

Educación Continua

con una nueva visión en la Ingeniería

CURSO

# Explotación de Minas

Del 13 al 17 de Junio del 2011

Expositor: M. en C. Víctor Manuel López Aburto



CI - 3

[www.mineria.unam.mx](http://www.mineria.unam.mx)

Encuétranos en:



[www.facebook.com/decdfi](http://www.facebook.com/decdfi)



[www.twitter.com/decdfi](http://www.twitter.com/decdfi)

## CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE  
LA INDUSTRIA MINERA**1.1 Definiciones****1.1.1 Mineral**

Un mineral es un sólido producido por procesos de naturaleza inorgánica, que posee una composición química definida y, si se crea en condiciones favorables, también presentará una forma cristalina y otras propiedades físicas.

De manera más amplia, un mineral debe ser una sustancia homogénea, aun cuando se examine detalladamente al microscopio; además, debe tener una composición química que generalmente es precisa y puede expresarse por medio de una fórmula química. En algunos casos, la composición química es variable, pero sólo dentro de ciertos límites y si es así, por lo general obedece a una ley determinada.

Es costumbre por razones de conveniencia, limitar el nombre del mineral a aquellos compuestos que han sido formados por procesos naturales, mientras que los compuestos obtenidos en laboratorio o en un horno para fundición, se llamarán *minerales artificiales*.

El conocimiento del origen de los criaderos minerales permite predecir y en su momento determinar con exactitud su geometría o morfología, la distribución de sus valores, su probable continuidad a rumbo y profundidad, su posible existencia en la corteza terrestre en función de las rocas que lo alojan; y con la conjunción de todos estos datos, su volumen y tonelaje. Con toda esta información se podrá determinar de acuerdo con las cotizaciones internacionales de los metales (actuales o a futuro), su potencialidad económica.

A continuación se enlistan algunos rasgos importantes de los criaderos minerales:

- |                                        |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Criadero mineral                       | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Minerales comerciales</li> <li>- Ganga</li> <li>- Roca encajonante</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Geometría de los yacimientos minerales | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vetas</li> <li>- Mantos</li> <li>- Chimeneas</li> <li>- Cuerpos de reemplazamiento</li> <li>- Cuerpos diseminados</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Origen de los criaderos minerales      | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitación en el seno del agua (calizas, fosforitas, salinas, etc.)</li> <li>- Origen orgánico (carbón y petróleo)</li> <li>- Origen magmático (formados por segregación magmática: níquel)</li> <li>- Metamórficos (formados por metamorfismo: granate, oro, magnetita, calcopirita, etc.)</li> <li>- Pneumatolíticos (formados por gases en o cercanos a los contactos con granito: turmalina, topacio, casiterita, wolframita, etc.)</li> <li>- Metamorfismo regional (grafito, cianita, sillimanita, etc.)</li> <li>- Hidrotermales (relleno y reemplazamiento en vetas, mantos, chimeneas y cuerpos diseminados)</li> <li>- Residuales por lixiviación de <math>\text{SiO}_2</math> (formación de yacimientos de níquel o aluminio)</li> <li>- Enriquecimiento secundario (minerales oxidados, sombreros de Fe)</li> <li>- Placeres (oro, estaño y en general los minerales pesados)</li> </ul> |

### 1.1.2 Mena

Por definición se dice que una mena está constituida por un agregado de minerales, de los cuales se pueden extraer con provecho económico, uno o más metales.

En virtud de que tanto los costos de operación minera involucrados en su extracción, como los precios de los metales en el mercado internacional varían, un determinado agregado mineral puede considerarse como *mena* bajo ciertas condiciones, las cuales pueden ser diferentes para otro tipo de agregados. Los minerales de mena, de los que se pueden extraer los metales comerciales, generalmente vienen asociados a otro tipo de minerales que genéricamente se les designa con el nombre de *ganga*, por lo que se podrá definir a la ganga como *conjunto de minerales de una mena que no poseen un valor comercial en el momento de su explotación*. El cuarzo, la limonita, la calcita, la dolomita, los feldespatos y el granate representan algunos de los minerales de ganga más comunes asociados a las menas. Resulta conveniente aclarar que dos menas pueden resultar totalmente diferentes en cuanto al contenido de minerales de ganga.

La problemática de los minerales ha tenido dos aspectos fundamentales y distintivos: primero encontrarlos, ya que en conjunto representan una porción infinitamente pequeña del área continental del planeta y segundo separar de la ganga aquellos que resulten comerciales en la forma más económica posible. El trabajo de separación de la ganga es la terminación realizada por la mano del hombre del proceso de concentración iniciado por la naturaleza.

### 1.1.3 Roca

Una roca es un agregado de dos o más minerales, por lo que casi todas ellas están formadas por asociaciones de minerales, excepto las rocas vítreas las cuales están constituidas por vidrio volcánico en lugar de minerales. Genéricamente las rocas se dividen en tres grandes grupos:

Ígneas  
Sedimentarias  
Metamórficas

La figura 1.1, representa el diagrama del ciclo de las rocas, donde se observa que cuando se encuentran alojadas en la corteza terrestre, pueden sufrir transformaciones que van de ígneas a sedimentarias y a metamórficas repetidamente a través de diversas secuencias posibles. El diagrama aun podrá mostrar otras alternativas; por ejemplo, el magma podrá formar rocas ígneas volcánicas o rocas extrusivas y cualquiera de estos grupos o ambos podrán sufrir metamorfismo, reducirse a

sedimentos o fundirse otra vez para iniciar una nueva generación de cuerpos ígneos. Las rocas de las cadenas montañosas activas, están sujetas a los más frecuentes y radicales cambios.

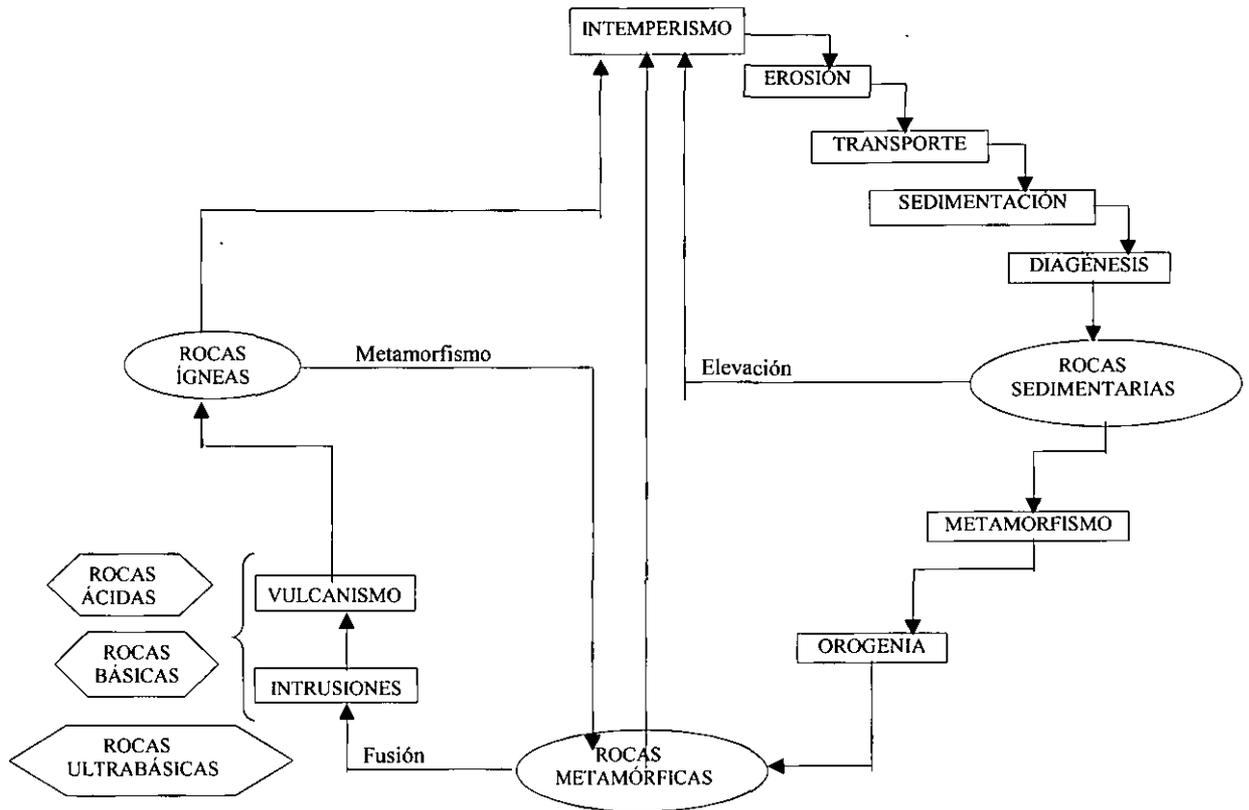


FIGURA 1.1 Diagrama del ciclo de las rocas y sus fenómenos geológicos asociados

## 1.2 Definición de términos mineros mexicanos

En la minería como en cualquier actividad humana se utiliza una terminología especial. En México se ha acuñado un número considerable de términos mineros, algunos de los cuales datan de la Colonia y continúan en uso hasta la fecha, otros han desaparecido o han sido reemplazados por nuevos.

Muchos de los términos mineros aquí definidos son de uso local y pueden tener diferente significado según el distrito minero. Por ejemplo, el lenguaje minero de Chihuahua puede ser diferente del usado en Pachuca o Real del Monte. Por otra parte, aunque existen formas locales de expresión, durante muchos años los trabajadores mineros han emigrado temporalmente de un distrito minero a otro. Esto ha creado una corriente constante de comunicación entre mineros de diferen-

tes lugares. También a medida que algunas minas se mecanizan o se desarrolla una nueva tecnología minero-metalúrgica surgen nuevos términos mexicanos, de los cuales sólo unos cuantos se consignan en este trabajo. Será interesante continuar la investigación del significado de un mayor número de términos mineros mexicanos, donde seguramente la mejor fuente de información serán los profesionistas de experiencia en la minería. Muchos de los términos mineros descritos en este trabajo, fueron compilados por Antúnez en 1958; otros no aparecen en ningún diccionario o bien tienen diferente significado. Deliberadamente se omitieron términos geológicos, así como nombres de minerales y rocas.

## 1.2.1 Glosario de términos mineros mexicanos

<b>Abra</b>	Hueco, fractura, hendidura o cavidad en la roca.
<b>Abrigo</b>	Ancho o potencia de una veta.
<b>Abrigo</b>	Espesor de tepetate que cubre un cuerpo mineral.
<b>Acarreo</b>	Transporte de mineral.
<b>Acequia</b>	Pequeño canal de desagüe.
<b>Ademe perdido</b>	Ademe provisional no recuperado.
<b>Ademadores</b>	Personal encargado de ademar.
<b>Ademe</b>	Revestimiento de madera en las obras mineras.
<b>Ademe</b>	Sostenimiento de labores con madera, acero, concreto, etc., para mantenerlas abiertas.
<b>Atacador</b>	Trozo cilíndrico de madera con el que se presiona los cartuchos de explosivo dentro del barreno.
<b>Aurífero</b>	Que contiene oro. Relativo al oro.
<b>Azogue</b>	Mineral de mercurio. Mercurio nativo.
<b>Bajío</b>	Terreno bajo casi plano.
<b>Bajo</b>	Bloque inferior de una veta. Contacto inferior de una veta.
<b>Bajo</b>	Tabla. Reliz inferior de la veta.

<b>Banco</b>	Terraplén macizo usado como camino.
<b>Banco</b>	Explotación escalonada.
<b>Barra</b>	(Real del Monte). Contratista minero.
<b>Barras mixtas</b>	Barras metálicas cuyos contenidos principales son oro y plata. Metal Doré.
<b>Barrenación</b>	Grupo de barrenos perforados en una obra minera. Acción y efecto de barrenar.
<b>Barreno</b>	Perforación practicada en la roca para detonarla con explosivos.
<b>Barreno a diamante</b>	Perforación en la que se utiliza brocas con insertos de diamante.
<b>Barretero</b>	Minero que trabaja a mano con barra y marro.
<b>Barrial</b>	Amplio valle intermontaño.
<b>Beneficio mineral</b>	Operación metalúrgica tendiente a producir metales o concentrados a escala industrial.
<b>Blandujal</b>	(S.L.P.). Terreno blando. Arcilla de falla.
<b>Bocamina</b>	Entrada principal a la mina. Portal de entrada. Socavón.
<b>Caídos</b>	Bloques o fragmentos de roca desprendidos.
<b>Caja de agua</b>	Depósito de agua. Sumidero.
<b>Cal</b>	Sinónimo de caliza.
<b>Calavereo</b>	(Zacatecas). Brecha mineralizada.
<b>Calcinados</b>	Productos minerales resultantes de la calcinación o tostación.
<b>Calesero</b>	Trabajador encargado de operar la calesa.
<b>Caliche</b>	Costra de carbonato de calcio.
<b>Cama</b>	Guarnición de madera en el techo o cielo.
<b>Cantera</b>	Cualquier roca usada en la construcción, con fines de ornato. (Ej. cantera rosa de Zacatecas).

<b>Cigüeña</b>	Malacate manual muy rudimentario.
<b>Clavo</b>	Cuerpo mineral aislado de alta ley y dimensiones limitadas. Zona de concentración natural de un mineral.
<b>Cochero</b>	Minero encargado de empujar un carro minero o góndola.
<b>Cola</b>	Última porción de una tentadura.
<b>Colas(Metalurgia).</b>	Material deprimido en el fondo de las celdas de flotación.
<b>Colas finales</b>	Arenas de desecho final, producto del proceso de flotación. Arenas estériles. Jales.
<b>Guía mineral</b>	Característica geológica que indica proximidad a zonas o áreas mineralizadas.
<b>Jales</b>	Lodos o arenas de desperdicio, producto de plantas de beneficio. Colas finales del proceso de flotación.
<b>Jaula</b>	Ascensor de entrada y salida de una mina.
<b>Jaula</b>	Calesa. Elevador de una mina.
<b>Mineral potencial</b>	Mineral supuestamente existente en un depósito o en un cuerpo.
<b>Mineral probable</b>	Mineral estimado que se evalúa conociendo dos caras de un bloque.
<b>Mineral probado</b>	Mineral positivo, mineral bloqueado o mineral demostrado.
<b>Pegar con batería</b>	Detonar explosivos (cebados con estopines eléctricos), usando una batería eléctrica.
<b>Pendiente</b>	Inclinación. Ángulo de buzamiento.
<b>Peñascal</b>	Terreno con abundancia de peñascos.
<b>Peñón</b>	Prominencia topográfica de relieve alto y forma angular en la cima.
<b>Pepenar</b>	Seleccionar a mano el mineral de más alta ley.
<b>Pepita</b>	Fragmento de metal nativo de oro o plata. Nuez.
<b>Polvorín</b>	Almacén o depósito de explosivos.

<b>Poste</b>	Pieza de madera usada para fortificación. Pie derecho. Puntal.
<b>Potencia de veta</b>	Espesor o ancho de una veta, medido perpendicularmente a sus respaldos, paredes o tablas.
<b>Pozo</b>	Obra minera sensiblemente vertical colada de arriba hacia abajo, que sirve como comunicación entre niveles, como obra de ventilación y como chorreadero de material rocoso.
<b>Pozo de arrastre</b>	Tiro interior inclinado. Contratiro inclinado.
<b>P. P.</b>	(Término topográfico). Punto de partida.
<b>Precipitados</b>	Productos resultantes de la precipitación química de soluciones hidrometalúrgicas.
<b>Presa de jales</b>	Depósito de arenas estériles producidas en las plantas de beneficio de minerales.
<b>Veta echada</b>	Veta muy inclinada.
<b>Veta madre</b>	Cuerpo potente o veta principal que atraviesa un distrito minero.
<b>Winche</b>	Malacate portátil empleado en las faenas de rezagado en el interior de los rebajes.
<b>Winze</b>	Pozo.
<b>Yucle</b>	Camión de volteo con capacidad superior a treinta y cinco toneladas, usado en las grandes operaciones a cielo abierto.
<b>Yucle</b>	Degeneración de la palabra <i>euclide</i> . Camión de volteo de gran capacidad. Camión "fuera de carretera". <i>Off-of-road</i> .
<b>Zoquete</b>	(Norte de México). Lodo.

### 1.3 La minería y su contribución al desarrollo del hombre

Durante la era paleolítica el hombre, según los hallazgos obtenidos, hizo de las rocas sus principales armas e instrumentos de trabajo. Aun cuando utilizó también la madera y el hueso, es posible suponer que de un modo inteligente se fueron perfeccionando no sólo los artefactos en cuanto a tales, sino también los procedimientos. El detalle más sobresaliente en el desarrollo de la tecnología de ese entonces fue el invento de herramientas para fabricar otros instrumentos.

En la búsqueda de los elementos de la naturaleza y por impulsos de necesidades perentorias, el hombre encontró los metales. El uso y aprovechamiento de éstos dio ocasión para que apareciera una nueva etapa en su desarrollo, la que se llamó *edad de los metales*. Esta era se distingue inmediatamente por las evidencias arqueológicas encontradas que provienen de la fabricación de armas y utensilios de bronce y hierro (lanzas, espadas, puñales, anillos, alfileres, vasijas etc.). Durante esta etapa, el hombre alcanzó un gran desarrollo técnico y artístico, por lo que se puede afirmar otro tanto de los objetos de barro, que previa cocción se transformaron en cerámica.

El hombre, que desde la prehistoria usó (además de sus manos) otros instrumentos para la realización de sus labores, aprendió a forjar herramientas y después máquinas. Las primeras herramientas fueron objetos movidos por una fuerza natural, en tanto que las máquinas existieron desde que los seres humanos se ingeniaron para aprovechar la fuerza del viento o del agua como elementos capaces de impulsar sus vehículos e instrumentos. Más tarde se aprovechó el vapor y, con posterioridad, el petróleo, la electricidad y más recientemente la energía atómica. En tales términos, como lo apunta Arthur Birnie, fue el descubrimiento de la máquina de vapor lo que permitió que se pudiera contar con fuerza motriz en cualquier sitio y en cualquier circunstancia para acelerar la producción industrial. El contar con el vapor permitió la obtención de un mayor número de mercancías, al tiempo que hizo posible una especialización en las tareas de los operarios. Por la acción del vapor, las máquinas tuvieron que fabricarse de hierro para ser más resistentes y robustas, lo que condujo a la necesidad de llevar a cabo una explotación más intensa de los yacimientos de dicho metal, así como a la búsqueda de mejores métodos destinados a su fundición. En sus inicios, los establecimientos que fundían hierro, emplearon como combustible el carbón de leña; más tarde, a mediados del siglo XVIII, se optó por el carbón mineral en bruto y finalmente se utilizó el carbón de coque, con lo que las actividades de explotación minera en las cuencas carboníferas, se vieron multiplicadas.

En la actualidad, la minería juega un papel de primerísima importancia en la economía de todos y cada uno de los países que conforman el planeta, debido fundamentalmente a que dicha actividad provee una gran cantidad de materias primas que, mediante previo tratamiento metalúrgico, proporciona al hombre satisfactores a sus diversas necesidades. La minería como tal es considerada como una industria generadora de riquezas, pues en todos los países donde se practica representa una aportación importante de divisas al Producto Nacional Bruto (PNB).

## **1. 4 La evolución de la tecnología minera y su influencia en la vida económica del hombre**

Históricamente la evolución de la tecnología minera ha sido dividida en las siguientes edades o periodos:

### **1. Edad de piedra**

Durante esta época, el hombre empezó a depender del reino mineral desde el momento mismo en que tuvo la necesidad de emplear una piedra atada a un palo para proveerse de un martillo como herramienta de trabajo o de pedazos de pedernal o rocas duras, que afiladas, las empleó como puntas de flechas y lanzas para proporcionarse armas de defensa e instrumentos de cacería.

### **2. Edad de bronce (o de los metales prehistóricos)**

En este período, el hombre utilizó la plata (Ag), el oro (Au), el cobre (Cu), el estaño (Sn), el plomo (Pb) y el hierro (Fe) para su bienestar económico. El oro y la plata los conoció en forma nativa en los depósitos aluviales de los ríos (placeres); el plomo y el estaño debido a su fácil fusión, se cree que los descubrió en forma accidental en algún incendio forestal; el hierro lo conoció en forma de meteoritos desprendidos de cuerpos celestes que cayeron a la Tierra.

Los egipcios encontraron plata, pero la explotaron muy poco; el oro lo obtenían de sus minas en Nubia; el cobre lo explotaron en la península del Sinaí y en la isla de Chipre; el hierro lo conocieron muy escasamente en forma de meteoritos. Sin embargo destacaron notablemente en las artesanías de alfarería, confeccionaron vasijas y platos de gran belleza a base de arcilla cocida.

Los fenicios y cartagineses descubrieron y aprovecharon el estaño de la zona que hoy en día se conoce como Cornwall (Inglaterra). Trabajaron el oro en Rodesia (África) y explotaron plata, plomo, cobre y mercurio en la península Ibérica. Griegos y macedonios en esta época poseían tres minas de oro y plata en el Monte Láureo, cerca de Atenas. Los macedonios tenían minas muy ricas de oro, las cuales aprovechó Filipo el Macedonio (padre de Alejandro Magno) para financiar su poderío. El Imperio Romano fincó su dominio en las minas arrebatadas a los fenicios, egipcios, cartagineses y griegos. Durante el esplendor de los romanos, la minería se desaprobó en la península Itálica, sede del Imperio, por considerarse un trabajo propio de esclavos, razón por la cual, ningún ciudadano romano de categoría debería dedicarse a la minería. Las únicas minas que trabajaron los romanos fueron las que poseían en sus colonias y territorios conquistados.

La cultura china floreció en forma paralela a la de los egipcios, fenicios y griegos. Se tienen noticias de que los chinos ya usaban cadenas de hierro en puentes levadizos antes de Jesucristo. La gran muralla china se terminó de construir en el siglo III a. C., con una longitud aproximada de 2250 km y 7 metros de altura a lo largo de su frontera norte. Su cresta o parte superior tiene un ancho suficiente como para permitir la circulación de carretas. La muralla se encuentra revestida de rocas graníticas y ladrillos cocidos.

Cuando Cristóbal Colón llegó a América, se encontró que la mayoría de las tribus que habitaban el Nuevo Mundo vivían en la edad de piedra hablando en términos minero-metalúrgicos, a excepción de los aztecas y los incas que ya conocían y trabajaban el oro y la plata. Los mayas con sus magníficas pirámides daban muestra de su avanzada arquitectura.

### 3. Edad Media

A la caída del Imperio Romano en el siglo IV d. C., surge la Edad Media (siglos IV a XV), durante la cual inexplicablemente la minería sufre un estancamiento y consecuentemente la humanidad detiene su desarrollo. Los únicos lugares donde se continuó la actividad minera fue en Cornwall (Inglaterra) explotando estaño, cobre, plomo y plata; y en Sajonia (Alemania) donde se explotó plata, plomo, cobre, zinc y estaño. El Renacimiento surge en el siglo XV, época durante la cual se construyeron las grandes catedrales y obras de importancia arquitectónica en Europa. Durante esta época aumenta considerablemente el consumo de materiales de construcción de origen mineral. Es en esta época cuando surge la grandeza de España como potencia mundial, quien domina al mundo durante 100 años, gracias a las riquezas minerales (especialmente oro y plata), traídas de sus colonias en América, básicamente de México y Perú. Una buena parte de oro y plata extraídos de México y Perú pasó a poder de Inglaterra a través de sus piratas, los cuales atacaban, robaban y saqueaban a los galeones españoles que transportaban las barras de los metales a España.

### 4. Revolución industrial y época moderna

La revolución industrial (siglos XVI a XVII) quedó marcada por la aparición de la máquina de vapor de Jaime Watt en Inglaterra. Aunado a este descubrimiento comienza el uso a gran escala del carbón mineral empleado como combustible, una vez que el carbón vegetal y la leña empezaron a dar muestras de agotamiento y de destrucción ecológica. El carbón resulta importante por dos razones poderosas: a) por su poder calorífico y b) por su alto poder reductor. Por su alto poder ca-

lorífico se empleó como combustible en las grandes calderas para producir calor y éste a su vez mover turbinas que generarían electricidad. Por su poder reductor se empezó a emplear como combustible en forma de coque para la fusión del hierro, dando origen a los aceros, los cuales resultaron ser muy resistentes a la tensión y a la compresión.

En el siglo XIX, Inglaterra se convirtió en el primer líder industrial mundial, debido al descubrimiento y empleo del carbón y el acero. En 1865 la producción de hierro y acero solamente en Inglaterra fue superior a la del resto del mundo. A fines del siglo XIX (1895), Estados Unidos y después Alemania sobrepasaron a Inglaterra en la producción mundial de este metal, con lo que se empezó a marcar la superioridad y poderío de los Estados Unidos de América como potencia mundial industrial.

En la actualidad, salvo los ajustes estadísticos correspondientes la producción mundial de acero y carbón, sigue aproximadamente el siguiente orden:

#### Productores mundiales de acero

Lugar	País
1°	Estados Unidos de América
2°	Unión Soviética
3°	Japón
4°	Alemania
5°	Inglaterra
6°	Francia
7°	Italia

#### Productores mundiales de carbón

Lugar	País
1°	Unión Soviética
2°	Estados Unidos de América

#### Reservas mundiales de carbón (millones de toneladas)

	Antracita y bituminoso	Sub-bituminoso y lignito	Total	Porcentaje mundial
US	111,338	135,305	246,643	25.1
Rusia	49,088	107,922	157,010	15.9
China	62,200	52,300	114,500	11.6
Australia	47,300	43,100	90,400	9.2

India	72,733	2,000	74,733	7.6
Alemania	24,000	43,000	67,000	6.8
Sur Africa	55,333	0	55,333	5.6
Ucrania	16,388	17,968	34,356	3.5
Kazakhstan	31,000	3,000	34,000	3.5
Polonia	12,113	2,196	14,309	1.4
Brasil	0	11,950	11,950	1.2
Canadá	4,509	4,114	8,623	0.9
Colombia	6,368	381	6,749	0.7

Source: BP Statistical Review of World Energy. Mining Magazine, September 2001

Dentro de los países latinoamericanos un productor importante de carbón es Colombia, aunque aún no aparece clasificado en un lugar de primera magnitud dentro de las estadísticas mundiales. Las tablas anteriores reflejan claramente que tanto en la actualidad como en épocas anteriores, el poderío industrial, estratégico y militar de una nación depende directamente de la abundancia y diversidad de sus recursos naturales. En la época moderna, los combustibles, minerales y metales básicos, se pueden clasificar de la siguiente manera:

### 1. Combustibles

Petróleo

Gas natural

Carbón mineral

- 2 Coquizables (contenido de cenizas menor del 15%)
- 2 No coquizables (contenido de cenizas mayor del 15%)

Minerales radioactivos

- 2 Uranita, pitchblenda, carnotita, torianita, etc.

### 2. Metales

Metales siderúrgicos

- 2 Hierro, manganeso, níquel, cobalto, vanadio, cromo

Metales tradicionales

- 2 Plomo, cobre, zinc, estaño

Metales ligeros

- 2 Aluminio, magnesio, titanio

Metales raros

- 2 Radio, berilio

Metales preciosos

2 Oro, plata, platino

3. No-metálicos

Minerales industriales

a) Materiales de construcción

2 Basalto, caliza, yeso, arcilla, grava, arena

b) Industria química

2 Azufre, cloruro de sodio (sal común)

c) Industria de fertilizantes

2 Roca fosfórica, potasa, nitratos diversos

El Producto Nacional Bruto (PNB) de un país o de una entidad se define como el valor total de bienes y servicios a precios de mercado. En México las industrias extractivas contribuyeron hasta hace algunos años con un 7% aproximadamente a dicho Producto Nacional Bruto.

### **Características distintivas de la industria minero-metalúrgica**

Estas características únicas y distintivas se reducen a cinco puntos importantes:

- a) Los yacimientos minerales no se encuentran distribuidos uniformemente en la corteza terrestre.
- b) Estos yacimientos se consumen o se agotan con su explotación, por lo que son considerados como recursos naturales no renovables.
- c) Las materias primas provenientes de estos yacimientos poseen diversas propiedades que los capacitan para usos y aplicaciones muy variadas.
- d) Algunos criaderos minerales se encuentran concentrados en ciertos países por caprichos geológicos y geográficos.
- e) La búsqueda, descubrimiento, explotación y beneficio de los criaderos minerales requiere del uso de técnicas exclusivas y altamente especializadas.

### **1.5 Síntesis histórica de la minería en México**

El oro que a raíz de la Conquista cayó en manos de los españoles provenía de placeres auríferos y no de minas propiamente dichas. El mismo Cortés recibió como obsequio de Moctezuma Xocoyotzin una porción de oro nativo con valor de 162,000 pesos, de los cuales tenía que entregar una

quinta parte a la Corona de España, según la información que proporcionó el barón de Humboldt, aunque de acuerdo con los datos de Bernal Díaz del Castillo, la cantidad fue sensiblemente mayor.

Es probable que además del oro, los indígenas antiguos, particularmente los toltecas, conocieron también la plata a la que llamaban *iztac-teoquitlatl*, mientras que al oro le aplicaban el nombre de *coztic-teoquitlatl*. Con el uso de estos términos, que para el europeo resultaban algo extraños (significaban excremento de los dioses, amarillo y blanco respectivamente), quedó demostrado que los nativos conocían tales metales únicamente en estado puro. La plata existía en muy pocas cantidades y quizá la palabra *iztac-teoquitlatl* se originó hasta después de conocer en la Nueva España la *plata española*.

Los mismos indígenas conocían la mica: *metzquitlatl* o excremento de la luna y el cobre: *tepuchtli* o hinchazón de la piedra (en lengua azteca), metal que usaban en la fabricación de sus armas, vasijas, herramientas de labranza, objetos de adorno e idolillos. Tenían especial habilidad en endurecer el metal rojo (amartillándolo) para fines especiales y es indudable que les era conocido el procedimiento de fundición y hasta el de liga con el estaño.

Humboldt menciona en su ensayo político, que los aztecas traían el plomo: *temetzli* o piedra luna y el estaño: *amochitl* o vapor de agua, de Taxco e Ixmiquilpan, dato que resulta inexacto. Tampoco es cierto aquello de que el cobre había sido traído en estado puro de la región de los grandes lagos de Norteamérica y de América Central a cambio de minerales de oro y plata que provenían de las minas mexicanas de Zacatollan y Coahuico, ya que el laborío o explotación de minas, no era conocido por los indígenas. El mismo Alejandro Humboldt menciona en sus escritos:

“La explotación de minas fue totalmente desconocida por los aztecas; y si acaso emprendieron algunos trabajos en las vetas, éstos fueron de muy poca profundidad e insignificantes”.

Se limitaban pues, a obtener el oro y la plata de los placeres de ríos y arroyos, o en forma nativa en los crestones o afloramientos de las vetas.

Con la repentina llegada de los españoles, la cultura de los indígenas mexicanos experimentó un profundo cambio. Los conquistadores, amaestrados en su patria para los trabajos de la minería, establecieron nuevos lugares de explotación de minerales. A medida que progresaban en la conquista y en la exploración de los nuevos territorios, seguían descubriendo nuevas y ricas vetas, las cuales daban origen al fomento y desarrollo de florecientes empresas mineras.

En todas partes donde el territorio conquistado fue explorado, se descubrieron yacimientos minerales más o menos importantes, lo que el barón de Humboldt aprovechó para aprender más a cerca

del pasado histórico de estas minas, para lo cual no dejó de tomar debida nota de ello, por lo que gracias a la inquietud de este hombre de ciencia, se han podido recopilar datos importantes con relación a una serie de antiguos distritos mineros localizados dentro del territorio nacional.

A continuación se presentan los datos de Humboldt, junto con aportaciones y suplementos que han llegado hasta nuestra época, los cuales dan una idea aproximada del rápido desarrollo de la minería en México.

### 1.5.1 Desarrollo cronológico de la minería en México

Año	
800	La orfebrería florece durante el período clásico en Monte Albán, Oaxaca, posiblemente con oro de placer de Tepeucila.
1000	Minado precolombino de mercurio en Soyatal, Qro., probablemente para usarlo como pigmento.
1500	Posible minado precolombino de plata en las regiones de Taxco, Real del Monte, Zimapán, Tlalpujahua y Sultepec.
1519	Establecimiento de la primera fundición de fierro en la Villa Rica de la Veracruz, por Hernán Martín para la fabricación de armas del conquistador Hernán Cortés.
1521	Año inicial de la minería en México, en el cual, Hernán Cortés abre las minas de Taxco, Gro., con el socavón del Rey. Ésta es la primera mina en México y en Américas, operada por europeos.
1521	Descubrimiento de las minas de plata en el Chico, Hgo., de acuerdo con los registros encontrados en la iglesia del mismo lugar. Primeros embarques de plata a España.
1524	Descubrimiento de las minas de plata en Sultepec, Edo. de México y en Pachuca, Hgo.
1536	Se inicia la construcción de la primera Casa de Moneda del Nuevo Mundo en la Cd. de México. Se acuña la primera moneda llamada <i>Carlos y Juana</i> .

