mineral proveniente de la mina sea muy grande, se establecen tres etapas de trituración. Como ejemplo, en la Cía. Minera de Cananea, S.A., la quebradora primaria reduce el mineral a -8", la secundaria a -1 1/4" y la terciaria a -3/4"; en las tres etapas las quebradoras son del tipo cónico.

Normalmente, antes de la entrada a las quebradoras se colocan separadores magnéticos, para protegerlas de metales.

El producto triturado es almacenado en tolvas llamadas de finos. Las tolvas tienen como capacidad mínima el equivalente al consumo de 24 hrs. de molienda.

#### VI.1.2. Molienda

Es la etapa final de la fragmentación del mineral y da inicio en las tolvas de finos que alimentan a los molinos. Se utilizan generalmente molinos de bolas tipo Hardinge, que consisten de un tamber cilíndrico-cónico, montado sobre un eje horizontal que gira y es cargado algo menos de la mitad de su volumen con bolas de

fierro fundido o acero forjado (estas últimas tienen mayor duración). En su parte interior, los molinos tienen un recubrimiento reemplazable de acero especial para su protección, llamado laines.

El molino debe moverse a una velocidad tal, que impida a la fuerza centrífuga mantener adherida a su pared interna la carga (velocidad crítica); ya que en tal caso no se produciría la molienda, puesto que las bolas no caerían sobre el mineral y no se provocaría el choque entre las bolas, laines y el mineral, que es el principio de operación de la molienda. Para conocer la velocidad de trabajo del molino, se necesita conocer primero la velocidad crítica; al nivel del mar se establece con la siguiente expresión:

$$N = \frac{42,3}{D-d}$$

donde:

N = número de revoluciones por minuto

D = diámetro del molino (en metros)

d = diámetro de las bolas (en metros)

La velocidad de trabajo (Vt) corresponde entre el 70% y 80% de la velocidad crítica (Vc), por lo tanto:

$$Vt = 0.75 Vc$$

La carga de bolas en los molinos debe ser un factor constante donde ocupan un volumen proporcional a ellos; independientemente del diámetro de descarga del molino, en términos generales se considera como carga apropiada, un volumen correspondiente a un tercio del diámetro interior del molino.

De esta consideración se deduce la siguiente fórmula:

$$CB = 0.2044 V p.e.$$

donde:

CB = Carga de bolas (en Kg.)

V = Volumen del molino (en metros cúbicos)

p.e. = Peso específico de las bolas (7.85)

Los molinos pueden trabajar en seco, pero generalmente trabajan con agua; así el agua, el mineral y las bolas del molino se encuentran en el interior de éste (ocasionalmente algún reactivo), y al girar se provoca un efecto de cascada al llegar la carga a la parte superior del molino, y al caer y chocar entre sí se produce el fracturamiento.

La capacidad del molino depende de la relación de reducción, así como de la dureza del mineral, y no puede calcularse exactamente.

Una evaluación de la capacidad de un molino tipo Hardinge en toneladas por 24 hrs. es:

4.76 Diámetro máximo X longitud

$C_1$

donde:

$C_1$  es un valor que varía entre 6 y 3 para la mayoría de las operaciones normales.

En la práctica se observa que los molinos descargan con un 80% de sólidos, y con tamaños de 35 a 200 mallas (0.42 m.m. a 0.074 m.m.); la descarga pasa por una bomba a un ciclón que separa los gruesos de los finos. Previamente es determinado el tamaño de clasificación del ciclón, lo que depende del tamaño de liberación de la partícula de cobre y de otros elementos como oro y plata; los gruesos regresan al molino o pasan a otro molino de remolienda, de donde a su salida son clasificados nuevamente y no continúan sino hasta alcanzar el tamaño establecido.

### VI.1.3. Flotación

En el tratamiento de minerales, la flotación es un proceso por medio del cual son separadas las partículas de diferentes minerales, al flotar algunas de ellas so-

bre una superficie de agua.

En las técnicas de flotación con espumas, las partículas sólidas se mantienen constantemente agitadas -- con agua y en la parte superior se forma una capa de es puma espesa.

Debido a las distintas propiedades superficiales de los cuerpos sólidos uno de ellos adsorbe con más facilidad la fase acuosa, se moja perfectamente y se hunde en el líquido. El otro sólido, en cambio, adsorbe - de preferencia el aire, y queda recubierto total o parcialmente por la fase gaseosa; la densidad aparente de las partículas, de este sólido, adheridas a las burbujas de aire (que en su superficie adsorbe), resulta menor que la del agua, por lo que el conjunto flota y se sostiene en la superficie del líquido, donde se forma una espuma mineralizada que se hace rebosar continuamente por el borde superior de la celda de flotación.

En términos generales, no pueden recuperarse de una manera efectiva las partículas de mineral sulfuroso que sean mayores a la malla 48 (el número de la malla - indica el número de aberturas por pulgada lineal en una tela de alambre).

El mecanismo especial de la flotación involucra -

la anexión de las partículas minerales a las burbujas de aire, de modo tal que dichas partículas son llevadas a la superficie donde pueden ser removidas.

Este mecanismo abarca las siguientes etapas:

1. Moler el mineral a un tamaño suficientemente fino para separar los minerales valiosos uno de otro, así como los minerales adherentes de ganga.

2. Preparar las condiciones favorables para la adherencia de los minerales deseados a las burbujas de aire.

3. Crear una corriente ascendente de burbujas de aire en la pulpa del mineral.

4. Formación de una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa.

5. Remoción de la espuma cargada de mineral.

La creación de una corriente ascendente de burbujas de aire se logra con una máquina de flotación, que produce burbujas, mediante la agitación mecánica del mineral o por la introducción directa bajo presión, de aire o una combinación de ambas. Estas operaciones pue

den considerarse mecánicas adjuntas al proceso de flota  
ción.

Las máquinas de flotación más comunes son las - -  
Sub-A, que consisten esencialmente de cierto número de -  
celdas de sección cuadrada hechas de acero, con un im-  
pulsor que gira en el fondo de cada celda, situado so-  
bre una entrada por la que se hace pasar la pulpa y - -  
sobre un tubo por el que se introduce aire. El impul-  
sor lleva cuatro hojas colocadas a 45 grados, y va ado-  
sado o fijo al extremo inferior de una flecha vertical; gira a una velocidad periférica de 1450 a 1500 pies por minuto. Las flechas usualmente se hacen girar en pares por medio de motores verticales con bandas "V". Está -  
provisto de un orificio de entrada circular colocado --  
abajo para la admisión de pulpa y aire. Placas desvia-  
doras están cada celda arriba del impulsor para reducir -  
la tendencia a formar oleaje en la superficie de la pul-  
pa. La pulpa penetra por un paso de transferencia colo-  
cado debajo del fondo de la primera celda y es jalada -  
al impulsor por la succión debida a su rotación, donde -  
es aventada a la zona de agitación. En seguida se le-  
vanta; sigue por los lados de la celda y es llevada - -  
hacia abajo en el centro, de nuevo hacia la zona de agi-  
tación. Una corriente de aire es insuflada a un sopla-  
dor que da de 1.5 a 2 libras por pulgada cuadrada, el -  
volumen de aire se regula por medio de una válvula que -

lleva la tubería de entrada. La espuma que contiene mineral se reúne en la superficie, para después caer a la canal que recibe el concentrado por medio de paletas giratorias. La pulpa pasa a través de las celdas colocadas en línea, hasta que todo el mineral valioso ha sido flotado por entero; las colas con escaso contenido de cobre son descargadas en la última celda.

Este tipo de máquina se fabrica en diferentes tamaños; el tamaño queda definido por el diámetro del impulsor. La anchura de la celda corresponde al doble -- del diámetro del impulsor y la altura es de un 20% a un 25% mayor que la anchura.

Existen pequeñas variaciones de las máquinas de flotación, lo que depende del fabricante, y además de otros tipos existentes, pero el principio de operación es el mismo.

Para obtener una adherencia de las partículas minerales desecadas a las burbujas de aire, y de ahí formar una espuma cargada de mineral en la superficie de la celda, debe formarse una película de superficie -- "Hidrofóbica" sobre las partículas que deben flotar y una película "Hidrofílica" o humectable en todas las -- demás. Esto se logra por medio de colectores y modificadores, y la selección de la combinación apropiada --

para cada tipo de mineral.

Los reactivos usados en la flotación pueden ser clasificados bajo los siguientes grupos, de acuerdo a sus funciones:

- 1.- AGENTES ESPUMANTES
- 2.- AGENTES COLECTORES
- 3.- AGENTES MODIFICADORES.

AGENTES ESPUMANTES: Son reactivos químicos para producir y estabilizar una espuma de características apropiadas para la flotación.

Todos los espumantes actualmente en uso son compuestos orgánicos heteropolares. Hace pocos años se utilizaban: El alcohol amílico, cresol y terpineol entre otros; generalmente todos los anteriores son no solubles en agua, hasta la introducción del espumante completamente soluble en agua llamado Dowfroth 250. Este producto no es solamente un espumante extremadamente selectivo sino que también es efectivo a la mitad o cuarta parte de la concentración requerida de aceite de pino u otros agentes espumantes.

AGENTES COLECTORES: Son compuestos químicos orgánicos que causan la colección de los minerales deseados

en la espuma. Sus propiedades de no humectable o repelente al agua son aprovechadas para que las partículas de mineral se adhieran a la burbuja y floten.

Los colectores comerciales usados en minerales -- sulfurosos y con cierta cantidad en minerales oxidados incluyen: xantatos, ditiofosfatos y tiocarbanilida.

Los xantatos son quizá los más importantes del -- grupo de los colectores, químicamente se llaman ditio-- carbonatos. Existen cuatro tipos de xantatos que son: Etílico, Propílico, Butílico y Amílico.

Los ditiofosfatos se usan mucho bajo el nombre de Aerofloats.

La tiocarbanilida es el nombre comercial de la Difenitiourea. Ha sido usada ampliamente, pero debido a su insolubilidad en agua, su costo y su poca aplicabilidad, ha sido sustituida por xantatos y aerofloats. Su uso más importante es en la flotación de plomo, ya que tiene poca tendencia para flotar esfalerita y pirita -- como los xantatos.

AGENTES MODIFICADORES: La lista de agentes modificadores o acondicionadores de superficie empleados en la flotación es larga y variada. Generalmente incluye

todos los reactivos cuya función principal no es coleccionar ni espumar.

Los modificadores pueden actuar como depresores, activadores, reguladores de pH, dispersantes, etc. Un depresor es cualquier reactivo que impide la adsorción de un colector por una partícula de mineral impidiendo, por tanto, su flotación. Por otra parte, los activadores mejoran la adsorción del colector. Frecuentemente un solo compuesto puede llevar a cabo varias funciones. Por ejemplo el carbonato de sodio puede ser activador para la pirita y un depresor para la calcita, así como un dispersante de pulpa y un modificador de pH.

Casi todas las plantas de flotación que tratan minerales sulfurados, operan con un pH alcalino con objeto de lograr óptimos resultados metalúrgicos así como evitar la corrosión del equipo de metal. Los reguladores de alcalinidad comunmente empleados son la cal y el carbonato de sodio.

Antes de entrar la pulpa a las celdas de flotación y después del molino, pasa a un tanque acondicionador -- donde es el principal lugar de adición de los reactivos; consiste de un tanque de acero, de sección circular, con un impulsor de propela colocado cerca del fondo. El impulsor está montado en una flecha vertical movida por un

mecanismo instalado en la parte superior y se hace girar lo suficientemente rápido para mantener los sólidos en suspensión y desde luego mezclarlos por completo.

El concentrado que proviene de las celdas limpiadas contiene entre 80% y 85% de agua, por lo que se debe someter a una decantación.

La mayor parte del agua se remueve en un espesador del que se descarga el concentrado en la forma de una pulpa que contiene entre 65% y 70% de sólidos. La pulpa espesa es enviada a un filtro de vacío del que los sólidos son descargados en forma de torta, conteniendo por lo general de 10% a 12% de agua.

Las colas también se decantan, no sólo para economizar el agua sino para recuperar los reactivos disueltos y poder usarlos nuevamente.

## VI.2. TOSTACION

La tostación se define como el calentamiento de un compuesto mineral, que puede reaccionar con alguno de los siguientes elementos: oxígeno, vapor de agua, carbono, -- azufre o cloro, que se efectúa hasta alcanzar altas temperaturas pero sin llegar a la fusión, con la finalidad de realizar un intercambio químico, al eliminarse algunos -- componentes por volatilización. El objeto de la tosta--- ción es regular la cantidad de azufre en el concentrado de cobre. Para esto se observarán las siguientes opera--- ciones: secado, calcinación, tostación sulfatante, tosta--- ción oxidante y nodulización.

### VI.2.1. Secado

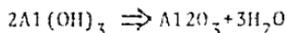
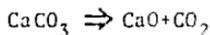
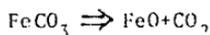
Es la fusión de concentrados; hoy en día, el secado no suele efectuarse como operación independiente, sólo en los casos que el exceso de humedad pueda interferir o retrasar los tratamientos posteriores. Los concentrados con contenidos menores de un 5% de humedad son tratados directamente en los hornos de tostación.