- 1537 Se inaugura la Casa de Moneda de México y se acuña la moneda conocida como *macuquina* o *cruz*.
- 1538 Un fraile franciscano descubre las vetas de *Los Leones* y *Santa Isabel* que dan origen al distrito minero de Charcas.
- 1540 Descubrimiento de los primeros yacimientos de plata en lo que hoy en día es la ciudad de Zacatecas.
- 1543 Se establece una fundición para minerales auro-argentíferos en Sultepec, Estado de México.
- 1544 Descubrimiento de las minas de plata-plomo de *Santa Bárbara*, distrito de Parral, en el estado de Chihuahua.
- 1546 Descubrimiento de las minas de plata de *San Martín*, Zacatecas.
- 1546 El capitán español Juan de Tolosa descubre ricos filones de plata en la mina de *San Bernabé*, al pie del cerro de la Bufa, en lo que hoy es el estado de Zacatecas.
- 1547 Fundación de la Real y Pontificia Universidad de México.
- 1548 Se trabajan por primera vez, los ricos depósitos argentíferos de la mina *Bolaños*, en el estado de Jalisco.
- 1548 Se inician labores en las minas de plata del distrito de Guanajuato, precisamente en la mina *San Bernabé*, al oeste de *La Luz*, en el valle del río de Las Palmas.
- 1548 Juan de Tolosa, Diego de Ibarra y asociados comienzan a operar la mina de plata de Alvarado en Veta Grande, Zacatecas.
- 1548 Época de bonanza, dan principio los trabajos en la veta de *Los Tajos de Pánuco*, Cohauila.
- 1549 Se descubren los depósitos argentíferos de Sultepec.

- 1550 Se inician las experimentaciones con el proceso de amalgamación, para la obtención de oro y plata con mercurio.
- 1550 Juan de Rayas, un muletero español, descubre la veta madre de Guanajuato, y se inicia el minado superficial en los afloramientos del filón, en las minas de *Rayas y Mellado*.
- 1550 Por el 15 de abril se procede a las primeras labores de cateo y reconocimiento de la *Veta Madre* de Guanajuato y la mina de *Rayas*.
- 1551 Comienzan los primeros trabajos en la veta del *Rosario, El Jacal y El Encino*, en el distrito de Real del Monte, en el estado de Hidalgo.
- 1552 Ginés Vázquez del Mercado encuentra en su marcha hacia el norte, los grandes depósitos de fierro del famoso Cerro de Mercado, en el actual estado de Durango.
- 1554 Francisco de Ibarra descubre las vetas del Cerro de Proaño en Fresnillo, Zacatecas.
- 1555 Juan de Tolosa descubre los depósitos de plata en Sombrerete, Zacatecas y las minas de *Avino* en Durango.
- 1557 Fray Bartolomé de Medina descubre en las instalaciones de la mina *La Purísima* (Pachuca, Hgo.), el importante procedimiento metalúrgico conocido como “método de patio”, empleado en la extracción de valores metálicos de oro y plata. El procedimiento consistía en tratar el mineral previamente triturado con sales de cobre, para después atacarlo con azogue (mercurio), hasta dejar amalgamados los minerales nobles o ricos. Posteriormente, se destilaba la amalgama para obtener los metales puros. El tratamiento que se empleaba con anterioridad al de “patio”, era el de fundir con óxido de plomo (litargirio) los minerales de oro-plata.
- 1558 Empiezan los trabajos subterráneos de la mina de *Mellado*, en Guanajuato.
- 1563 Francisco de Ibarra funda en el mes de julio, la ciudad de Durango como capital del reinado de Nueva Vizcaya.

- 1564 Rodrigo del Río y Loza descubre la mina de *Santa Bárbara* en Chihuahua. Se dice que la ley del mineral era de cerca de 2700 gramos de plata por tonelada.
- 1574 Comienzan las labores mineras por plata en Real de Natividad en el estado de Oaxaca, por Juan de Oñate, nieto de Hernán Cortés y bisnieto de Moctezuma II.
- 1580 Descubrimiento de minerales de plata en el cerro de San Pedro, S.L.P., por Pedro Iriarte y Miguel Calderón.
- 1583 Descubrimiento de las minas de Charcas en S.L.P.
- 1591 Fundación de la ciudad de San Luis Potosí.
- 1591 Descubrimiento de la mina *Santa Eulalia* en Chihuahua.
- 1596 Fundación de la ciudad de Monterrey, Nuevo León.
- 1598 Empiezan los trabajos de explotación en los criaderos de Mapimí, en el estado de Durango.
- 1600 Descubrimiento de las primeras vetas de plata en Parral, Chihuahua. Fundación de Parral por Antón Martín Zapata.
- 1606 Se establece otra Casa de Moneda en la ciudad de Zacatecas.
- 1615 Se descubren ricas vetas de plata en el distrito de Guadalcázar, San Luis Potosí, por Juan de Ábrego.
- 1632 Comienza la explotación de las vetas argentíferas de la mina *Nevada* en Batopilas, Chihuahua.
- 1632 Se inician operaciones en la mina de plomo-plata de *Lomo de Toro* en Zimapán, Hidalgo.
- 1640 Descubrimiento de las minas de Angangueo en Michoacán.
- 1658 Francisco de Molina descubre las minas de plata en San Francisco del Oro, Chihuahua.

- 1666 Se abre un laborío en Cusihiuriachic, Chihuahua, para la explotación de ricas minas de plata.
- 1673 Descubrimiento de la mina *Clarines* en Santa Bárbara, Chihuahua.
- 1676 Por primera vez en México se usa pólvora negra aplicada a una explotación minera, en las minas del cerro San Pedro, San Luis Potosí.
- 1700-1730 Nuevo auge en Zacatecas y Guanajuato. Se abren nuevas minas: *La Asturiana*, *Nueva Granada*, *San Pascual*, *Cabrestante* y *Tecolotes* en el distrito de Veta Grande; *Refugio*, *Rayas*, *Rondanera*, *Peregrina*, *San Clemente* y *Guadalupe* en el distrito de San Bernabé. Estas minas fueron explotadas por Gregorio Zumialde, Juan de Dios de la Campa e Ignacio Arrieta.
- 1725 Se inicia la explotación de plata en Sonora, en la mina *Planchas de Plata* del distrito de Magdalena.
- 1740 Comenzaron los trabajos en los criaderos de oro y plata en *Minas Prietas*, distrito de Hermosillo, Sonora.
- 1740 Primeros depósitos de grafito en San José de Moradillas, Sonora.
- 1749 Don Pedro Romero de Terreros, antiguo comerciante de Santander, España, descubre los ricos filones de Real del Monte, en el estado de Hidalgo y, asociado con José Bustamante, empiezan a trabajar las minas.
- 1760 El venturoso minero Antonio Obregón que más tarde llevó el título de Conde de Valenciana, inicia la explotación de la riquísima mina de *La Valenciana*, que por muchos años fue la primera del mundo por la abundancia de sus productos auro-argentíferos. Esta mina se localiza sobre la Veta Madre, en lo que hoy es la ciudad de Guanajuato.
- 1760 Después de 11 años de exploración y desarrollo, se encuentra mineral redituable en Real del Monte, y se construye la primera planta de tratamiento de mineral en la hacienda de La Regla, en Pachuca, Hidalgo.
- 1760 Se decretan las *Reales Ordenanzas de Minería* en Madrid.

- 1762 Se registra la primera bonanza en la veta Vizcaína de las minas de Real del Monte. Pedro Romero de Terreros amasa grandes riquezas y presenta al Rey una fragata de guerra armada; en agradecimiento a sus servicios, es nombrado Conde de Regla.
- 1766 En julio estalla la primera huelga en una mina de la Nueva España; ésta se efectúa en Real del Monte, Pachuca, contra su dueño, Pedro Romero de Terreros.
- 1773 Se inicia la explotación de las pertenencias mineras de Cerro Viejo, en el distrito de Real de Catorce, S.L.P. Los primeros trabajos de explotación en este lugar los realizan Sebastián Coronado, Bernabé Antonio de Zepeda, Antonio Llanos y Manuel Martínez.
- 1774 Pedro Romero de Terreros, conde de Regla, funda el Nacional Monte de Piedad o Casa de Empeño. Él mismo contribuye con los fondos y dicta las reglas para gobernar esta institución de caridad, la cual sigue operando después de más de 200 años.
- 1780 En el estado de San Luis Potosí se da comienzo a la explotación de la mina *Purísima Concepción*.
- 1783 Fundación del Real Seminario de Minería (Escuela de Minas) en la Ciudad de México. Joaquín Velázquez de León es su primer director.**
- 1785 Se inician formalmente las labores en la mina aurífera de *Natividad*, en el estado de Oaxaca.
- 1786 Fundación de la Escuela de Ingeniería, Minería y Metalurgia en Guanajuato, la cual da origen a la Universidad de Guanajuato.
- 1790 Se hace uso por primera vez de mulas y caballos para la formación de las llamadas “tortas” en el procedimiento de patio. Este tipo de beneficio metalúrgico resultaba altamente perjudicial para la salud de los trabajadores.
- 1790 En abril don Andrés Manuel del Río imparte el primer curso sobre mineralogía en el Real Seminario de Minería de la Ciudad de México. También se le comi-

siona para traducir el libro *Teoría de criaderos metalíferos*, de Abraham Werner.

- 1791 Francisco Cayetano de Fagoaga descubre la veta *Pabellón* del distrito minero de Sombrerete, Zacatecas.
- 1792 **Inauguración oficial del Real Seminario de Minas, presidido por Fausto de Elhúyar Suvise y en presencia de Andrés Manuel del Río, Francisco Javier de Gamboa, Joaquín Velázquez y Cárdenas de León y A.P. Alzate y León y Gama. Ésta es la primera escuela técnica en la Nueva España.**
- 1794 Descubrimiento de las minas de *Naica* y *Saucillo* en Chihuahua, por Alejo Hernández, Vicente Ruiz y Pedro Ramos de Verea. El denuncia se hizo bajo el nombre de San José de Sacramento, localizado en la cañada del Aguaje de la sierra de Naica.
- 1797 Se inician los trabajos de construcción del Palacio de Minería, donde se reubicará el Real Seminario de Minería. El proyecto se le encarga al arquitecto Manuel Tolsá.
- 1799 Descubrimiento de los placeres de oro en Altar, Sonora.
- 1802 Frau Sonneschmidt encuentra los primeros yacimientos de los “ópalos de fuego” en la barranca de Tolimán en el estado de Querétaro. Antes ya se conocía el ópalo, pero con el descubrimiento de estos yacimientos, la explotación de esta gema se hizo sistemática.
- 1802 Andrés Manuel del Río menciona la existencia de un nuevo elemento que él llama *erytronium* en los depósitos de plomo de Zimapán. Este elemento es más tarde redescubierto, descrito y nombrado vanadio por von Sefstroma en Suecia.

Éstos fueron los principales acontecimientos en la minería mexicana hasta antes de la llegada del barón de Humboldt, cuyas anotaciones se deben en gran parte a él mismo. Se informa detalladamente acerca de las técnicas mineras de la época y el mismo Humboldt habla de las tablas estadísticas desde sus primitivos inicios.

Cuando se inició la lucha por la independencia de México, se despoblaron las minas; descansaron de su labor la barreta y el martillo, las herramientas del minero. Las arrastras se hallaban desiertas

debido a que los propios mineros que antes empuñaban el mazo para arrancar de las entrañas de la Tierra el precioso metal tomaban ahora las armas, obedientes a la voz de la patria que pedía la libertad de México.

Once años duró la lucha por la libertad. Los horrores de la guerra causaron incontables heridas al país, sin embargo, el nuevo gobierno del México vencedor supo curarlas con sabias disposiciones y, de las cenizas humeantes, habría de nacer una nueva vida. En la época de Humboldt, según las noticias, ya se explotaban cerca de 3000 vetas.

- 1810 Descubrimiento de los criaderos de plata en el Refugio, estado de Chihuahua y construcción de la primera planta de amalgamación conocida como *El Real de Tahonitas*.
- 1811 El Real Seminario de Minería es transferido al Palacio de Minería, a pesar de que el edificio no está totalmente terminado.
- 1813 Se termina de construir el Palacio de Minería en abril.
- 1821 Instalación de la primera máquina de vapor traída de Inglaterra en Real de Cuatorce, San Luis Potosí, para el desagüe de sus minas.
- 1823 El 8 de octubre, el Congreso Nacional de la joven República Mexicana aprobó la resolución de conceder a los extranjeros, bajo ciertas condiciones el derecho de adquirir minas dentro del territorio nacional, y fueron las compañías inglesas las primeras en aprovechar este tipo de concesión.
- 1824 Se reinicia la explotación de las vetas de plata del cerro de Proaño en Fresnillo, en el estado de Zacatecas.
- 1840 Se inauguran los trabajos en la mina de *La Luz*, en la ciudad de Guanajuato se obtiene una notable bonanza en el período comprendido de 1843 a 1847.
- 1855 Se descubren criaderos de ópalo fino en San Juan del Río en el estado de Querétaro.
- 1866 Jacobo Kucaler aconseja la explotación de los yacimientos de carbón en Sabinas, estado de Coahuila.

- 1870 Principian los trabajos mineros en la rica zona aurífera de Real de Castilla en el estado de Baja California.
- 1873 Se descubren los metales de mercurio y cinabrio cerca de Huitzucó, en el estado de Guerrero.
- 1878 Néstor Arriola da a conocer los criaderos de plomo argentífero de la Sierra Mojada, en Coahuila.
- 1884 Edwin Ludlow emprende con gran éxito en el estado de Coahuila y por cuenta de una compañía americana, los primeros sondeos en busca de yacimientos de carbón.
- 1885 Una compañía francesa inicia la explotación de los ricos yacimientos cobrizos de *El Boleo*, en Santa Rosalía, estado de Baja California Sur.
- 1886 La minería de la Sierra Mojada alcanza su auge.
- 1889 Comienzan a producir las minas de carbón de *Las Esperanzas*, Coahuila.
- 1895 La *Mc. Arthur Cyanamid Co.* introduce el proceso de cianuración para el beneficio de oro y plata. Este nuevo procedimiento ya había obtenido grandes resultados en el sur de África y otras partes de Europa, por lo que pronto reemplazó al método de patio de Bartolomé de Medina.

El 1° de enero de 1900, se habían denunciado en territorio mexicano alrededor de 12,781 propiedades mineras, lo que indica el gran cambio sufrido por esta industria después de la lucha de independencia.

En 1904, el personal que laboraba en las minas era de 78,891 hombres y en haciendas de beneficio 21,941 para hacer un total de 100,382 personas ocupadas en el ramo de la minería. Hasta el 1° de abril de 1910, el número de títulos mineros subió a 31,229, lo que en área de terreno representaba 442,282 hectáreas aproximadamente. A todo lo anterior hay que agregar la instalación de energía y perforaciones en busca de petróleo.

El petróleo ya era conocido por los indígenas y Humboldt menciona su existencia cerca de Guadalupe en el Edo. de México. Los mexicanos antiguos, también conocieron el asfalto (zona superior oxidada en los depósitos petroleros), quienes lo utilizaban para fines diversos bajo el nombre de *chapopote*.

Destaca la introducción de una nueva Ley Minera de los Estados Unidos Mexicanos del 25 de noviembre de 1909.

## 1.6 Crónica del descubrimiento de algunas minas mexicanas

### Descubrimiento del mineral de Tasco <sup>1</sup>

El distrito minero de Tasco o Taxco es uno de los más famosos del país, no tanto por la riqueza o abundancia de los frutos de sus minas, sino por su antigüedad y porque algunas de ellas fueron trabajadas por el Marqués del Valle, descendiente directo e inmediato del conquistador Hernán Cortés.

Es muy común la opinión entre los escritores y cronistas que se han ocupado de asuntos mineros, de que Hernán Cortés trabajó minas de plata en Tasco desde los primeros años de la conquista, lo cual resulta infundado debido a los siguientes hechos:

“Los primeros historiadores de México, esto es, los que escribieron a raíz de la conquista, no hacen mención alguna de éste hecho, que por su gran importancia debió llamar naturalmente la atención pública en aquella época memorable; hallándose sólo la noticia dada por historiadores y cronistas, que deseando Cortés fundir unos cañones en México y habiendo sabido que los naturales de Tasco empleaban en sus cambios unas piezas pequeñas de cobre y estaño fundidas, envió a allá a unos comisionados, mismos que trajeron muestras de dichos metales. Este hecho notable lo refirió el conquistador, en una de sus cartas dirigidas al Emperador Carlos V”.

De este hecho referido por Cortés, han deducido algunos historiadores que el conquistador trabajó minas de plata en Tasco, porque suponen que al regresar sus enviados con las muestras metálicas, han de haberle entusiasmado con el relato de las riquezas minerales que vieron durante su expedición.

Esta versión perduró muchos años, pero recientemente se ha deducido que los emisarios debieron ser naturales de la región (caciques o mercaderes), toda vez que Cortés les llamaba *comisionados* y los demás historiadores no les llamaban por sus nombres, como lo han hecho al hablar de los españoles que mandó Cortés a buscar las minas de oro de Oaxaca y otros puntos o como los que fueron a traer azufre al Popocatepetl.

---

<sup>1</sup> T. García, *Los mineros mexicanos*, p. 123.

Por otra parte, Cortés estaba demasiado preocupado con la idea de conservar y aumentar sus fuerzas militares, de construir armamento, municiones y defensas de guerra, a fin de mantener la tierra conquistada, por lo que en tal situación, no era lógico emprender expediciones lejanas y peligrosas con objeto de trabajar minas de plata, ya que en los primeros años de la conquista, ni las de oro trabajó por su cuenta, pues es sabido que las grandes riquezas que atesoró las obtuvo por medio de despojos violentos y después a título de regalos o tributos.

Por lo anterior, más natural sería suponer que Cortés trabajó minas de cobre o estaño en Tasco toda vez que tanta necesidad tenía de esos metales para fabricar cañones. Entonces se puede asegurar sin temor a equivocación que durante la primera época que permaneció Cortés en México no trabajó minas de plata ni en Tasco ni en ninguna otra parte porque si tal hecho hubiera sucedido, habría llevado a España la plata producida por sus minas puesto que no pudo haberle dado otro destino, ya que no existía casa de moneda en México.

Cortés muere en Castilleja de la Cuesta, España, el 2 de diciembre de 1547, a la edad de 63 años, razón por la cual, en 1549 (año en que se supone se descubrió el mineral de Tasco), resulta evidente que fue su hijo don Martín el que trabajó las minas.

El ingeniero Santiago Ramírez en su obra *La riqueza minera de México* señala con respecto al distrito minero de Tasco:

“En la mina de “Juliantla”, la mayor riqueza se ha encontrado en la superficie, en la línea de unión entre la pizarra arcillosa y la caliza; y el observador que señala este hecho lo compara al producido por una inyección metálica desparada sobre la superficie.”

Esta localización es tan superficial, que se conserva la tradición de que un carbonero llamado Miguel Jos al remover madera calcinada encontró hilos y glóbulos rojos de plata pura que habían sufrido una fusión incipiente, lo cual fue la base de un descubrimiento de importancia que produjo algunos millones de pesos.

Parece ser que *La Compañía* fue la primera veta descubierta por los españoles en el mineral de Tasco. Este criadero argentífero tenía de dos a tres metros de espesor, con el mineral finamente diseminado. Sobre esta veta debieron haber sido abiertas las minas que trabajó el Marqués del Valle, las cuales, según datos recogidos, no fueron muy abundantes en sus productos, ni los tuvieron copiosos en su primera época.

Don José Borda, célebre europeo, emprendió trabajos mineros de importancia en Tasco a mediados del siglo anterior y obtuvo buenos resultados a juzgar por los monumentos que dejó, entre los cuales destaca la iglesia parroquial conocida hoy como la catedral de Santa Prisca, cuyo monto se dice fue de 400 pesos de aquel tiempo.

### **Descubrimiento del cerro del Mercado**<sup>2</sup>

La celebridad del cerro del Mercado en el estado de Durango procede de muchos años atrás, pues es anterior a la conquista. Los indios tepchuanes que habitaban aquellas tierras tuvieron siempre una idea muy elevada del gran criadero mineral, porque suponían que contenía oro y plata en abundancia mezclados con otras substancias que ellos no conocían, razón por la cual no podían utilizar los preciosos metales. Esta idea se fue propagando entre los indios de las tribus circunvecinas como los zacatecos, cascanes, coras y nayaritas, los cuales, especialmente estos últimos, comunicaron la existencia de aquel cerro con sus tradiciones de inmensa riqueza, a los españoles que llegaron a la Nueva Galicia con don Nuño de Guzmán.

Todos los historiadores de la Conquista están de acuerdo en que los españoles estuvieron dominados en distintas épocas por tres grandes preocupaciones, que halagan dulcemente su desmesurada ambición de riquezas.

Cristóbal Colón, el primero de los “conquistadores”, vivió el último tercio de su existencia enteramente preocupado con el descubrimiento de lo que llamaba “Isla de la Especiería”, preocupación que se hizo extensiva hasta Hernán Cortés, quien gastó una gran fortuna en armar escuadri-llas en el Pacífico para guiarlas a la búsqueda de la preciada isla sin más resultado que haber descubierto él mismo, las Californias.

La otra preocupación de los españoles era la posesión de la llamada “Provincia de Quivira”, nueva tierra de promisión de fantástica riqueza, confusamente descrita al virrey Mendoza por el soldado español Juan Núñez Cabeza de Vaca y sus tres compañeros de infortunio que lograron arribar a México después de ocho años de penurias y trabajos que pasaron entre las tribus indígenas del Norte y Occidente del país, todo ello a causa del desastre que sufrió la expedición que mandó Pánfilo de Narváes a descubrir la Florida.

La tercera y última preocupación de los españoles fue el descubrimiento de la “Montaña de Plata”, ahora Cerro de Mercado, que suponían estaba situada en terrenos de la Nueva Galicia.

---

<sup>2</sup> *Ibid*, p. 117.

Entusiasmado don Nuño de Guzmán con las exageradas relaciones que le hacían los nayaritas de las riquezas de la montaña, mandó al capitán Pedro Alméndez Chirinos a que hiciera una entrada por aquellas tierras y tomase posesión de las minas; pero habiendo llegado Chirinos hasta Topia con grandísimos trabajos y después de haber sostenido muchos combates con los indios, regresó por Culiacán hasta Tepic, donde se hallaba don Nuño de Guzmán. Poco después llegaron también los capitanes Angúlo y Oñate dando razón de haber atravesado la sierra del norte donde sostuvieron combates con los indios guerreros que se mantenían únicamente de la caza, llegaron hasta los valles llamados después de Guadiana y de Poanas; pero sin descubrir el famoso cerro.

Enterada la Audiencia de la Nueva Galicia algunos años después del resultado de estas expediciones y deseosa de ensanchar sus dominios, determinó enviar una expedición para que tomase posesión de aquellas tierras y de la Montaña de Plata. Con este fin, hizo ir a Compostela al esforzado caudillo Ginés Vázquez del Mercado, caballero noble y rico, que habiéndole nombrado capitán general, le encomendó la expedición. Volvió el capitán Vázquez del Mercado a Guadalajara, su lugar de residencia y mandó tocar tambores y clarines con banderolas de terciopelo, puso tiendas de campaña muy vistosas y reclutó a cien hombres, con los cuales venció a los indios de Xocotlán que estaban alzados. Siguió su derrotero, guiado por unos indios de Valparaíso que le aseguraban que *“tierra adentro había un cerro todo de plata en unos llanos grandes”*. Pasó por el valle de Ranchos y el de Sombrerete hasta Avino; al llegar cerca del cerro llamado de Plata, buscó a los guías para preguntarles si era ése que estaba mirando: *“a buen tiempo se han ido, que tenemos ya a la vista el cerro de nuestra ventura”*. Todos se alegraron y le decían:

“Esta es la riqueza por que tanto se han fatigado los primeros hombres; ésta es la que el virrey Antonio de Mendoza envió a buscar por mar y tierra; este es el cerro que Coronado no pudo hallar, por que ya Dios lo tenía para que fuese de Mercado”.

Nombre que tomó desde entonces. Pero cuando llegaron al criadero se vieron completamente burlados en sus esperanzas, pues algunos soldados vizcaínos conocieron que era mineral de fierro. El capitán general, decepcionado, triste y melancólico porque había consumido inútilmente su fortuna, se volvió por donde había llegado, y como su tropa no guardaba ya la disciplina militar, al llegar a una ciénega cerca de Sombrerete fue sorprendido en la noche por los indios de Sain Alto y de otros puntos, resultando del combate dos españoles muertos y algunos heridos, entre ellos don Ginés Vázquez del Mercado, por cuyas heridas murió en el camino y su cadáver fue enterrado en Juchipila. Todo esto sucedió al terminar el año de 1552.

Estas tres grandes preocupaciones, que bien se pueden llamar quimeras, perseguidas con tanto tesón por los conquistadores, fueron la causa de los asombrosos descubrimientos que cambiaron la faz del mundo en el siglo XVI.

Educación Continua

con una nueva visión en la Ingeniería

CURSO:

# Explotación de Minas

Del 13 al 17 de Junio del 2011

Expositor: M. en C. Víctor Manuel López Aburto



CI - 3

[www.mineria.unam.mx](http://www.mineria.unam.mx)

Encuétranos en:



[www.facebook.com/decdfi](http://www.facebook.com/decdfi)



[www.twitter.com/decdfi](http://www.twitter.com/decdfi)

## CAPÍTULO 2

### **OBRAS DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO, MUESTREO Y CÁLCULO DE RESERVAS**

#### **2.1 Introducción**

En el mundo moderno, la exploración y prospección minera son parte integral de la industria y de los programas de desarrollo y abastecimiento de recursos minerales. Definir objetivos primarios de exploración en un trabajo organizado no es tarea simple, esto implica valorar las necesidades de materias primas, analizar los indicadores económicos y estadísticos en cuanto a volúmenes y calidades de minerales requeridos por la industria, además de considerar una serie de factores como los precios de los metales en los mercados nacionales e internacionales, la cantidad y disponibilidad de las reservas mineras locales, etc. Al elegir los objetivos primarios de exploración, se tendrá también que considerar factores políticos, especulativos, tecnológicos y ecológicos. La actitud general de la exploración organizada depende en buena medida de quién la efectúe. Los organismos oficiales en sus programas de exploración generalmente fijan metas a largo plazo, en tanto que en la iniciativa privada se consideran seriamente los términos redituables a plazos más cortos.

La fase completa de exploración involucra problemas técnicos complejos que abarcan desde la evaluación geológico-minero-metalúrgica, hasta otros tan diferentes como suelen ser la concesión legal de los lotes mineros, el abastecimiento adecuado de agua, combustible y energía, así como el reclutamiento, entrenamiento y capacitación del personal que laborará en el proyecto.

## **2.2 Nomenclatura y fines de las obras de prospección, exploración y desarrollo**

### **2.2.1 Definición**

Las obras de prospección, exploración y desarrollo son los trabajos geológicos preliminares que se realizan para localizar yacimientos minerales.

### **2.2.2 Descripción**

La información crítica acerca de un trabajo de prospección minera comprende no sólo las observaciones que se puedan hacer en el campo, sino también la investigación de los datos que podrían llamarse históricos, de los trabajos realizados en el pasado (particularmente los de la mena en estudio) y vestigios o indicios de otras menas localizadas en las cercanías. La combinación de las observaciones directas y de los antecedentes históricos, varía en forma proporcional a las fases de desarrollo alcanzadas por la prospección.

El examen de un trabajo de prospección usualmente conduce a la apreciación de su valor económico o bien a la recomendación de continuar o suspender los trabajos de desarrollo. Si el investigador recomienda continuar con el desarrollo de los trabajos deberá, en términos específicos, apoyar el trabajo que propone. La naturaleza y extensión del trabajo dependerá del tipo de problema que presente la investigación y, en este aspecto, cualquier trabajo de prospección caerá dentro de alguno de los tres siguientes tipos:

#### **1. Prospecciones conducentes a la localización de la mena**

La etapa inicial de toda prospección minera exige al máximo la aplicación de un buen juicio geológico, en donde el investigador tiene que hacer una estimación no sólo de la probable existencia de un yacimiento, sino también de su valor aproximado. Así declarado, todo parecería conjeturas, pero la solución no siempre es tan indeterminada como podría parecer. Un trabajo formal rara vez se emprende, excepto en un distrito o zona donde se haya probado la existencia de algunos yacimientos o donde al menos exista un afloramiento o indicios de alteración de rocas. Se puede esperar razonablemente que si se descubre un nuevo criadero, éste tendrá un tamaño y ley comparables a otros criaderos del distrito o al menos el tamaño que indica las dimensiones de los afloramientos. Aunque las sorpresas son siempre posibles, estas evidencias dan alguna idea sobre las probabilidades de la zona en estudio.

La búsqueda de nuevos depósitos comprobará las posibilidades de aquellas guías que puedan ser reconocidas, ya sean afloramientos, monteras, zonas alteradas o condiciones estructurales favorables. Si el desarrollo consiste en una búsqueda exhaustiva en un gran sector de terreno o en unas pruebas rápidas de una área restringida, ello dependerá de lo precisas y definidas que parezcan ser las guías existentes.

## 2. Prospecciones conducentes a la ampliación de reservas

Si se encuentra una mena y su ley es lo suficientemente atractiva como para que justifique su exploración en virtud de un tonelaje suficiente, la pregunta obligada sería: ¿Cuántas toneladas más pueden existir en el depósito?

En la mayoría de los trabajos de prospección donde el geólogo tiene la oportunidad de considerar seriamente si se ha encontrado una cantidad importante de reservas minerales, la parte medular de su trabajo será determinar la posibilidad de desarrollar más reservas. Si alguno o todos los frentes de desarrollo están aun sobre mineral, la respuesta a la interrogante será afirmativa, por lo que el siguiente paso importante será definir cuánto más se puede encontrar. Una visualización en tres dimensiones de la mena en su asentamiento geológico será la base de una proyección tentativa. Las tendencias inferidas de la distribución de valores, conjuntamente con las tendencias en la estructura geológica, darán una indicación del probable rumbo, inclinación y continuidad del cuerpo.

## 3. Prospecciones conducentes a la explotación de una mena

En este tipo de trabajos no existen cuestionamientos serios respecto a la cantidad de material contenido en el depósito. El problema principal será el de determinar si puede o no ser tratado dicho mineral con un beneficio económico razonable. En otras palabras, el planteamiento ante la existencia evidente del depósito es: qué se puede hacer con él y qué utilidad podría reportar su extracción.

En este tipo de prospecciones la cantidad de mineral (económico y no económico) es presumiblemente muy grande, aunque durante el curso del estudio deberá demostrarse la existencia de algún tonelaje específico más allá de toda duda antes de emprender una inversión económica de consideración, ya que esta demostración puede exigir sondeos directos u otros métodos de desarrollo bajo guías geológicas. La interrogante en un principio no es la de conocer si la cantidad de material es de un millón o de cien millones de toneladas, sino la de saber si el material

es realmente una mena en el sentido técnico. Posteriormente se plantearán las preguntas críticas: ¿cuál será la utilidad por tonelada?, ¿pueden convertirse en un producto comercial?, ¿cuánto costará la extracción y beneficio del mineral? La geología puede ser de gran ayuda para determinar el estado mineralógico del material y tal vez para determinar la naturaleza del terreno en lo que estructuralmente pueda afectar la selección del método minero de explotación, pero los problemas más complejos y por ende fundamentales serán los de la evaluación de reservas, la estimación de costos y las pruebas metalúrgicas.

### 2.2.3 Equipo y materiales usados en la prospección

El equipo y los materiales usados en la prospección minera varían de acuerdo con las necesidades, objetivos y complicaciones de cada prospecto. En general, uno de los factores más importantes por considerar, son el clima y el acceso. Elegir las estaciones más favorables del año para realizar el trabajo de campo, algunas veces no es posible. Por ejemplo, en áreas de difícil acceso o regiones pantanosas, normalmente se trata de evitar la temporada de lluvias, especialmente si el programa incluye barrenación. De esta manera se evita el deterioro del equipo y altos costos de operación; sin embargo, la etapa de prospección previa a la exploración formal puede llevarse a cabo durante la mayor parte del año.

Prospectadores, exploradores y geólogos profesionales generalmente utilizan el siguiente equipo básico:

Ácido clorhídrico diluido	Escalímetro	Martillo de geólogo
Altímetro	Escuadras de dibujo	Mesa de campaña
Anteojos para el Sol	Estereoscopio de bolsillo	Mochila de campaña
Batea para tentadura	Estufa portátil	Navaja de campo
Baterías de repuesto	Etiquetas engomadas	Papel albanene
Binoculares	Fotografías aéreas	Papel cuadriculado
Bolsa para dormir	Guantes de carnaza	Pastillas de cloro
Bolsas de muestreo	Imán de bolsillo	Pico
Botas de cuero	Impermeable o manga de hule	Pilas secas
Botas de hule	Jeringas desechables	Plano base
Botiquín de primeros auxilios	Lámpara de carburo	Plumas y lápices
Brújula tipo Brunton	Lámpara de baterías	Radio de baterías
Cámara fotográfica	Lentes de seguridad	Regla de dibujo
Cantimplora	Libreta de apuntes	Repelente para insectos
Casa de campaña	Libreta para registrar muestras	Ropa de trabajo
Casco minero	Libros de referencia	Sillas de campaña
Catres de campaña	Lupa de 10 cm de diámetro	Suero anticrotálico
Cinceles	Mapas	Suero antialacránico
Cinta adhesiva ( <i>masking tape</i> )	Marcadores	Tinta china
Cuñas	Marro	Tinta de colores

## 2.2.4 Obras de exploración y desarrollo

### Descripción

Una vez concluidos los trabajos de prospección y exploración geológica y partiendo de los datos obtenidos, se procederán a verificar desde el punto de vista minero, las zonas de interés potencialmente rentables para una explotación minera racional. Para tal efecto se procederá a explorar con obra minera directa, haciendo uso del cuele de obras subterráneas tales como: socavones, tiros, niveles, pozos, contrapozos, etc., todas ellas enfocadas a fines exploratorios.

### Definiciones

#### 1. Obras de exploración

Son todos los trabajos necesarios encaminados a conocer la forma, tamaño y posición del yacimiento, así como sus valores, en forma aproximada.

#### 2. Obras de desarrollo

Son los trabajos necesarios que por medio de obras mineras conducen a probar que un yacimiento mineral es costeable en su extracción; y en función de las zonas costeables encontradas, prepararlo para la explotación minera.

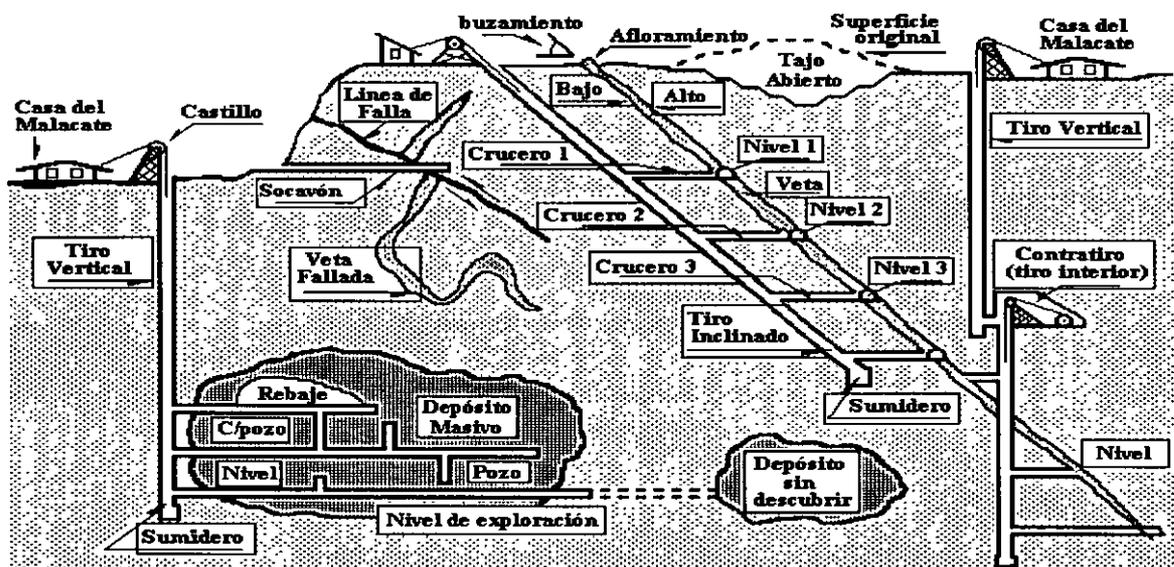


FIGURA 2.1 Obras de exploración y desarrollo subterráneas

El desarrollo de una mina requiere de un sistema de acceso a las zonas mineralizadas, el cual se logra mediante el cuele de obras subterráneas tales como tiros, socavones, contratiros, niveles y contrapozos, los cuales deberán ser cuidadosamente planeados.

Los trabajos de desarrollo pueden ser divididos en dos partes de acuerdo con el proyecto. La primera se conoce como desarrollo general y está relacionado con la determinación de la configuración del depósito, su buzamiento y el trazado principal de la mina. La segunda parte concierne al método de explotación por aplicar, donde podrán seguirse una variedad de patrones.

Las diferentes vías de comunicación en la roca pueden ser de cuatro tipos fundamentales: tiros, niveles, contrapozos y rampas.

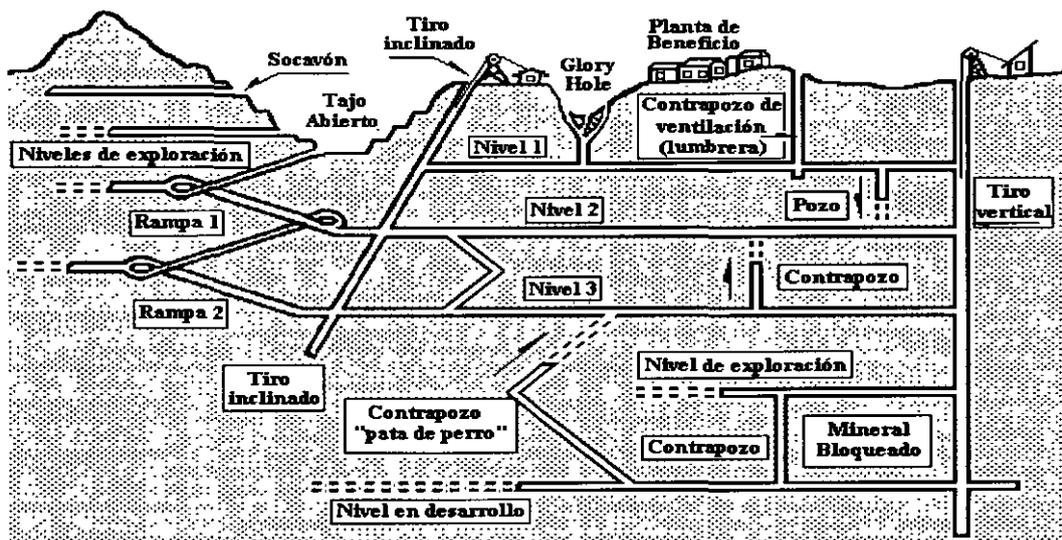


FIGURA 2.2 Vías de comunicación en roca

#### a) Cuele de tiros

La finalidad fundamental de un tiro es la de dar acceso a la mina y permitir la comunicación con las frentes de trabajo en el interior. El tiro también puede ser utilizado para el manto (acarreo vertical) del mineral y el material estéril; para el transporte de personal y materiales a la mina; como vía de ventilación, etc.

Los tiros modernos normalmente son verticales. La sección puede ser rectangular, circular o elíptica. Los tiros circulares han llegado a popularizarse hoy en día, debido a que soportan mejor el empuje horizontal de la roca y porque son más fáciles de recubrir con concreto.

La excavación de un tiro es una fase complicada en el desarrollo de una mina; esto debido tanto al equipo que se requiere como al trabajo mismo. La profundización de un tiro requiere de grúas especiales, plataformas, etc., y dependiendo de los usos y funciones a que se destinen, deberá equiparse para el transporte vertical de materiales, equipos y personal, así como para el manto del mineral.

El ahonde de un tiro se realiza generalmente con perforadoras manuales, aunque también se pueden emplear equipos neumáticos con brazos hidráulicos especialmente diseñados para mecanizar las operaciones, tanto de barrenación y voladura, como las maniobras de rezagado del material fracturado por efecto de los explosivos.

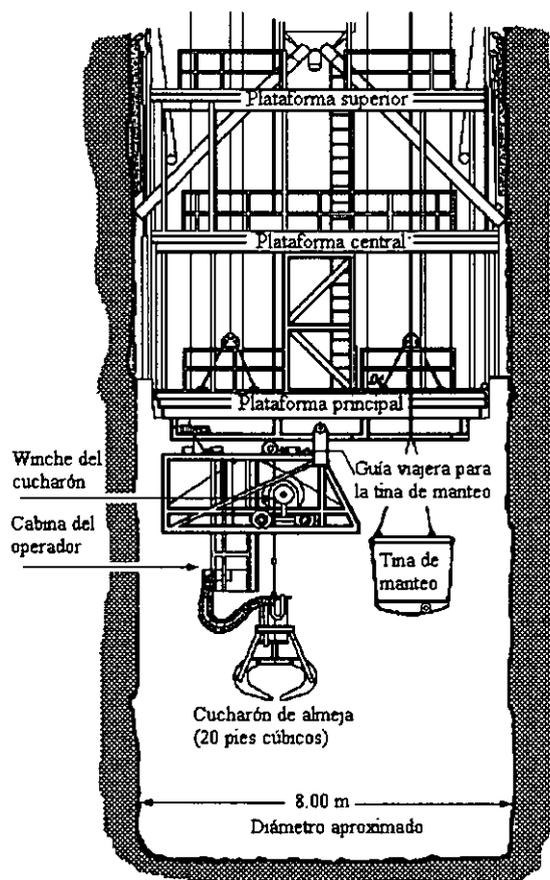


FIGURA 2.3 Ahonde mecanizado de tiros

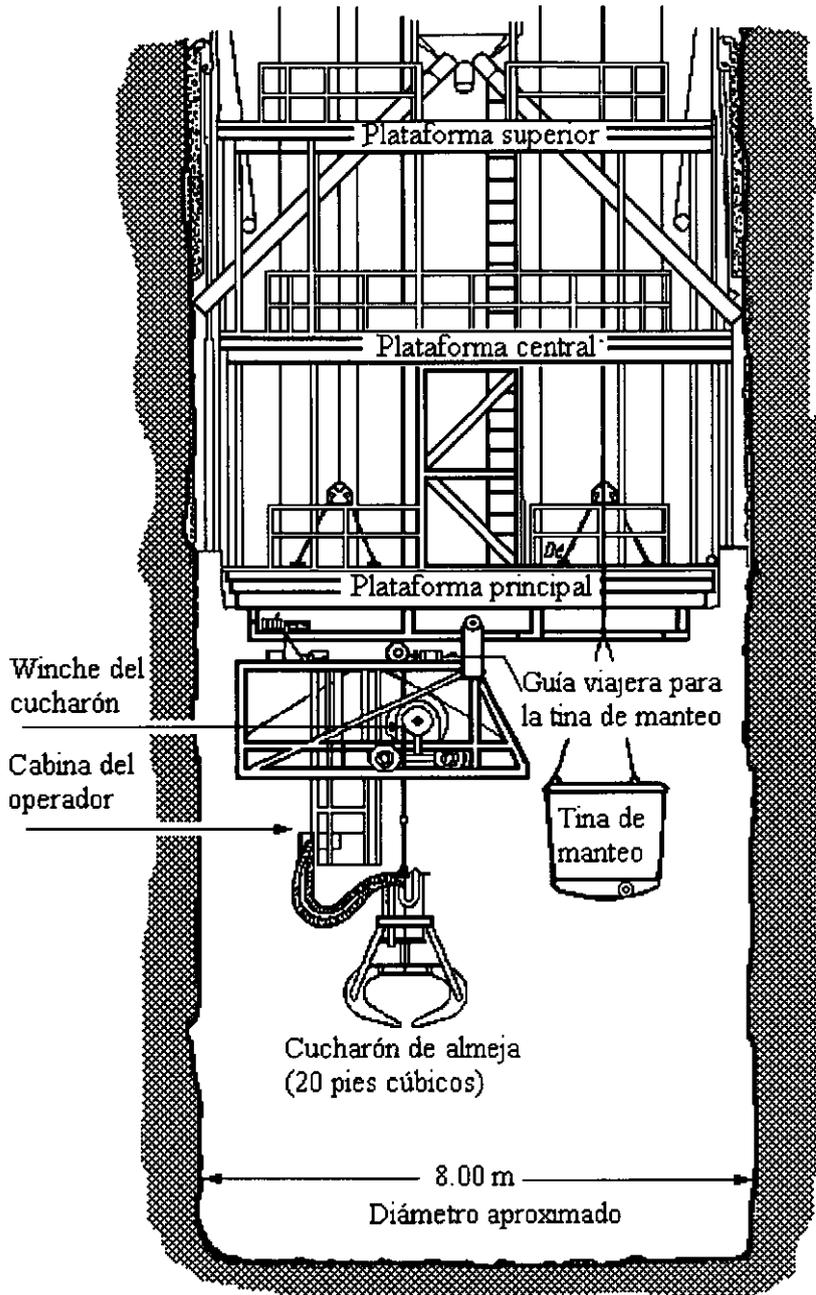


FIGURA 2.3a Ahonde de tiros con resagadora neumática

## b) Frentes y niveles

Las frentes en una mina se emplean para diversos fines, tales como: obras de acceso, de desarrollo para el sistema de minado, de exploración, de ventilación y acarreo horizontal, etc. Las secciones de este tipo de obras pueden variar entre 4 y 20 m<sup>2</sup>, dependiendo del tamaño de los equipos que por ellas vayan a circular y de la consistencia de la roca. En general, la geometría

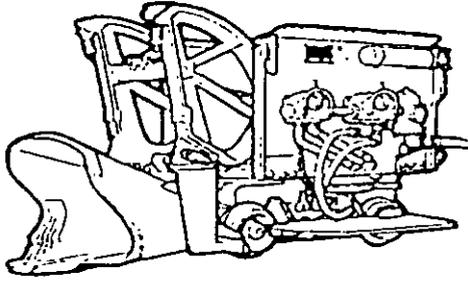
de la obra es de tipo rectangular con cielo abovedado o sensiblemente circular cuando se requiere de una resistencia a la compresión mayor y cuando se cuenta con el equipo de perforación adecuado.

Las secciones más pequeñas (de 4 a 6 m<sup>2</sup>) se barrenan con perforadoras ligeras de pierna neumática. En las secciones de tipo medio se pueden emplear las perforadoras de brazos hidráulicos rotatorios con perforadoras ligeras. Los equipos de brazos hidráulicos pesados (jumbos) son adecuados para las secciones mayores, aunque no existe una regla general a este respecto. A menudo se encuentran en las frentes otros tipos de equipo de perforación que será necesario tomar en consideración, por lo que siempre se debe elegir el más adecuado, en función de las condiciones predominantes del terreno.

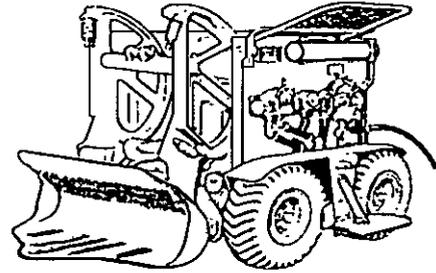
En las frentes de dimensiones estrechas, el rezagado del material quebrado se realiza normalmente con cargadores convencionales, tales como palas neumáticas o trascavos con descarga posterior, "cavos" montados ya sea sobre neumáticos o sobre rodamiento de vía. El material rezagado puede ser transportado en vagonetas con descarga lateral o por el fondo, tiradas por una locomotora eléctrica o de motor a combustión. En frentes con secciones mayores, se pueden emplear cargadores más grandes montados sobre ruedas de goma (*scoop-tram*) equipados con motor a diesel o cargadores de brazo excavador montado sobre oruga tipo "minero continuo". Para el acarreo del material rezagado, se emplean camiones de bajo perfil o si la sección lo permite, camiones convencionales de volteo (figura 2.4).

### c) Contrapozos

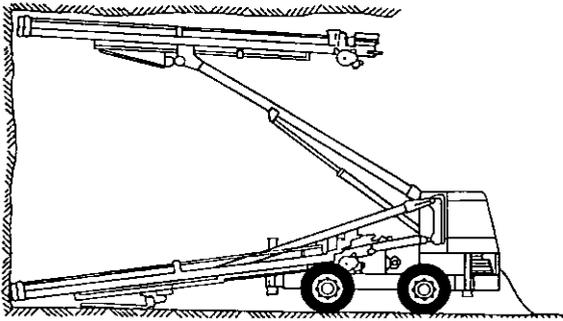
Los contrapozos en una mina son obras sensiblemente verticales que forman las comunicaciones entre los diferentes niveles. Se usan como paso de mineral; como camino para el tránsito del personal; como conductos de ventilación y como parte integral de la obra de tumbe (por ejemplo en tumbe por subniveles). La sección de este tipo de obras es normalmente entre 4 y 6 m<sup>2</sup>. Para su cuele, se utilizan diferentes métodos, resultando los más sencillos aquellos que no son mecanizados, o sea, en los que se levantan andamios de madera o metálicos que sirven de plataforma de perforación.



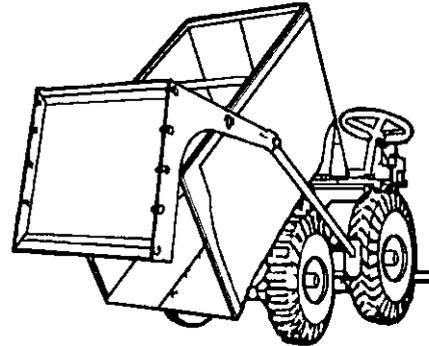
pala



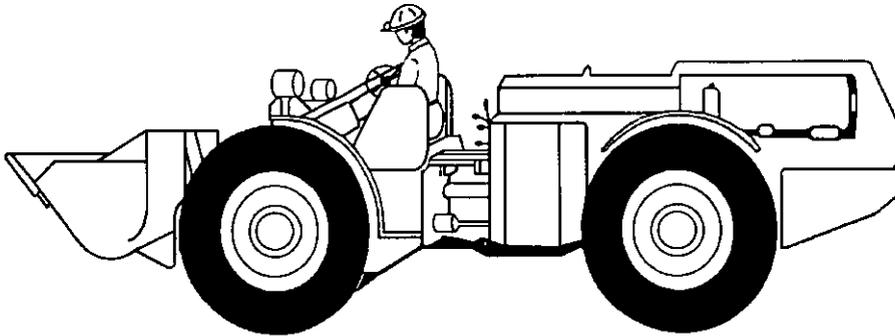
cavo



jumbo



volquete sobre neumáticos



scoop - tram

FIGURA 2.4 Equipo diverso de barrenación y rezagado para minería subterránea

El avance mecanizado de contrapozos se puede hacer, por ejemplo, con una jaula *jora*, (figura 2.5), o con una *plataforma satélite* (figura 2.6) o con otros equipos similares de perforación con mecanismos de izaje. Cuando se utilizan estos equipos, primero se debe perforar un barre-

no guía de diámetro apropiado desde el nivel superior, a partir del cual se cuele la obra en forma ascendente desde la misma jaula, la cual posee su propio cabrestante que le permite elevarse por sus propios medios a través del cable que pasa por el barreno guía. Existen en el mercado otros equipos para el cuele de contrapozos, conocidos como *máquinas trepadoras*, desarrolladas por la firma sueca *Linden-Alimak* (figura 2.7), las cuales cuentan con su propio riel elevador sobre el que engrana una corona-piñón de acción neumática ensamblado en el cuerpo de la máquina.

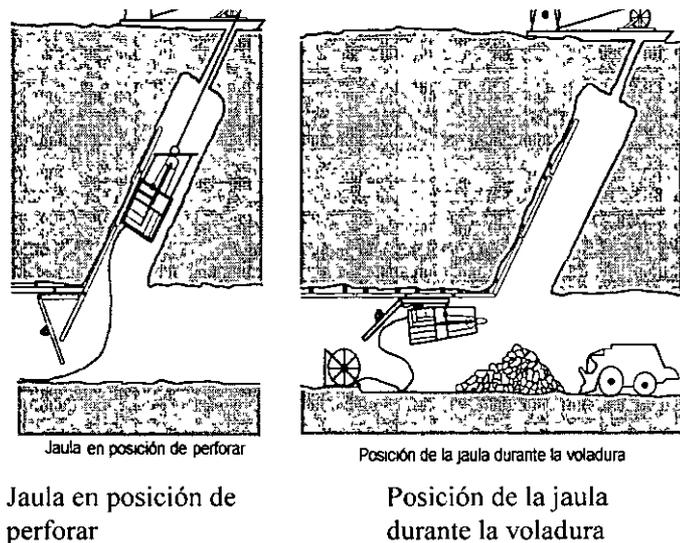


FIGURA 2.5 Jaula jora

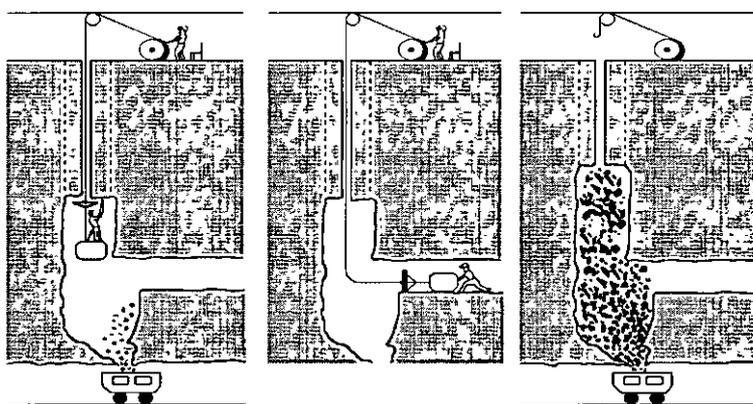
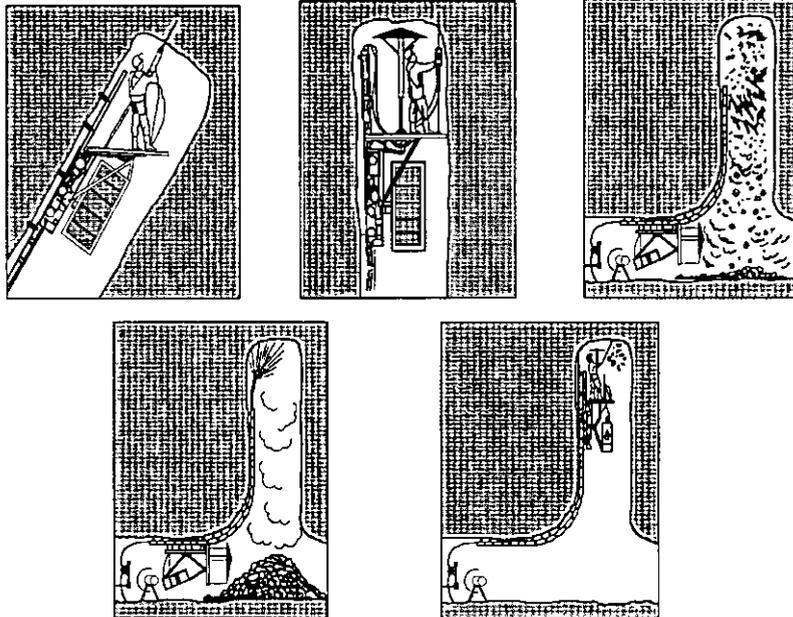
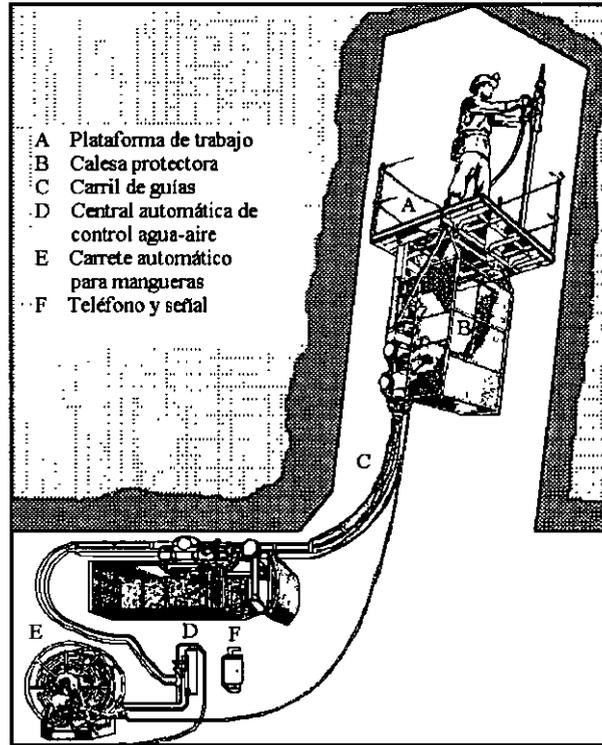


FIGURA 2.6 Plataforma satélite



Secuencia de trabajo

FIGURA 2.7 Máquina trepadora (Alimak)

Otro medio para mecanizar las operaciones de avance es la perforación de barrenos largos, colados desde el nivel superior con equipo especial para este fin. En este caso el explosivo se carga por arriba, sin personal dentro del contrapozo.

Lo más moderno es el uso de máquinas contrapoceras tipo *Robbins* (figura 2.8), cuyo empleo y características se detallarán más adelante.

Estos métodos mecanizados hacen más fácil y más seguro el trabajo. La longitud total del contrapozo impone, algunas veces, una cierta limitación en la selección de equipos de perforación.

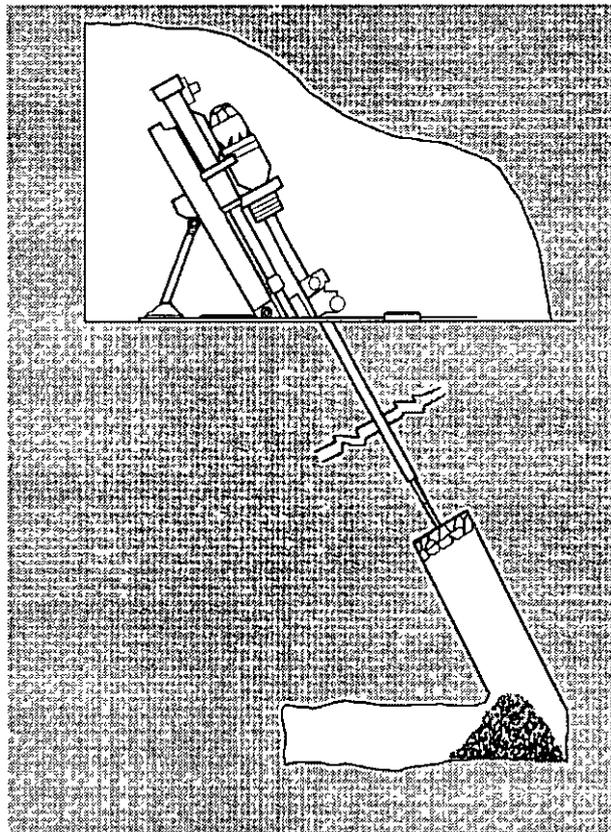


FIGURA 2.8 Máquina contrapocera (*Robbins*)

#### d) Rampas

El uso de rampas como obras de transporte se está haciendo muy común; la tendencia general hoy en día en las operaciones mecanizadas es la de cambiar gradualmente al uso de equipos sin vía. Muchas rampas tienen la misma función que los contrapozos: conectar los diferentes nive-

les de la mina. Normalmente la pendiente de las rampas varía entre el 7 y el 12%, lo que hace posible el desplazamiento fácil y rápido de máquinas autopropulsadas sobre ruedas de goma.

La figura 2.9 muestra una secuencia teórica generalizada de las etapas y decisiones más comunes que se presentan durante la etapa de exploración. En esta secuencia, un área puede quedar en espera de ser considerada en el futuro como una zona potencialmente interesante, como es el caso de algunos depósitos de baja ley, los cuales resultan incosteables al momento de la evaluación, pero que muy probablemente puedan ser explotados por las futuras generaciones de mineros.

La tabla 1.1 ilustra en orden generalizado las fases y estudios más comunes realizados en un proyecto de exploración. En la secuencia normal de exploración, algunos estudios así como la combinación de ellos varían de acuerdo con el tipo de yacimiento.

TABLA 2.1 Secuencia teórica de estudios en proyectos de exploración

Fases	Secuencia de exploración	Información y estudio
Reconocimiento regional	1. Compilación geológica 2. Fotogeología 3. Análisis estructural 4. Inspección de campo	Reportes, mapas y bibliografía Unidades litológicas y estructuras Fallas, estructuras y diques Contactos y áreas mineralizadas
Reconocimiento preliminar de semi-detalle	5. Reconocimiento geológico 6. Mapeo de afloramientos 7. Mapeo de estructuras 8. Mapeo geoquímico	Caminos y unidades litológicas Áreas mineralizadas, zonas de alteración Brechas, fallas, diques Muestreo de arroyos y suelos
Levantamientos geológicos	10. Gravimetría en áreas cubiertas 11. Polarización inducida	Opcionales y coordinados en programas de geofísica, según criterio geológico de 1-8

TABLA 2.1 *SContinuación*

Fases	Secuencia de exploración	Información y estudio
Detalle de evaluación geológica del área	12. Mapeo geológico de detalle	Forma, estructura y tamaño del yacimiento
	13. Mapeo de alteraciones	Relación de alteraciones, estructuras y zonificaciones. Área <i>continúa</i> favorables y desfavorables
	14. Estudios mineralógicos, geocronométricos y petrográficos	Láminas delgadas, secciones pulidas. Determinación de edad y metalogénesis
	15. Polarización inducida	Opcional. Depende del tipo de yacimiento
	16. Barrenación a diamante	Selección y evaluación de áreas favorables
	17. Registro de barrenación	Muestreo y estudio por intervalos
	18. Análisis químicos y físicos	Afloramiento, núcleo ley y calidad
	19. Registros eléctricos de pozos	Opcional
	20. Estudios de mineralización	Forma, extensión, composición y génesis
	21. Determinación de la ley	Cálculo reservas
Proyecto minero	22. Evaluación preliminar	Rentabilidad del yacimiento
	23. Pruebas metalúrgicas	Recuperaciones
	24. Proyecto minero	Método de explotación
	25. Investigación planta de beneficio	Costos inversión. Capacidad. Tipo de planta
	26. Selección áreas, plantas y caminos	Abastecimientos: mano de obra, agua, electricidad, insumos, vías de comunicación, campamentos, etc.
	27. Servicios, terreros y jales	

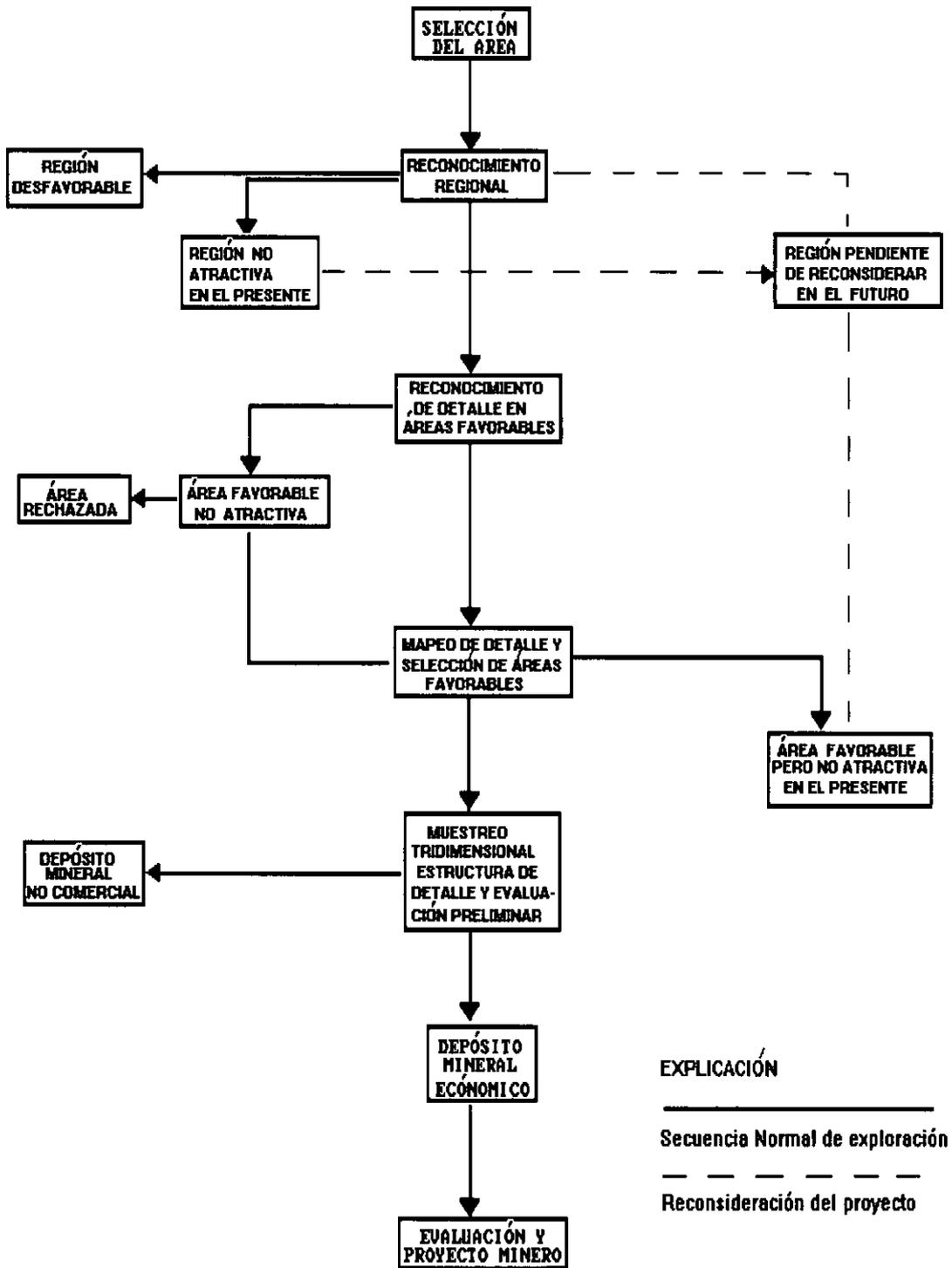


FIGURA 2.9 Secuencia generalizada de objetivos en exploración

## **2.3 Procedimiento de muestreo, registro y control de muestras. Planos y secciones de muestreo**

### **2.3.1 Procedimientos de muestreo**

Un criadero mineral es una mezcla de minerales en proporciones que varían en las diferentes partes de su masa, en consecuencia, la proporción de metales que contienen también varía de un lugar a otro; por tanto, una sola muestra tomada en un lugar cualquiera no contendrá la misma proporción de minerales o metales que el criadero en conjunto posea, excepto por una coincidencia altamente improbable. El posible error (que sería muy grande si se tomara una sola muestra), disminuiría con el número de muestras, pero nunca desaparecería por completo, a menos que las muestras fuesen tan numerosas y tan grandes, que la suma de ellas fuera igual a la totalidad del criadero, con lo que éste se habría extraído por completo en el proceso de toma de muestras. Dado que llevar esta práctica a tal extremo iría en contra de su propio objetivo, el error está siempre presente en los casos reales, por lo que el objetivo práctico consistirá en reducir este error a límites permisibles.