El secado puede hacerse extendiendo el concentrado en un suelo de ladrillo o de plancha metálica; se le somete a calentamiento a fuego directo o con aire caliente y se remueve; o bien, por medio de secadores, como hornos -

rotatorios que son capaces de reducir la humedad hasta me  
nos del 1%.

### VI.2.2. Calcificación

La calcificación se limita a eliminar el agua combinada  
químicamente en los concentrados de óxido y carbonato,  
así como también en las arcillas, y a los de combustión -  
de piedra caliza, dolomita, magnesita y bauxita, como seindica  
en las reacciones siguientes:



La calcificación difiere únicamente del secado en que  
las temperaturas empleadas son más altas. La mayor parte  
de las sustancias hidratadas encontradas en la metalurgia,  
ceden el agua por debajo de los 300 grados centígrados,  
pero los carbonatos exigen el empleo de una temperatura  
de 500 a 800 grados centígrados, y los sulfatos y --  
sustancias arcillosas, temperaturas entre 600 y 1000 grados  
centígrados.

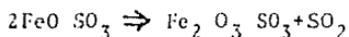
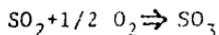
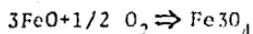
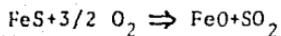
### VI.2.3. Tostación Oxidante y Sulfatante

Con objeto de eliminar el azufre y oxidar el hierro se suele llevar a cabo una tostación oxidante, aunque también afecta al arsénico, antimonio y telurio, contenidos prácticamente en todos los concentrados sulfurados.

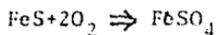
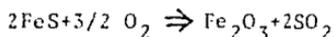
Algunos concentrados con contenidos mayores de un 24% de azufre en forma de sulfuros de hierro y cobre suelen tostarse "autógenamente", es decir, se emplea únicamente el calor de la oxidación por los sulfuros del concentrado, lo que difícilmente ocurre con sulfuros de zinc; en este caso, y en concentrados con menos de 24% de azufre se aporta calor externo en forma de combustible, se mantiene una temperatura de 700 a 750 grados centígrados sin exceder la temperatura de sinterización.

Según se pretenda la formación de óxidos o sulfatos, se designa como tostación oxidante o sulfatante respectivamente.

Las reacciones que suceden dentro de un horno de tostación son difíciles de decir, pues las proporciones de los minerales varían con el tiempo. Las reacciones más importantes son las siguientes:

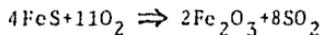


Si la temperatura del horno esta arriba de los 530\_ grados centígrados las reacciones son:

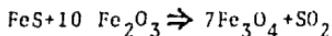
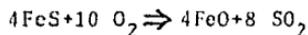


El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que se forma es perjudicial, en el horno de reverbero se reduce con dificultad al reaccionar con el FeS.

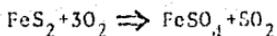
Abajo de los 200 grados centígrados las reacciones\_ ocurren de la siguiente forma:



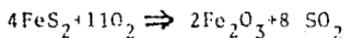
En escasez de aire:



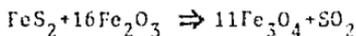
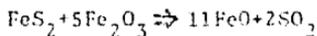
Las reacciones que ocurren entre los 250 y los 290 grados centígrados son:



Las reacciones que ocurren entre los 290 y 500 grados centígrados son:



Arriba de los 600 grados centígrados son:



Durante la tostación existe una tendencia a la formación de sulfatos y no a la de óxidos, por lo que para lograr una sulfatación se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- a) Ajustar adecuadamente la carga de concentrado, -- para no tener exceso ni deficiencia de azufre.
- b) Evitar que la carga se mueva mientras existan sulfuros sin oxidar.
- c) Evitar que los productos de la combustión se mezclen con los concentrados.
- d) Mantener el horno a temperaturas relativamente -- bajas.

En la tostación oxidante estos factores no son importantes, ya que la finalidad es la de eliminar el azufre y convertir el cobre en un óxido, pero en la lixiviación lo que se desea es producir sulfato de cobre.

Los gases generados por la combustión en el horno contienen polvos con alto contenido de cobre, el que es recuperado en un precipitador electrostático. Los polvos regresan al horno y se tiene una eficiencia de recuperación del 95%.

#### VI.2.4. Nodulización

Este proceso se lleva a cabo en hornos rotatorios, en los que las partículas se calientan hasta una temperatura de fusión baja para aglomerarse en nódulos de tamaño mayor. En este proceso se tienen cambios físicos más que químicos; es útil para concentrados que, de otra forma, darían lugar a una pérdida considerable del mineral en forma de polvos, al ser introducidos al horno de fusión.

La etapa de tostación en algunos procesos pirometalúrgicos no se lleva a cabo, ya que el concentrado pasa directamente al horno de fusión.

### VI.3. FUSION

Desde el punto de vista metalúrgico, una mena sulfurada de cobre consta de sulfuros de hierro y cobre, ciertas impurezas metálicas y ganga. La separación del cobre del hierro y de los metales básicos de la ganga se fundamenta en los siguientes hechos:

1.- Debido a las relaciones de energía libre existentes entre el azufre, el cobre y el hierro; el azufre se combina preferentemente con el cobre para formar sulfuro cuproso.

2.- El oxígeno se combina preferentemente con el hierro para formar óxido ferroso.

3.- Los sulfuros cuprosos y ferrosos se disuelven entre sí para formar una mata fusible.

4.- Esta mata tiene un peso específico superior al de la escoria y es insoluble en ésta.

5.- Además, esta mata tiene la facultad de disolver los metales preciosos que contiene la mena, así como también algunas de las impurezas, tales como arsénico, antimonio o bismuto.

6.- Cuando se calientan por encima de 450 grados centígrados, el sulfuro cuproso y el óxido reaccionan entre sí para formar cobre metálico y anhídrido sulfuroso.

Para llevar a cabo el proceso de fusión, se puede efectuar en hornos de cuba, de reverbero y eléctricos; siendo el más usual el de reverbero, debido, que el primero ha caído en desuso y el eléctrico no es muy usual.

### VI.3.1. Fusión en horno de reverbero

En la carga del horno de reverbero sólo tiene lugar un número relativamente reducido de reacciones exotérmicas, pues su función principal es la de fundir la misma, formar la mata y la escoria y permitir que estas se segregen en dos capas con objeto de que puedan separarse para su posterior tratamiento o desecho. Las reacciones químicas que transcurren en el seno de la carga son de los tipos siguientes: en el primero metatesis, se convierte todo el cobre en forma sulfurada y la mayor parte del hierro en óxido, para unirse con el fundente y formar una escoria; el segundo tipo implica las reacciones que tienen lugar entre los componentes de la carga y la atmósfera, en las que se forma y libera anhídrido sulfuroso. La eliminación de azufre oscilará entre una cantidad muy pequeña y el 30% del contenido total de este elemento en la carga, según la naturaleza de ésta y la

cantidad de oxígeno libre que se encuentra en los gases\_ de la flama,

Las funciones del horno de reverbero son las siguientes:

- 1.- Fundir el mineral y el fundente lo más rápidamente posible con una pérdida mínima de calor.
- 2.- Permitir la formación de mata y escoria.
- 3.- Mantener una temperatura lo suficientemente elevada para que la escoria y la mata sean perfectamente fluidas y pueda procederse fácilmente a su separación.

La carga esta constituida casi siempre de concentrados tostados o crudos obtenidos del proceso de flotación. Estos, o los productos calcinados que de ellos se obtienen, contienen una alta proporción de finos; los productos calcinados fluyen con gran facilidad. Si se cargan en estado crudo, los concentrados contienen una considerable cantidad de humedad y suelen ser difíciles de manejar por efecto de la presencia de los productos químicos empleados en el proceso de flotación. Los factores más importantes que se deben tener en cuenta en la carga son:

- 1.- Los contenidos de cobre y de azufre deben ajustarse a la mezcla o a la tostación con objeto de producir una mata de la riqueza deseada.

- 2.- El tamaño de las partículas de la carga ejerce rá influencia sobre la velocidad de fusión, la pérdida en escoria y la cantidad de polvos volátiles.
- 3.- La naturaleza de la ganga, que debe escoriificarse con el fundante apropiado, tiene que considerarse desde el punto de vista de las condiciones económicas locales. En cualquier caso se intenta reducir la cantidad y costo del fundante, mezclando los minerales o con un fundante adecuado.
- 4.- Las características físicas y químicas del material que contiene el cobre (es decir, si se ha sometido a la tostación, esta concentrado por mena fina, por concentrados secos o húmedos, - por polvos o por mineral sometido a un segundo tratamiento, o por cobre cementado) deben tenerse siempre en cuenta.

Las consideraciones ideales para obtener buenos resultados metalúrgicos exigen una escoria que contenga 37 a 38% de  $\text{SiO}_2$ , 39 a 40% de  $\text{FeO}$ , 4 a 6% de  $\text{CaO}$  y 4 a 6% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cada mineral constituye un problema aparte, - pero, por regla general para lograr buenos índices de recuperación del metal es necesario establecer una relación adecuada del cobre y metales preciosos. La relación escoria-mata es de 1.8:1 como término medio. En conjunto, las escorias de los hornos de reverbero son -- más ácidas.

La mata fundida es colocada en un convertidor al que se inyecta aire a través de toberas, lo que provoca la oxidación del sulfuro ferroso. El anhídrido sulfuroso generado escapa por la boca del convertidor, y el óxido ferroso reacciona con la sílice del fundente e con el revestimiento del convertidor si este es del tipo ácido y forma una escoria que flota en la superficie. El calor de formación de la escoria y de la oxidación del azufre y el hierro, mantienen la carga en estado líquido.

Al final del período de escorificación, cuando todo el azufre asociado al fierro se ha oxidado, se inicia el período de formación del cobre, durante el cual el sulfuro cuproso se oxida y formando óxido cuproso; éste a su vez, se reduce con el sulfuro cuproso todavía existente y queda el cobre libre que forma anhídrido sulfuroso.

Estas reacciones continúan hasta haber eliminado parcialmente todo el azufre, lo que se observa en la flama que inicialmente es rojiza, se transforma en verde en la etapa de escorificación y finalmente azul en la de soplado.

El arsénico y antimonio con contenidos mayores de 0.8% de la mata, son volatilizados en forma de óxidos, pero cuando estos contenidos son menores permanecen en el cobre blister, al igual que el oro y la plata.

El cobre así obtenido, es llamado blister, lo que en español significa cobre ampollado, debido a las burbujas de bióxido de azufre que se forman sobre su superficie cuando éste se solidifica; logrando obtener un cobre con una pureza del 99 al 99.4%.

Un análisis de un blister típico da la siguiente composición: Cu (99%), O<sub>2</sub> (.25%), S (.10%), As (.05%), Sb (.05%), Se (.04%), Te (.005%), Ni (.25%), Pb (.08%), Zn (.002%), Fe (.03%), Bi (.0002%), Ag (900 a 925 gr/ton), Au (15 a 16 gr/ton).

## VI.5. REFINACION

La refinación se lleva a cabo en dos etapas, la primera pirometalúrgica y la segunda electrolítica. Los bloques fundidos de cobre blister de 350 kg de peso aproximado, pasan inicialmente a una refinación pirometalúrgica - en un horno de reverbero, que en ciclos de 24 hrs. se efectúan: la carga del horno, fusión del cobre, oxidación de las impurezas como el azufre, reducción del óxido cuproso formado durante la oxidación, y la colada o vaciado del cobre fundido en forma de ánodos.

Los ánodos pasan a la refinación electrolítica y se colocan en cubas, e intercalados con láminas delgadas de cobre puro, llamados cátodos iniciadores; las cubas son llenadas con solución electrolítica y se hace pasar un flujo eléctrico entre el cátodo y el ánodo, a través de la solución, la que transporta los iones de cobre del ánodo al cátodo. Las impurezas del cobre anódico son: hierro, arsénico, níquel, zinc, telurio, selenio, oro, plata, plomo y antimonio; los cuatro primeros elementos se solubilizan en la solución electrolítica y las restantes se depositan en el fondo de la cuba en forma de lodos. Esta etapa tarda 15 días y como producto final se obtiene un cobre catódico con un 99,9% de cobre como mínimo, el cual se vende directamente al mercado o en forma de lingotes.

### VI.5.1. Pirometalúrgica

La refinación parte de los bloques de cobre blister los que pasan a hornos de reverbero con capacidad de 100\_ a 250 ton.

La refinación pirometalúrgica se efectúa en ciclos\_ de 24 hrs.; consistente en las siguientes etapas:

- 1.- Carga del horno (2 hrs)
- 2.- Calentamiento y fusión del cobre (10 a 12 hrs.)
- 3.- Oxidación de impurezas como azufre (2 a 3 hrs.)
- 4.- Reducción del óxido cuproso formado durante la\_ oxidación (2 a 3 hrs.).
- 5.- Colada o vaciado del cobre fundido en forma de\_ ánodos.

Es recomendable usar combustible con bajo contenido de azufre.

De estas etapas la más importante es la de oxida---ción, que consiste en inyectar aire a presión en el cobre fundido, que tiende a oxidar principalmente el azufre remanente del cobre blister a cantidades mínimas. Durante\_ la oxidación, el cobre también es oxidado, formando óxido cuproso y se considera en términos económicos que ha con---cluido la oxidación cuando existe un 6% de óxido cuproso.

De la oxidación continúa la etapa de reducción conocida en términos metalúrgicos como "madereo"; consiste en introducir en el cobre fundido dentro del horno troncos de madera verde resinosa, los que generan gases reductores, que se combinan con el óxido cuproso y lo transforman a cobre metálico. Esta reducción concluye cuando el porcentaje de óxido cuproso se reduce del 6% al 2.5% (un porcentaje inferior a éste no resulta costeable para continuar con la reducción).

Al finalizar la reducción, el cobre es vaciado en moldes con forma de ánodo, los que pasan a la refinación electrolítica. Los ánodos tienen un peso aproximada de 350 kg, y de un análisis típico se observan los siguientes contenidos: Cu (99.50%), O<sub>2</sub> (.15%), S (.003%), - - As (.04%), Sb (.045%), Se (.04%), Bi (.0002%), Te (.05%), Ni (.25%), Pb (.045%), Zn (se elimina casi completamente), Fe (.003%), Au y Ag permanecen constantes del análisis original del cobre blister.

Los moldes para los ánodos son colocados en número de 12 ó más en las ruedas de walker. Una rueda walker con 12 moldes tarda de 5 a 6 minutos en ser llenada.

### VI.5.2. Electrolítica

Existen dos sistemas principales para la refinación electrolítica: el sistema múltiple y el sistema en serie.

En el sistema múltiple, los ánodos y los cátodos se conectan en paralelo, mientras que las celdas electrolíticas se conectan en serie, como se observa en la siguiente figura.



Fig. VI.1. Conexión múltiple sencilla.

En el sistema en serie, ocurre lo contrario, las celdas electrolíticas se conectan en paralelo entre sí, y los ánodos funcionan como electrodos bipolares; se introduce el flujo eléctrico únicamente por los extremos y quedan sin conexión los electrodos intermedios, como se observa en la siguiente figura.

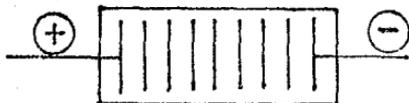


Fig. VI.2. Sistema en serie.

En este último tipo de refinación presenta algunas desventajas, por lo que en la actualidad el sistema múltiple debido a su mayor flexibilidad lo ha desplazado casi por completo. A continuación se mencionan algunas características del sistema múltiple:

La solución electrolítica consiste de una solución de sulfato de cobre con concentraciones de ion cúprico de 45 a 50 g/l, y de ácido sulfúrico de 180 a 200 g/l, que opera de 50 a 65 grados centígrados de temperatura. Debe existir una circulación del electrolito de 10 a 15 l/min. por celda, para evitar la polarización por formación de pilas de concentración, así como para garantizar la existencia de iones cúpricos cerca del cátodo.

Las refinерías más importantes del mundo indican una densidad de corriente catódica que varía de 1.6 a 3.6 A/dm<sup>2</sup>, y operan normalmente entre 1.6 y 1.9 A/dm<sup>2</sup>.

El voltaje de las pilas varía en función de la densidad de corriente, la construcción de los tanques, del número de ánodos y cátodos, los sistemas de conexiones y

sus estados de conservación. Para que exista un voltaje mínimo de operación, los ánodos se colocan en las cubas lo más cerca posible (10 cm. de centro a centro). Generalmente la tensión es baja, del orden de 100 a 190 volts.

Los cátodos iniciadores son láminas delgadas de cobre puro, que se forman en cubas especiales con cátodos de titanio, y durante 24 horas producen los cátodos iniciadores (uno por cada lado), para evitar que se adhieran al titanio se le da un baño de aceite y gasolina. De estas mismas láminas se utiliza un 10% para ser cortadas en tiras en forma de orejas, los cátodos iniciadores dentro de las celdas de producción, donde incrementarán su peso de 4 kg iniciales a 100 kg en 15 días.

Existen dos tipos de impurezas durante la electrólisis, las solubles (fierro, arsénico, níquel y zinc) y las insolubles (selenio, telurio, oro, plata, plomo y antimonio).

Las impurezas insolubles son depositadas en el fondo de la celda durante el proceso, de estos lados llamados anódicos se obtienen oro, plata y selenio.

Las impurezas solubles son disueltas por la solución electrolítica, la cual no deberá contener más de 20 a 22 g/l de impurezas. Se purga diariamente una parte -

del electrolito para evitar la concentración alta de impurezas; se repone el electrolito extraído con una solución de ácido sulfúrico en agua de la misma concentración que el electrolito.

El ión cúprico se mantiene constante, se le pasa por celdas electrolíticas especiales llamadas "cubas des cuprizadoras", con diferencia de las de producción ya que contienen ánodos insolubles de plomo.

Al finalizar la refinación electrolítica, se obtienen cátodos de cobre con una pureza del 99.94% al 99.97% de Cu, el que ya es comercial, o se funde en forma de lingotes para su comercialización.

## VI.6. LIXIVIACION

Se conoce con el nombre de tratamiento hidrometalúrgico o lixiviación, a todo proceso por medio del cual, el cobre que se encuentra en los minerales se disuelve en un medio acuoso y después se separa por precipitación química o electrolítica. Frecuentemente estos procesos se conocen con el nombre de "procesos húmedos" para distinguirlos de los "procesos secos" o de fusión.

El proceso hidrometalúrgico se aplica a minerales de cobre oxidados, sulfuros, carbonatos, e inclusive cobre nativo; es recomendable que, para su aplicación, estos minerales tengan bajo contenido de cobre, ya que de lo contrario el tiempo de reacción es mayor y son necesarias mayores cantidades de solvente.

Las instalaciones para extraer el cobre por hidrometalurgia son en promedio 40% más económicas que las instalaciones necesarias para extraer la misma cantidad de metal por el método convencional de fusión.

Los solventes que tienen más aplicación comercial son los siguientes:

- 1.- Solución diluida de ácido sulfúrico con sulfato ferroso y férrico.

- 2.- Solución diluida de ácido sulfúrico
- 3.- Solución de carbonato de amonio amoniacal
- 4.- Soluciones diluidas de cianuros.

El solvente a utilizar depende del tipo de mineral y las condiciones específicas para cada caso.

Los factores que se toman en cuenta para hacer una lixiviación satisfactoria son los siguientes:

- a).- Que la ganga no consuma al solvente usado y - si lo consume se debe usar un solvente que no ataque a la ganga.
- b).- Tiene que haber buen contacto entre el solvente y el mineral.
- c).- Que haya poco cobre en las cavidades intersticiales del mineral.
- d).- Las partículas del mineral se deben humedecer y secar alternativamente para aumentar el contacto con el oxígeno atmosférico.
- e).- La concentración de cobre en la solución depende de la concentración del ácido, la cual tiene que ser la máxima posible antes de que se disuelva el hierro.

Actualmente se desarrollan nuevas técnicas de lixiviación tendientes a lograr procesos más económicos y -- que permitan beneficiar a los yacimientos minerales de -- baja ley. Dentro de esas técnicas se encuentra la lixi-

lixiviación bacteriológica, la cual, además de las ventajas - que presentan los procesos hidrometalúrgicos reduce el consumo de solventes, mediante la formación de ácido sulfúrico y sulfato férrico producido por el metabolismo bacterial hasta hacer prácticamente nulo el consumo de solventes.

#### VI.6.1. Lixiviación por Soluciones

Cuando el mineral no responde debidamente a los tratamientos por concentración gravimétrica, flotación u otro procedimiento sencillo, se considera adecuado tratarlo por lixiviación.

El metal deseado puede encontrarse en estado libre, o bien, en forma de sulfuro, carbonato, silicato, óxido o sulfato.

Los solventes que se utilizan en la lixiviación incluyen tanto soluciones ácidas como alcalinas, así como también algunas sales, pero el ácido sulfúrico es el que se usa universalmente ya que es el más barato. Esto se debe, en parte, a su eficiencia como solvente y en parte, a que es fácil de conseguir, de bajo costo y las pérdidas durante el proceso son bajas, aunque de manejo peligroso.

El ácido clorhídrico se utiliza en algunas plantas, tiene más problemas de manejo que el sulfúrico y las pérdidas son mayores.

El anhídrido sulfuroso y el amoníaco, además de ser muy volátiles, son también difíciles de manejar, por lo que se usan poco. Sin embargo, se estudian procesos de lixiviación con amoníaco para tratamiento de minerales con sulfuro de cobre.

Los reactivos accesorios en la lixiviación son aquellos que, como el sulfato férrico y ferroso, activan las reacciones de disolución, sin ser el solvente principal. El sulfato férrico ayuda a disolver algunos sulfuros de cobre, y el sulfuro ferroso actúa como agente des polarizante en la electrolisis del cobre.

Estos ácidos diluïdos son utilizados para minerales oxidados, siempre y cuando no contengan calcita o dolomita como ganga. El ácido sulfúrico es el más usado, en un rango de concentración del 2 al 10% y además de ser el más económico.

El sulfato férrico en solución con ácido sulfúrico, se utiliza para sulfuros y óxidos de cobre a excepción de minerales con carbonatos como ganga.

Los sulfuros se oxidan con el sulfato férrico:



El sulfato ferroso reacciona con el oxígeno del --  
aire en presencia de ácido sulfúrico para regenerar el -  
sulfato férrico:



Las soluciones alcalinas amoniacaes con carbonato de amonio, se utilizan para minerales oxidados con ganga soluble en ácidos. El cobre se solubiliza formando un complejo  $(\text{Cu}_2 (\text{NH}_3) \text{ CO}_3)$  a partir del cual, por calentamiento, se descompone en  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ ; cuando el cobre permanece en forma de óxido o en forma elemental en polvo - al reducirse con gases.

Las variables de la solución lixivianante son la temperatura y la concentración; si se aumenta cualquiera de las dos, aumenta la velocidad de reacción y de disolución, la solución ataca a la ganga y al equipo. De esto se desprende que se debe trabajar con soluciones diluidas, aunque el proceso sea largo y el factor limitante - real es el tiempo. Si se aumenta la cantidad de tiempo\_ de reacción, se recupera mayor cantidad de cobre, pero - aumenta la cantidad de solventes.

## VI.6.2. Métodos de Lixiviación

Los principales métodos de lixiviación son los siguientes:

- 1.- Lixiviación in situ.
- 2.- Lixiviación por lotes.
- 3.- Lixiviación por percolación.
- 4.- Lixiviación por agitación.

Lixiviación in situ: Se aplica a yacimientos con un grado mínimo aprovechable y que no justifica otro sistema; consiste en aplicar las soluciones lixiviantes a los minerales en su lugar de origen. Debe considerarse, además, la existencia de fracturas en el yacimiento para que por estas fluya la solución ácida, en caso contrario se debe aumentar la superficie de contacto, lo que provoca el fracturamiento por medio de cargas de explosivos.

Lixiviación por lotes: Este proceso, que es similar al anterior, consiste en extraer el mineral y colocarlo en tal forma que tenga buen contacto con el aire para que se oxiden los sulfuros a sulfatos y se le agregan las soluciones lixiviantes; este proceso es largo, aunque se ha acelerado por el hecho de que las reacciones son exotérmicas. Se riegan más de una vez y se les deja después un tiempo largo en contacto con el aire

antes de volverse a mojar. El manejar grandes tonelajes hace que el costo sea bajo.

Lixiviación por percolación: Este es el sistema -- más usado, es un trabajo a contracorriente con la particularidad que el mineral tiene mayor contenido de cobre que los métodos anteriores.

El mineral se introduce en seis u ocho cubas o tanques dispuestos de tal manera que se hace pasar la solución de un tanque al otro. La solución una vez que ha pasado por todos los tanques, es enviada a la recuperación; en cada recorrido de la solución, se saca el mineral de un tanque y se introduce mineral nuevo. La solución -- lixiviante nueva, se vierte al tanque que contenga el mineral de menor concentración, es decir, que este en el último paso. Esta misma solución se introduce después -- en el tanque que tenga el mineral en su penúltimo paso y así se continúa pasando la solución a través de los tanques, hasta llegar al que contiene el mineral nuevo y -- que esta en su primer paso, y por lo tanto más rico en cobre. Con este sistema la solución más concentrada se pone en contacto con el mineral más rico y la solución -- menos concentrada se pone en contacto con el mineral con menor contenido de cobre.

El tiempo de contacto entre la solución y el mine-

ral es entre cinco y diez días, dependiendo de la concentración usada de ácido.