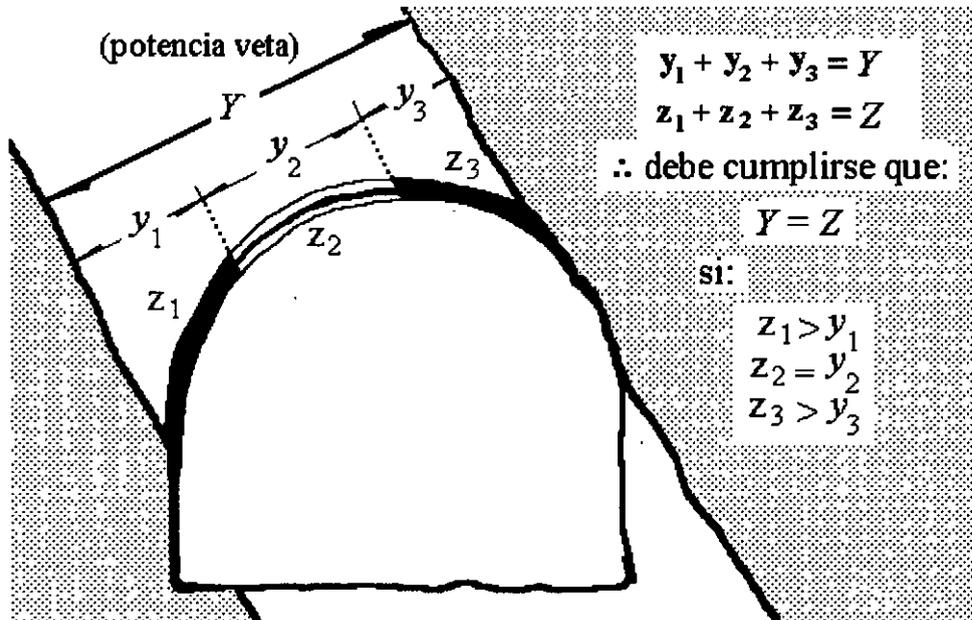
Lo anterior significará la necesidad de buscar el equilibrio entre el número de muestras y la exactitud deseada. Como consecuencia, se tendrá que en caso de no existir muestras suficientes, el resultado no será confiable; y por el contrario, si existen demasiadas, el tiempo y el costo serán excesivos.

En la realidad, la exactitud del proceso depende no sólo del número de muestras, sino también de su distribución en el seno del criadero, pues sería incorrecto tomar todas las muestras de una parte muy rica o de una parte muy pobre. Es por tanto muy importante la elección de los lugares de toma, de tal forma que todas las partes del criadero mineral estén representadas.

Teóricamente sería permisible reunir todas las muestras en un conjunto único para su ensayo, pero ya que es esencial conocer no tan sólo la ley del criadero, sino las leyes de sus distintas partes, la práctica común estriba en determinar los valores de cada muestra separadamente y combinar los resultados mediante los métodos apropiados de cálculo.

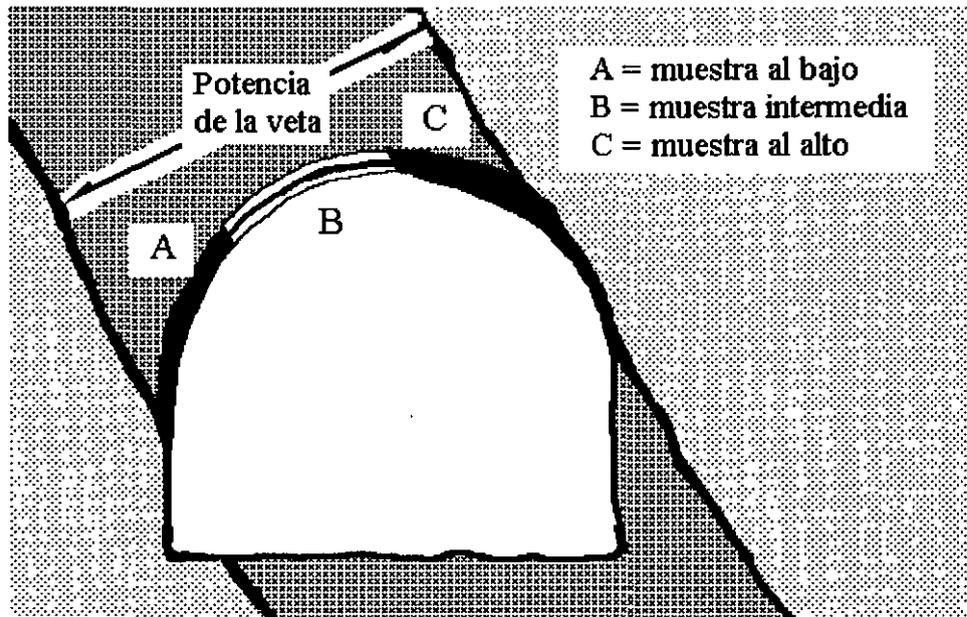
Determinar con exactitud el número conveniente de muestras y los lugares apropiados donde deberán tomarse, exige el establecer hipótesis respecto a los valores existentes y su distribución; por tanto no existe un método infalible que decida sobre esto anticipadamente, aunque una vez que se haya tomado un número razonable de muestras, será posible juzgar si son lo bastante numerosas y si están apropiadamente localizadas. La experiencia profesional en miles

de minas forma una base para decidir cuál debe ser la posición y espaciamiento convenientes, sujetos naturalmente a modificaciones en cualquier mina individual después de haber tomado las muestras preliminares. Esta experiencia ha desarrollado métodos que minimizan el error humano al elegir el material que ha de constituir la muestra. Los métodos corrientes incluyen varios tipos de perforación, pero si la mina está expuesta en superficie o en obras subterráneas (frentes, niveles o cruceros), la práctica usual consiste en arrancar de forma sistemática partes de dicha mena. El método convencional de hacerlo es la toma de muestras en "ranuras".

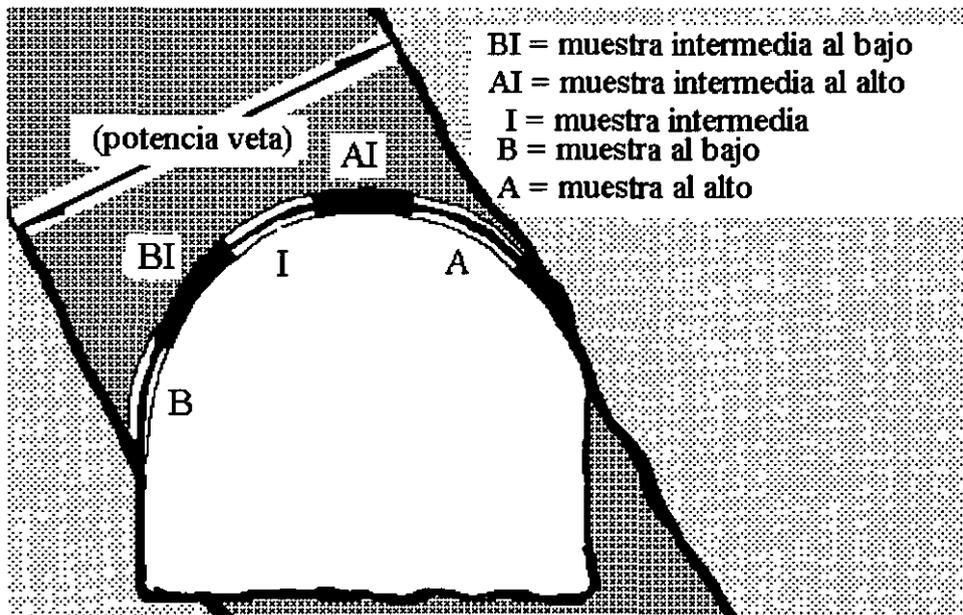


Es importante hacer notar que en el muestreo de vetas, éste deberá hacerse siempre normal a sus respaldos. En el caso de que el muestreo no se pueda hacer perpendicular, se deberá calcular las proyecciones de  $Z$  que sumadas darán la proyección total  $Y$ .

### 2.3.2 Método para tomar tres muestras en vetas



### 2.3.3 Método para tomar cinco muestras



Para la obtención de las muestras en obras subterráneas y sobre su periferia utilizando el método de ranuras, se deberá proceder de la siguiente manera:

1. Limpiar o lavar si es posible la superficie expuesta de la zona a muestrear.
2. Evitar tomar la muestra representativa donde solamente el mineral es blando o fácil de cortar.
3. Antes de tomar la muestra, ahondar en la zona seleccionada, aproximadamente una pulgada y desechar el producto de esta ranura.
4. Tratar de obtener la muestra con una sección aproximada de 1 por 3 pulgadas lo más constante posible, dentro de la ranura previamente producida.
5. La muestra así tomada debe ser embolsada o ensacada, cerrada sellada y etiquetada.
6. Tomar tantas muestras en una misma línea como lo requiera el método que se adopte.

### **2.3.4 Otros métodos de toma de muestras**

El muestreo por "ranuras" es el método más aceptado en la mayoría de las minas en activo y en todas las investigaciones, salvo las muy superficiales, pero en algunos casos se utilizan otros métodos en lugar de las "ranuras" o en adición a ellas, algunos de los cuales se describen a continuación:

#### **a) Muestreo de esquirlas**

Se toma una serie de fragmentos de roca ya sea en una línea a través de una exposición de mineral o a intervalos al azar sobre una frente. El método es menos laborioso que hacer "ranuras". En algunos distritos mineros, exámenes comparativos han demostrado que en manos de operarios entrenados, se pueden dar resultados compatibles. Esto es bastante excepcional, sin embargo, el método no debe usarse nunca hasta que haya sido completamente comparado con los resultados obtenidos de las "ranuras" o de los rebajes de producción de la misma mina. No se debe usar nunca en un trabajo de exploración, excepto quizá cuando se necesiten con urgencia algunos resultados preliminares.

#### **b) Muestreo de una voladura**

Una muestra recogida de la pila formada después de una voladura con explosivos sustituye algunas veces a una "ranura" en una frente. Por lo general, se hace de modo burdo escogiendo trozos de roca de tamaño conveniente. Aunque teóricamente no es de confianza, una muestra de este tipo puede arrojar los resultados apetecidos en algunas menas cuyos valores se encuentran distribuidos de manera regular o que resulten adecuados independientemente de la forma de fracturamiento del mineral.

#### c) Muestreo de vagonetas o carros mineros

De cada vagoneta que sale del rebaje u obra de desarrollo, se toma una palada de material o una serie de trozos elegidos, ya sea al azar o de acuerdo con un sistema preconcebido. Debido a que esto da lugar a una muestra bastante grande, existe la posibilidad de que sea representativamente correcta, aunque existe la tendencia usual a tomar demasiado del material de mayor tamaño o del más fino. Se puede comprobar, promediando todas las muestras de las vagonetas (o carretillas) tomadas en un día, comparándolas con la muestra correspondiente tomada de la planta de beneficio, dado que esta última muy probablemente sea la que resulte correcta, en especial si se obtiene por métodos automáticos después de su proceso de trituración.

Con la comprobación anterior, puede resultar que la muestra tomada de una vagoneta proveniente de una obra única sea incorrecta, aunque el resultado final se equilibre por compensación de errores con los minerales procedentes de otras fuentes.

#### d) Muestreo de barrenación

La perforación de barrenos de exploración (empleando el método que mejor se ajuste a las condiciones existentes ya sea de pulseta, de percusión, de rotaria, a diamante, etc.) proporcionará un medio satisfactorio para el muestreo y delimitación del cuerpo, siempre y cuando el criadero mineral pueda ser perforado en un número suficiente de lugares a un costo razonable. Esto depende de la profundidad del depósito y del espaciamiento necesario para determinar exactamente su ley (figura 2.10).

En criaderos horizontales poco profundos, existe una gran área al alcance de barrenos cortos, donde el contenido es relativamente uniforme, como es el caso de las menas de hierro y de los depósitos de cobre porfídico donde los sondeos no necesitan localizarse muy próximos entre

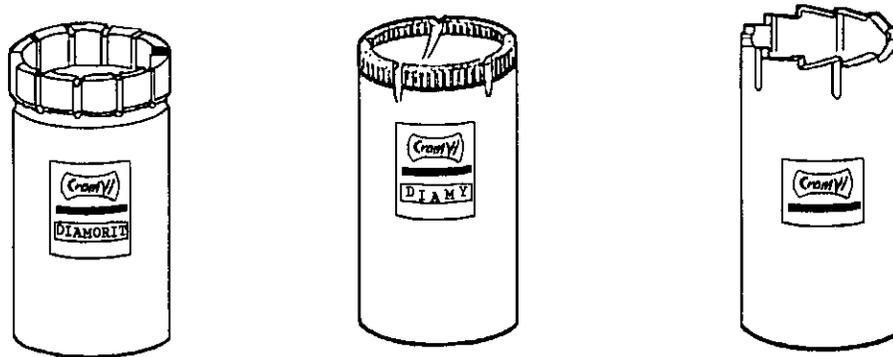
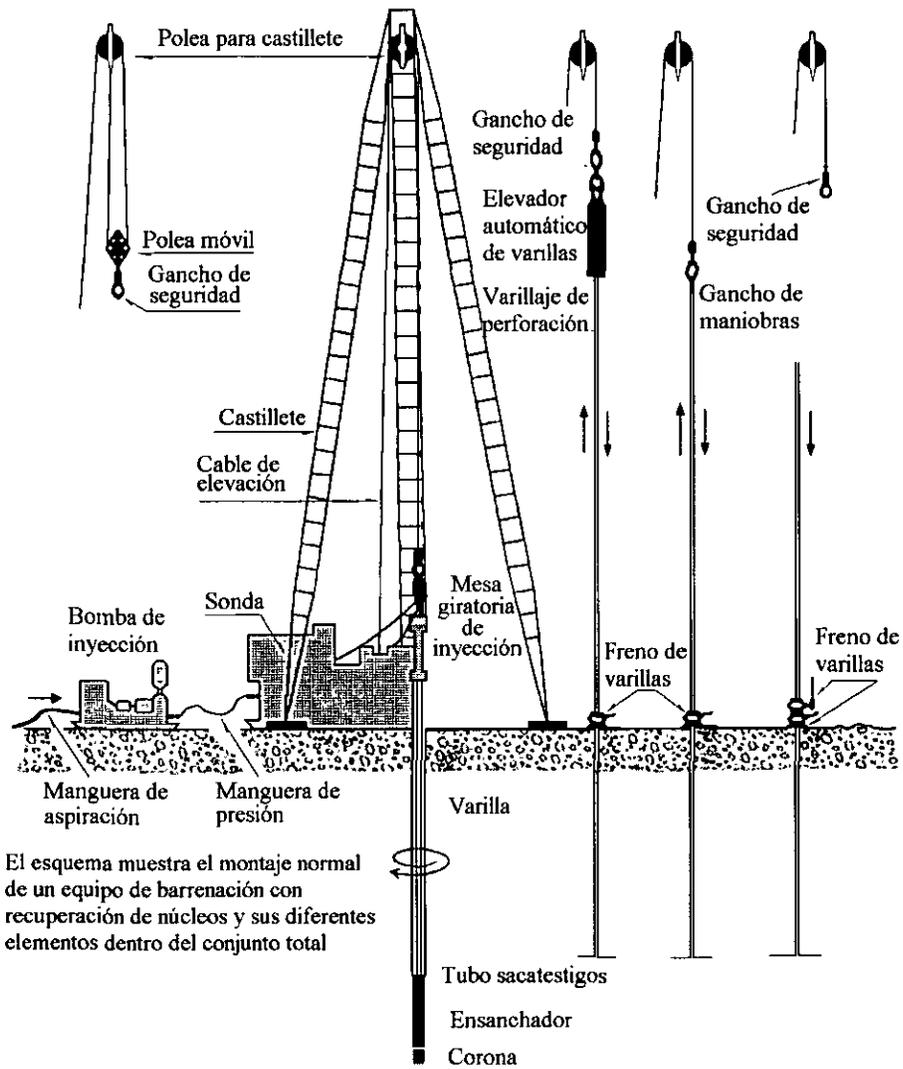
sí. Una práctica general en algunos distritos de cobre diseminado es la de realizar sondeos de percusión a cada 50 ó 60 m. Donde sea posible, los barrenos deberán localizarse en los vértices de una cuadrícula de coordenadas rectangulares. En algunos criaderos supergenéticos delgados de contenido muy errático, ha sido necesario espaciamientos de 25 m. En yacimientos porfidícos, algunos sondeos de exploración deberán alcanzar profundidades mayores que la de los barrenos restantes, pues recientemente se han descubierto cantidades considerables de mena primaria más abajo de lo que anteriormente se pensaba era el fondo de la mineralización comercial.

En criaderos fuertemente inclinados, la cantidad de mena al alcance de sondeos dados desde la superficie es limitada, incluso para barrenos inclinados con broca a diamante. Si la ley es uniforme, las perforaciones no necesitan ser demasiado numerosas y las barrenaciones a diamante proporcionarán un muestreo satisfactorio hasta profundidades de 300 m o más, según condiciones de la roca. Con menas de menor uniformidad la conveniencia de intentar estimar la ley mediante sondeos está abierta a discusión.

### 2.3.5 Registro y control de muestras

Cada una de las muestras tomadas en la forma descrita en el subtema anterior deberá contar con un registro exacto de su localización, dimensiones y fecha, tal y como lo ilustra el ejemplo que se anota a continuación:

Muestra No.	Ancho (cm)	Localización	Fecha
4200-A	60	Fte 3614-N	09-02-92
4200-B	30	Fte 3614-N	09-02-92
4200-C	70	Fte 3614-N	09-02-92



coronas o brocas a diamante

FIGURA 2.10 Equipo para perforación a diamante

Una vez tomadas y registradas las diferentes muestras, se remitirán al laboratorio químico correspondiente, donde previa preparación, se determinarán las leyes de mineral contenidas en cada una de ellas. También, se tendrá la precaución de conservar la mitad de la muestra preparada en el laboratorio como “testigo” para dado el caso, verificar o corroborar el ensaye.

Cuando el laboratorio elabora el informe con las leyes determinadas, éstas se deberán conservar, archivar y registrar en los planos de muestreo.

### 2.3.6 Cálculo de la ley media y tonelaje de una mena

#### a) Ley media

La ley media de un bloque se calcula a partir de las leyes medias de las frentes expuestas que lo limitan. En un yacimiento típico, estas frentes están formadas por las obras que circunscriben el bloque, es decir, por el nivel superior e inferior del bloque y los contrapozos laterales que conectan estos niveles y que constituyen los costados del bloque. El método usual de cálculo se ilustra en el siguiente ejemplo:

Supóngase un bloque de mineral delimitado por dos niveles y dos contrapozos, cuyos resultados de muestreo se consignan en las siguientes tablas:

Localidad	Ancho (m)	L e y e s				
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn
N-75-1	1.60	2.0	190	1.0	2.0	3.0
N-77-1	1.40	2.0	170	2.0	1.0	1.0
N-79-1	1.70	3.0	1500	3.0	2.0	2.0
N-81-1	1.50	8.0	500	5.0	3.0	1.0
N-83-1	0.80	1.0	800	4.0	5.0	2.0
N-85-1	1.50	2.0	1400	2.0	0.0	0.4
N-87-1	2.00	1.0	1300	5.0	0.2	0.4
N-89-2	1.80	2.0	1000	6.0	0.5	1.0
N-91-2	1.60	4.0	1200	5.0	2.0	2.0
N-93-2	2.20	3.0	1000	4.0	3.0	3.0
N-95-2	2.10	1.0	300	3.0	3.0	2.0
N-97-2	1.00	2.0	400	2.0	3.0	2.0
N-99-2	0.80	6.0	100	0.0	0.0	7.0
N-101-2	1.30	1.0	50	6.0	1.0	1.0
$\Sigma$	21.30					

Localidad	Ancho (m)	L e y e s				
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn
CP-1-0	1.60	2.0	190	1.0	2.0	3.0
CP-1-2	1.40	2.0	170	2.0	1.0	1.0
CP-1-4	1.70	3.0	1500	3.0	2.0	2.0
CP-1-6	1.50	8.0	500	5.0	3.0	1.0
CP-1-8	0.80	1.0	800	4.0	5.0	2.0
CP-1-10	1.50	1.5	1400	2.0	0.0	0.2
CP-1-12	2.00	1.0	1300	5.0	0.2	0.4
CP-1-14	1.80	2.0	1000	6.0	0.5	1.0
CP-2-16	1.60	4.0	1250	5.0	2.0	2.0
CP-2-18	2.20	3.0	1000	4.0	3.0	3.0
CP-2-20	2.10	1.0	300	3.0	3.0	2.0
CP-2-22	1.00	2.0	400	2.0	3.0	2.0
CP-2-24	0.80	6.0	100	0.0	0.0	7.0
CP-2-26	1.30	1.0	50	6.0	1.0	1.0
CP-2-28	1.00	1.0	500	2.0	1.0	2.0
CP-2-30	1.00	1.0	1000	1.0	0.0	1.0
$\Sigma$	23.30					

Con los resultados proporcionados por el laboratorio de análisis químico, los cuales se encuentran registrados en las tablas anteriores, se procederá a calcular *los contenidos* de todas y cada una de las muestras para después proceder con la estimación de la *ley media* del bloque. Para iniciar los cálculos, se usarán de las siguientes fórmulas empíricas:

$$\text{Contenido} = \text{ancho ley} \quad (1)$$

$$\text{Ley media} = \frac{\text{de contenidos}}{\Sigma \text{ de ancho}} \quad (2)$$

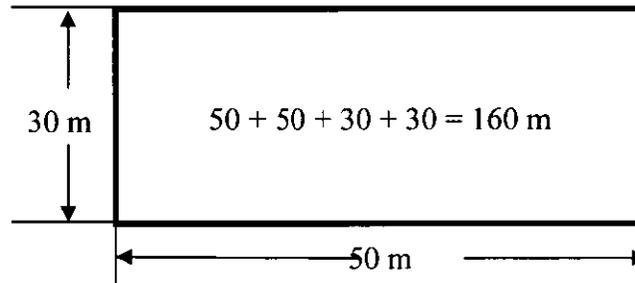
Contenidos									
Niveles					Contrapozos				
Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Au	Ag	Pb	Cu	Zn
3.2	304	1.6	3.2	4.8	3.2	304	1.6	3.2	4.8
2.8	238	2.8	1.4	1.4	2.8	238	2.8	1.4	1.4
5.1	2550	5.1	3.4	3.4	5.1	2550	5.1	3.4	3.4
12.0	750	7.5	4.5	1.5	12.0	750	7.5	4.5	1.5
0.8	640	3.2	4.0	1.6	0.8	640	3.2	4.0	1.6
3.0	2100	3.0	0.0	0.3	2.3	2100	3.0	0.0	0.3
2.0	2600	10.0	0.4	0.8	2.0	2600	10.0	0.4	0.8
3.6	1800	10.8	0.9	1.8	3.6	1800	10.8	0.9	1.8
6.4	1920	8.0	3.2	3.2	6.4	2000	8.0	3.2	3.2
6.6	2200	8.8	6.6	6.6	6.6	2200	8.8	6.6	6.6
2.1	630	6.3	6.3	4.2	2.1	630	6.3	6.3	4.2
2.0	400	2.0	3.0	2.0	2.0	400	2.0	3.0	2.0
4.8	80	0.0	0.0	5.6	4.8	80	0.0	0.0	5.6
1.3	65	7.8	1.3	1.3	1.3	65	7.8	1.3	1.3
					1.0	500	2.0	1.0	2.0
					1.0	1000	1.0	0.0	1.0
55.7	16277	76.9	38.2	38.5	57.0	17857	79.9	39.2	415

Ley promedio	
Niveles	Contrapozos
Au = 55.7/21.3 = 2.6 g/t	Au = 57.0/23.3 = 2.47 g/t
Ag = 16277/21.3 = 764 g/t	Ag = 17857/23.3 = 766.4 g/t
Pb = 76.9/21.3 = 3.61 %	Pb = 79.9/23.3 = 3.42 %
Cu = 38.2/21.3 = 1.79 %	Cu = 39.2/23.3 = 1.68 %
Zn = 38.5/21.3 = 1.79 %	Zn = 41.5/23.3 = 1.78 %

$$\text{Ancho promedio en niveles} = \frac{21.3}{14} = 1.52 \text{ m}$$

$$\text{Ancho promedio en contrapozos} = \frac{23.3}{16} = 1.45 \text{ m}$$

Cálculo de los promedios del bloque



Ancho promedio

$1.52 * 50 = 76$	
$1.52 * 50 = 76$	239
$1.45 * 30 = 43.5$	---- = 1.49 m
$1.45 * 30 = 43.5$	160
-----	
	239

Ley promedio de oro

$2.60 * 50 = 130$	
$2.60 * 50 = 130$	404
$2.40 * 30 = 72$	---- = 2.50 g/ton
$2.40 * 30 = 72$	160
-----	
	404

Ley promedio de plata

$768 * 50 = 38400$	
$768 * 50 = 38400$	120240
$724 * 30 = 21720$	----- = 751 g/ton
$724 * 30 = 21720$	260
-----	
	120240

Ley promedio de plomo

$3.6 * 50 = 180$	
$3.6 * 50 = 180$	564
$3.4 * 30 = 102$	---- = 3.50 %
$3.4 * 30 = 102$	160
-----	
	564

Ley promedio de cobre

$$\begin{array}{r}
 1.80 * 50 = 90 \\
 1.80 * 50 = 90 \\
 1.60 * 30 = 48 \\
 1.60 * 30 = 48 \\
 \hline
 276
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 \\
 276 \\
 \hline
 = 1.70 \% \\
 160
 \end{array}$$

Ley promedio de zinc

$$\begin{array}{r}
 1.80 * 50 = 90 \\
 1.80 * 50 = 90 \\
 1.80 * 30 = 54 \\
 1.80 * 30 = 54 \\
 \hline
 288
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 \\
 288 \\
 \hline
 = 1.80 \% \\
 160
 \end{array}$$

b) Volumen

El peso de un bloque se estima calculando en primer lugar el volumen y multiplicando a continuación por el factor de conversión de volumen a tonelaje, es decir, por el peso específico del mineral en cuestión.

El volumen se calcula multiplicando el espesor por el área. El espesor medio se determina al calcular el promedio de anchos de las muestras. El área se calcula midiendo los lados o bien con un planímetro sobre una sección longitudinal a la escala correspondiente.

Si los anchos han sido medidos horizontalmente, el área se mide directamente sobre la sección longitudinal; pero si se miden los anchos verdaderos, el área encontrada se divide entre el seno de la pendiente a fin de corregir el error de la proyección. Aunque el procedimiento descrito es para vetas de gran buzamiento, se usan métodos análogos para criaderos de poca inclinación.

Para el cálculo de volúmenes de gran espesor o de grandes masas, puede ser conveniente usar la fórmula del prismaoide:

$$V = \frac{A_1 + 4A_2 + A_3}{6} h$$

donde

- $A_1$  Área de la base superior
- $A_2$  Área de la sección media
- $A_3$  Área de la base inferior
- $h$  Altura del prisma

### c) Tonelaje

La conversión del volumen en tonelaje es muy simple si se usan medidas métricas, sólo hay que multiplicar el volumen en metros cúbicos por el peso específico en gramos por centímetro cúbico para obtener el peso en toneladas métricas.

Si se requiere expresar el volumen en pies cúbicos, se tendrá que dividir entre el factor tonelaje-volumen (cantidad de pies cúbicos en una tonelada de mineral).

Dado que las estimaciones de mineral se hacen siempre con base en toneladas secas (sin humedad), cualquier determinación a este respecto se debe corregir por su contenido de agua. En la práctica, errores pequeños en el factor tonelaje-volumen son menos importantes que errores en la ley, pues no afectan el aprovechamiento por tonelada. Lo que sí afectan es la estimación de la vida productiva de la mina que sólo en casos aislados puede ser determinada con precisión, como por ejemplo en yacimientos plenumensurados, o sea, aquéllos capaces de ser medidos y demostrados en una fase temprana de la operación.

### d) Por bloques

Una vez calculado el tonelaje y la ley de cada bloque, se suman los tonelajes de los bloques individuales y la ley media se determina multiplicando la ley de cada bloque por su tonelaje, para obtener su contenido. Se hace la sumatoria de contenidos y tonelaje de los tres bloques, para que una vez realizado, se divida la suma de contenidos entre la sumatoria de tonelajes, obteniéndose así la ley media de los bloques.

Localidad	Tonelaje (ton)	Ley (%)	Contenido (ton) (ley)
Bloque No. 1	1760	6.10	10736
Bloque No. 2	2384	8.40	20026
Bloque No. 3	5760	7.40	42624
$\Sigma$	9904		73386
Ley promedio		7.41	

$$Ley\ media = \frac{\text{contenidos}}{\Sigma\ \text{tonelajes}} = \frac{73386}{9904} = 7.41\%$$

## 2.4 Cálculo de reservas minerales

### 2.4.1 Generalidades

La estimación de reservas en la industria minera ha sido una característica de relevante importancia en la evaluación de depósitos minerales durante todas las etapas de su desarrollo. Antiguamente este tipo de evaluaciones se apoyaban en hechos y en la experiencia e intuición de quien la realizaba. Hoy en día, ante las necesidades cada vez más crecientes de la industria, y al mejor conocimiento de los depósitos y métodos, tanto de muestreo como de minado, las técnicas para el cálculo de reservas minerales se han visto mejoradas notablemente.

El propósito fundamental del cálculo de reservas de un yacimiento consiste en determinar la cantidad de mineral presente y la factibilidad de realizar la explotación comercial de dichos minerales metálicos y no metálicos. Este tipo de cálculos se realizan durante toda la vida productiva de la empresa, comenzando desde la etapa de prospección preliminar hasta el final de su actividad comercial o hasta el agotamiento de las reservas contenidas en el depósito. Una explotación eficiente y productiva sería imposible sin la ayuda de un cálculo preciso. También es importante conocer la potencialidad del yacimiento para determinar el límite de las exploraciones y desarrollos geológicos; la distribución de los valores dentro del cuerpo; el tipo de tratamiento metalúrgico a que deberán ser sometidos éstos; el tamaño y tipo de equipo que se deberá instalar en la mina y en la concentradora; el ritmo de producción diaria; la producción global anual; la estimación de la vida activa de la mina; el método minero de explotación; los

requerimientos de capital y financiamiento; los requerimientos de energía, mano de obra, materiales, agua, etc.

El resultado del cálculo de reservas se emplea como un valioso auxiliar en el departamento de planeación para determinar los costos de producción, estimar la eficiencia de la operación y las pérdidas de minado (índices de recuperación); para el control de calidad de los productos; para el financiamiento de otros proyectos; para la venta de productos; para la compra de materiales y equipos, y para la consolidación financiera de la empresa, incluyendo en este último renglón, los rubros de contabilidad e impuestos.

Derivado de todo lo anterior y como consecuencia del breve análisis expuesto, es fácil deducir la importancia que reviste el conocimiento de las reservas minerales contenidas en un depósito sujeto a la posibilidad de una explotación minera comercial. La bibliografía sobre el tema describe numerosos métodos de estimación de reservas, algunos de los cuales, sólo son ligeras modificaciones de los más usuales.

Para proceder al cálculo de reservas de un depósito mineral (reducido y distorsionado por el mapeo) es conveniente convertirlo a un cuerpo geométrico análogo, compuesto por uno o varios bloques, de tal forma que expresen lo mejor posible el tamaño, la forma y la distribución de las variables. La construcción de estos bloques dependerá del método de estimación que se seleccione. Algunos sistemas ofrecen más de una forma de construir los bloques, introduciendo de esta forma la subjetividad; en cuyo caso, una manera apropiada y aceptada será aquella en que preferentemente se tomen como base, factores geológicos, mineros y económicos.

#### **2.4.2 Clasificación de métodos para el cálculo de reservas**

Dependiendo del criterio que se emplee para substituir o transformar el cuerpo explorado en bloques auxiliares y de la forma que se use para los cálculos numéricos de las variables, los métodos convencionales de estimación de reservas pueden ser clasificados dentro de cuatro grupos, además de dos métodos más modernos que involucran el uso de computadoras, programas de cómputo especiales y técnicos altamente capacitados en estas disciplinas, quienes finalmente harán la interpretación de la información obtenida en campo.

Clasificación de los métodos de evaluación de reservas minerales

## Métodos convencionales <sup>1</sup>

1. Métodos de factores y áreas de influencia
  - a) Método analógico
  - b) Método de bloques geológicos
2. Métodos de bloques minables
3. Métodos de secciones transversales
  - a) Método estándar
  - b) Método lineal
  - c) Método de isolíneas
4. Métodos analíticos (geométricos)
  - a) Método de triángulos
  - b) Método de polígonos

## Métodos computarizados

1. Métodos estadísticos
2. Métodos geoestadísticos

### 2.4.2.1 Métodos convencionales

#### 1. Métodos de factores y áreas de influencia

Las áreas involucradas en el cálculo son delineadas y delimitadas en primera instancia por criterios geológicos y después por criterios mineros y económicos. Las variables fundamentales, tales como dimensiones del cuerpo, ley del mineral y factores de influencia se determinarán directamente, ya sea por cálculos estimativos o por características afines tomadas de otras porciones del mismo depósito o de otros depósitos similares.

---

<sup>1</sup> Constantine C. Poppoff. Circular No. 8283. "Computing Reserves of Mineral Deposits: Principles and Conventional Methods". *U.S. Bureau of Mines*. Washington, 1967.

## 2. Métodos de bloques minables

Estos métodos involucran la delineación de las áreas de los bloques, por medio de trabajos mineros subterráneos y por consideraciones de carácter geológico y económico. Los factores definidos para cada bloque son calculados analíticamente en diversas formas. Como su nombre lo indica, este método es empleado fundamentalmente en la etapa de extracción.

## 3. Métodos de secciones transversales

El cuerpo mineral se delinea y los bloques se conforman con base en ciertos principios de interpretación de los datos de exploración. Los parámetros de los bloques y del cuerpo mineral completo se determinan de varias formas.

## 4. Métodos analíticos o geométricos

Para aplicar estos métodos, se hace necesario dividir gráficamente el cuerpo mineralizado en bloques de formas geométricas simples (prismas triangulares y prismas poligonales). Los factores para cada bloque se determinan directamente, se calculan valores aritméticos promedio o se emplean determinaciones semejantes.

### 2.4.2.2 Métodos computarizados

#### 1. Métodos estadísticos

Al igual que los métodos convencionales, los métodos estadísticos requieren de una base de datos obtenidos directamente de campo. Estos datos debidamente clasificados y registrados están constituidos fundamentalmente por datos de carácter geológico (delimitación y morfología), muestreo y determinación mineralógica (ley, volumen y tonelaje).

Con los datos obtenidos, se elaboran gráficas o diagramas estadísticos donde quedarán asentadas las frecuencias relativas de ocurrencia de la información manejada, sin considerar su posición en el espacio.

## 2. Métodos geoestadísticos

Para la aplicación de estos métodos se requiere de equipo de cálculo más sofisticado (computadoras y equipo periférico) y personal técnico altamente capacitado. Con la ayuda de la computadora como herramienta básica, estos métodos procesan un gran cúmulo de datos en tiempos relativamente cortos, permitiendo el manejo de mucha más información en menos tiempo.

Al igual que en los métodos anteriores la base de datos la constituye información geológica y muestreo obtenidos directamente de campo. La diferencia fundamental con los métodos estadísticos estriba en que las muestras de la población desconocida son siempre muestras aleatorias e independientes entre sí. La base geoestadística se apoya en la teoría de las "variables regionalizadas", la cual relaciona la magnitud de las variables (ley, rango, peso, etc.) con su posición en el espacio, siendo este último concepto, la diferencia con el método estadístico clásico.

### 2.4.3 Requerimientos para el cálculo de reservas

Ningún cálculo de reservas en la industria minera resulta justificable a menos que se realice y se use; por tanto, estos trabajos deberán elaborarse únicamente cuando se requieran. El método de cálculo ideal será simple, rápido y confiable de acuerdo con las características del cuerpo mineral y de la información disponible. Adicionalmente, también tendrá que ser adecuado para una rápida comprobación.

Los costos por conceptos de estimación de reservas, se espera que sean sensiblemente más bajos, comparados con los costos de exploración y desarrollo, aunque en ocasiones algunos métodos más complejos son justificables, particularmente cuando la disponibilidad de los equipos de cálculo (calculadoras y computadoras) hace que se tengan ahorros substanciales por concepto de mano de obra.

En la selección del método, las particularidades y conveniencias de automatización deberán ser cuidadosamente consideradas en función tanto de los volúmenes y magnitud de los trabajos por realizar, como de la exactitud requerida en las estimaciones.

El método sujeto a selección será cuidadosamente estudiado, determinando en detalle los procedimientos de trabajo y la exactitud de los cálculos. Para lograr lo anterior, las fórmulas empíricas que se empleen serán lo más sencillas que sea posible. La selección adecuada de los

procedimientos facilitará el proceso de estimación y proporcionará el mismo grado de exactitud aun para los métodos más complejos.

El tratamiento objetivo de los datos reales tomados de campo es considerado por muchos técnicos de las ciencias de la Tierra como uno de los más importantes requerimientos. Algunos investigadores establecen que sus estudios y fórmulas fueron diseñadas para un determinado fin:

"Un método de cálculo que elimine todas las pruebas y criterios del calculista y deje solamente las matemáticas puras, será un método que pueda ser manejado casi enteramente por una máquina calculadora,(...) lo cual resulta indeseable".

Los cálculos de reservas deben alcanzar el propósito de la evaluación y, cuando resulte apropiado, ilustrar también la distribución de las variables. La confiabilidad de un cálculo de reservas depende fundamentalmente de la exactitud y del total conocimiento del depósito. También dependerá de las suposiciones aceptadas para la interpretación de las variables, de los límites del cuerpo mineral, de la exactitud de los promedios ponderados y del empleo de fórmulas matemáticas. Los requerimientos de recursos necesarios para determinar la cantidad y densidad de las observaciones dependerá fundamentalmente del tamaño y tipo de depósito.

Durante las últimas décadas, la eficiencia y exactitud en el cálculo de reservas, ha mejorado gradualmente gracias a los avances en el campo de la geología económica; al incremento de profesionales de la ingeniería; al mejoramiento en las técnicas de exploración, muestreo, mìnado y evaluación; al uso de análisis estadísticos y a una más eficiente administración.

El creciente uso de máquinas procesadoras de datos (computadoras) ha hecho posible el procesar grandes cantidades de datos de exploración en forma de tarjetas y cintas perforadas, discos y cintas magnéticas, casetes, disquetes, etc. El uso de computadoras permite la utilización de dos o más métodos convencionales de cálculo de reservas, produciendo mayor exactitud, incremento en la velocidad de procesamiento y ahorro en mano de obra.

#### **2.4.4 Criterio de selección del método**

En general, la selección del método más adecuado para la estimación de reservas depende directamente de factores tales como: geología del depósito, método de exploración, disponibilidad y confiabilidad de los datos en los cuales se basará el estudio, propósitos del cálculo y grado de exactitud requerido.

Si los cálculos son preliminares o se requieren inmediatamente, se escogerá el método más simple, que no requiera de planos especiales. Si los cálculos son fundamentales para el diseño de una operación, la selección del método dependerá del sistema de explotación que se esté considerando como más viable, dado que la ley mínima explotable, recuperación, dilución, eficiencia del equipo, mano de obra y costos unitarios variarán directamente en función del sistema seleccionado. Un método simple puede ser el más adecuado, cuando por ejemplo en una operación a tajo abierto, la extracción selectiva del tepetate o del mineral marginal se elimina. Cálculos de reservas en depósitos horizontales (mantos) son menos complejos que aquellos que se realizan para depósitos tabulares (vetas) de alta ley, depósitos con volúmenes reducidos o depósitos diseminados con valores irregularmente distribuidos.

Los trabajos de exploración ya sea por retícula, por secciones transversales o por barrenación aleatoria, también pueden afectar la selección del método de estimación. Siempre resultará deseable que durante la etapa de exploración se use un método que permita aumentar paso a paso las reservas en lugar de recalcular todo periódicamente. En consecuencia, la naturaleza de los diversos métodos de estimación será cuidadosamente considerada.

Aunque los métodos sencillos sean los preferidos, en ocasiones los más complicados pueden ser ampliamente justificados. Ambos extremos deberán evitarse, ya que la simplificación exagerada de la información, conducirá a graves omisiones de la naturaleza geológica del depósito; por el contrario, la complicación extremada de los datos llevará a la obtención de información con precisión no garantizada, lo que puede conducir a una elevación de los costos del proyecto hasta el punto de tornarlo potencialmente incosteable. La maximización en el uso de todos los datos recolectados en el proceso de exploración constituye una muy importante consideración. Una planeación pobre y deficiente, así como una sobreexploración darán como resultado una cantidad excesiva de datos innecesarios para ser aceptados como elementos de exactitud en los cálculos.

#### **2.4.5 Análisis de los datos de exploración**

El cálculo de reservas de un depósito mineral es un procedimiento técnico que consta de diversas operaciones. El orden de dichas operaciones y su ejecución usual es el siguiente:

1. Apreciación geológica.
2. Apreciación en los métodos de exploración y muestreo.
3. Evaluación de los datos de exploración.

4. Delineación y delimitación del cuerpo mineral.
5. Selección de un método adecuado de cálculo.

La importancia del conocimiento de la geología del depósito resulta fundamental tanto para entender algunos conceptos como el tamaño, forma y distribución de valores, como para poder dar sentido a la interpretación de los datos de exploración. La apreciación geológica incluye la obtención, verificación y presentación de los datos de exploración en forma de gráficas, tablas, mapas y secciones a una escala adecuada, asumiendo la hipótesis de trabajo en el origen de la mineralización.

El método de exploración, esto es, el tipo y la densidad de los trabajos realizados y de las muestras tomadas, debe ser estudiado concienzudamente para determinar la ubicación y la exactitud de los datos desde el punto de vista de la geología, la configuración geométrica de los cuerpos, los patrones de distribución de las variables, los errores y la categoría de las reservas. Tales apreciaciones son siempre complementadas por análisis estadísticos y por comparación con otros depósitos similares en tipo y forma.

El análisis de los datos de exploración (el cual invariablemente resulta el paso más engorroso durante la evaluación) es siempre acompañado por la definición de los parámetros internos y externos de las porciones económicamente minables del cuerpo mineral, por la determinación de la precisión de las medidas y análisis, y por la determinación de que si la cantidad de trabajos exploratorios en las diversas porciones del cuerpo alcanzaron los requerimientos mínimos para ser clasificados dentro de una determinada categoría de reservas.

#### **2.4.6 Procedimiento para la estimación de reservas**

Para realizar un cálculo de reservas, primero se delinearé el cuerpo mineral, para después subdividirlo mediante diversos métodos en segmentos o bloques de diferentes grados de confiabilidad.

El procedimiento usual para el cálculo de volúmenes es el de substituir gráficamente la forma irregular del cuerpo mineral por otro imaginario y auxiliar, con la superficie de base coincidiendo con el plano de una sección longitudinal. Este cuerpo auxiliar será entonces reemplazado por una o más figuras geométricas simples y sólidas que indiquen el volumen de tal prisma, el que podrá ser calculado mediante el uso de sencillas fórmulas geométricas. La división del cuerpo mineral en bloques se hace de acuerdo con un método seleccionado, de tal forma que

cada bloque pueda ser directamente relacionado con otro o con alguna serie de valores de exploración adecuadamente obtenidos de campo.

Las reservas del cuerpo mineral completo se calculan determinando áreas y volúmenes para cada bloque, para después convertir los volúmenes en toneladas de mineral crudo y obtener las leyes promedio de los minerales comerciales. Finalmente y de acuerdo con la tabulación de resultados, clasificar los bloques por categorías, tales como: positivas, probables y posibles.

#### **2.4.7 Elementos principales para el cálculo**

El cálculo de reservas requiere conocer de las características dimensionales, morfológicas y cualitativas del cuerpo mineralizado. Esta información se obtiene por investigación directa (mediciones, análisis químicos y experimentaciones), e indirectamente por suposiciones, interpretaciones y cálculos numéricos.

Toda la información básica de las variables de los bloques en que previamente fue dividido el cuerpo entero (longitud, ancho, espesor, factores de peso y ley), obtenidas por simple observación o por cálculos ponderados, podrá ser localizada exactamente en planos o mapas, mediante números asignados a puntos de referencia definidos o como líneas cuyas longitudes se dibujarán a escala.

Para obtener la información preliminar, se hará uso frecuente de las técnicas de muestreo, cuya finalidad básica es la de obtener pequeñas partes representativas de los lugares que son objeto del estudio. La teoría del muestreo para dichos métodos está basada en la hipótesis de que la distribución de la mineralización de un yacimiento ha sido efectuada siguiendo un cierto orden o arreglo, de tal forma que si se toma un número considerable de muestras distribuidas convenientemente, el promedio de ellas representará adecuadamente la zona investigada.

Con la información obtenida por el muestreo, se tendrán las bases para la correcta evaluación de las reservas minerales contenidas en el depósito, así como el conocimiento exacto de la calidad y ley del mineral que se está explotando o explorando. Esto quiere decir que las técnicas de muestreo y sus resultados también pueden ser utilizados como elementos de control en las operaciones de producción.

Existen diversos métodos de muestreo diferentes entre sí y con aplicaciones también diversas para cada caso. Entre los más empleados se pueden mencionar los siguientes:

1. Muestreo por zanjas.
2. Muestreo por pozos.
3. Muestreo de canal.
4. Muestreo de lodos.
5. Muestreo de polvos.
6. Muestreo por carros mineros.
7. Muestreo a pala.
8. Muestreo de núcleos de barrenación.

La finalidad de todos ellos es recoger la misma cantidad de material tomado de las diferentes partes que forman el área en estudio, que en conjunto, constituirán la muestra representativa de la zona. "Cualquier otra técnica que tenga la tendencia a una selección de partículas o a la obtención desproporcionada de un solo tipo de material deberá ser descartada", pues la base esencial de todo buen muestreo es la imparcialidad o la no selección del material muestreado. A esta técnica se le conoce con el nombre de "muestreo aleatorio" o "al azar", en la que todas las partículas de la zona muestreada, teóricamente, tendrán la misma oportunidad de ser seleccionadas sin ninguna parcialidad dirigida

#### **2.4.8 Preparación mecánica y ensaye de la muestra**

Una vez que la muestra ha sido cortada, el siguiente paso será su preparación, procedimiento de particular importancia y quizá al que se le da menor atención. Se denomina "preparación mecánica", porque los medios que se emplean, tanto para la reducción del volumen como para la reducción de tamaños de las partículas, son exclusivamente mecánicos, sin la intervención de ningún otro medio de índole diferente. Los mecanismos de laboratorio más usados para estos fines son las quebradoras (de quijada y/o de cono), pulverizadores, cribas (o tamices) y separadores o "cortadores" de material.

La metodología de trabajo que generalmente se sigue es la de reducir primeramente el tamaño de los fragmentos de la muestra a  $\frac{1}{4}$  de pulgada, empleando las quebradoras de quijada. La obtención de dicho tamaño queda asegurada mediante el empleo del tamiz correspondiente. Después de efectuada la operación de trituración-clasificación, el material será homogeneizado mezclando perfectamente todos los productos obtenidos, para inmediatamente después reducir el volumen del material en caso de que la cantidad total de la muestra resulte excesiva. Se continuará con la reducción de tamaños, empleando ahora quebradoras de cono y tamices de -10 mallas, repitiendo el procedimiento de "recorte de volumen". A continuación, la muestra redu-

cida se somete a un proceso de secado hasta eliminar todo vestigio de humedad, para continuar con las etapas de homogeneización y reducción de tamaños y volúmenes, ahora con pulverizadores y tamices con aberturas de 100 mallas. Si por deficiencias de operación mecánica de los pulverizadores algunas partes del material quedan de mayor tamaño que los requeridos, estas porciones deberán ser pulverizadas manualmente en un "mortero" de tal forma que se asegure una recuperación del 100% de la muestra en la última parte del proceso de preparación mecánica. Finalmente y previa homogeneización, la muestra se dividirá en dos partes como mínimo, una de las cuales será enviada a los laboratorios de ensaye para su análisis químico y la otra se almacenará con objeto de conservar una "muestra-testigo" en los registros de la empresa o para comprobaciones posteriores, en caso de que fueran requeridas. Ocasionalmente se obtiene una tercera parte de la muestra que se destina a "tercerías", cuya finalidad será la de obtener un tercer resultado del análisis, cuando existan discrepancias notables en los dos anteriores.

Los análisis químicos se realizan por diferentes vías (húmeda, seca o por absorción atómica), dependiendo del tipo de minerales de interés comercial (metálicos o no-metálicos) y de la mena, ganga o roca que los contenga. La información obtenida de los ensayes son datos referentes a la ley del mineral y al comportamiento químico ante diversas reacciones.

Una vez que se ha completado el proceso de preparación mecánica y ensaye químico, los datos obtenidos se registrarán en formas de reporte especialmente diseñadas para tal fin y en donde quedarán asentados el número de la muestra, la procedencia, la localidad, etc. Toda esta información deberá ser archivada para formar parte del expediente del estudio global que conducirá a la estimación total de las reservas contenidas en el depósito.

#### **2.4.9 Clasificación de las reservas minerales**

Dentro de los estudios globales de evaluación y cuantificación de reservas minerales, éstas se encuentran clasificadas en grupos perfectamente definidos atendiendo al grado de confiabilidad asignado a cada categoría, los que a su vez dependerán de la información que se obtenga dentro del área investigada. La información requerida se puede obtener a través de obras mineras directas (frentes, cruceros, pozos, contrapozos, etc.), por medio de obras indirectas (barrenación a diamante y pulsadoras) o bien por una combinación de ambas. Con esta información se puede "conocer" dos, tres o más lados de un bloque mineral y en función de ello, las reservas podrán ser agrupadas dentro de alguna de las siguientes clasificaciones:

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Positivas Probables Posibles	Probadas Probables Posibles	Medidas Indicadas Inferidas	Desarrolladas Prospectivas -----	Explotables De interés -----

Estas clasificaciones son comúnmente empleadas por agencias gubernamentales de los Estados Unidos de América, como el *Geological Survey, U.S. Bureau of Mines, The Securities and Exchange Commission* y por muchas compañías independientes o particulares, de acuerdo con el significado que adopte la política de cada una de ellas.

En términos comerciales de geología minera, la cual se encuentra afectada directamente por factores de tipo económico, no es difícil encontrar analogías entre reservas "desarrolladas" y reservas "probadas", o entre "probables", "posibles" y de "extensión", cuyas definiciones para mayor claridad de los conceptos, se hará a continuación.

a) Reservas probadas o desarrolladas

Tal y como el término lo indica, "reservas probadas" se refiere a aquel mineral que se encuentra completamente expuesto o lo que es lo mismo, conocido por los cuatro lados que limitan al bloque que lo contiene, el cual además deberá encontrarse en disposición inmediata para ser extraído por el método de minado seleccionado.

b) Reservas probables

Este tipo de reservas son representadas por el mineral cuya ocurrencia, para efectos de estimación, se encuentra razonablemente asegurada, pero sin una certeza absoluta. Se le puede asignar una ley conservadoramente definida, a menos que las obras de extracción hayan avanzado hasta el punto en que el mineral probable pueda ser integrado como mineral explotable. La ley asignada a la mayoría de los bloques "probables" puede ser la ley determinada por los bloques contiguos clasificados como "probados".

c) Reservas posibles o de extensión

Este tipo de reservas, conocido por algunos autores como el "mineral del futuro", es de la clase de material cuya existencia tiene una razonable posibilidad de existir, hipótesis basada funda-

mentalmente en la potencia del depósito, en la continuidad de las condiciones geológico-mineralógicas y en la extensión de los cuerpos mineralizados desarrollados hasta ese momento, indicaciones a través de las cuales, se pueden obtener signos de continuidad que indiquen lo que se puede esperar a medida que avancen las excavaciones. Debido a la escasez de trabajos de exploración en estas áreas (los cuales podrán revelar la existencia de algunos valores), a las reservas posibles no se les puede asignar ninguna ley con una certeza práctica, ni tampoco se podrá expresar ninguna cantidad definida. Reservas de extensión es el mineral que prácticamente deberá ser considerado como "posible", dado que representará al mineral que se cree o se supone que existe adelante de las caras expuestas de los bloques conocidos o de los frentes de exploración.

#### d) Reservas medidas

Comprende todo el mineral cuyo tonelaje es calculado por las dimensiones reveladas en afloramientos, zanjas, barrenos, etc., con leyes calculadas a partir de los resultados obtenidos de un muestreo detallado. Las áreas de inspección, muestreo y medida deberán localizarse dentro de una cercanía razonable, definiendo perfectamente las características geológicas, de tal manera que la forma, el tamaño y el contenido mineral queden bien establecidos.

#### e) Reservas indicadas

Es el mineral cuyo tonelaje y ley son calculados por una parte a base de mediciones específicas de muestreo o de datos de producción, y por la otra a través de las evidencias geológicas presentes en el terreno.

#### f) Reservas inferidas

Las estimaciones cuantitativas de este tipo de mineral están basadas fundamentalmente en el amplio conocimiento de las características geológicas del depósito, donde existen pocas o ninguna muestra o medida. La estimación se fundamenta en la continuidad o repetición de la evidencia geológica, la cual puede incluir comparaciones con otros yacimientos de tipo semejante.

## 2.4.10 Técnicas para el cálculo de reservas

Los métodos convencionales para el cálculo de reservas se encuentran perfectamente definidos y agrupados bajo la siguiente clasificación:

1. Pesos y áreas de influencia
  - a) Método de analogía
  - b) Método de bloques geológicos
  
2. Secciones transversales
  - a) Método estándar
  - b) Método lineal
  - c) Método de isolíneas
  
3. Analíticos o geométricos
  - a) Método de triángulos
  - b) Método de polígonos

### 2.4.10.1 Pesos y áreas de influencia

Este método ha sido descrito en diversas formas, como: método de promedios aritméticos, método de pesos promedio, método análogo (o por analogía), método de bloques geológicos, etc. En este trabajo, los métodos de pesos y áreas de influencia serán descritos bajo los nombres de método de analogía y método de bloques geológicos.

#### a) Método de analogía

Está basado en la suposición de que ciertos segmentos o bloques del cuerpo mineral considerado son similares en características geológicas y mineralógicas. Para efectos de cálculo, el cuerpo se divide en segmentos o bloques construidos con base en factores geológicos, mineros y económicos, es decir, estructura, potencia, ley, valor comercial, profundidad y tipo de roca encajonante.

En algunos casos, características cualitativas encontradas en algunas partes de la masa mineralizada pueden ser aceptadas con fines de cálculo como partes representativas del bloque del cuerpo mineral entero (figura 2.11).

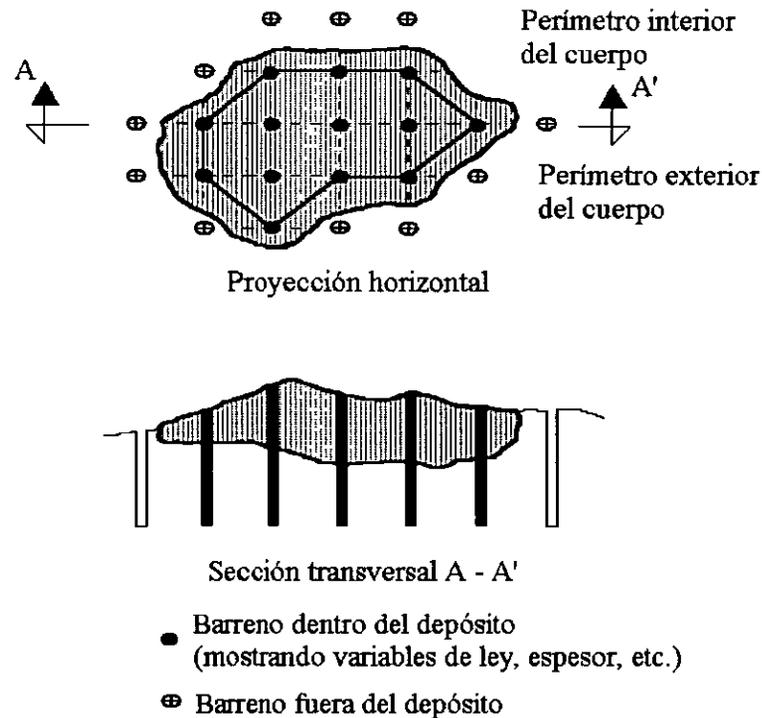


FIGURA 2.11 Método de analogía (pesos y áreas de influencia)

Tomado de Popoff, C. Constantine, 1967

Si los bloques son de igual tamaño, cada observación y análisis de muestras tendrá igual influencia en determinar los factores de peso. Si el número de variables en un bloque se presentan en cantidad suficiente, los factores pueden ser calculados y estudiados por análisis estadístico.

Estas variables pueden ser tomadas en una o varias observaciones, o calculadas tomando datos del propio depósito o de otros de similares características; el método de analogía por tanto sólo puede ser empleado donde exista cuando menos una observación o dato disponible. Segmentos o bloques con diferentes factores de control requerirán del empleo del método de bloques geológicos. Cuando la geología de un área o depósito se considera análoga a otra, una sola observación puede ser suficiente para el cálculo de reservas de un determinado mineral.

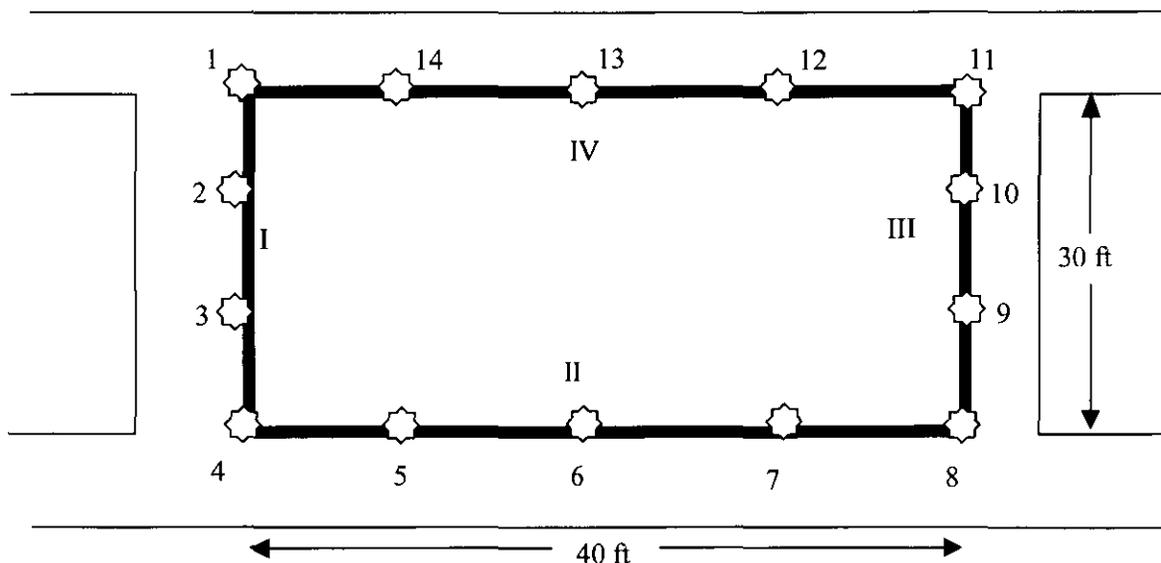
Los pesos de influencia es la operación de asignar ciertos factores a cada una de las observaciones o conjunto de ellas, para representar su valor relativo, localización e importancia, comparadas con otras observaciones del mismo tipo o naturaleza. Estas asignaciones pueden hacerse con base en unidades de longitud, área, volumen o tonelaje, determinando cada una de ellas por simple promedio aritmético de los datos, conjuntamente con otro tipo de consideraciones subjetivas, tales como criterio y experiencia del calculista.

EJEMPLO 1

La siguiente figura representa una porción de una veta, la cual ha sido bloqueada por obras mineras subterráneas (dos niveles y dos contrapozos), con objeto de preparar un rebaje para su explotación.

Para proceder con la preparación del bloque se requiere conocer el volumen de mineral contenido en él, la ley promedio de cada una de las caras formadas partiendo de los resultados de los análisis de laboratorio que se realizaron a cada una de las 14 muestras tomadas en la periferia del bloque y el tonelaje de éste, suponiendo una densidad de 3.8 para el mineral.

Nótese que se han tomado muestras en las esquinas del bloque, cuyo intervalo de influencia en cuanto a ley será de uno, mientras que las restantes tendrán un intervalo de dos, atendiendo a la distribución geométrica de las muestras tomadas en las caras del bloque.



Ensaye de laboratorio					
Muestra No.	Ancho (ft)	Ley (%)	Muestra No.	Ancho (ft)	Ley (%)
1	5.0	20.00	8	5.0	24.00
2	6.0	16.00	9	4.0	52.00
3	6.0	36.00	10	5.0	38.00
4	4.0	35.00	11	7.0	19.00
5	5.0	41.00	12	6.0	22.00
6	5.0	29.00	13	7.0	26.00
7	8.0	18.00	14	4.0	48.00

Cálculo de la ley promedio

Cara 1

Muestra No.	Ley (L)	Ancho (a)	Intervalo (w)	Contenido (L*a*w)	Ancho*intervalo [(a)(w)]
1	20	5.0	1	100	5.0
2	16	6.0	2	192	12.0
3	36	6.0	2	432	12.0
4	35	4.0	1	140	4.0
		21.0	6	864	33.0

$$\text{Ancho promedio} = \frac{a W}{\Sigma(W)} = \frac{33}{6} = 5.5 \text{ pies}$$

$$\text{Ley promedio} = \frac{\text{contenidos}}{\Sigma[(a)(W)]} = \frac{864}{33} = 26.18\%$$

Cara 2

Muestra No.	Ley (L)	Ancho (a)	Intervalo (w)	Contenido (L*a*w)	Ancho*Intervalo [(a)(w)]
4	35	4.0	1	140	4.0
5	41	5.0	2	410	10.0
6	29	5.0	2	290	10.0
7	18	8.0	2	288	16.0
8	24	5.0	1	120	5.0
		27.0	8	1248	45.0

$$Ley\ promedio = \frac{1248}{45} = 27.73\%$$

$$Ancho\ promedio = \frac{45}{8} = 5.62\text{ pies}$$

Procediendo en forma similar, se obtienen los siguientes resultados:

Cara 3

$$Ley\ promedio = 34.97\%$$

$$Ancho\ promedio = 5.00\text{ pies}$$

Cara 4

$$Ley\ promedio = 27.07\%$$

$$Ancho\ promedio = 5.75\text{ pies}$$

Promedios totales para el bloque

Cara No	Long. (ft)	Ley prom. (Lp)	Ancho prom. (Ap)	Área (Ap*Long)	Contenidos (Lp)(Área)
I	30.0	28.18	5.50	165.0	4319.7
II	40.0	27.73	5.62	224.8	6233.7
III	30.0	34.97	5.00	150.0	5245.5
IV	40.0	27.07	5.75	230.0	6226.1
S	140.0			769.8	22025.0

Resultados finales para el bloque:

$$Ley\ promedio = \frac{\text{contenidos}}{\sum \text{áreas}} = \frac{22025.0}{769.8} = 28.61\%$$

$$\text{Ancho promedio} = \frac{\text{área}}{\sum \text{perímetro}} = \frac{769.8}{140.0} = 5.56 \text{ pies}$$

$$\text{Volumen} = (l)(l)(\text{ancho promedio}) = (30)(40)(5.5) = 6,600 \text{ pies}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 35.31 \text{ pies}^3$$

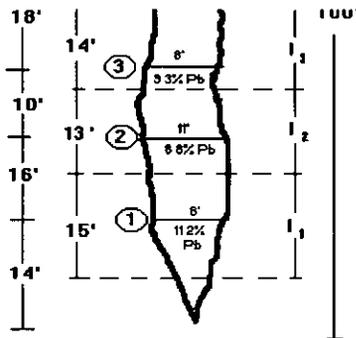
$$\text{Volumen} = (6,600 / 35.31) = 186.92 \text{ m}^3$$

$$\text{Tonelaje} = (V)(\delta)(186.92)(3.8) = 710.18 \text{ toneladas métricas}$$

## EJEMPLO 2

Durante los trabajos de construcción de una carretera, un *bulldozer* descubrió un afloramiento mineralizado de alta ley, correspondiente a un depósito de tipo vetiforme. Una sección longitudinal de este afloramiento se muestra en la figura que aparece a continuación, conjuntamente con los resultados del análisis de laboratorio, el ancho de las muestras tomadas y el espaciamiento entre ellas.