**Lixiviación por agitación:** En este proceso se mantienen en suspensión las partículas finamente divididas, por medio de agitación neumática o mecánica. En general, este método se aplica para minerales de alta ley, o bien para concentrados, en los que, por la escasez de tonelaje de mineral o por la necesidad de rapidez en el tratamiento no hacen posible el uso de la percolación cuyo desarrollo es siempre lento. La agitación también actúa sobre minerales muy finos, o bien, está el cobre tan diseminado que queda fuera del alcance del método de la percolación. El tiempo de contacto es generalmente de horas, en lugar de días que se necesitan en la percolación.

### VI.6.3. Lixiviación Bacteriológica

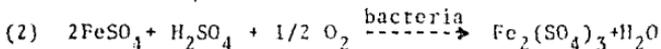
La lixiviación de sulfuros de cobre por bacterias se da por el aire de la atmósfera y un tipo de bacterias llamada *thiobacillus ferrooxidans*. Aunque el mecanismo no se conoce completamente, se supone que ocurre de acuerdo a las siguientes reacciones:

Los iones ferrosos entran en la solución por la acción química del ácido sulfúrico y del oxígeno sobre -

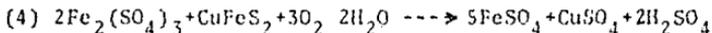
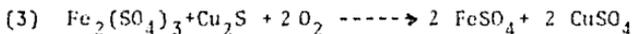
los minerales de sulfuro de hierro.



La bacteria thiobacillus ferrooxidans ataca químicamente a los iones ferrosos para formar iones férricos.



Los iones férricos actúan como solventes para minerales sulfurados.



El  $\text{FeSO}_4$  de la tercera reacción puede oxidarse a  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  sin presencia de bacterias, pero sus enzimas catalizan la reacción y aceleran la velocidad de reacción.

Las pruebas muestran que los minerales de cobre no son atacados directamente por la bacteria, como parece ser el caso para el azufre y sulfuro de hierro.

El agua de las minas de sulfuros contiene esta bacteria. Esta agua se utiliza con el ácido sulfúrico diluido para formar el solvente y promueve los cultivos --

iniciales de la bacteria.

Para obtener una óptima acción de las bacterias en la lixiviación debe realizarse bajo las condiciones que permitan una reproducción de la bacteria:

pH entre 1.5 y 3.5,

- Temperatura entre 25 y 40 grados centígrados,
- Suministro de oxígeno (por aereación de las soluciones o por desagüe periódicamente el apilamiento del mineral), y
- Evitar la exposición de las soluciones a la luz solar.

Además debe existir un buen contacto entre la solución, las bacterias y las partículas sólidas para una rápida lixiviación.

La naturaleza cíclica de las reacciones 2 y 3 permiten la formación de ácido sulfúrico y de los iones de hierro.

Parte del ácido sulfúrico se pierde al reaccionar con la ganga, lo cual es útil para el control del pH; sin embargo, las soluciones tienden a saturarse con sulfato férrico, el cual tiende a precipitarse como sulfato férrico básico, a veces, éste precipitado puede alterar

el flujo del solvente a través del mineral. Este problema se resuelve en parte, haciendo pasar ocasionalmente una solución reductora ( $\text{NaHSO}_3$ ) a través del apilamiento de minerales.

#### VI.6.4. Recuperación del cobre de las soluciones

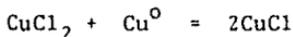
Para recuperar el cobre contenido en la solución existen varios métodos de precipitación química y métodos de precipitación electrolítica.

##### Precipitación química:

1.- Precipitar el cobre disuelto con chatarra de hierro (cementación) según la reacción:

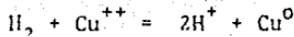


2.- Como cloruro cuproso, se usa, cobre metálico según la reacción:



3.- Precipitación a partir de soluciones amoniaca-les, descomponiendo y secando el solvente,

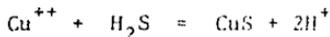
4.- Con hidrógeno elemental según la reacción:



Además de estos métodos, es posible utilizar los siguientes:

5.- Precipitación con  $\text{SO}_2$  a partir de soluciones de sulfatos.

6.- Precipitación usando ácido sulfhídrico, según:



7.- Precipitación con carbonato cálcico.

8.- Intercambio iónico.

CEMENTACION: El cobre se puede extraer de la solución usando cualquier metal más electropositivo que él. El metal que resulta más económico para esta operación es la chatarra de hierro o el hierro esponja, éste último es menos utilizado.

El cobre obtenido por este proceso de cementación tiene como impurezas, hierro y oxígeno, por lo que se debe refinar, pero se obtiene con una pureza suficiente -- como para ser directamente introducido a los hornos de fundición de ánodos.

El cobre cementado, que no es fundido, puede volver a lixiviarse y se usa para ello una solución ácida más concentrada (150 g/l), esta solución sólo contendrá sulfatos de hierro y cobre; el hierro se precipita en forma de óxido hidratado y el cobre se recupera por electrodepósito.

Una tercera alternativa para tratar el cobre cementado sobre hierro es lavado con agua a presión, el cobre se desprende y deja libre al hierro que no ha reaccionado; posteriormente se recolecta el cobre.

PRECIPITACION AMONICAL: El cobre disuelto en soluciones amoniacales forma una sal cúprica compleja de amonio. Estas sales se hidrolizan fácilmente a menos de que exista amonio en exceso. Si se calienta ligeramente la solución para extraer el exceso de amonio, el complejo forma una sal de cobre, la cual se precipita. Si se encuentra carbonato de cobre en la solución, el producto final será óxido de cobre, ya que el carbonato de este metal se descompone en solución. El proceso tiene la ventaja de que tanto el amoniaco como el dióxido de carbono se regeneran en la torre de recuperación.

RECUPERACION DEL COBRE DE LAS SOLUCIONES DE CIANUROS: Se tendrá en la solución  $\text{Na}_2\text{CuCN}$  y  $\text{Na}_2\text{S}$ . Si se desea precipitar el cobre, será suficiente que se aumen-

te la concentración del ión sulfuro con la adición de sulfuro ácido de sódio, suficiente para precipitar el cobre como  $\text{Cu}_2\text{S}$ . La reacción de la disolución del sulfuro de cobre se hace reversible al disminuir el pH.

#### PRECIPITACION DEL COBRE CON HIDROGENO ELEMENTAL:-

El hidrógeno, por ser más electropositivo que el cobre es separado de la solución en forma muy selectiva. Este proceso es lento, pero se ha comprobado que con la adición de sulfato de amonio como agente regulador (buffer) la velocidad de precipitación es mayor; la cantidad de sulfato de amonio necesaria es de 100 g/l y la cantidad de ácido que debe existir para evitar la precipitación de las sales de cobre debe ser de 12 a 25 g/l, la temperatura de trabajo adecuada es de 38 grados centígrados. Con estas condiciones, se puede llegar a obtener 80 g/l de cobre sin precipitar las sales de cobre.

Las soluciones buffer son muy corrosivas, lo que es considerado como una desventaja de este método.

EXTRACCION POR INTERCAMBIO IONICO: Este proceso permite hacer una extracción muy selectiva y puede separar el cobre en presencia de otros metales; posteriormente se extraen los metales que tengan valor económico, como es el caso del zinc.

PRECIPITACION ELECTROLITICA: Es el método más empleado para recuperar el cobre de las soluciones de sulfatos. Tiene la ventaja sobre los métodos anteriores, de obtener un cobre de alta pureza que no requiere de refinación posterior.

Con este proceso se genera una parte de ácido sulfúrico por cada parte de cobre recuperada. El ácido que se recupera inmediatamente de la solución, se puede utilizar nuevamente en la lixiviación cuando ha salido de las celdas de electrólisis, formando así un circuito cerrado. A este proceso se le conoce con el nombre de recuperación electrolítica para diferenciarlo del proceso de refinación electrolítica.

## **VII. USOS Y PRODUCCION**

La gran importancia del cobre hay que atribuirla, - en parte a la elevada conductividad eléctrica, que es la más elevada de todos los metales con excepción de la plata. Además, presenta una excelente resistencia a la corrosión y tiene buena conductividad térmica. Por otro lado, tiene facilidad para formar con el zinc una aleación de fácil mecanizado, que posee resistencia, elasticidad y es resistente a la corrosión; Se designa con el nombre de latón. Con el estaño forma una aleación muy útil llamada bronce; y buenas características del metal de chatarra.

Debido a esta combinación tan amplia de propiedades y características favorables, el cobre ha pasado a ser -- uno de los más importantes metales no ferrosos y se emplea prácticamente en todas las industrias.

El cobre es de los metales más prácticos, por lo -- que el consumo de cobre en 1900 fue diez veces mayor que en 1850. Desde entonces cuidando más su consumo, se usa en un rango del 4 al 5% anual. Actualmente se usan más - de 8 millones de toneladas al año, ocasionado esto por la industrialización del mundo. Del consumo total, la mitad va a la industria eléctrica, especialmente en el aspecto conductividad. Cuando son consideradas las extensas ramificaciones de la industria, se comprende el alto consumo.

que cubre aspectos como cables y alambres para oficinas, casas, carros, aviones y barcos; motores, generadores y transformadores, p neles de control, electrodos y conmutadores, contactos, etc.. La telecomunicación avanza constantemente por lo que también lo hace el consumo de cobre.

Aparte de la industria eléctrica, se encuentra el - de la construcción en donde Europa, usa 500,000 toneladas de su producción, utiliza el 11% para la construcción de edificios. La industria del transporte en Europa utiliza aproximadamente 300,000 toneladas anualmente dividiendo - esto entre ferrocarriles, barcos, carros, aviones, etc. - En total el 90% de la producción de cobre es utilizado en la industria eléctrica, la de la ingeniería, la de construcción y la del transporte. El 10% restante se usa - para el consumo del hogar en productos como refrigeradores, lavadoras, etc., sin olvidar las municiones y monedas. Las sales de cobre son usadas en la agricultura porque las plantas y animales requieren de este elemento - para su desarrollo: Cantidades alrededor de 250,000 toneladas de sales de cobre (100 toneladas de cobre) son usadas cada año.

### VII.1.1. Aleaciones

Aunque las aleaciones contienen más de un 99% de cobre, las pequeñas cantidades de otros elementos que se --añaden en proporciones muy precisas, son las que condicionan su ampliación a finalidades concretas. Dichas aleaciones son muy valiosas debido a su elevada resistencia a la corrosión, a sus propiedades para trabajo en caliente (650-900°C) y en frío, a su elevada conductividad térmica y eléctrica y a su facilidad para soldarse y pulirse. Las aleaciones de cobre poseen una gran aptitud para el trabajo en frío y pueden conseguirse reducciones del orden del 90% sin recurrir a un recocido intermedio.

Sobre la base del costo final o total, las aleaciones de cobre ofrecen una combinación de propiedades poco corrientes para la fabricación de una gama muy amplia de materiales estampados, estirados y centrifugados. Aunque el costo inicial por unidad de peso puede parecer elevado si se le compara con el de otros productos, los costos de acabados son mucho más bajos.

#### VII.1.1.a) Latones

Entre las propiedades únicas de los latones se encuentran las siguientes: elevada ductibilidad y maleabilidad, baja  $T^{\circ}$  de recocido (300-650°C), estirado rápido, --

elevado valor de la chatarra, buena base para el metalizado, color agradable y no atascar o ensuciar las matrices.

Los latones son esencialmente aleaciones de cobre y zinc; cuando el contenido de este último llega al 36% se conoce con el nombre de latones "alfa". Poseen características para trabajo en frío extraordinarias. Los que tienen un contenido de zinc comprendido entre el 36 y 45% se designan con el nombre de "alfa-beta" y aquellos cuyo contenido de este metal es superior al 45% con el de latones "beta".

Los tipos alfa-beta y beta se adaptan especialmente bien al trabajo en caliente, propiedad que aumenta con el contenido de zinc hasta la proporción de éste alcanza un máximo de 40%. El revenido sólo puede producirse por trabajo en frío y el grado del mismo se indica por un prefijo, como, por ejemplo, 1/4 duro (reducción en superficie del 10.9%) o extra de muelle (68.7%), ver tabla I.

#### VII.1.1.b) Bronces

Estas son aleaciones compuestas estrictamente por cobre y estaño aunque el término se aplica también a otras aleaciones, se emplea algún adjetivo, como, por ejemplo, "latón-estaño". Además el bronce comercial no es un bronce, sino una aleación cobre-zinc de un conteni-

do de cobre aproximadamente igual al de la aleación cobre-estano con la que tiene un gran parecido de color. Debido a estas inconsistencias sería deseable que, siempre que fuese posible se diesen las especificaciones completas de las aleaciones empleadas en la industria. Por regla general, los bronce son aleaciones técnicas que se caracterizan por tener unas propiedades mecánicas superiores a las de cobre-zinc y cobre zinc-plomo. Debido a estas propiedades y, sobre todo, a sus características de resistencia a la fatiga, los bronce se emplean en aquellas operaciones en que los materiales han de someterse a esfuerzos alternativos o cíclicos o donde se requiere resistencia a la corrosión (ver tabla VII.1).

#### VII.1.1.c) Cobre-Níquel

Las aleaciones que contienen del 20-30% de níquel pueden estirarse, estamparse, trabajarse en frío y en caliente y soldarse con o sin metal de aportación. Son lo suficientemente resistentes para competir con algunas aleaciones férricas en lo que respecta a sus propiedades mecánicas y, por consiguiente, se emplean frecuentemente en aquellos casos en que el fallo del material implica un gasto o peligro considerable. Su ductibilidad les comunica propiedades de trabajo excelentes, mientras la resistencia que ofrecen a los agentes corrosivos y erosivos y el color blanco que las caracteriza, hacen que su demanda

sea grande. Las aplicaciones más importantes de estas -- aleaciones son en condensadores navales y de centrales de energía y en munición de arma corta.

Las aleaciones que contienen cantidades más peque-- ñas de níquel (4.5-20.5%) se conocen con el nombre de plata de níquel. Estas aleaciones difieren mucho entre sí - en lo que se refiere a la composición y, por ejemplo, una aleación del 10% de níquel contiene un 67% de cobre, mientras que otra con el mismo contenido del primer metal tiene uno de cobre del 46%. Por regla general, estas alea-- ciones se emplean en la fabricación de cubiertos, debido al ancho de que tienen una duración prolongada, se trabajan fácilmente y tienen un color que se aproxima mucho al de la plata. Generalmente, este color varía con el contenido de níquel desde plateado hasta amarillento (ver ta-- bla VII.1).

TABLA VII.1  
Composiciones y Empleos de las Aleaciones de Cobre  
% de elemento aleante

Aleación	Cu	Zn	Pb	Ni	Sn	Otros	Empleos
<b>Cobre:</b>							
Electrolítico	99.9+	-	-	-	-	- -	Válvulas electrónicas construcción.
Arsenical	99.45	-	-	-	-	As-0.45	Tuberías, chapas, soldadura.
Fosforado	99.9	-	-	-	-	- -	Tuberías, soldadura.
Plateado	99.9	-	-	-	-	Ag0.22'1kg	Conmutadores y radiadores.
<b>Latón:</b>							
Rojo	85.0	15.0	-	-	-	- -	Joyería y radiadores.
Para cartuchos	70.0	30.0	-	-	-	- -	Munición
Amarillo	65.0	35.0	-	-	-	- -	Estirado, estampado.
Muntz	60.0	40.0	-	-	-	- -	Construcción.
<b>Latón al plomo:</b>							
De plomo	67.0	32.3	0.8	-	-	- -	Mecanización
De fácil mecanización	62.0	35.0	3.0	-	-	- -	Mecanización
De construcción	56.0	41.5	2.5	-	-	- -	Construcción
<b>Latón al estaño:</b>							
Admiralty	71.0	28.0	-	-	1.0	- -	Tuberías de condensador
Naval	60.0	39.0	-	-	0.75	- -	Tuberías, forja.
De manganeso	59.0	39.0	1.25	-	0.75	- -	Minería, válvulas.
<b>Níquel-plata:</b>							
18%	64	18	-	18	-	- -	Estirado, muelles.
15%	65	20	-	15	-	- -	Construcción.
5%	62	33	-	5	-	- -	Joyería
<b>Bronce:</b>							
Herculoy A	96.5	-	-	-	0.5	Si-3	Depósitos, cubas.
Herculoy B	97.8	-	-	-	0.2	Si-2	Marinaria, utensilio
Aluminio	91	-	-	-	-	Al-9	Mat. resistente a los ácidos.
Cuproníquel	70	-	-	30	-	- -	Condensadores, cubas
De fósforo	95	-	-	-	5.0	P-0.05	Distragms, maquinaria.

## VII.2. PRODUCCION

### VII.2.1. Provenir del Cobre para el Siglo XXI y Perspectivas para un Futuro más Lejano

A partir de los inicios de la civilización se han descubierto yacimientos minerales por un total de más de 600 millones de toneladas de cobre en la corteza terrestre; hasta la fecha, se han consumido alrededor de la tercera parte de esas reservas, en su mayoría, por supuesto, durante el siglo actual (aproximadamente 200 millones de toneladas).

Las reservas mundiales de cobre alcanzan actualmente un total aproximado de 420 millones de toneladas, en su mayor parte en yacimientos porfídicos, en el sudoeste de Estados Unidos, la U.R.S.S., China, Chile y Perú; este total puede ser consumido rápidamente en un cercano futuro si las predicciones de Stulov resultan exactas. Si la tasa de consumo permanece estacionaria a su actual nivel, las reservas conocidas no pueden durar más de unos 40 años, por lo cual resulta indispensable localizar nuevos abastecimientos, y esos se encuentran primordialmente en yacimientos porfídicos.

Lo más probable es que el mercado del cobre continúe siendo objeto de fluctuaciones, y que el consumo siga

umentando en cuanto se afiance la esperada mejoría económica; conforme vayan agotándose los yacimientos a niveles más someros, habrá que ir poniendo en explotación otros más profundos y estimular métodos más eficientes de extracción subterránea.

Aunque no parece probable que, en términos reales, los precios vuelvan a alcanzar los exagerados niveles registrados en 1974. Los yacimientos porfídicos constituirán las fuentes principales del cobre. Es muy posible -- que factores socio-económicos y políticos empujen los factores de exploración y de la industria y los alejen de -- las regiones tradicionales, en favor de otras más estables. La industria cuprífera tendrá que ir conteniendo, rápidos cambios y pesadas presiones debido a actividades de los gobiernos de países en desarrollo.

Durante las últimas dos décadas, cerca de dos, de cada tres toneladas de cobre recientemente descubierto se han realizado en yacimientos de tipo porfídico, y alrededor del 45% de cobre que se extraen en la actualidad proviene de yacimientos porfídicos que, con el transcurso -- del tiempo, se espera proporcionen grandes cantidades de cobre.

Esto resulta lógico si se considera que más de tres quintas partes de las reservas conocidas están en yaci--

mientos de esta clase, de los que con seguridad, quedan - algunos por descubrir. Podría decirse que, en promedio, - cada uno de los yacimientos mencionados contienen no me- nos de un millón de toneladas de cobre, por lo tanto, que da una formidable cifra de toneladas (miles de millones) - disponible para extracción. Si el hombre actúa intelligen- temente y enérgicamente en la exploración y prospección y desarrollo de los recursos aún existentes del mineral y - aporta las inversiones indispensables para financiar tec- nologías avanzadas y construcciones de plantas.

Dado que una buena proporción de áreas en desarro- llo ocurren en el planeta como es el caso de Sudamérica - Andina, sin embargo, se suscitarán dilaciones causadas -- por fenómenos socio-económicos y políticos desfavorables, pero es de esperarse que durante el siglo XXI muchas de - esas cuestiones, debidamente estudiadas, podrán vencerse - con éxito.

#### VII.2.2. Pronósticos y Cambios en las Cotizaciones del Cobre

Después de un prolongado período de bajos precios - del cobre en las cotizaciones internacionales, estos han - experimentado un sensible aumento, el cual ha sido impul- sado por fuertes incrementos en la demanda y bajas en la - oferta debido a la reestructuración de la industria mine- ra.

Los precios han continuado incrementándose a lo largo de 1988, 1989 y 1990, cuyas cotizaciones han sido las siguientes:

Para 1988, de 2,596.1 dólares por toneladas, hasta 2,848.4 dólares por tonelada para el año de 1989; para el primer trimestre de 1990 que comprende hasta el 14 de marzo se incrementó a 3,062.8 dólares por tonelada. Aunque existe la posibilidad de que estos declinen a niveles de un dólar por libra; lo cual será determinado en el futuro por una combinación de mayor crecimiento industrial, así como un aumento en las unidades de producción en los próximos años, (Fig. VII.1).

Para la década de los noventas, los analistas consideran que la demanda de cobre refinado crecerá; su tasa fluctuará entre el 1.5% y el 2.0% anualmente. Conviene señalar que este pronóstico supera ligeramente al que se había hecho en años anteriores, debido a la posibilidad de que durante dicha década, el sector de bienes de capital con consumo intensivo de cobre, puede crecer más rápidamente de lo que se consideraba inicialmente, debido a la reducción de los precios del petróleo ya que es un recurso no renovable.

La década de los ochentas ha sido testigo de cambios sorprendentes en la economía internacional de la pro

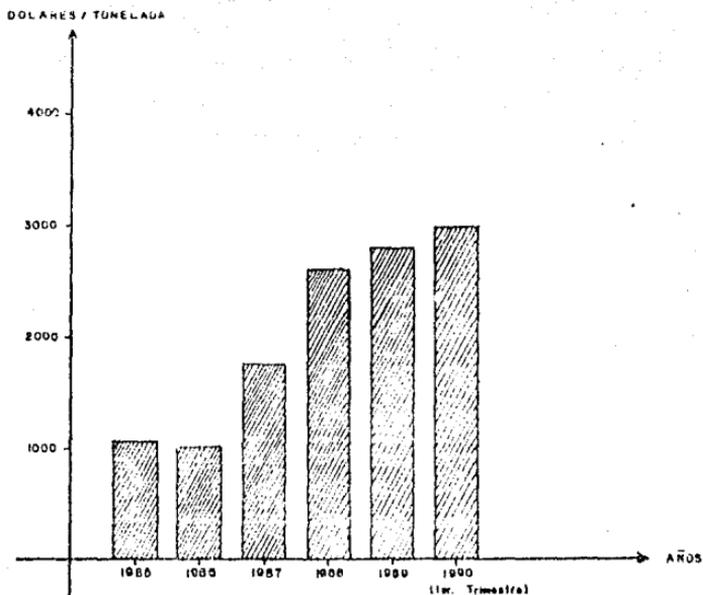


Fig. VI. Gráfico de la cotización del cobre en los últimos 5 años.

Fuente: Dirección General de Minas 1990.

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CIENCIAS DE LA TIERRA.	
GRAFICA DE LA COTIZACION DEL COBRE EN LOS ULTIMOS 5 AÑOS.		
AHROYO OSORNO E.		GARCIA GARCIA H.
BAUTISTA GONZALEZ A.		RODRIGUEZ GUTIERREZ A.
CERON SANTILLAN C.		FRUNSTEIN JIMENEZ F.R.
TESIS PROFESIONAL	1990	FIG. N° VI. 1

ducción del cobre. Estos cambios pueden agruparse bajo los siguientes rubros:

- a).- Reestructuración de compañías mineras que condujo al cierre o modernización de unidades ineficientes.
- b).- La creciente importancia de extracción por solventes.
- c).- Ajustes a las partidas cambiarias llevadas a cabo por países exportadores.
- d).- Consolidación de la propiedad de las empresas a través de fusiones y adquisiciones.

Estos cambios se debieron fundamentalmente por los bajos precios que prevalecieron en este período y dieron finalmente como resultado ahorros en los costos de diversos productores, que a su vez redundó en una mejor posición competitiva en el mercado mundial.

Ahora bien, si se toma en consideración que la producción del cobre continúa en aumento en el mundo, puesto que ésta fue superior en 3.8% durante los primeros once meses de 1988 en comparación en el mismo período de 1987, por tal motivo el mercado del cobre se mantiene a la espectativa respecto al precio del cobre ya que el abastecimiento ha aumentado. Por otra parte las tasas en el consumo del cobre crecieron a un ritmo menor en 1988 contra el 4.2% que se logró en 1987. De hecho los grandes -

incrementos en el consumo de cobre se lograron fundamentalmente en Europa y Asia. En general se estima que a largo plazo, el aumento mundial en el consumo de cobre será del orden del 1.5% anual, lo que referido a precios y si se toma en consideración los fuertes incrementos de consumo ocurridos en los últimos años, es válido suponer que se dé una disminución en las tasas de crecimiento a corto plazo, lo que muy probablemente incida en los niveles de precios. (Fig VII.2).

### VII.2.3. Niveles de Producción en México.

La producción minera de cobre en México ha tenido un incremento del 10.5%, pasó a 273,481 toneladas producidas en 1988; ésta ha sido la cifra más alta que haya alcanzado el país en la producción del cobre y lo coloca entre los 10 principales productores en el mundo.

Ahora bien, dentro de este contexto es preciso indicar en Tablas, la recopilación estadística de México y el mundo. Del mismo modo, se consideran las tablas de exportación e importación. Para dar una idea de la importancia que tiene el cobre dentro del desarrollo de la Humanidad.

Por otra parte la Cía. Minera de Cananea, S.A. de C.V. puso en marcha su nueva planta concentradora con capacidad de 65,000 toneladas de mineral al día, las que en adición a las 15,000 toneladas existentes, suman un total de 80,000 toneladas diarias de mineral. Actualmente se han continuado los trabajos de expansión en la planta de extracción por solventes con capacidad de 20,000 toneladas al año, lo que permitirá llegar a una capacidad total de cátodos de 30,000 toneladas anuales.

MILES DE TONELADAS METRICAS.