El mineral comercial resultó ser galena, con un peso específico de 7.6 y el mineral de ganga, sílice con un peso promedio de 2.7.



Para evaluar en forma preliminar este depósito, se requiere:

- Calcular la ley promedio en la cara muestreada, asumiendo que el ancho mínimo que podrán tener los rebajes es de 9 pies.
- Determinar el factor de tonelaje del depósito, o sea, la cantidad de unidades de volumen por unidad de peso, para este caso:  $\text{pies}^3/\text{tonelada}$ .

SOLUCIÓN

Como el ancho mínimo del rebaje debe ser de 9 pies

y las muestras 1 y 3 sólo tienen 8 pies de potencia, se deben ajustar las leyes del mineral, dado que se tendrá que cortar un pie de material estéril. El ajuste se hace de la siguiente manera:

$$\text{Ley ajustada} = \left[ \frac{(\text{ley muestra})}{(\text{ancho mínimo})} \right] (\text{ancho muestra})$$

$$\text{Muestra 1} = \frac{(11.2)}{(9.0)} (8.0) = (1.24) (8.0) = 9.95 \%$$

$$\text{Muestra 3} = \frac{(9.3)}{(9.0)} (8.0) = (1.03)(8.0) = 8.26 \%$$

El intervalo de influencia se calcula por promedio aritmético, sumando la semidistancia que existe arriba y abajo de la línea de muestreo.

EJEMPLO

*Muestra 3*

semidistancia arriba = 9 pies

semidistancia abajo = 5 pies

intervalo de influencia de la muestra 3 = 14 pies

Con las aclaraciones anteriores, se procede a elaborar la tabla de cálculo de la siguiente manera:

a) Cálculo de la ley promedio en la cara expuesta

Muestra No.	Ley (%)	Ancho del rebaje (pies)	Ancho veta (pies)	Intervalo influencia (pies)	Área influencia (ancho rebaje × intervalo (pies) <sup>2</sup> )	Contenido (ley) (área)
1	9.95	9.0	8.0	15.0	135.0	1343.25
2	8.80	11.0	11.0	13.0	143.0	1258.40
3	8.26	9.0	8.0	14.0	126.0	1040.76
4	7.70	12.0	12.0	20.0	140.0	1258.00
5	12.30	10.0	10.0	21.0	220.0	2706.00
Σ		51.0	49.0	83.0	854.0	8073.41

$$\text{Ley promedio} = \frac{\sum \text{contenidos}}{\text{área de influencia}} = \frac{8073.41}{854.00} = 9.45\%$$

$$\text{Ancho promedio} = \frac{\text{ancho rebaje}}{\text{No. de muestras}} = \frac{51}{5} = 10.20 \text{ pies}$$

b) Cálculo del factor de tonelaje

La galena es un sulfuro de plomo ( $PbS$ ) y su composición, según el *Textbook of Mineralogy* de Edward S. Dana, es:

$$\text{Pb} = 86.6 \% ; \quad \text{S} = 13.4 \% ; \quad \text{Gr. Sp.} = 7.6$$

Por lo que de acuerdo con esta composición, el depósito tiene:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Pb} = 9.45 \% \\ \text{S} = 1.46 \% \end{array} \right\} \text{Galena} = 10.91 \%$$

$$\text{SiO}_2 = 89.03 \%$$

$$\text{Total} = 100.0 \%$$

Para calcular el factor de tonelaje, primero se estimará el factor proporcional de cada material (tomando la gravedad específica de cada elemento, relacionada al peso de un pie cúbico de agua), para que mediante una suma aritmética, se obtenga el factor de tonelaje del depósito.

Dado que: 1 pie<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O = 62.4 lbs, entonces:

$$(\text{Gr.Sp. del material probado})(62.4) = \text{peso del material en lbs}$$

$$\text{Gr. Sp. del Pb} = 11.34 ; (11.34)(62.4) = 707.61 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Gr. Sp. del S} = 2.10 ; (2.10)(62.4) = 131.04 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Gr. Sp. del SiO}_2 = 2.70 ; (2.70)(62.4) = 168.48 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Ley de Pb} \quad 9.45 \% = 190.0 \text{ lb/ton}$$

$$\text{Ley de S} \quad 1.46 \% = 29.26 \text{ lb/ton}$$

$$\text{Ley de SiO}_2 \quad 89.09 \% = 1,781.0 \text{ lb/ton}$$

$$\text{Factor tonelaje Pb} = 190.00/707.61 = 0.2674 \text{ pies}^3/\text{ton}$$

$$\text{Factor tonelaje S} = 29.40/131.04 = 0.2223 \text{ pies}^3/\text{ton}$$

$$\text{Factor tonelaje SiO}_2 = 1780.00/168.40 = \underline{10.5800 \text{ pies}^3/\text{ton}}$$

$$\text{Factor de tonelaje para el depósito} = 11.0707 \text{ pies}^3/\text{ton}$$

$$1\text{m} = 3.28 \text{ pies}$$

$$1\text{m}^3 = (3.28)^3 = 35.31 \text{ pies}^3$$

$$\therefore 11.0707/35.31 = 0.3138 \text{ m}^3/\text{ton}$$

#### b) Método de bloques geológicos

Los factores de control en la aplicabilidad de este método son muchos y muy variados, dependiendo de las consideraciones bajo las cuales se subdivide el cuerpo, sin descartar la posibilidad de que éste por sí solo pueda constituir un bloque unitario. Los lados del bloque pueden coincidir con los límites naturales del depósito, o bien, éstos pueden ser delineados con base en factores geológicos, deformaciones estructurales, variaciones de espesor y ley, adaptabilidad a ciertos métodos de minado, requerimientos de beneficio y proceso, disponibilidad de eral a profundidad, etc. (figura 2.12).

FIGURA 2.12 Método de bloques geológicos (pesos y áreas de influencia)

Tomado de Popoff, C. Constantine, 1967

Los factores se determinan a partir de datos de exploración, o bien éstos pueden ser adaptados de resultados de muestreo promedio de producción o de datos provenientes de otras partes del depósito. La interpretación de estos datos se puede hacer por las reglas de "cambios graduales", "del punto más cercano" o por generalización. Los parámetros de cada bloque son determinados por el procedimiento descrito para el método de analogía. La ley promedio para cada bloque podrá calcularse por promedios aritméticos, promedios de pesos de influencia o por análisis estadístico. Las reservas de cada bloque se calculan como el promedio del área por los factores promedio y las reservas totales estarán constituidas por la suma de todos los bloques individuales.

#### Ventajas y desventajas

En términos generales, ambos métodos de analogía son relativamente simples, flexibles y de fácil adaptación a diversos tipos de depósitos; sin embargo, requieren de entrenamiento y experiencia. La determinación de los factores puede hacerse mediante un mínimo de cálculos simples, prescindiendo del empleo de mapas y planos de detalle. El proceso de cálculo puede efectuarse para bloques individuales, niveles, segmentos o para el cuerpo entero, empleando fórmulas poco complejas, por lo que debido a la continua extracción o exploración, podrán realizarse fácilmente cambios significativos en las reservas de la mina, por medio de la adición o substracción de las áreas respectivas o bien obteniendo áreas nuevas o corregidas.

La exactitud del método depende del tipo de depósito, número de bloques y densidad de las observaciones. En cuerpos uniformes, donde hay un número suficiente de datos, el error de estimación cometido resulta mínimo, siendo éste substancialmente mayor en cuerpos erráticos con poco echado y con valores distribuidos en forma no uniforme.

#### **2.4.10.2 Secciones transversales**

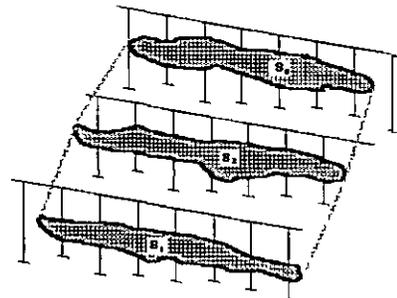
El primer paso en la aplicación del método de secciones transversales consiste en dividir el cuerpo entero en bloques, por medio de la elaboración de secciones geológicas transversales ubicadas a intervalos que dependerán de la naturaleza del depósito, de la cantidad y localización de los datos de exploración y de los propósitos del cálculo. Dependiendo de la forma de dividir los bloques, existen tres variantes del método:

a) Método estándar

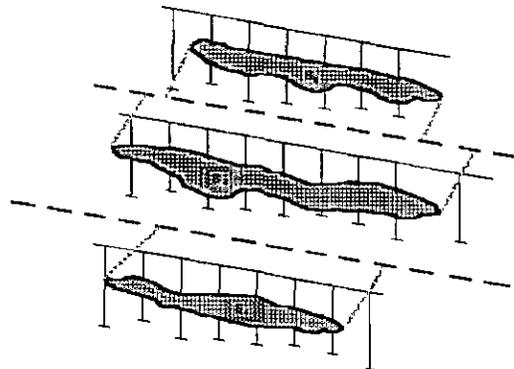
Basado en la regla del cambio gradual, cada bloque quedará confinado en medio de dos secciones con superficies laterales irregulares y los bloques exteriores o finales por una sola sección también con caras laterales irregulares. Dichas secciones pueden ser paralelas, no paralelas, verticales, horizontales o inclinadas (figura 2.13-A).

b) Método lineal

También basado en la regla del cambio gradual, este método varía con respecto al anterior en que cada bloque estará definido por una sección completa y por la mitad de la distancia de las secciones adyacentes (figura 2.13-B).



a) Por cambios graduales



b) Por semidistancia

FIGURA 2.13 Métodos de secciones transversales

(Popoff, C. Constantine. 1967)

### c) Método de isolíneas

Isolíneas, por definición, son aquellas líneas curvas que en un plano o mapa unen todos los puntos de igual valor unitario. Se emplean para ilustrar gráficamente las propiedades físicas y químicas o aquellos procesos o fenómenos que puedan ser expresados por valores unitarios (ejemplo: planos topográficos).

El método se basa en la suposición de que los valores unitarios de las variables varían continua e ininterrumpidamente de un punto a otro, de acuerdo con el principio de cambios graduales.

Para formar las isolíneas, los valores intermedios se determinan por interpolación entre puntos de valor conocido. Como resultado de ello, algunas propiedades de los cuerpos minerales pueden ser presentadas gráficamente en un plano o sección, por medio de un sistema de isolíneas o isovalores.

Casos comunes del empleo de este método se presentan en cálculos de promedios de espesor, ley promedio y valor promedio de un depósito, realizados a partir de planos adecuados de isolíneas. Los nombres técnicos que específicamente reciben estas aproximaciones son: *isópacas* (anchos), *isóbaras* (presiones), *isotermas* (temperaturas), *isógradas* (leyes), etc.

El método de isolíneas está difundido muy ampliamente en trabajos de ilustración y análisis de las propiedades físicas y químicas de depósitos longitudinales bien definidos con anchos razonablemente uniformes y leyes con cambios graduales, tal y como resulta el caso de mantos, depósitos de placer, depósitos de stock, etc. Resulta impráctico en cuerpos estructuralmente fracturados, en cuerpos de pequeñas dimensiones, en depósitos de minerales mixtos o complejos y en depósitos muy irregulares. También es de suma utilidad en la proyección e interpretación de fotografías aéreas, donde pueden ser calculados los volúmenes de material removido en un área de minado a cielo abierto, por ejemplo (figura 2.14).

#### Ventajas y desventajas

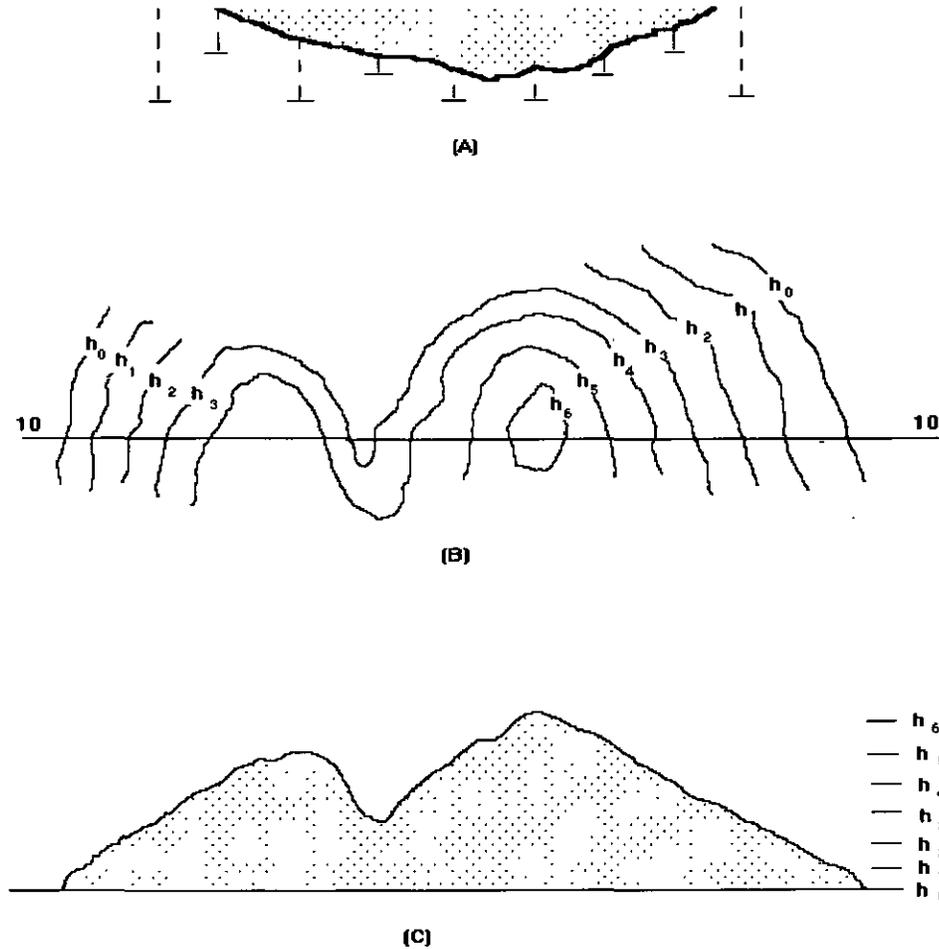
La mayor ventaja del método de isolíneas, es su descriptividad. Un plano de isópacas proporciona una configuración idealizada del depósito; uno de isógradas mostrará la distribución de mineral rico y de mineral pobre y un plano de reservas ilustrará la distribución del mineral y sus constituyentes con valor comercial.

El método, aunque en general es simple, requiere de un número suficiente de observaciones así como de una adecuada densidad y distribución de éstas, con objeto de poder dibujar con toda precisión las isolíneas.

### 2.4.10.3 Métodos analíticos

Los métodos analíticos empleados en los cálculos de reservas de mineral se encuentran subdivididos en dos grupos: *método de triángulos* y *método de polígonos*.

Para fines prácticos, se puede considerar como uno solo, debido a que las dificultades encontradas en uno de ellos (el de triángulos) derivaron en el desarrollo del otro (el de polígonos).



- (A) Sección transversal a lo largo de línea 10
- (B) Plano isópaco del cuerpo mineral en la línea 10
- (C) Sección transversal construida en base a (B)

FIGURA 2.14 Método de isolíneas

(Popoff, C. Constantine. 1967)

### a) Método de triángulos

El método se fundamenta en el principio del cambio gradual, usando como datos básicos la información de campo arrojada por los trabajos de barrenación. Debido a esto, el primer paso en la aplicación del sistema será la elaboración de un mapa que muestre en planta (o sección longitudinal) el depósito, en el cual se deberá señalar con toda claridad el lugar exacto de todos y cada uno de los trabajos exploratorios y el área total de la zona en estudio. Realizado lo anterior, se procederá a dividir geométricamente la zona en una serie de triángulos que se formarán mediante el trazado de líneas rectas que unirán los vértices de cada triángulo, representado por cada uno de los barrenos adyacentes y más cercanos entre sí. Cada triángulo así formado representará una proyección horizontal o lo que es lo mismo, la base de un prisma imaginario con lados  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  iguales a los espesores del cuerpo mineral.

Para llegar a obtener un cálculo confiable, se divide el depósito en el mayor número posible de triángulos (siempre y cuando la información disponible lo permita), evitando el cruce de líneas y procurando, hasta donde sea posible, obtener triángulos equiláteros (que serán los triángulos ideales), aunque la práctica más común es escoger la diagonal más corta durante la construcción de la retícula, lo que en la mayoría de los casos hace poco probable la formación de triángulos con lados iguales (figura 2.15).

La asignación de pesos de igual influencia a cada uno de los barrenos que forman el triángulo es parte de la metodología, aunque prácticamente esto sólo sea correcto cuando se tiene formado un triángulo equilátero, por lo que en algunos casos, es común asignar estos pesos de influencia en función del ancho de cada barreno, de los ángulos formados o de la longitud de los lados, según se presenten las circunstancias, evitando mezclar estas asignaciones, es decir, estos pesos deberán ser asignados por igual en todas las muestras.

### Aplicabilidad

El método de triángulos resulta particularmente aplicable a grandes depósitos sedimentarios o diseminados, debido a que el cambio uniforme y gradual de las variables resulta fundamental en el éxito del sistema y son en este tipo de depósitos, donde se dan las condiciones adecuadas, además de que los barrenos de exploración (los cuales representan la fuente más importante de información), pueden ser espaciados regularmente en retículas de dimensiones específicas.

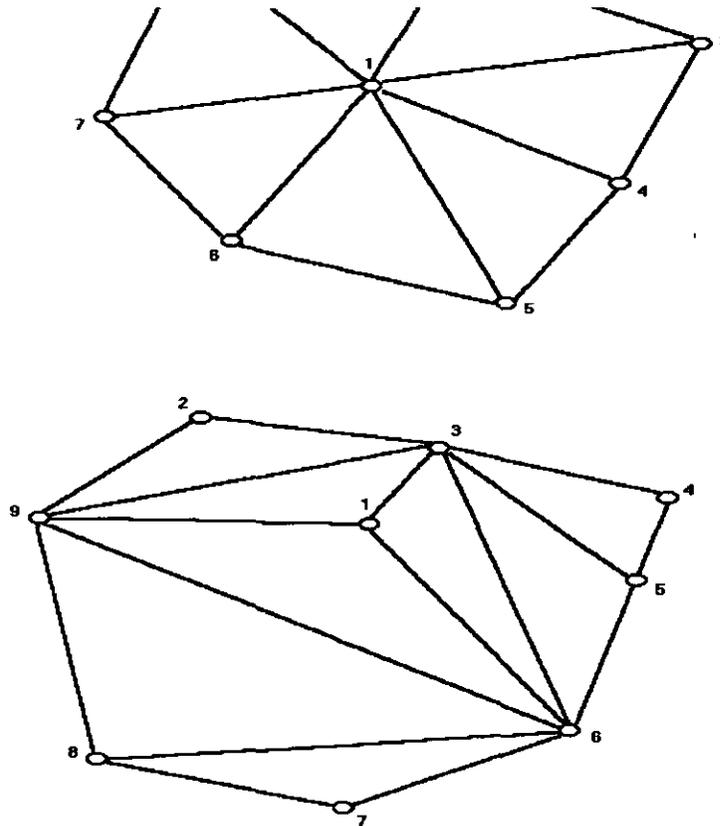


FIGURA 2.15 Método de triángulos

(Popoff, C. Constantine. 1967)

### Ventajas y desventajas

En comparación con otros métodos, el triangular requiere de la formación de un gran número de bloques, lo que se traduce en el consumo de grandes cantidades de tiempo y mayor número de cálculos, con lo que aumenta la posibilidad de cometer errores. El método resulta inexacto cuando el número de variables disminuye del centro hacia los límites exteriores del cuerpo, por lo que se dificulta tomar en cuenta consideraciones de tipo geológico o minero. Además, el error relativo que se comete al aplicar el método depende en gran parte de las fórmulas aplicadas y del número de bloques en que se tenga dividida la zona mineralizada. Muchos de estos problemas, aunados a la diversidad de criterios aplicados por diferentes personas y autores, dieron como resultado el desarrollo de otro método derivado del de triángulos: el poligonal, el cual se explicará más adelante.

Una gran ventaja de los métodos analíticos es su relativa facilidad de cálculo numérico, con instrumentos tan sencillos como una sumadora o una calculadora de bolsillo, en manos de personal bien entrenado.

#### b) Método de polígonos

El método de polígonos, también conocido como *prismas poligonales*, *esferas de igual influencia*, *áreas de igual influencia* o *áreas de puntos más cercanos*, está basado en el concepto de que todas las variables determinadas para un cierto punto en un cuerpo mineral se extienden hasta la mitad de la distancia de los puntos adyacentes que lo rodean (principio de la semidistancia), formando así un área de influencia.

Al igual que en el método de triángulos, se dispondrá de una proyección horizontal (planta) del área, donde se vaciarán todos los datos disponibles, para que a continuación se prosiga con la construcción de los polígonos. Estos se formarán, extendiendo la esfera de influencia de un barrenos hasta la semidistancia del barrenos adyacente, tomando como base una retícula triangular trazada como si se fuera a emplear el método anteriormente descrito. El área de influencia entre barrenos se puede definir de dos formas:

1. Por medio del trazo de bisectrices perpendiculares a las líneas de unión entre dos barrenos en su punto medio (figura 2.16-A).
2. Por medio de bisectrices angulares trazadas a partir de los ángulos formados por la retícula de los triángulos base (figura 2.16-B).

La primera técnica es reconocida como la más adecuada, confiable, efectiva y segura. En resumen, la cronología para la aplicación del método de polígonos es la siguiente:

1. Elaboración de planos y vaciado de datos.
2. Construcción de los polígonos a partir de una base triangular, siguiendo un ordenamiento definido (por ejemplo, en el sentido de las manecillas del reloj).
3. Cálculo de las reservas de cada área o bloque, asumiendo que cada una de ellas estará afectada proporcionalmente por los datos de ley, densidad y magnitud del barrenos conocido alrededor del cual se formó el área de influencia.

4. Agrupamiento de bloques con relación a leyes, anchos, confiabilidad, etc., para poder sumar las reservas de acuerdo con su categoría, en: positivas, probables o posibles.

En casos especiales donde los puntos de información están muy distantes entre sí o donde la continuidad de su confiabilidad sea dudosa, se podrán construir áreas de influencia alrededor de cada punto conocido mediante el uso de un "círculo de influencia", cuyo diámetro estará dado en función de la naturaleza del depósito y de la distancia y distribución de valores que se considere "confiable", en cuyo caso, los bloques tendrán forma cilíndrica en lugar de un prisma poligonal.

### Aplicabilidad

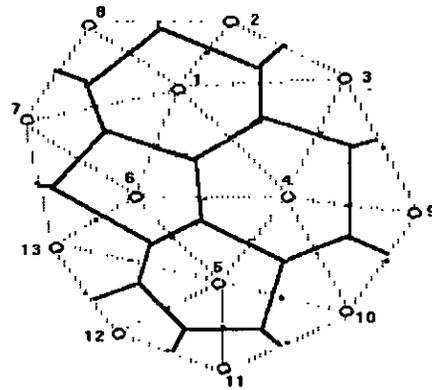
El método de polígonos es de particular utilidad en la cuantificación de cuerpos tabulares, depósitos diseminados y grandes cuerpos lenticulares. Al igual que los métodos anteriores, a mayor número de bloques formados y datos obtenidos con mejor distribución mayor será la confiabilidad y exactitud de las estimaciones.

La aplicación del método de polígonos no es recomendable en la evaluación de cuerpos donde no se pueda presumir de la existencia de una continuidad razonable de las variables entre puntos conocidos o cuando existan zonas estériles entreveradas con las zonas mineralizadas (caballos de tepetate).

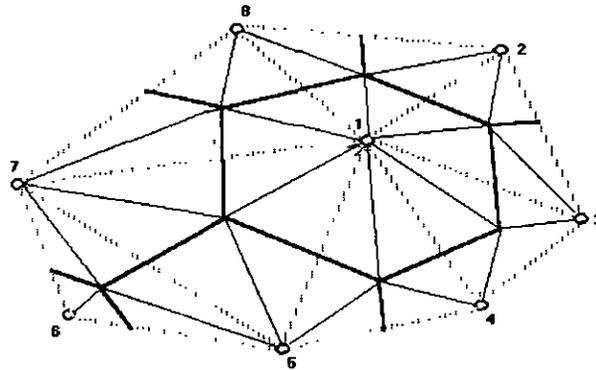
### Ventajas y Desventajas

Una gran ventaja de este método consiste en que no hay necesidad de recalcular todas las áreas, cuando por motivo de la anexión de nuevos datos de exploración se tiene que modificar el área en estudio. Lo anterior se debe a que cada bloque o polígono se calcula en forma independiente sin influencia de los bloques adyacentes, considerando como constantes algunas variables, tales como ancho, ley, etc., en toda la extensión del bloque.

Cuando los proyectos de exploración siguen patrones de espaciamiento en forma regular, la metodología de cálculo se simplifica grandemente, ocurre todo lo contrario cuando los patrones son irregulares. Esto se debe fundamentalmente a que se pueden dar casos de diferencias notables en la asignación de los pesos de influencia en ciertos bloques con la consecuente falla de cálculo o alteración en los resultados finales.



a) Trazos de polígonos por bisectrices perpendiculares



b) Trazo de polígonos por bisectrices angulares

FIGURA 2.16 Método de polígonos

(Popof, C. Constantine. 1967)

### 2.4.11 Métodos estadísticos

#### Generalidades

La teoría estadística aplicada a la evaluación de yacimientos minerales empezó a formar parte integral de esta metodología a mediados de la década de los años 50, gracias a las investigaciones realizadas en Sudáfrica por H.S. Sichel y D.F. Krige; y en los Estados Unidos de Norteamérica por G.S. Koch, R.F. Link, R.F. Hewlett y S.W. Hazen, entre otros.

A partir de esta época y con la aparición de las computadoras, el desarrollo de la teoría estadística ha jugado un papel preponderante en las nuevas técnicas de evaluación, permitiendo el

manejo de grandes volúmenes de datos que pueden ser procesados en tiempos asombrosamente reducidos, con la consecuente relativa facilidad de manipulación e interpretación.

### Principio de trabajo

Al igual que todos los métodos convencionales descritos con anterioridad, las etapas preliminares para la aplicación de los métodos estadísticos comprenden, en general, la evaluación geológica del yacimiento, exploración, muestreo, determinación morfológica (puntualizando sus límites y fronteras), evaluación de los datos de exploración y selección del método de cálculo más adecuado. Es en estos dos últimos puntos donde se puede afirmar que realmente estriban las diferencias fundamentales entre los métodos convencionales y los métodos estadísticos. Con los datos recopilados en las dos primeras etapas se procederá a construir un diagrama donde quedarán asentadas las frecuencias relativas de la ocurrencia de valores de las muestras en diferentes intervalos de concentración, sin considerar la localización de ellos. A este diagrama se le conoce con el nombre de "histograma".

Con la información proporcionada por el histograma se podrá conocer el tipo de distribución que siguen los valores, considerando a éstos, como normal, binomial, poisson, etc., de acuerdo con el tipo de curva estadística que describen. Conociendo la distribución que siguen los valores, se podrán determinar los parámetros estadísticos tales como el rango, la media, la varianza y la desviación estándar de la totalidad de los datos o "población" disponible.

También a partir del histograma y de acuerdo con el tipo de distribución que sigan los valores, se podrán llegar a establecer los intervalos o límites de confianza, los cuales ponderan el porcentaje de certeza con el que un determinado valor puede quedar localizado a una cierta desviación estándar, con respecto a ambos lados de la media.

Realizadas las operaciones anteriores, se estará en disponibilidad de obtener el llamado "modelo teórico", el cual describirá en forma particular el yacimiento en estudio.

### Aplicabilidad

La aplicación del método estadístico se ha practicado con éxito en muchos y muy distintos depósitos alrededor del mundo, los cuales van desde vetas auríferas angostas y chimeneas diamantíferas en Sudáfrica y depósitos de placer en Malasia, hasta grandes mantos fosfóricos, de-

pósitos porfiríticos de cobre y vetas de minerales mixtos (Au, Ag, Cu, Pb, Zn.) en México, Estados Unidos de Norteamérica, Sudamérica y Europa.

### Ventajas

Dentro de las grandes ventajas del empleo de estas técnicas, destaca el concepto de confiabilidad de las estimaciones mediante el uso de límites de confianza. Con esto es posible establecer de antemano el límite de confiabilidad que se desee dar al cálculo y de acuerdo con ello, elaborar o modificar los proyectos de exploración de tal forma que se ajusten a límites preestablecidos. Otra ventaja es que pueden ser aplicados aun cuando la información disponible no sea abundante, permitiendo la "creación" de datos simulados que deberán cumplir con los mismos parámetros estadísticos del histograma, obtenidos con base en la "población disponible".

### Desventajas

Debido al gran volumen de información que debe ser manipulada, se hace necesario el empleo de computadoras o contar con las facilidades necesarias para tener acceso a ellas por medio de terminales y periféricos. También requiere de la participación de personal altamente calificado, tanto para el manejo del equipo electrónico como para la aplicación del método e interpretación de resultados.

## 2.4.12 Métodos geoestadísticos

### Generalidades

La estimación de reservas por métodos geoestadísticos es una técnica relativamente nueva, desarrollada al inicio de la década de los años 60 por el profesor Georges Matheron y sus más cercanos colaboradores del Centro de Morfología Matemática en Fontainebleau, Francia.

La fundamentación matemática del método se apoya en la aplicación de la "*teoría de las variables regionalizadas*" al estudio de yacimientos minerales, la cual no sólo está relacionada con la magnitud de las variables, si no que también con su posición en el espacio; de este concepto se deriva el término de "regionalización". El sistema se asemeja un poco al método estadístico clásico; sin embargo, existe una diferencia fundamental entre ambas técnicas: en el método estadístico se infiere que las muestras tomadas en una población desconocida, son siempre aleatorias, asumiéndose además que son independientes entre sí, por lo que si se toma una muestra, esta no proporciona información alguna sobre la siguiente.

Dado que las condiciones descritas arriba raramente son satisfechas cuando se toman muestras provenientes de barrenos de exploración, el método geoestadístico no exige que las muestras sean independientes, por el contrario, la geoestadística asume que las muestras adyacentes están correlacionadas entre sí espacialmente (en el espacio). También asume que esa correlación puede ser analítica y estadísticamente capturada dentro de una función llamada "*variograma*". La geoestadística, por tanto, posee un atractivo muy especial tanto para geólogos como para ingenieros mineros, no solo debido a la evidente ventaja que representa la correlación espacial existente entre muestras adyacentes, si no que se debe fundamentalmente a que esta relación puede ser medida en términos cualitativos.

Abundando un poco más en los objetivos fundamentales de la geoestadística, se puede establecer que dentro de los alcances del método se obtiene lo siguiente:

1. Estimación más confiable de los valores minerales contenidos en bloques independientes o la estimación del valor del depósito entero.
2. Conocimiento sobre los errores de cálculo con los que son efectuadas las estimaciones.