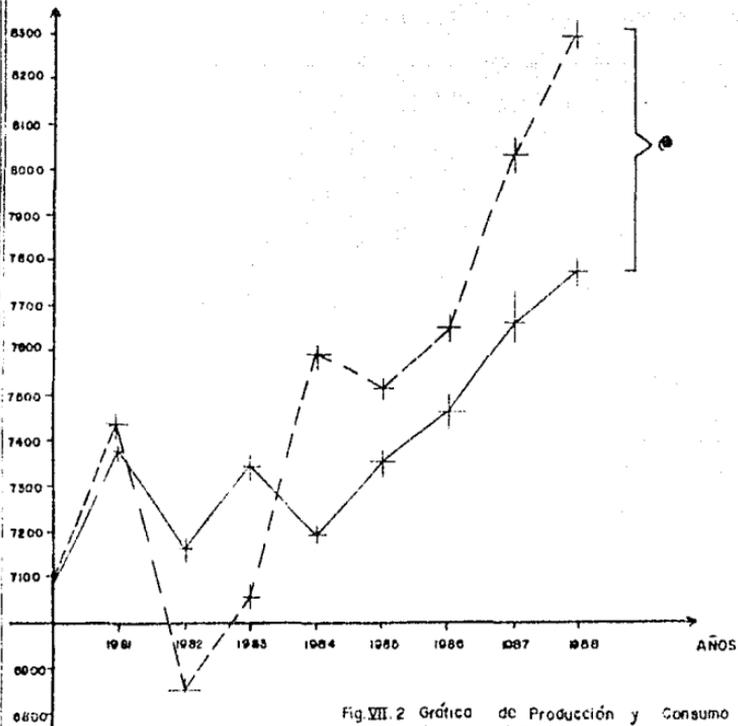


Fig. VII. 2 Gráfica de Producción y Consumo de Cobre refinado (Miles de toneladas métricas por año)

SIMBOLOGIA

----- CONSUMO  
 \_\_\_\_\_ PRODUCCIÓN

⊙ { CHATARRA DE RECUPERACIÓN  
 ETC

Fuente: "Revista de la Cámara Minera. Grupo de Productores del Cobre." 1989.

UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CIENCIAS DE LA TIERRA	
PRODUCCION Y CONSUMO DE COBRE REFINADO (MILES DE TONELADAS METRICAS)		
ARROYO OSORNO E.	GARCIA GARCIA H.	
BAUTISTA GONZALEZ A.	RODRIGUEZ GUTIERREZ A.	
CERON SANTILLAN C.	RUBINSTEIN JIMENEZ F.N.	
TESIS PROFESIONAL	1990	FIG N° VII. 2

Por su parte, Mexicana de Cobre, S.A. ha venido incrementando el aprovechamiento de su fundición; en 1988, produjo 76,227 toneladas de ánodos, lo que significó un incremento del 45.4% en relación al año 1987. Esta planta irá aumentando gradualmente su producción para llegar, en 1991, a un nivel de 90% al 100% de su capacidad instalada de 180,000 tons/año.

Respecto a la producción de cobre electrolítico, se obtuvo un incremento del 5.6% en relación al año 1987. -- Esto fue posible gracias a una mayor disponibilidad de material fundido, aunado a la mayor demanda generada por el consumo interno como por la exportación de productos manufacturados a base de cobre, renglón en el que se ha observado una notable actividad por parte de la industria na-cional.

En relación a la refinería de cobre electrolítico, Cobre de México, S.A. de C.V., ha iniciado un programa de expansión que consiste en una ampliación de su capacidad de aprovechamiento y beneficio de chatarra de cobre, así como un movimiento gradual de sus hornos de reverbero, lo que redundará un incremento del 25% de su capacidad instalada, para llegar a un volumen total de producción de - - 200,000 toneladas anuales.

RECOPIACION ESTADISTICA DE LA PRODUCCION MINERA DE COBRE EN MEXICO  
(TONELADAS METRICAS)

AÑOS	COBRE Toneladas métricas	AÑOS	COBRE Toneladas métricas	AÑOS	COBRE Toneladas métricas
De					
1521 A					
1890	8000	1923	53372	1956	79188
1891	5000	1924	49113	1957	71721
1892	7915	1925	54596	1958	68245
1893	9607	1926	53763	1959	62372
1894	11959	1927	58734	1960	56617
1895	11806	1928	65505	1961	46818 XX
1896	11338	1929	86559	1962	54019
1897	11553	1930	73412	1963	55090
1898	15919	1931	54212	1964	52072
1899	17249	1932	35213	1965	55248
1900	22473	1933	39825	1966	56513
1901	33943	1934	41268	1967	56012
1902	36357	1935	39373	1968	61110
1903	46040	1936	29713	1969	66167
1904	51739	1937	46077	1970	61012
1905	65449	1938	41581	1971	63150
1906	61615	1939	44390	1972	78720
1907	57473	1940	37602	1973	80501
1908	38173	1941	48716	1974	32670
1909	57230	1942	50896	1975	78196
1910	48160	1943	49774	1976	88970
1911	56072	1944	41300	1977	89662
1912	57245	1945	61680	1978	87186
1913	52592	1946	61054	1979	107109
1914	26621	1947	63491	1980	184123
1915	206	1948	59076	1981	232902
1916	28411	1949	57245	1982	229178
1917	50946	1950	61701	1983	195959
1918	70200	1951	67351	1984	303523
1919	52272	1952	58463	1985	276125
1920	49192	1953	60148	1986	270672
1921	15228	1954	54806		
1922	26978	1955	71567		

NOTA: XX Producción afectada por huelga laboral.

PRODUCCION MINERA DE COBRE EN MEXICO POR ENTIDADES FEDERATIVAS Y MUNICIPIOS  
T O N E L A D A S

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
T O T A L	195,959	303,523	276,125	270,672	230,573
<u>AQUASCALIENTES</u>	25	16	27	32	27
<u>ASIENTOS</u>	25	16	27	32	27
<u>BAJA CALIFORNIA SUR</u>	1,435	1,332	357	-	-
<u>MULEGE</u>	1,435	1,332	357	-	-
<u>COAHUILA</u>	59	19	15	11	2
<u>OCAMPO</u>	54	13	14	9	7
<u>SAN BUENAVENTURA</u>	-	1	-	-	-
<u>SIERRA MOJADA</u>	3	1	-	-	-
<u>TORREON</u>	2	4	1	2	2
<u>CHIHUAHUA</u>	8,986	9,032	8,753	14,007	11,932
<u>AQUILES SERDAN</u>	210	280	308	352	300
<u>BALLEZA</u>	1	1	1	-	-
<u>COYAME</u>	-	-	-	-	-
<u>CUSHIIRIJAHC</u>	3	5	4	3	3
<u>CHIHUAHUA</u>	10	2	1	5,510	4,694
<u>CHINIPAS</u>	4	5	4	4	3
<u>GUADALUPE Y CALVO</u>	2	1	4	3	3
<u>GUAZAPARES</u>	1	1	-	-	-
<u>GUERRERO</u>	12	-	-	-	-
<u>HIDALGO DEL PARRAL</u>	112	94	110	105	89
<u>JUAREZ</u>	-	-	-	1	1
<u>MATAMOROS</u>	1	2	-	-	-
<u>MORELOS</u>	1	-	-	-	-
<u>MORIS</u>	-	2	-	3	3
<u>NAMIQUIPA</u>	-	-	2	4	3
<u>OCAMPO</u>	1	-	2	4	3
<u>SAN FRANCISCO DEL ORO</u>	2,617	2,623	2,217	2,053	1,743
<u>SANTA BARBARA</u>	4,164	3,667	3,265	3,854	3,283
<u>SANCILLO</u>	1,823	2,288	2,282	1,868	1,591

TONELADAS

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
TEHRIS	1	-	-	-	-
TERRAZAS	-	1	-	-	-
URIQUE	14	60	536	230	196
VILLA MATAMOROS	-	-	3	13	11
<u>DURANGO</u>	354	520	1,286	672	572
CANATATLAN	-	1	1	1	1
CANELAS	-	2	3	2	2
CONTEO DE COMINFORT	1	1	3	4	3
CUENCAME	79	210	457	104	88
DURANGO	-	-	-	93	79
GENERAL SIMON BOLIVAR	5	1	-	1	1
GUADALUPE VICTORIA	10	28	26	65	55
GUANACUVI	39	68	134	244	208
INDE	15	19	427	26	22
LERDO	1	1	-	-	-
MAPIMI	4	8	9	7	6
NAZAS	-	-	-	2	2
NOMBRE DE DIOS	-	2	5	3	3
OCAMPO	-	1	1	1	1
ORO, EL	4	12	5	-	-
OTAEZ	5	8	17	14	12
PANUO DE CORONADO	46	37	47	37	31
PUEBLO NUEVO	-	27	-	-	-
RODIO	1	-	-	-	-
SAN BERNARDO	5	5	-	-	-
SAN DIMAS	-	1	-	-	-
SAN JUAN DE GUADALUPE	24	12	19	9	8
SAN JUAN DEL RIO	-	6	7	10	8
SAN LUIS DEL CORDERO	-	4	1	-	-
TAMAZULA	2	9	6	13	11
TOPIA	34	24	30	27	23
VELARDEÑA	64	23	-	-	-

TONELADAS

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
VICTORIA	1	-	-	-	-
ORIGEN DESCONOCIDO	-	1	-	-	-
<u>GUANAJUATO</u>	95	136	118	122	104
GUANAJUATO	95	136	118	122	104
<u>GUERRERO</u>	1,000	961	921	948	807
AJUCHITLAN DEL PROGRESO	1	-	-	-	-
COYUCA DE CATLAN	15	1	-	-	-
CUTZAMALA DE PINZON	-	-	2	2	2
JOSE AZUETA	59	56	50	46	39
LEONARDO BRAVO	1	5	1	1	1
METLATONC	-	1	1	1	1
PINZAN MORADO	3	3	-	-	-
TAXCO DE ALARCON	904	870	854	898	764
ZUMPANGO DEL RIO	17	16	8	-	-
<u>HIDALGO</u>	1,223	1,609	1,480	998	851
NICOLAS FLORES	7	43	59	9	8
PACHUCA	2	-	2	3	2
ZIMAPAN	1,214	1,566	1,419	986	841
<u>JALISCO</u>	378	691	435	543	463
AMECA	-	-	-	1	1
BOLASOS	82	112	128	167	142
GUADALAJARA	-	1	-	-	-
HOSTOTIPAQUILLO	1	-	-	-	-
TALPA DE ALLENDE	295	578	307	575	320
<u>OAXACA</u>	3	3	14	10	10
COATACAS ALTAS	-	-	-	3	3
IXTLAN DE JUAREZ	3	2	4	3	3
SAN BALTAZAR CHICHICAPAN	-	-	3	-	-
SAN JERONIMO TAVICHE	-	1	6	3	3
SAN MATTEO CALPUJALPAN	-	-	-	1	1
TLACOLULA DE NATAMOROS	-	-	1	-	-

TONELADAS

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
TUMORIS	1	-	-	-	-
TERRAZAS	-	1	-	-	-
URIQUE	14	60	536	230	196
VILLA MATAMOROS	-	-	3	13	11
<u>DURANGO</u>	351	520	1,286	672	572
CANATATIAN	-	1	1	1	1
CANELAS	-	2	3	2	2
CONTEO DE COMFORT	1	1	3	4	3
CHENCAME	79	210	457	104	88
DURANGO	-	-	-	93	79
GENERAL SIMON BOLIVAR	5	1	-	1	1
GUADALUPE VICTORIA	10	28	26	65	55
GUANACUAVI	39	68	134	244	208
INDE	13	19	427	26	22
LERDO	1	1	-	-	-
MAPIMI	4	8	9	7	6
NAZAS	-	-	-	2	2
NOMBRE DE DIOS	-	2	5	3	3
OCAMPO	-	1	1	1	1
ORO, EL	4	12	5	-	-
OTAEZ	5	8	17	14	12
PANUCO DE CORONADO	46	37	47	37	31
PUEBLO NUEVO	-	27	-	-	-
RODIO	1	-	-	-	-
SAN BERNARDO	5	5	-	-	-
SAN DIMAS	-	1	-	-	-
SAN JUAN DE GUADALUPE	24	12	19	9	8
SAN JUAN DEL RIO	-	6	7	10	8
SAN LUIS DEL CORDERO	-	4	1	-	-
TAMAZULA	2	9	6	13	11
TOPIA	34	24	30	27	23
VELARDEÑA	64	23	-	-	-