De la misma manera, se puede puntualizar que una variable regionalizada queda definida tanto por su magnitud como por su localización, continuidad y orientación, incluyendo la relación respecto a valores adyacentes y zonas de influencia. De lo anterior se deriva que la posición de una determinada especie mineral dentro de un depósito, puede ser tan importante como su propio valor comercial; por ejemplo, si un valor muy alto es localizado dentro de una zona de valores altos o intermedios, puede tener una importancia relevante desde el punto de vista económico; mientras que otro valor ubicado en una zona de persistentemente baja ley, pudiera ser un fenómeno carente de interés.

Consecuentemente, si un volumen mineralizado es muestreado en un punto "x" localizado dentro del área estudiada, el ensaye de ese valor en este punto, será  $f(x)$ ; es decir, el valor ensayado representa una variable regionalizada que estará dada en función de su distancia o posición "x".

Sería erróneo referirse a la geoestadística simplemente como "*un método de estimación de reservas*", cuando realmente la geoestadística conforma un grupo de "herramientas" muy útiles. Dichas herramientas son:

1. El variograma (o semivariograma para algunos autores).
2. La varianza de estimación.
3. El krigage.

### El variograma

El variograma es una función matemática que se usa para describir la correlación espacial entre leyes (o cualquier otra variable de mineralización) dentro de un depósito mineral. El procedimiento analítico toma las diferencias entre pares de valores separados por una distancia "h", los cuales son elevados al cuadrado y sumados. La suma de estas diferencias elevadas al cuadrado se divide entre dos veces el número total de pares determinados, lo cual queda expresado matemáticamente en los siguientes términos:

$$\delta(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

donde

$Z(X_i)$	valor de la variable en la posición $X_i$
$Z(X_i+h)$	valor de la variable en la posición $X_i+h$
$n$	número de pares cuyas diferencias han sido elevadas al cuadrado y sumadas

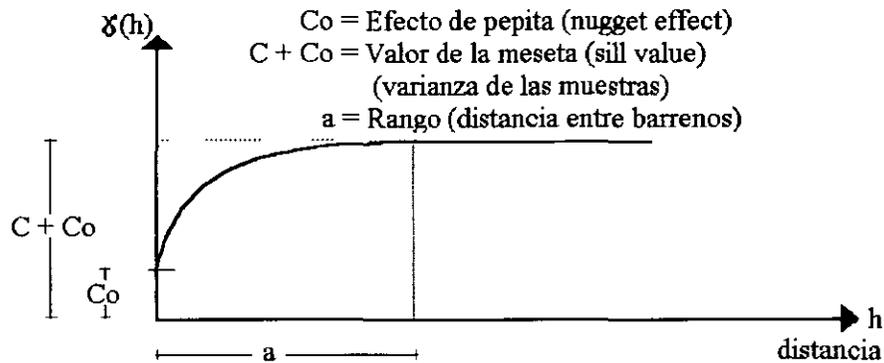
En términos muy simplificados, se puede afirmar que el variograma "mide" los grados de similitud entre dos muestras tomadas a diferentes distancias, valores que pueden ser graficados en una curva que representará el grado de continuidad de los valores de las variables. A medida que la curva del variograma crece, indica el grado de disminución en la influencia de una muestra sobre su vecina más cercana.

Mediante el análisis de los rasgos del variograma (o semivariograma), también se pueden obtener algunos caracteres estructurales del yacimiento. Por ejemplo, si las muestras sobrepasan una cierta distancia conocida como rango de correlación, alcance, o simplemente *rango*, dichas muestras ya no presentarán prácticamente ninguna correlación con la muestra vecina. Este fenómeno puede ser observado en la curva del variograma, donde la porción horizontal de ella, llamada *sill* o meseta, representa la varianza máxima entre muestras (figura 2.17).

Para el cálculo de reservas locales por medio de *krigeage*, así como para estimaciones globales, es necesario que los variogramas estén expresados en una forma matemática que sea repre-

sentativa del depósito entero o de los bloques en investigación. Para ello, varios investigadores han desarrollado diversos modelos matemáticos, algunos de los cuales presentan *sill* o meseta y otros no lo presentan. Los modelos de variogramas más comunes se ilustran en la figura 2.18.

Hasta este punto y en una forma muy general, se puede señalar que el procedimiento para realizar una estimación geoestadística de reservas minerales se puede dividir en dos partes: la primera consiste en efectuar la investigación y modelaje de la estructura física y estadística del cuerpo mineral, en el cual se hará la estimación (los conceptos de continuidad y estructura del depósito estarán englobados en semivariogramas elaborados durante esta primera etapa). La segunda parte del procedimiento es la estimación del proceso mismo de *krigeage* (el cual dependerá completamente de los variogramas elaborados durante la primera fase del estudio).



(h)

FIGURA 2.17 El variograma y sus componentes

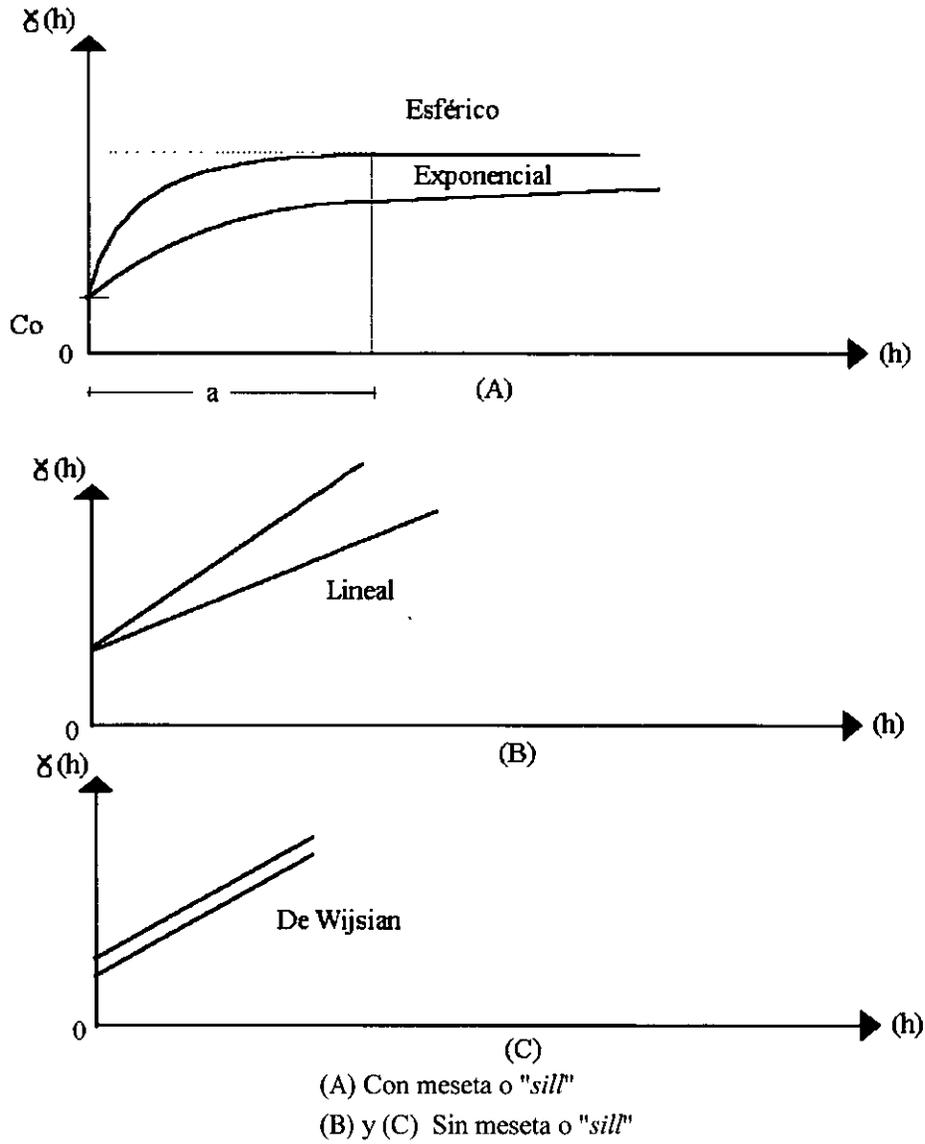


FIGURA 2.18 Diferentes modelos de semivariogramas

La varianza de estimación

Después de que se ha obtenido el modelo con el cual se proseguirá la evaluación del depósito, se procederá con el cálculo de la *varianza de estimación*, la cual proporcionará la magnitud de los posibles errores efectuados durante el cálculo. De esta manera, la varianza de estimación viene a constituir la diferencia entre el valor aproximado y el valor exacto del estimador "\*". (el asterisco se usa para denotar la diferencia entre valores derivados del modelo teórico).

### El *krigeage*

Como ya se mencionó, el *krigeage* es una de las herramientas básicas de la geoestadística que sirve para estimar las leyes de un bloque mineral (o de todo el depósito) como una combinación lineal de las muestras disponibles, obteniéndose así el promedio pesado de todos los datos, ya sea que estos hayan sido tomados dentro del bloque o en su periferia.

Los estimadores geoestadísticos son tratados como variables aleatorias, las cuales poseen una cierta función probabilística de densidad (ejemplo: función normal de densidad). Una vez que un estimador es usado para calcular un valor en particular, este valor será llamado "estimador", por lo que a partir de ese momento dejará de ser variable aleatoria.

Debido a lo anterior y dado que pueden existir muchos posibles estimadores de una variable aleatoria, los atributos de cada estimador pueden ser comparados con objeto de escoger el mejor de ellos para el problema que se esté manejando. Los atributos más comúnmente deseados en un estimador es que sea *imparcial* y que produzca una mínima varianza de estimación.

El *krigeage* se realiza asignando factores de peso a los datos disponibles y, dependiendo de la geometría de las muestras, de la magnitud de los parámetros geoestadísticos del depósito y del tamaño de los bloques, se obtiene un estimador óptimo que determine el conjunto de pesos que produzcan la mínima varianza en la estimación.

Los pesos ponderados que se emplean en el *krigeage* se obtienen mediante la solución de sistemas de ecuaciones simultáneas, las cuales para ser planteadas necesitan del cálculo de la interrelación que guardan todos los pares de muestras utilizados, empleando para ello, la expresión matemática del variograma. En una forma muy generalizada y atendiendo estrictamente al desarrollo matemático, se puede afirmar que el proceso de *krigeage* consiste exclusivamente de la solución de un sistema de ecuaciones lineales; pero la dificultad del método no radica en este planteamiento matemático, sino en la correcta selección del modelo geoestadístico que correlacione adecuadamente las variables del área sujeta a investigación. La selección correcta de dicho modelo conducirá a la definición de los mencionados parámetros que intervendrán directamente en las ecuaciones de *krigeage*. Además, el *krigeage* no solo proporcionará el mejor estimador lineal, sino que también ayudará a evitar los errores sistemáticos en que se puede incurrir durante la evaluación, en cuanto a subestimación o sobrevaloración.

Conociendo la varianza y la desviación estándar del *krigeage*, se podrán calcular los límites de confianza de las estimaciones, en forma semejante a la empleada en los métodos estadísticos.

### Aplicabilidad

Debido a su calidad de "nuevo método", el uso de la geoestadística ha sido muy limitado los primeros estudios se efectuaron en forma experimental en los países donde se empezaron a desarrollar estas técnicas. Recientemente y después de haber probado su utilidad, el sistema ha encontrado aplicaciones en diversos tipos de yacimientos, tales como depósitos de hierro y carbón en Francia; de fosfatos y oro en Sudáfrica; de cobre disseminado en México, Chile y Estados Unidos; en vetas cobrizas de Canadá; en vetas de estaño de Inglaterra y en una gama muy diversa de yacimientos alrededor del mundo.

Las limitaciones en el uso de la geoestadística, fundamentalmente, obedecen a factores de tipo económico y tecnológico, ya que su empleo requiere tanto de equipo sofisticado de cálculo como de personal capacitado para el buen empleo del sistema, factores que a medida que pasa el tiempo se espera que se superen.

### Ventajas y desventajas

Las ventajas que ofrecen los métodos geoestadísticos son muchas y muy variadas. Entre las más notables se pueden señalar las siguientes:

1. Es un método imparcial y uniforme en su aplicación.
2. Optimiza la información disponible.
3. Los errores de cálculo son minimizados (subestimación o sobrevaloración).
4. Se apoya en bases 100 % científicas.
5. Se puede conocer la exactitud del cálculo (*krigeage*).
6. Proporciona bases para los proyectos de exploración.

Opuestamente, también posee las siguientes desventajas:

1. Para su aplicación, necesita del uso de equipo electrónico muy sofisticado.
2. Requiere de información abundante y sistemática.
3. Requiere personal altamente capacitado, con conocimientos especiales sobre el método y su teoría.
4. Los datos de alimentación para el procesamiento, deben ser cuidadosamente preparados.

### **2.4.13 Comparación de ventajas y desventajas de los métodos convencionales contra los métodos geoestadísticos**

#### Métodos convencionales

##### a) Ventajas

- 2 No requiere entrenamiento especializado del personal encargado de los estudios de evaluación.
- 2 No requiere de equipo complejo para la realización de las operaciones de cálculo.
- 2 Puede ser aplicado aun cuando el volumen de datos sea limitado.
- 2 El procesamiento de la información no requiere de formato o de preparación especial.
- 2 La inversión inicial es mínima.
- 2 La metodología de cálculo puede ser supervisada de una manera fácil y objetiva.
- 2 No requiere de planos o mapas de detalle, altamente elaborados.
- 2 Se pueden hacer estimaciones individuales para cada bloque o zona de interés.

##### b) Desventajas

- 2 Sujeto al criterio o política que siga la empresa para la evaluación de sus reservas.
- 2 Sujeto a la posibilidad del error humano tanto en la metodología de cálculo como en la interpretación de resultados.
- 2 Dificultades de actualización cuando se producen cambios bruscos en las cotizaciones mundiales del mercado de los metales, en los costos de producción, etc.
- 2 Son métodos que consumen grandes cantidades de horas/hombre durante los cálculos.

- 2 Nunca se conoce la certidumbre del cálculo.
- 2 No se tiene una noción cuantitativa del error de cálculo.
- 2 La supervisión del cálculo debe estar a cargo de una persona con amplia experiencia y criterio con el objeto de evitar, hasta donde sea posible, obtener resultados erróneos, producto de fallas humanas o de la inexperiencia.

### Métodos geoestadísticos

#### a) Ventajas

- 2 Método imparcial y uniforme en su aplicación.
- 2 Optimiza la información disponible.
- 2 Minimiza las posibilidades de error.
- 2 Actualiza fácil y rápidamente las condiciones de cálculo imperantes.
- 2 Se apoya en bases 100 % científicas.
- 2 Se conoce la exactitud del cálculo.
- 2 Proporciona bases para los proyectos de exploración y muestreo, haciendo posible la investigación de ellos aun antes de que se produzcan.

#### b) Desventajas

- 2 Requiere de equipos electrónicos sofisticados y caros.
- 2 Requiere de personal calificado con conocimientos sobre la teoría del método.
- 2 Inversión inicial cuantiosa, dependiendo de la cantidad de datos por procesar.
- 2 La metodología de cálculo es difícil y no puede realizarla cualquier persona.

- 2 Los errores de cálculo son difícilmente detectables.
- 2 Cuando se requiere la aplicación del método por primera vez se necesita la asesoría de una persona calificada y con experiencia.
- 2 La información debe ser abundante y sistemática.
- 2 Los datos de alimentación a las computadoras requieren de una cuidadosa preparación en formatos especiales.
- 2 La información deberá ser revisada y uniformizada bajo un mismo criterio.

#### **2.4.14 Conclusiones**

Resulta notable la diferencia entre ambos sistemas de estimación de reservas minerales, sin embargo y a pesar de los grandes adelantos tecnológicos, existen ventajas en los métodos convencionales que no pueden ser descartados ni aun con el uso de las computadoras. En países o en compañías de recursos económicos limitados, los métodos convencionales siguen siendo de gran utilidad, aun con todas sus "desventajas".

Por otra parte, no se puede negar el gran paso que ha dado la industria con la introducción de los métodos computarizados en la estimación de sus recursos minerales, los cuales han probado su versatilidad y enorme utilidad en el manejo de grandes volúmenes de información, los que ni con mucho podrán ser manejados con los sistemas y elementos manuales que emplean los métodos convencionales.

Las grandes ventajas que proporcionan los métodos geoestadísticos son realmente dignos de consideración, pero los costos que éstos representan definitivamente están fuera del alcance económico de muchas compañías pequeñas y medianas como las que abundan en México. Seguramente el sueño dorado de esas compañías sería el de también usar esta tecnología puesta al servicio de la industria minera y quizá lo logren en un futuro no muy lejano, a medida que la geoestadística se popularice y disminuya los costos.

En resumen, los métodos convencionales se deberán seguir empleando, ya que de momento no se vislumbra la posibilidad de que estén condenados a la desaparición. En cuanto a los geoes-

tadísticos, siguen creciendo y desarrollándose, motivo por el cual, toda la industria deberá tomar parte activa, permitiendo y propiciando la capacitación de su personal en la moderna tecnología.

Hoy en día el desarrollo de programas de cómputo (software) para el modelaje geológico y el diseño de operaciones mineras subterráneas y superficiales, ha hecho que la geoestadística forme parte fundamental de dichos programas, sin los cuales el diseño de minas asistido por computadora sería muy difícil.

Educación Continua

con una nueva visión en la Ingeniería

CURSO:

# Explotación de Minas

Del 13 al 17 de junio del 2011

Expositor: M. en C. Víctor Manuel López Aburto



CI - 3

[www.mineria.unam.mx](http://www.mineria.unam.mx)

Encontranos en:



[www.facebook.com/decdfi](http://www.facebook.com/decdfi)



[www.twitter.com/decdfi](http://www.twitter.com/decdfi)

**CAPITULO 3****SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN*****INTRODUCCION***

Los problemas de estabilidad en las minas así como en otros tipos de trabajos relacionadas con excavaciones, son idénticos desde el punto de vista de condiciones estéticas; y muchos de los factores que contribuyen a dicha estabilidad, son también susceptibles de contribuir a la resistencia de los materiales bajo condiciones de carga dinámica, por ejemplo roca fragmentada o tepetate de relleno en los rebajes.

Existe una gran cantidad de información disponible que proviene de múltiples trabajos mineros subterráneos y aunque la mayor parte de ésta es de índole descriptiva, constituye la guía más confiable para una evaluación completa de los problemas de estabilidad en las obras mineras.

En minería y desde el punto de vista económico, el mejor método de explotación deberá ser aquel que proporcione la mayor tasa de retorno en la inversión. Adicionalmente, el método seleccionado deberá satisfacer condiciones de máxima seguridad y permitir un ritmo óptimo de extracción bajo las condiciones geológicas particulares del depósito. La clasificación de los métodos de minado adoptados por la mayoría de las agencias de minería en el mundo, han sido elaboradas con base en la geología estructural y en la mecánica de rocas, prevaleciendo el concepto fundamental de estabilidad en las obras. El mejor método de minado dependerá de las características geológicas del terreno, mismas que determinarán el tamaño del área que se va a minar, con los respaldos (o paredes) que mejor se autosoporten durante la remoción del mineral, de la naturaleza y tamaño de los soportes que se requieran y del tipo de estructura de soporte que se necesite para mantener las obras permanentemente abiertas sin problemas de subsidencia.

Específicamente, la geología del sitio deberá ser estudiada en detalle, de tal manera que:

- Las obras preliminares (o de exploración directa) sean realizadas en los sitios donde se obtenga la mayor información del terreno.
- Las obras permanentes sean ubicadas y coladas en roca sólida y estable.
- Los rebajes de producción sean planeados y diseñados para condiciones óptimas de estabilidad y de control del terreno.
- Las obras excavadas se conserven abiertas a costos mínimos de mantenimiento.
- Las obras se localicen de tal manera que eviten los riesgos inherentes a las aguas subterráneas.
- Los métodos de minado se puedan planear adecuadamente.
- Se obtengan los factores máximos de seguridad.

### **3.1. CLASIFICACION DE LOS DEPOSITOS MINERALES Y SUS MATERIALES ROCOSOS**

Después de que un depósito ha sido descubierto, explorado, delineado y evaluado, el siguiente paso será la selección del método de minado que física, económica y ambientalmente se adapte para la recuperación del mineral comercialmente valioso contenido en el yacimiento.

El término "*depósito mineral*" se emplea para denotar una concentración de mineral comercial que incluye la roca huésped y minerales asociados ("mena"). Por "*mineral comercial*" se deberá entender aquel tipo de mineral cuyos contenidos metálicos poseen un valor económico comercializable en los mercados de metales y con base en el cual, se justifica económicamente la explotación del depósito. Los "*minerales asociados*" son aquellos que en el momento de la explotación, pueden o no tener un valor comercial. Si es el caso de la primera alternativa, será posible aumentar el valor económico del depósito o la rentabilidad de la operación, y en el caso de la segunda opción, los valores contenidos podrán ser considerados como reservas potencialmente explotables o recuperables a futuro, dependiendo fundamentalmente de la demanda que de ellos se tenga en la industria de transformación y de las cotizaciones internacionales que fije tal demanda.

Para una correcta y veraz clasificación de un depósito mineral y su material rocoso asociado, se deberá disponer de información geológica suficiente que incluya estudios de metalogenia, geología histórica de la zona y, sobre todo, de núcleos de barrenación provenientes de un programa reciente de exploración, aun en localidades donde se disponga de suficiente información obtenida en exploraciones y estudios anteriores.

En términos generales, se pueden identificar siete tipos de depósitos minerales como sigue:

#### **1. DEPOSITOS MASIVOS**

Son depósitos de extensión considerable, tanto en el sentido horizontal como en el vertical y dentro de los cuales la mineralización está distribuida en forma relativamente uniforme. Los depósitos de cobre diseminado son ejemplos típicos de estos yacimientos. Los domos salinos también pueden ser incluidos en esta clasificación.

#### **2. DEPOSITOS ESTRATIFORMES**

Se definen como depósitos tabulares alojados paralelamente a los planos de estratificación de la roca huésped, la cual invariablemente está formada por rocas sedimentarias. Generalmente los mantos tienen una extensión horizontal de dimensiones considerables pero con un espesor limitado. La mayoría de los depósitos de carbón y algunas evaporitas (potasa) y fosforitas, caen dentro de los depósitos de este tipo.

### **3. VETAS ANGOSTAS**

Son zonas o cinturones de mineralización de gran longitud pero de poca potencia (menos de 3 m), con un ángulo de buzamiento pronunciado. Generalmente se encuentran encajonadas dentro de la roca huésped y limitadas por las paredes (respaldos o tablas) al alto y al bajo de la estructura.

### **4. VETAS ANCHAS O POTENTES**

La definición de este tipo de depósitos es igual al de las vetas angostas, con la única diferencia de que su ancho o potencia es mayor de 3 metros.

### **5. CUERPOS LENTICULARES**

Cuerpo mineral en forma de lente que se presenta aisladamente en zonas mineralizadas alojado dentro de depósitos masivos, mantos o vetas. Presenta dimensiones limitadas y en la "jerga minera" se les conoce como "*clavos*". Ocurren frecuentemente en yacimientos de sulfuros simples (plomo-zinc-fierro), donde estos minerales presentan un sobrenriquecimiento notable.

### **6. DEPOSITOS TUBULARES (CHIMENEAS)**

Cuerpos masivos de forma aproximadamente cilíndrica y de dimensiones variables, con un desarrollo vertical significativamente mayor que su extensión horizontal. Generalmente presentan una sección elipsoidal o cercana al círculo.

### **7. DEPOSITOS DE PLACER**

Son depósitos sedimentarios superficiales o cercanos a la superficie, generalmente de forma tabular y de extensión considerable. Estos depósitos se caracterizan por contener partículas de minerales en su forma nativa o metálica (oro, platino, estaño, etc.) en detritos (gravas y arenas de lechos de ríos y arroyos).

Adicionalmente, los materiales rocosos asociados a los depósitos minerales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

#### **1. DETRITOS**

Se definen como fragmentos de partículas sólidas producidas por la desintegración química y/o mecánica de las rocas que generalmente poseen poca cohesión y muy baja resistencia a la compresión, por ejemplo: suelos, gravas, arenas, aluvión, arenas de playa, etc.

## **2. ROCAS FRACTURADAS CON DIACLASAS (Formaciones no consolidadas)**

Un macizo rocoso frecuentemente se encuentra en la superficie del terreno, cerca de ella o en una zona de fallas, en la que las fracturas o diaclasas contienen productos de alteración o descomposición, tales como materiales arcillosos, a través de los cuales la cohesión es muy pobre. Estos macizos rocosos pueden ser considerados como masas constituidas por partículas con tamaños granulométricos considerablemente mayores a los que forman los suelos.

## **3. ROCAS FRACTURADAS CON DIACLASAS Y CONSOLIDACION PARCIAL**

Constituidas por masas rocosas en las cuales las fracturas y diaclasas están parcialmente cementadas, formando un material rocoso con una cohesión que varía de baja a media.

## **4. ESTRATOS LAMINARES DELGADOS**

Cuerpos rocosos generalmente de origen sedimentario, en los cuales el espesor promedio de los estratos laminares es menor de 30 cm. Las separaciones entre los estratos pueden estar parcialmente cementadas y el paquete rocoso fracturado. Un ejemplo de éstos son los horizontes de lutitas y areniscas encontrados en los techos (o cielos) de las minas de carbón.

## **5. ESTRATOS LAMINARES GRUESOS**

Paquetes rocosos en los cuales los espesores promedio de los estratos son mayores a 30 cm (1 pie). Puede existir cementación parcial entre estratos, y el macizo rocoso puede presentar cierto grado de fracturamiento.

## **6. ROCAS MASIVAS**

Conjunto masivo de rocas "*relativamente sano*" (sin diaclasas y sin fracturas), o macizo rocoso fracturado y con diaclasas, en el cual el grado de cementación entre los estratos y en las diaclasas produce un material rocoso de gran resistencia. Brechas cementadas y conglomerados se incluyen en estos tipos de rocas.

**Una mina subterránea se define como:**

*“el conjunto de obras o excavaciones subterráneas, que conducen al aprovechamiento y disfrute económico de un yacimiento mineral”.*

Para el desarrollo de una mina subterránea se requiere de un sistema de acceso a las zonas mineralizadas, lo cual se logra mediante el cuele de obras tales como tiros, socavones, contratiros, niveles, pozos y contrapozos, los cuales deberán ser cuidadosamente planeados y diseñados

Las características físicas que dictan la elección de un método de minado subterráneo, pueden ser agrupadas como sigue:

1. *Resistencia del mineral y de la roca encajonante*
2. *Tamaño, forma y ángulo de buzamiento del depósito mineral*
3. *Profundidad del depósito y naturaleza del encape.*
4. *Continuidad de la mineralización dentro de los límites del cuerpo e influencia de la geología en la estructura de las rocas.*
5. *Posición del depósito con relación a instalaciones superficiales, drenaje y otras obras subterráneas.*

### **1. Resistencia del mineral y de la roca encajonante**

La resistencia estructural tanto del mineral como de la roca encajonante, es una de las primeras características que deberá ser analizada antes de procederá la excavación de las diferentes secciones del depósito, con objeto de determinar las dimensiones más adecuadas de las obras mineras que se requerirán para una operación segura, el lapso de tiempo que éstas podrán permanecer abiertas con seguridad, o el tipo de soporte que, llegado el caso, necesitarán.

La estabilidad estructural de la masa mineralizada en particular y del macizo rocoso en general, dependerá no sólo de la resistencia inherente a la propia roca, sino que también dependerá de la existencia de fracturas y/o planos de debilidad y de su arreglo geométrico, así como del factor tiempo. Un bloque pequeño de roca, con textura y estructura uniformes y que no presente discontinuidades ocasionadas por fracturas o juntas es, invariablemente, una unidad estructural más resistente que una masa rocosa carente de uniformidad y cortada por planos de discontinuidad; sin embargo, pilares muy grandes pueden mostrar mayor resistencia estructural en el terreno que los núcleos o probetas estudiadas en el laboratorio (esto debido al efecto de confinamiento en el núcleo central de la muestra), a pesar de que exista algún fracturamiento y variación en sus propiedades. El arreglo y la distancia entre fracturas y otras discontinuidades, tendrá un profundo efecto en la resistencia de la roca.

## ***2. Tamaño, forma y ángulo de buzamiento del depósito***

La morfología de los cuerpos minerales varía de masivo a tabular y de mantos a chimeneas, dentro de los cuales se pueden presentar *clavos*, diques y cuerpos diseminados, que aparecen en función de la historia genética y de las características de la roca huésped a partir de la cual se formaron. De acuerdo con la posición espacial del depósito, se determinará el método que se empleará para minar-

lo. Por ejemplo, un depósito tabular buzando a un ángulo muy pronunciado, podrá ser removido completamente sin hacer uso de estructuras de soporte, siempre y cuando las paredes que lo encajonan sean moderadamente resistentes. Por el contrario, un depósito similar buzando a un ángulo mucho menor, puede tener una extensión horizontal tan grande que obligue a sostener la pared del "alto" con pilares naturales o con soportes artificiales.

Un depósito de forma regular requiere de menos soporte durante su explotación que otro que sea muy irregular, aunque el segundo conserve las otras mismas características físicas del primero, por lo que las operaciones en cuerpos irregulares, producirán rebajes con paredes y techos irregulares, tajadas o bloques de roca inestable y salientes en las paredes. Las irregularidades requerirán de algún tipo de soporte si la roca se encuentra fracturada o rota; en cambio si las paredes son lisas, regulares y de resistencia uniforme, podrán permanecer estables sin necesidad de soporte.

Un cuerpo mineral alojado en roca firme podrá ser totalmente minado y extraído sin necesidad de ningún otro tipo de soporte que no sean las paredes mismas. Si cuerpos más grandes son localizados en la misma clase de roca, será necesario proporcionar algún tipo de soporte en forma de pilares, relleno o madera, debido a que grandes porciones de los rebajes vacíos se dejarán sin soporte durante la etapa de remoción del mineral.

En otras palabras, existe un límite en longitud y ancho dentro de un área sin soportar que posee suficiente resistencia estructural para sostener los esfuerzos compresivos y el peso de la roca que rodea dicha área; por lo tanto resulta obvio que el tamaño de un depósito mineral, es otro de los factores fundamentales que deberá ser considerado en la selección del método óptimo de minado.

El tamaño y sección de las obras también estará afectado por factores de resistencia a los esfuerzos de compresión, pero cada caso deberá ser evaluado en forma particular.

## ***3. Profundidad del depósito y naturaleza del encape***

Frecuentemente, conforme se incremente la profundidad de los trabajos, el método de explotación debe ser cambiado o modificado, debido a que los huecos producidos requieren de más soporte. Depósitos poco profundos soportan pequeñas columnas de carga ejercidas por los macizos rocosos localizados encima de ellos, por lo que estarán sujetos a presiones litostáticas relativamente bajas. Estas presiones litostáticas ejercidas sobre las obras subterráneas, además de las tensiones tectónicas y residuales, se incrementarán proporcionalmente con la profundidad.

La índole de la masa rocosa encima del depósito, puede tener importantes efectos en las tensiones a profundidad, debido a que las magnitudes de las presiones dependerán de las condiciones del mate

rial de encabe, esto es, si el material es de tipo elástoplástico o viscoso. El peso de la masa que forma el encabe suelto es sustentado por las rocas subyacentes y, si las excavaciones se realizan más tarde, el peso será transmitido a los pilares, paredes o cualquier otro tipo de soporte, ya sea directamente o presionando sobre la roca, hundiendo y deformando los arcos y estructuras de sostenimiento. De manera semejante, si se forma un bloque suelto o *bloque de presión* sobre las excavaciones a causa de las presiones ejercidas por el macizo rocoso que las rodea, dichas presiones serán transmitidas a las estructuras de soporte en la mina. Bloques de presión de gran tamaño pueden ser el resultado de algún fenómeno geológico natural como fallas, o bien puede ocurrir como resultado de las mismas operaciones de minado.

#### **4. Continuidad de la mineralización dentro de los límites del cuerpo e influencia de la geología en la estructura de las rocas**

De la misma manera que el tamaño, la forma y regularidad del contorno, la continuidad de los valores y otras características geométricas del depósito mineral, tienen una influencia determinante en los problemas de soporte de las obras durante la etapa de explotación, el estudio de las diferentes teorías relacionadas con la génesis de los depósitos minerales, son también guías muy valiosas en las etapas de desarrollo y explotación del yacimiento.

Las características estructurales de los depósitos minerales tienen gran influencia en todas y cada una de las cuatro fases de la operación minera: *prospección, exploración, desarrollo* y explotación.