T O N E L A D A S

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
<u>PUEBLA</u>	12	1	1	6	5
IZUCAR DE MATAMOROS	12	1	1	6	5
<u>QUERETARO</u>	382	486	471	737	627
CADEREYTA DE MONTES	340	486	471	737	627
MAONI	42	-	-	-	-
<u>SAN LUIS POTOSI</u>	2,219	2,098	2,239	2,869	2,444
CATORCE	2	1	3	1	1
CERRO DE SAN PEDRO	6	3	1	1	1
CIARGAS	709	712	837	1,605	1,667
PAC, LA	1,500	1,362	1,398	1,262	1,075
SAN LUIS POTOSI	2	-	-	-	-
<u>SINALOA</u>	220	131	114	359	307
CONCORDIA	3	13	21	8	7
CASALA	199	104	45	32	27
CULTACAN	3	-	-	4	27
CIJITA	5	9	27	116	99
FUERTE, EL	-	1	1	2	2
MAZATLAN	5	-	1	111	95
ROSARIO	4	3	1	72	62
SAN IGNACIO	1	-	1	1	1
SINALOA	-	1	17	13	11
<u>MEXICO</u>	17	25	11	43	37
ALMOGYA DE ALQUISIRAS	2	4	-	-	-
SULTEPEC	-	-	-	27	23
ZACHILPAN	15	21	11	16	14
<u>MICHUACAN</u>	293	617	665	458	390
ANGANGUEO	139	145	103	104	88
RASTA	-	7	-	-	-
CARACURU	-	-	-	4	3
COALCOMAN	77	220	386	312	266
CHURUMICO	14	24	15	14	12
HUACANA, LA	10	-	-	-	-

T O N E L A D A S

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
HUETAMO	-	-	160	-	-
MORELIA	-	-	-	2	2
PAZCUARO	-	-	-	21	18
TANGANRATO	53	221	-	-	-
TLALPUJAHUAC	-	-	1	1	1
<u>MORELOS</u>	7	5	6	6	4
TLAQUILTEVANGO	7	5	6	6	4
<u>NAYARIT</u>	7	14	15	9	7
ACAPONETA	1	-	1	-	-
HUAJICORI	-	-	1	-	-
RUIZ	4	9	4	1	1
SANTIAGO IXCUINTLA	-	1	7	5	4
YESCA, LA	2	4	3	3	2
<u>NUEVO LEON</u>	-	10	-	-	-
LAMPAZOS DE NARANJO	-	10	-	-	-
<u>SONORA</u>	169,835	274,293	248,857	242,952	206,960
ACONCHI	5	10	45	30	25
AGUA PRIETA	-	-	-	10	8
ALAMOS	541	684	296	19	17
ALTAR	2	-	1	1	1
ARIVECHI	128	76	46	40	33
ARIZPE	-	-	11	8	6
BACANORA	-	1	-	-	-
BAVIACORA	6	10	49	17	15
BENJAMIN HILL	1	-	-	-	-
CABORCA	5	4	6	1	1
CAJEME	-	-	3	2	2
CANANEA	26,185	31,214	26,146	25,162	21,435
CIUDAD OBREGON	5	1	-	-	-
COLORADA, LA	3	4	4	4	4
CUCURPE	1	-	-	-	-

T O N E L A D A S

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
CUMPA	309	475	26	21	19
ESPERANZA	1	-	-	-	-
GUAYMAS	1	1	3	3	2
HERNANDEZ	7	13	22	14	12
MAGDALENA	1	-	1	4	4
MOCTEZUMA	-	-	1	-	-
NACCOZARI DE GARCIA	140,478	240,308	221,919	217,507	185,285
MOCALLES	2	-	47	1	1
OPODEPE	-	1	-	-	-
PITIQUITO	2,066	1,392	101	-	-
QUIRIBO	1	-	-	-	-
ROSARIO	3	1	-	1	1
SABANILLA	2	6	5	11	10
SAN FELIPE	-	1	2	-	-
SAN JAVIER	7	6	10	8	6
SAN MIGUEL DE HORCASITAS	1	1	20	13	10
SANTANA	2	-	1	3	2
SUAQUI GRANDE	1	1	3	-	-
TEPACHE	66	73	87	71	60
URES	-	3	2	1	1
YECORA	2	7	-	-	-
<u>TAMAULIPAS</u>	-	1	-	-	-
SAN NICOLAS	-	1	-	-	-
<u>ZACATECAS</u>	9,409	11,523	10,355	5,890	5,017
CONCEPCION DEL ORO	2,377	2,870	836	59	50
CUAUHTEMOC	-	-	-	1	1
CHALCHIHUITES	32	32	28	25	21
FRESNILLO	645	361	202	123	105
GRAL. FRANCISCO MURGUA	1	1	-	-	-
GRAL. PANFILO NATERA	-	2	2	-	-
GUADALUPE	3	3	2	6	5
JUAN ALDAMA	-	-	1	1	1

T O N E L A D A S

ESTADOS Y MUNICIPIOS	1983	1984	1985	1986	1987
MAZAPIL	118	109	121	166	141
MELCIOR OCAMPO	22	37	51	27	23
MIGUEL AUZA	11	7	3	2	2
MORELOS	-	-	-	1	1
NORIA DE ANGELES	602	707	641	724	621
OJOCALIENTE	7	5	6	2	2
RIO GRANDE	-	4	2	-	-
SOMBRERETE	5,283	7,134	8,184	4,461	3,800
VETA GRANDE	3	5	7	3	3
VILLA HIDALGO	49	47	19	5	4
ZACATECAS	256	199	250	279	237

FORMA DE PRESENTACION r/1

AFINADO	80,903	69,806	69,039	62,478	110,040
BARRAS IMPURAS	11,091	10,498	6,719	22,500	23,810
CONCENTRADOS	114,068	108,807	92,219	89,580	96,723

CIFRAS REVISADAS PARA EL AÑO 1985

CIFRAS ESTIMADAS

CIFRAS PRELIMINARES PARA EL AÑO 1987

FUENTE: SUMARIO ESTADISTICO DE LA MINERIA MEXICANA

EXPORTACION

TONEELADAS 1/

FORMAS DE PRESENTACION Y PAIS DE DESTINO	1983	1984	1985	1986	1987
MINERALES DE COBRE	1,484	77	13	29	23
ESTADOS UNIDOS	1,484	77	13	29	23
COBRE EN CONCENTRADOS O EN PRODUCTOS PIROMETALURGICOS O DE REFINADOS	110,756	102,601	102,889	83,169	65,994
ALEMANIA REPUBLICA FEDERAL	37,889	35,351	43,213	29,650	12,506
BRASIL	-	-	-	2,786	1,802
CANADA	-	-	-	-	3,610
COREA DEL NORTE	-	-	-	141	11,047
COREA DEL SUR	16,655	24,499	-	7,627	3,682
ESPAÑA	15,419	5,982	16,781	19,744	11,635
ESTADOS UNIDOS	5,499	-	1	2,786	1,617
FINLANDIA	-	-	-	-	1,755
INDIA	-	-	-	2,928	-
JAPON	29,309	21,073	17,913	3,061	7,187
REP. POPULAR CHINA	5,990	15,696	3,015	14,446	11,153
OTROS PAISES	-	-	21,966	-	-
COBRE EN BRUTO					
EXCEPTO ELECTROLITICO	10,909	14,712	11,536	21,967	10,209
ALEMANIA REPUBLICA FEDERAL	-	2,696	1,495	-	-
BELGICA-LUXEMBURGO	1,014	4,789	5,049	-	-
CANADA	626	-	-	-	-
ESTADOS UNIDOS	8,819	6,977	4,298	21,697	10,209
ITALIA	-	250	-	-	-
JAPON	445	-	18	-	-
SUIZA	-	-	676	-	-

P/ CIFRAS PRELIMINARES

1/ PESO BRUTO

2/ EN CONTENIDO METALICO

FUENTE: SUMARIO ESTADISTICO DE LA MINERIA MEXICANA, 1983 - 1987.

I M P O R T A C I O N

TONELADAS 1/

FORMA DE PRESENTACION Y PAIS DE ORIGEN	1983	1984	1985	1986	1987
ANODOS	2,237	198	51	21	24
ESTADOS UNIDOS	2,237	198	51	21	24
LINGOTES DE BRONCE O DE LATON	-	2	10	34	136
ESTADOS UNIDOS	-	2	10	34	136
DESPERDICIOS Y DESECHOS DE COBRE SIN ALFAR	8,090	14,016	17,007	5,581	10,154
CUBA	-	-	236	-	-
ESPANA	-	55	-	-	-
ESTADOS UNIDOS	8,090	13,961	16,771	5,581	10,154
DESPERDICIOS Y DESECHOS DE COBRE ALEADO	1,736	3,300	7,647	3,955	10,382
ESTADOS UNIDOS	1,716	3,300	7,621	3,952	10,380
ETIOPIA	-	-	-	2	-
GHANA	-	-	26	-	-
GUATEMALA	20	-	-	21	-
OTROS PAISES	-	-	-	-	2
COBRE ELECTROLITICO	5,448	5,927	11,754	7,977	3,237
ALEMANIA REPUBLICA FEDERAL	-	-	-	-	100
ESTADOS UNIDOS	5,448	5,927	11,754	7,977	3,137
COBRE NO ESPECIFICADO (LOS DEMAS)	2,407	11,314	62,745	8,819	1,387
BELGICA LUXEMBURGO	-	216	-	-	-
CANADA	2,205	-	-	-	-
CHILE	-	-	20,801	5,399	673
ESTADOS UNIDOS	202	11,038	40,605	3,420	714
JAPON	-	-	69	-	-
PANAMA	-	60	-	-	-
PERU	-	-	1,272	-	-
POLVO Y PARTICULAS DE COBRE SIN EXCEDER DE 450 MALLAS. 21	12	11	80	62	104

I M P O R T A C I O N  
(CONTINUACION)

FORMA DE PRESENTACION Y PAIS DE ORIGEN	1983	1984	1985	1986	1987
ALEMANIA REPUBLICA FEDERAL	3	1	1	5	2
AUSTRIA	-	-	-	1	-
ESTADOS UNIDOS	4	9	78	53	99
ITALIA	3	-	-	1	-
REINO UNIDO	2	1	1	2	3
POLVO Y PARTICULAS DE - COBRE SUPERIOR A 450 - MALLAS	3	1	2	2	-
ALEMANIA REPUBLICA FEDERAL	3	-	1	-	-
ESTADOS UNIDOS	-	1	1	2	-

P/ CIFRAS PRELIMINARES

1/ PESO BRUTO

2/ PESO LEGAL

FUENTE: SUMARIO ESTADISTICO DE LA MINERIA MEXICANA, 1983 - 1987.

PRODUCCION MUNDIAL <sup>1/</sup>  
(MILES DE TONELADAS METRICAS)

PAISES PRODUCTORES	1983	1984	1985	1986	1987
T O T A L	8,044	7,838	8,114	8,156	8,340
AUSTRALIA	256	236	258	239	230
CANADA	625	712	724	768	740
CHILE	1,257	1,290	1,356	1,386	1,420
ESTADOS UNIDOS	1,038	1,091	1,106	1,147	1,270
FILIPINAS	273	226	226	223	220
PERU	322	364	397	397	450
POLONIA	380	360	431	431	435
U.R.S.S.	1,000	590	600	620	640 <sup>2/</sup>
ZAIRE	535	540	560	563	560
ZAMBIA	543	540	485	450	435
OTROS PAISES DE ECONOMIA CENTRAL.	587	456	473	476	480 <sup>2/</sup>
OTROS PAISES DE ECONOMIA DE MERCADO	1,228	1,433	1,500	1,456	1,460

P/ CIFRAS PRELIMINARES

1/ PRODUCCION MINERA EN CONTENIDO METALICO

2/ CIFRAS ESTIMADAS

FUENTE: SUMARIO ESTADISTICO DE LA MINERIA MEXICANA, 1983 - 1987.

## ESTADISTICA DE PRODUCCION Y CONSUMO DE COBRE EN MEXICO

1978 - 1982

1982 *	PRODUCCION DE COBRE BLISTER	PRODUCCION <sup>I</sup> DE COBRE - - ELECTROLITICO	CONSUMO TOTAL
ENERO	4,858	6,034	11,399
FEBRERO	4,759	5,255	10,329
MARZO	5,297	8,071	11,560
ABRIL	3,717	7,813	9,900
MAYO	5,694	7,711	5,892
JUNIO	6,194	6,536	5,938
JULIO	6,132	6,926	4,769
AGOSTO	5,772	7,197	2,931
SEPTIEMBRE	4,747	6,531	4,013
OCTUBRE	5,112	5,767	5,286
NOVIEMBRE	6,321	5,292	7,968
DECIEMBRE	5,158	4,197	7,566
T O T A L	63,761	77,700	87,551

1981	65,348	70,767	131,030
1980	87,857	102,742	117,051
1979	88,053	100,855	100,927
1978	85,851	82,981	81,139

\* DATOS PRELIMINARES

I INCLUYE COBRE CATODICO PRODUCCION POR LA CIA. MINERA DE CANANEA, S.A.

FUENTE: ASOCIACION MEXICANA DEL COBRE, A.C.

## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VIII.1. RECOMENDACIONES

Con base en los mapas (Figs. III.12 a III.17) de la República Mexicana, en los cuales se muestran los diferentes tipos de yacimientos productores de cobre del país y en datos obtenidos de las diferentes publicaciones, se elaboró un mapa (Fig. III.18), en el que se observa que la parte norte, noroeste y suroeste presentan zonas productoras de este metal.

Además, en dicho plano se proponen zonas para realizar exploraciones, con buenas posibilidades de obtener resultados favorables para la obtención del cobre.

Por otra parte, se recomienda intensificar la búsqueda de cobre por medio de la exploración de minerales y elementos asociados a él: paragénesis química y mineralógica; se debe tener cuidado en aspectos geológicos (guías) y, apoyarse en métodos geofísicos y geoquímicos.

Los métodos de explotación de minas están generalmente bien aplicados en los diferentes distritos mineros mexicanos; sin embargo, para yacimientos de pórfidos cupríferos donde el encapote sea considerable y no sea económicamente costeable su extracción a taje abierto, es recomendable el uso del método subterráneo de hundimiento por bloques; con este método se obtendrá alta productividad -

con poca dilución si la extracción es bien controlada.

Desde el punto de vista de la economía actual:

El cobre constituye uno de los minerales estratégicos para la industria de los países desarrollados; por tanto, se recomienda intensificar la exploración y explotación debido al incremento en las cotizaciones y en el consumo.

## VIII.2. CONCLUSIONES

### 1.- DE LA HISTORIA

- Desde las primeras épocas de la historia, el cobre es uno de los metales más importantes para el hombre.
- Sus usos han sido de gran variedad: desde utensilios hasta conductores eléctricos, etc.
- La antigua producción mundial, es comparable con la de una mina actual.

### 2.- DE LA FISICA Y QUIMICA

- La más alta conductividad eléctrica (con excepción de la plata).
- Excelente resistencia a la corrosión.
- Buena conductividad térmica.

### 3.- DE LA GEOQUIMICA

- Se considera como un elemento calcófilo
- Tipo de enlace covalente
- Afinidad con el azufre (principalmente)
- Concentraciones mayores en rocas máficas y ultramáficas.

#### 4.- DE LAS CLASIFICACIONES DE LOS YACIMIENTOS

- No existe estandarización en las clasificaciones
- Se basa principalmente en aspectos petrográficos, tectónicos, mineralógicos, genéticos y estructurales.
- Las más recientes clasificaciones se basan en génesis y tectónica.

#### 5.- LOS MODELOS QUE SE PROPONEN EN EL PRESENTE TRABAJO SON:

- Mississippi Valley
- Pórfidos Cupríferos
- Pirometasomáticos
- Vulcano-Sedimentarios
- Mantos y Chimeneas
- Vetas en volcánicas
- Sedimentarios,

#### 6.- DE LA PROSPECCION

- Se deben considerar los diferentes metalotectones
- Los principales criterios de prospección serán:
  - + Guías paleogeográficas y fisiográficas
  - + Guías litológicas y estratigráficas
  - + Guías estructurales

- + Gufas mineralógicas
- + Prospección geoquímica
- + Prospección geofísica.

## 7.- DE LOS METODOS DE EXPLOTACION

- La elección del método de explotación dependerá de:

a) Su profundidad

a.1. Yacimientos que afloran o someros:

- A tajo abierto

a.2. Profundos verticales o inclinados (vetas, - chimineas, etc.)

a.2.1. Con roca encajonante consistente:

- Rebajes abiertos; y
- Tumba por subniveles.

a.2.2. Con roca encajonante semi-consistente:

- Tumba sobre carga;
- Corte y relleno con tepetate; y
- Corte y relleno hidráulico.

a.3. Con poca profundidad y de grandes volúmenes (cobre diseminado):

- Hundimiento por bloques

a.4. Profundos horizontales (mantos, estratiformes, etc.)

- Salones y pilares

8.- DE LOS METODOS DE BENEFICIO

- Para la concentración de minerales de sulfuros de cobre, se utiliza en general el sistema de flotación.
- Cuando el mineral de cobre contenido en los sulfuros, carbonatos, silicatos, óxidos o sulfatos, no responden debidamente a los procesos de concentración gravimétrica, flotación u otro procedimiento sencillo, se utiliza el proceso de lixiviación.

9.- DE LOS USOS

- De los metales más prácticos
- Aproximadamente la mitad va a la industria eléctrica.
- Usos muy variados
- Aleación principal con el zinc formando el latón
- Aleación con estaño, formando el bronce
- Buenas características de metal de chatarra.

## 10.- DE LA PRODUCCION DEL COBRE

- La producción del cobre continúa aumentando.
- El mercado del cobre se mantiene cauteloso respecto a la evolución del precio.
- El consumo ha aumentado en los últimos 5 años.
- México ocupa una buena posición como productor de cobre a nivel mundial.

## BIBLIOGRAFIA

- ARRIAGA, Germán. Algunas consideraciones sobre la clasificación de los yacimientos minerales y sus relaciones con las rocas encajonantes en México. México: VIII seminario interno C.R.M., 1986.
- ARRIAGA, Germán. Distrito minero de Tahuehueto. México: Trabajo inédito, 1981.
- ARRIAGA, Germán. Nuevas clasificaciones de yacimientos minerales. México: Trabajo inédito, 1986.
- ARRIAGA, Germán. Alteración vertical y lateral y zonas de mineralización en depósitos minerales de pórfidos. -- México.
- BARGALLO, Modesto. Tratado de Química inorgánica. México: Editorial Porrúa, S.A., Segunda edición, 1972.
- BARIAND, P. y otros. Les Mineraux: Leurs Gisements, Leurs Associations. Francia: Editorial Du BRGM, 1978.
- BARR, David A. Exploration Case History of a Disseminated Copper Deposit. E.U.A.: 29 th Annual SEG Meeting at Los Angeles, 1959.
- BENITEZ, Jorge Alan. Proyecto de la Exploración por cobre diseminado en el área de la mariquita, Cananea, Sonora. -- México: Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, -- -- U.N.A.M., 1970.

- BORISOV, S. Labores Mineras. U.R.S.S. Editorial Mir, -  
1976,
- BOWEN, P. y otro. Copper: It's Geology and Economic. - -  
E.U.A.: Editorial Applied Science Publishers, 1977.
- BRAY, John L. Metalurgia Extractiva de los Metales no -  
Ferrosos. España: Ediciones Interciencia, segunda edi-  
ción española, 1968.
- BRAVO, Neftalí. Geología de los depósitos minerales en  
el distrito minero de Naica, Chihuahua. México: Tesis  
Profesional, I.P.N., 1968.
- BRIAN, J. Skinner. Earth Resources. España: Editorial  
Omega, S.A., 1974.
- BUCIO, José de la Luz. Exploración Geológico-Minera del  
Pórfido Cuprífero de "La Caridad", municipio de Nacoza--  
ri, Sonora. México: Tesis Profesional, Facultad de In-  
geniería, U.N.A.M., 1971.
- COLORADO, Daniel. Yacimientos Paleokáusticos. México: -  
Gerencia de Estudios Especiales C.R.M., 1982.
- COTTON, F. Albert. Química Inorgánica Avanzada. México:  
Editorial Limusa, 1974.
- CUMMINS, Arthur. Mining Engineering Handbook. E.U.A., - -  
Society of Mining Engineers, 1973.

- CUSTODIO, E. y otro. Hidrología Subterránea. España: -  
Editorial Omega, S.A., 1976.
- DANA, James D. A Sistem of Mineralogy. E.U.A.: John --  
Wiley and Sons Inc., 1914.
- DE LA GARZA, Carlos A. Geología del Distrito Minero de -  
Fresnillo, Zacatecas. México: Tesis Profesional, Facul-  
tad de Ingeniería, U.N.A.M., 1970.
- DOMINGUEZ, Mario. Geología del Area del Cañón de San - -  
Marcos, Municipio de Cuatro Ciénegas, Coahuila. México:  
Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1974.
- DUPONT. Manual para el uso de explosivos. Segunda Edi-  
ción en español. México: Talleres de Editorial y Lito-  
grafía Regina, 1983.
- GARCIA, Oscar Benito. Geología del Yacimiento Vulcano-Se-  
dimentario del Distrito Minero de Cuale, Jalisco. México:  
Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., - -  
1987.
- GONZALEZ, Bonorino. Introducción a la Geoquímica. México:  
Editorial O.E.A., 1972.
- GULLBERT, John M. The Geology of Ore Deposits. E.U.A.: -  
Editorial W.H. Freeman and Company, 1986.
- HAWKES, Webb. Geochemistry in Mineral Exploration. - -  
E.U.A.: Editorial Harper and Roco, 1966.

- JENSEN, Mead. Economic Mineral Deposit. 3a. Edición. -  
E.U.A.: Editorial John Wiley and Sons Inc., 1978.
- KRAUNS, E.H. y otros. Mineralogía. 5ta. edición. Méxi-  
co: Editorial Mc. Graw Hill, 1965.
- KUZVART, M. y otros. Prospecting and Exploration of - -  
Mineral Deposits. E.U.A.: Editorial Elsevier, 1986.
- LAURENCE, D. Meinert. Skarn, Manto and Breccia Pipe - -  
Formation in Sedimentary Rocks of the Mining District, -  
Sonora. Volumen 77, June-July. E.U.A.: Economic Geology,  
1982.
- LEWIS, Robert. Elements of Mining. E.U.A.: Editorial -  
John Willey and Sons Inc., 1964.
- LINDGREN, Waldemar. Mineral Deposit. E.U.A.: Editorial  
Mc. Graw Hill, 1933.
- LOPEZ, R. Geología de México. Tomo II, tercera edición.  
México: Edición Escolar, 1982.
- MARTINEZ, Benjamin F.J. Estudio Geológico-Minero de la  
Mina San Francisco, Sierra de la Encantada, Municipio de  
Ocampo, Estado de Coahuila. México: Tesis Profesional,  
I.P.N., 1972.
- MEGAW, Peter K. Hogh-Temperatura Carbonate-Hosted Ag---  
-Pb-Zn (Cu). Deposits of Northern México. Volumen 81. -  
E.U.A.: Economic Geology, 1987.

- MITCHEL, A. Mineral Deposit and Global Tectonic Setting. E.U.A.: Editorial Academic Press Geology Series, 1981.
- MONTIEL, y otros. Prospección Minera del Area del Mineral de Dolores, Municipio de Madera, Chihuahua. México: Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1989.
- MORAN, Dante J. Geología de la República Mexicana. Segunda Edición, México: Editorial, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1985.
- ORDONEZ, Jorge E. Minas Mexicanas Tomo 1,2,3 y 4. México: Editorial Society of Economic Geologists, 1985, 1986, 1987 y 1988.
- PALOMERA, Trabajo inédito. El Cobre Asociado a los Pórfidos Cupríferos. México: 1985.
- PEELE, Robert. Mining Engineering Handbook. E.U.A.: - - 1986.
- PETRASCHECK, Emil. Yacimientos y Criaderos. España: Editorial Omega, S.A., 1965.
- POVIT, Georges. "Misc Au Point sur les Depost Stratiformes de Cu, Pb, Zn.: Un Type General "Sub-Marine Exhalative" ou "Hydrothermal-Sedimentaire" Francia: Ed. Bureau de - - Recherches Géologiques et minières, 1981.
- RODRIGUEZ, Héctor Alfonso. Discusión sobre el modelo de Yacimiento Mineral de la Región de Mar de Plata, Distrito de Pachuca, Real del Monte, Hidalgo. México: Tesis Profesional, Facultad de Inge

- nería, U.N.A.M., 1986.
- ROSE, Arthur. Geochemistry in Mineral Exploration, - -  
segunda edición. E.U.A.: Editorial Academic Press Geology Series, 1979.
  - ROUTHIER, P. Les Gisements Metalliferes Geologie et --  
Principes de Recherches. Francia: Editorial Masson et -  
C., 1963.
  - SILVA, Luis. Estudio Geológico-Minero de la Mina "La -  
Encantada", Coahuila. México: Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1974.
  - SILLITOE, Richard H. A plate tectonic Model for the --  
Origin of Porphyry Copper. Volumen 67. E.U.A.: Economic Geology, 1972.
  - SMIRNOV, V. I. Geología de Yacimientos Minerales. - -  
U.R.S.S.: Editorial Mir, 1982.
  - SUMARIO, Estadística de la Minería Mexicana. México: -  
Consejo de Recursos Minerales, 1983-1987.
  - TAGGART, Arthur. Elementos de Preparación de Minerales.  
Primera edición española. España: Ediciones Intercien-  
cia, 1966.
  - TAKEO, Sato. Yacimientos Vulcano-Sedimentarios. México:  
Universidad de Sonora, 1977.

- TITLEY, S. R. Porphyry Copper Deposits. E.U.A.: - - -  
Economic Geology, 1981.
- UTEHA. Diccionario Enciclopédico. Tomo III. México: Editorial UTEHA, 1953.
- VALLE, Enrique del. Apuntes de Introducción a los Métodos Geofísicos de Exploración. México: Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1989.
- VAN, George. Hidrometalúrgia de Metales Comunes. México: Editorial UTEHA, 1965.
- VECCHIO, Michael Alfred del. Estudio Petrográfico-Metalogenético del Area de Tlanilpa-Azulaques, Guerrero. - -  
México: Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, - - -  
U.N.A.M., 1978.
- YOUNG, G. J. Elements of Mining. E.U.A.: Mc. Graw Hill Book Company Inc., 1946.
- ZENDEJAS, Samuel. Exploración de Cobre Diseminado del Distrito Minero de Cananea, Sonora. México: Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1972.