En la primera fase de un proceso de minado, usualmente la geología representa la herramienta más importante empleada en la búsqueda de nuevos yacimientos. Durante la segunda y tercera fases, resulta esencial para un ingeniero minero con conocimiento de resistencia de materiales, disponer de toda la información relacionada con las características físicas y estructurales del depósito, las cuales, en un momento dado, podrán influir en el diseño de las obras y, en consecuencia, en los ritmos de producción, que a su vez y en su oportunidad afectarán los márgenes de utilidad.

#### **5. Posición del depósito con relación a instalaciones superficiales, drenajes y otras obras subterráneas**

Es importante destacar la importancia que implica la posición que ocupa el depósito mineral por explotar, con relación a las instalaciones superficiales que se pretendan construir en el entorno del cuerpo.

Los edificios y obras civiles que ocuparán los caminos de acceso, oficinas, talleres, subestaciones eléctricas, planta de beneficio, planta de tratamiento de aguas, polvorines, patios de maniobras, malacates, tiros, horcas, presas de jales, terreros, y en general todo tipo de instalación superficial que dará servicio a la mina, deberá ser localizado fuera del área que ocupa el yacimiento, pero lo suficientemente cercanas como para que el traslado y movimiento de materiales e insumos no se convierta en un problema de transportación.

Por lo que se refiere al manejo de flujos hidráulicos naturales, se deberá evitar el construir o colar obras subterráneas (y superficiales), dentro de las cuencas de drenajes pluviales naturales y/o en el



### ***Frentes y niveles***

Las *frentes*, son obras sensiblemente horizontales que se cuelan a rumbo de veta y tienen una comunicación con el tiro principal. Los *niveles*, son obras que cuando se colaron fueron *frentes* y después de equipadas para el fin para el que fueron creadas, adquieren la denominación de *nivel*.

Las frentes y niveles se emplean para diversos fines, tales como: obras de acceso a los rebajes de producción, obras de desarrollo para el sistema de minado, para fines de exploración, como obras de ventilación y acarreo horizontal de materiales. Las secciones de este tipo de obras pueden variar entre 4 y 20 m<sup>2</sup>, dependiendo del tamaño de los equipos que por ella vayan a circular y de la consistencia de la roca. En general, la geometría de la obra es de tipo rectangular con cielo abovedado (*portal*), o sensiblemente circular cuando se requiere de una resistencia a la compresión mayor y cuando se cuenta con el equipo de perforación adecuado.

### ***Pozos y Contrapozos***

Los *pozos* y los *contrapozos* en una mina, son obras sensiblemente verticales que sirven como comunicación entre los diferentes niveles de la mina, como obras de ventilación, como camino para el tránsito del personal, como *chorreaderos* de material rocoso y como parte integral de las obras de extracción en los diversos sistema de explotación de minas.

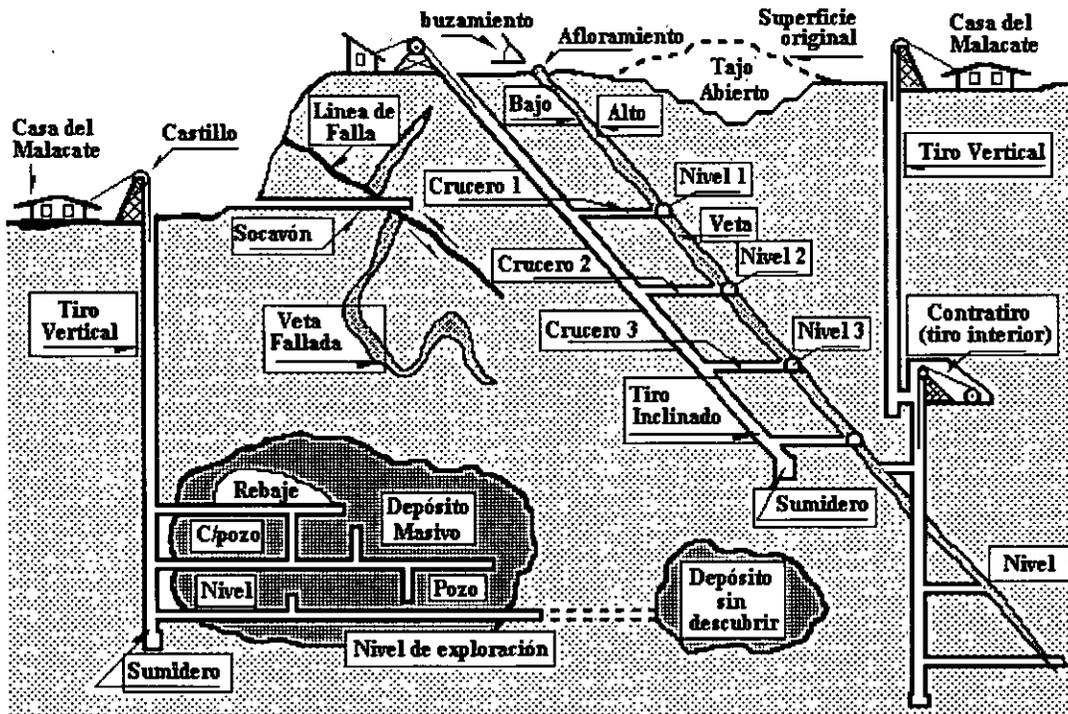
La diferencia fundamental entre estos dos tipos de obras, se fundamenta en manera en que se cuelan. Los *pozos* se cuelan de arriba hacia abajo, en tanto que en los *contrapozos* se hace de abajo hacia arriba, facilitando así las labores de rezagado, ya que en éstos se realiza por acción de la fuerza de gravedad, en tanto que en los pozos, la extracción del material fragmentado se debe hacer por la boca del mismo pozo.

### ***Rampas***

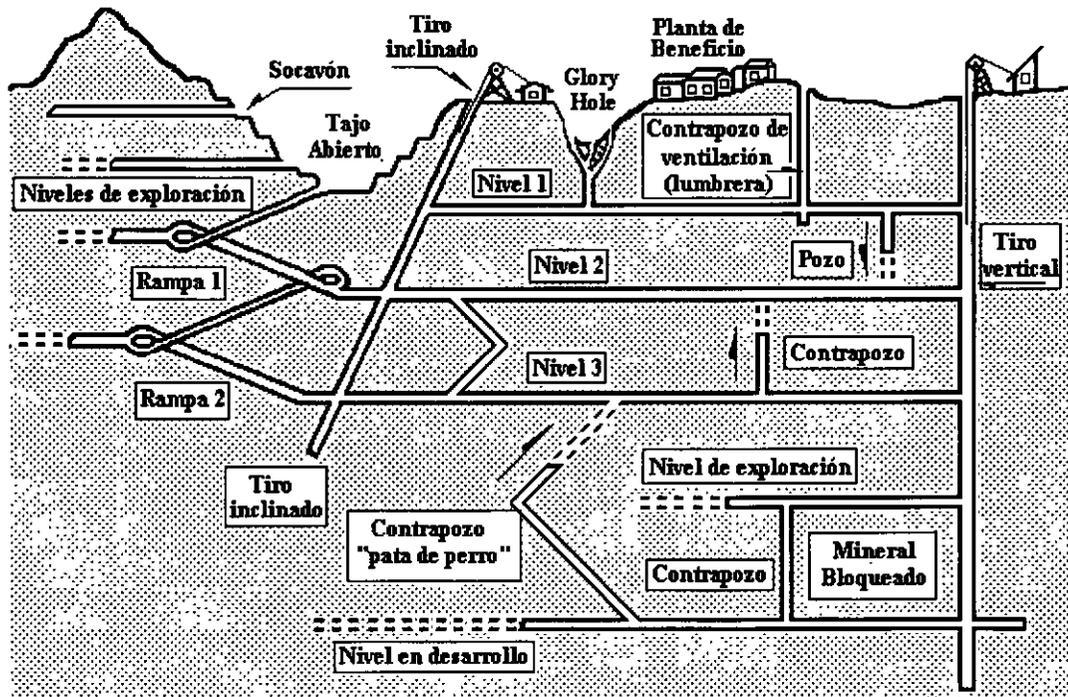
El uso de las rampas como obras de transporte se está haciendo muy común; la tendencia general hoy en día en las operaciones mecanizadas, es la de cambiar gradualmente al uso de equipos sin vía.

Muchas rampas tienen la misma función que los contrapozos: conectar los diferentes niveles de la mina.

Normalmente la pendiente de las rampas varía entre el 7 y el 12%, lo que hace posible el desplazamiento fácil y rápido de máquinas autopulsadas sobre ruedas de goma.



## OBRAS SUBTERRÁNEAS DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO



## VÍAS DE COMUNICACIÓN EN ROCA

Educación Continua  
con una nueva visión en la Ingeniería

CURSO:

# Explotación de Minas

Del 13 al 17 de junio del 2011

Expositor: M. en C. Víctor Manuel López Aburto



CI - 3

[www.mineria.unam.mx](http://www.mineria.unam.mx)

Encuétranos en:



[www.facebook.com/decdfi](http://www.facebook.com/decdfi)



[www.twitter.com/decdfi](http://www.twitter.com/decdfi)

**CAPITULO 4****MÉTODOS DE MINADO****4.1. CLASIFICACION DE LOS METODOS DE MINADO**

Los rasgos y características de los depósitos minerales fueron creados antes, durante o después de que la mineralización tuvo lugar. Así, las condiciones que determinan el método de minado más adecuado dependerán de lo anterior. Desde el punto de vista de la ingeniería geológica estructural, las siguientes características son de suma importancia en la selección de un método de explotación minera

1. El tamaño y la morfología del cuerpo mineral.
2. El espesor y el tipo del encape superficial.
3. La localización, rumbo y buzamiento del depósito.
4. Las características físicas y resistencia del mineral.
5. Las características físicas y resistencia de la roca encajonante.
6. La presencia o ausencia de aguas subterráneas y sus condiciones hidráulicas relacionadas con el drenaje de las obras.
7. Factores económicos involucrados con la operación, incluyendo la ley y tipo de mineral, costos comparativos de minado y ritmos de producción deseados.
8. Factores ecológicos y ambientales, tales como conservación del contorno topográfico original en el área de minado y prevención de que sustancias nocivas contaminen las aguas o la atmósfera.

Estos factores pueden ser rápidamente interpretados en términos de entidades geológicas, algunos cuantitativamente y otros en forma puramente cualitativa.

Como parte de los antecedentes para un análisis geológico de los sistemas de minado y su interrelación con la mecánica de rocas, la siguiente clasificación de los métodos de minado, ayudará en principio, a la realización del análisis de estabilidad en los macizos rocosos.

**MÉTODOS DE MINADO SUPERFICIAL****• MINADO DE PLACERES**

- a) Bateas y canalones.
- b) Minado hidráulico.
- c) Dragado.

**• TAJO ABIERTO**

- a) Banco individual.
- b) Bancos múltiples.
- c) Descapote de mantos.
- d) Explotación de canteras.

**• GLORY HOLE****MÉTODOS DE MINADO SUBTERRÁNEO****• REBAJES NATURALMENTE SOPORTADOS**

(A) Rebajes abiertos.

- a) Aberturas aisladas (rebajes individuales).
- b) Aberturas con pilares (rebajes múltiples).

- Con pilares casuales.
- Con pilares regularmente distribuidos.

(B) Salones y pilares.

(C) Tumbe por subniveles.

(D) Tumbe sobre carga.<sup>1</sup>

(E) Rebajes abiertos con "trancas" horizontales.

---

<sup>1</sup> Algunos autores lo clasifican dentro de los rebajes artificialmente soportados

- **REBAJES ARTIFICIALMENTE SOPORTADOS**

(A) Corte y relleno.

- a) Con tepetate.
- b) Con gravas y arenas de ríos y arroyos.
- c) Con arenas de jal (relleno hidráulico)

(B) Cuadros conjugados.

- a) Sin relleno.
- b) Con relleno posterior.

(C) Frentes largas.

(D) Frentes cortas.

(E) Rebanadas descendentes.<sup>2</sup>

- **REBAJES DE HUNDIMIENTO**

(A) Hundimiento de subniveles.

(B) Hundimiento de bloques y paneles.

#### **4. REBAJES CON METODOS COMBINADOS**

### **METODOS ESPECIALES**

- **MINADO POR SOLUCIONES**

(A) Proceso Frasch.

(B) Disolución con agua caliente.

(C) Lixiviación.

#### **4.1.1. METODOS DE MINADO SUPERFICIAL**

---

<sup>2</sup> Algunos autores lo clasifican dentro de los rebajes de hundimiento.

Una mina superficial es una excavación a cielo abierto destinada a la explotación de minerales. El sistema de minado superficial puede ser empleado para la extracción de minerales metálicos o no metálicos a partir de cualquier depósito mineral cercano a la superficie del terreno. Depósitos "*cercaños a la superficie*" implican cuerpos minerales localizados a profundidades menores de 160 m (500 pies aprox.). Los tamaños de los depósitos podrán variar desde algunos cientos de toneladas, hasta yacimientos de más de 100 millones de toneladas.

El minado superficial permite una gran flexibilidad en producción lo cual incluye la habilidad para minar selectivamente con un potencial de 100% de extracción, dentro de los límites de la excavación. Se requiere poco personal para la operación, dado que el alto grado de mecanización permite una alta productividad por hombre-turno, así como límites de seguridad más altos comparados con los sistemas de minado subterráneo.

Los problemas más comunes relacionados con el minado superficial, incluye climas adversos en algunas localidades (nieve, grandes precipitaciones pluviales, tormentas eléctricas, etc.); problemas ambientales indeseables tales como la generación de polvo, ruido, vibraciones causadas por el uso de explosivos y disponibilidad de grandes áreas para el almacenamiento de los desperdicios generados por las operaciones de explotación y beneficio: terreros y presas de jales.

### ● **Minado de Placeres**

El minado de placeres se efectúa concentrando minerales pesados (generalmente en su forma nativa) a partir de materiales detríticos, mediante una concentración gravimétrica selectiva en un medio acuoso o neumático en movimiento. Esta operación minera requiere que el depósito mineral se encuentre en o cerca del agua y en o cercano a la superficie.

La siguiente descripción corresponde a los tres métodos más comúnmente empleados en el minado de placeres: *bateas y canalones, minado hidráulico y dragado*.

#### **a) Bateas y canalones**

El sistema de bateas fue ampliamente usado por los *gambusinos* norteamericanos en los antiguos días de la "fiebre del oro", en placeres donde las aguas de ríos y arroyos arrastraron grandes cantidades de minerales nativos (oro, plata, piedras preciosas, etc) concentrándolos en estratos, "bolsas" o meandros, cuando las aguas que los transportaban perdían fuerza o cambiaban de rumbo en alguna curvatura del río. Dicha concentración se efectuaba por acción gravimétrica natural al asentarse el fragmento de mineral ("pepita" o "nuez") en el lecho del arroyo, dependiendo de su tamaño, de su peso específico y de la fuerza de la corriente de arrastre.

Con base en lo anterior, el método de bateas sólo puede ser utilizado cuando el mineral comercial sea más pesado que la ganga (estéril y minerales asociados) y cuando no se requiera de grandes volúmenes de producción, en virtud de que el método se considera muy rústico. Dado que el sistema es de baja productividad, hoy en día se emplea fundamentalmente con propósitos de explora

ción para detectar depósitos de placer o mineral proveniente de vetas u otros tipos de yacimientos.

Los canalones, también usados en la época de la "fiebre del oro", han sido ventajosamente reemplazados por otros métodos de mayor productividad. En la actualidad son empleados con fines exploratorios al igual que el método de bateas. La potencia de los depósitos con los que se usa el sistema de canalones puede variar entre 1.80 y 2.50 m (6-8 pies), y el material puede estar seco. Para efectuar la separación del mineral de su ganga se hace necesario el empleo de una canaleta inclinada construida de madera, con el fondo obstaculizado con tiras también de madera, colocadas perpendicularmente a las paredes del canalón, y de un flujo de agua corriente que se deposita en la canal conjuntamente con el mineral. Dicho flujo actúa como medio de arrastre de las partículas, quedando atrapadas en los obstáculos del fondo (también llamados *riffles*), aquellas que resultan más pesadas y las "pepitas" de minerales nativos. El tamaño, la longitud y el ángulo de inclinación del equipo, dependerán del volumen del depósito, del tiempo de desintegración de los terrones de arenas y gravas, del flujo disponible de agua y del tamaño máximo esperado de los fragmentos y "pepitas" atrapadas en los riffles.

En virtud de que la gran mayoría de los depósitos de placer en el mundo han sido prácticamente agotados, los métodos de concentración gravimétrica de placeres han caído en la obsolescencia, a excepción hecha de los fines exploratorios a que se hizo referencia y a la existencia de algún *gambusino*, también casi extinto, que aún practique estos métodos.

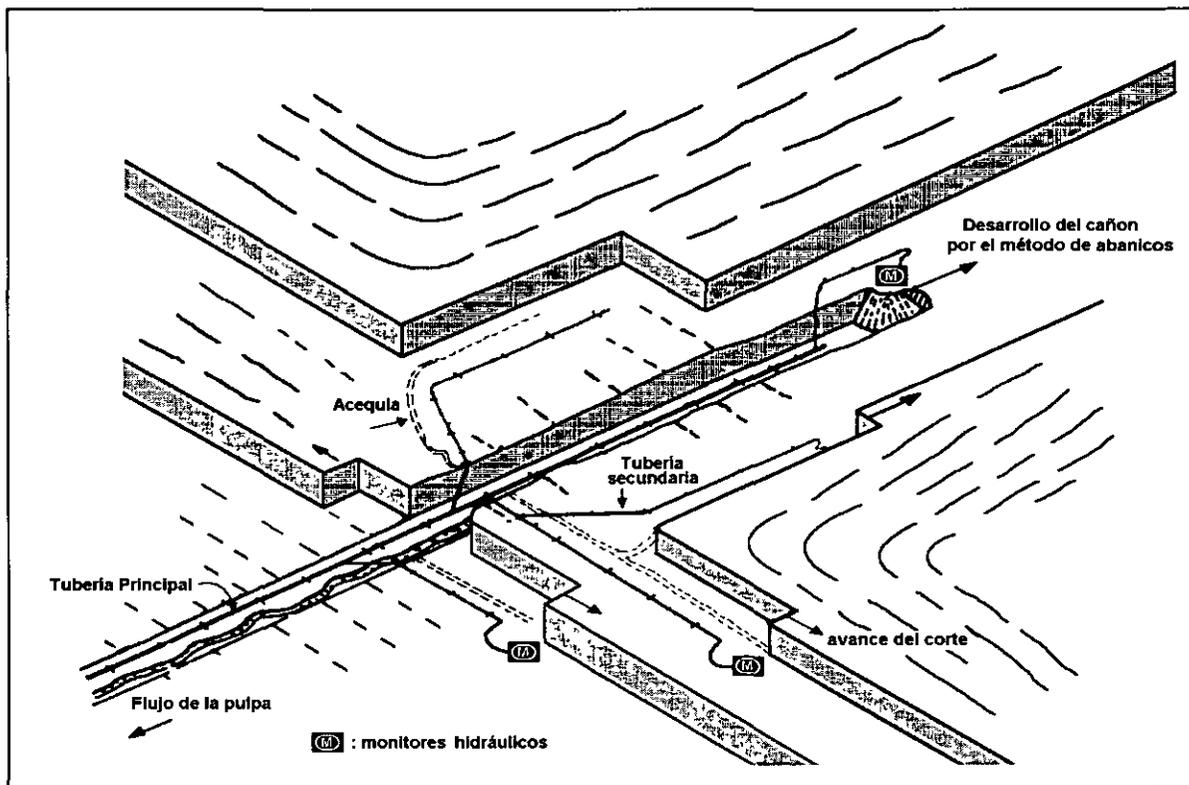
### b) Minado hidráulico

El minado con monitores hidráulicos es ampliamente usado en la explotación de grandes depósitos de placer que generalmente contienen arenas parcialmente cementadas, gravas y cantos rodados. A últimas fechas, también se emplea en el "minado" o repulpeo de presas de jales donde han quedado valores minerales comercializables al momento de la explotación. (figura 1).

Para su aplicación, el sistema de minado hidráulico emplea grandes cantidades de agua a presión dirigidas hacia los frentes de explotación a través de mangueras de alta presión y boquillas de flujo ajustable, para la desintegración de los terrones y grumos que forman los materiales contenidos en el depósito.

La mecánica de explotación consiste en aprovechar el impacto producido por el chorro de agua a presión descargado por un dispositivo construido específicamente para tal fin. Dicho aparato se le conoce con el nombre de *monitor hidráulico*. (figura 2). El agua lanzada a presión (en rangos que varían de 10 a 300 kg/cm<sup>2</sup>), disgrega el material y se mezcla con él formando una

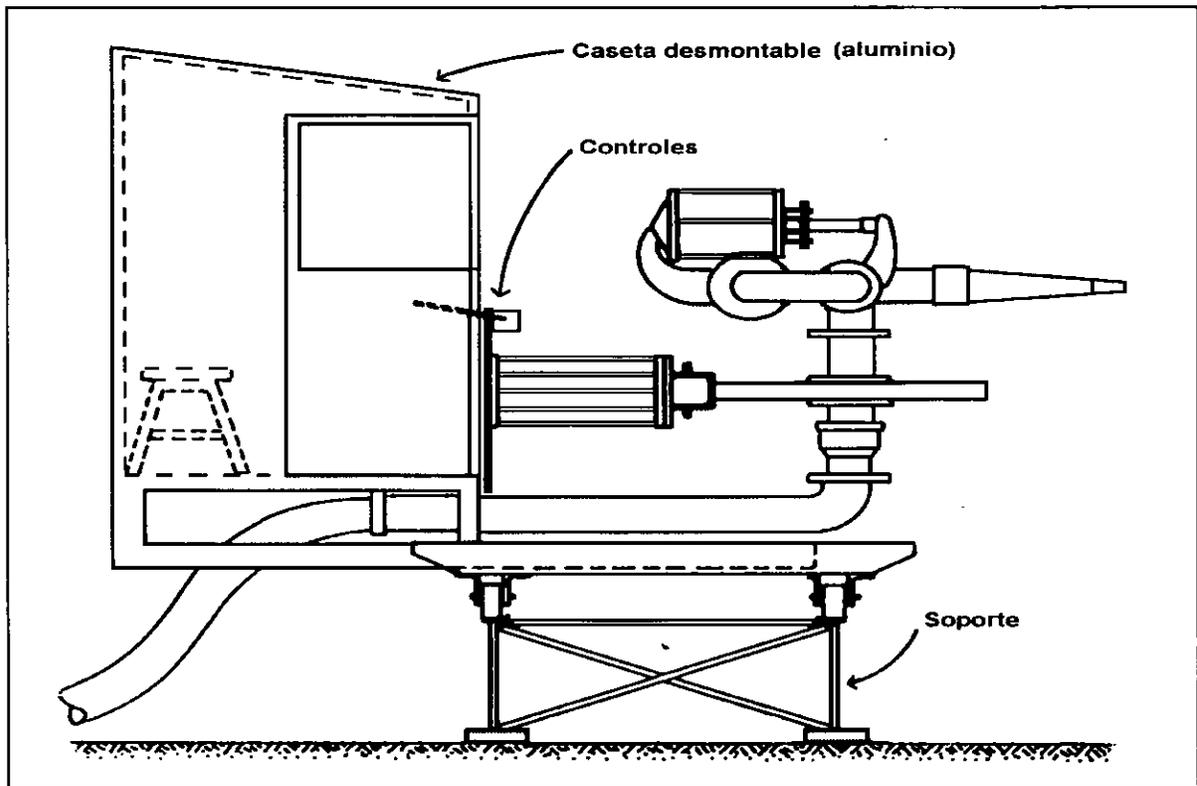
pulpa, la cual transporta en suspensión las partículas hacia canalones o zanjas cavadas en el terreno. A través de dichas zanjas, el material se conduce hasta las instalaciones metalúrgicas para su posterior tratamiento.



**Figura 1 SISTEMA DE MINADO HIDRAULICO**  
(Grajales, M.F., 1970)

El agua de minado debe tener la presión y el volumen suficientes como para poder excavar el material y arrastrar las partículas hacia los canales de transporte. Podrán requerirse cantidades adicionales de agua para el lavado de los materiales (deslamado) y para la operación adecuada de los canales de transporte.

La altura de operación de los bancos varía entre 5 y 17 m (15-50 pies), dependiendo del grado de compactación del depósito. La altura máxima de un banco, no deberá ser mayor de 50 m (150 pies). Para obtener mejores resultados del sistema de explotación, la pendiente de los bancos debe ser de cuando menos 2% para arenas y gravas finas; de 4 a 5% para gravas de tamaño medio; y mayor de 5% para material grueso y pesado. Los volúmenes de producción que se obtienen empleando este método, están limitados por las cantidades disponibles de agua, por la potencia del depósito, por el tamaño de las partículas y trozos de material y por las pendientes de trabajo.



**Figura 2 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN MONITOR HIDRAULICO**  
(Grajales, M.F., 1970)

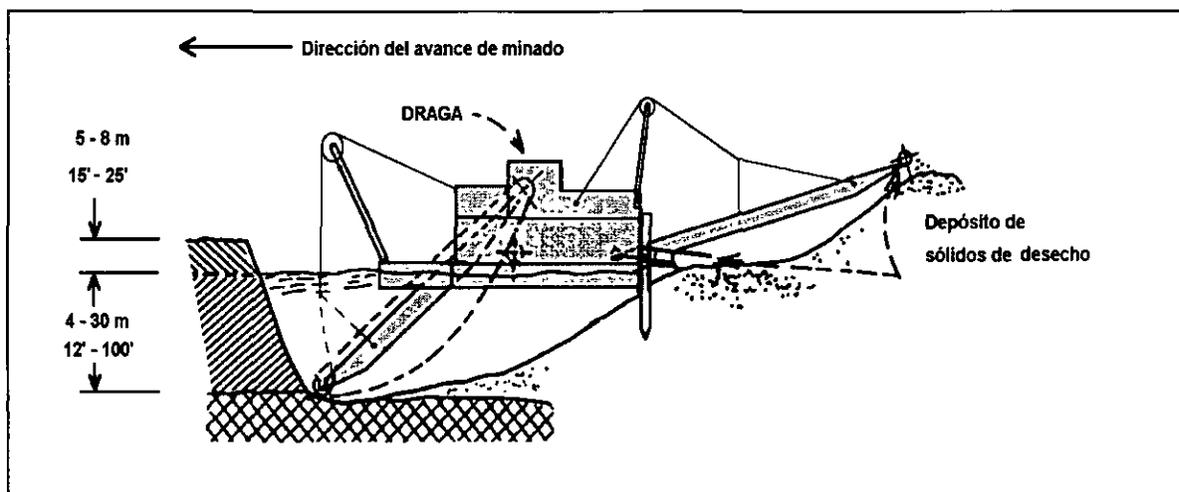
Problemas ambientales asociados al sistema de minado hidráulico son: el manejo de los flujos de desagüe y el manejo de los residuos de desecho (presa de jales). También y dado que el minado hidráulico eventualmente afecta grandes áreas superficiales, la restauración de la superficie original se puede convertir en otro problema.

### c) Dragado

El sistema de dragado consiste fundamentalmente en realizar excavaciones por debajo del agua en materiales rocosos de tipo detrítico. Para la aplicación de este método de minado, los depósitos explotables son generalmente de baja ley pero de gran tamaño, tanto en área como en espesor. El depósito puede ser un arroyo (activo o extinto) o bien el lecho de un río o laguna. La mejor pendiente superficial del depósito es del orden del 2% con un máximo de 6%. Las recuperaciones de minado estarán en función directa de las condiciones del lecho rocoso, es decir, bajarán si el lecho rocoso del depósito resulta ser plano y duro de tal manera que el mineral no quede atrapado o hundido en él; y se verán incrementadas si el lecho es suave y fracturado, dado que las maniobras de dragado se podrán efectuar con mayor eficiencia.

La draga es básicamente una máquina excavadora de gran volumen y de operación continua, la cual lleva incluida instalaciones de concentración gravimétrica (jigs) y sistemas de remoción de basura y materiales estériles, todo ello contenido en una plataforma flotante o barcaza (figura 3).

Las dragas pueden remover materiales depositados por debajo de la superficie del agua, desde 4 hasta 30 metros (12-100 pies); en algunos casos excepcionales, han sido usadas con bastante éxito a profundidades de 55 metros (165 pies) en Malasia. La altura de los bancos (pilas) formados con el material extraído, normalmente no debe exceder de 5 a 8 metros (15-25 pies), pero con dragas de gran alcance y capacidad éstos pueden alcanzar alturas de 13 a 17 metros (40-50 pies). Si existen restricciones topográficas que obliguen a formar pilas que excedan las alturas recomendadas, entonces se hará necesario el "descopetarlos" de alguna manera, para evitar la formación de cavernas dentro del apilamiento. El tamaño adecuado de la draga está determinado por el contenido de arcillas en las gravas, el tamaño de los fragmentos por minar y la cantidad disponible de agua dentro del área de trabajo como para mantener a flote la barcaza o plataforma de dragado.



**Figura 3 SISTEMA DE DRAGADO**  
(Cummins, B.A., 1973)

Los principales problemas con el sistema de dragado serán el de disponer de agua suficiente para mantener flotando la draga dentro del estanque, lago o río del área de explotación, y el disponer de "agua clara" en cantidad suficiente para el beneficio del material extraído. Otras grandes preocupaciones que se deben tener presentes, son las de mantener en operación continua éstos grandes equipos, la selección de áreas para el depósito de desechos (jales, basura, ramas, etc.) y la restauración de las áreas afectadas por la operación, tanto en tierra firme como en el agua.

#### • **MINADO A TAJO ABIERTO**

Las operaciones mineras a *tajo abierto* (también conocidas como minado a *cielo abierto*), pueden ser empleadas en cualquier tipo de depósito mineral alojado en cualquier tipo de roca, siempre y cuando dicho depósito se encuentre en la superficie del terreno o razonablemente cercano a él, de modo que la excavación quede abierta al cielo y expuesta a las condiciones atmosféricas. Estos

métodos son altamente recomendables para la explotación de yacimientos minerales de baja ley, con dimensiones substancialmente grandes, de tal manera que su magnitud permita la extracción económica del depósito mediante la remoción de grandes volúmenes de mineral a bajo costo.

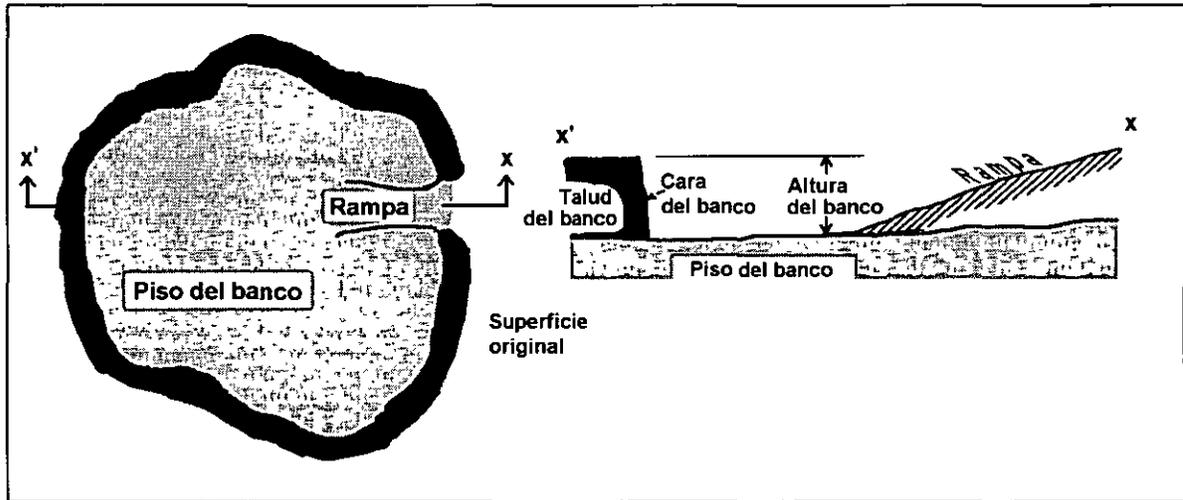
A pesar de que los sistemas de *descapote de mantos* y *explotación de canteras* son variantes del método de minado a tajo abierto, el *descapote de mantos* usualmente se refiere al minado de mantos de carbón y la *explotación de canteras* se relaciona con la producción de minerales no-metálicos (materiales industriales o de construcción) tales como roca volcánica, gravas clasificadas, caliza, yeso, arcillas para la industria cementera y en general, rocas para los agregados del concreto.

Algunos de los factores que determinan los planes de minado para un tajo son las orientaciones de diaclasas, fallas, contactos entre unidades litológicas y todo tipo de discontinuidades; la relación de *descapote* (volumen de estéril contra volumen de mineral por remover), las condiciones climatológicas y ambientales, ritmo de producción requerido y disponibilidad de equipo para la operación. También habrá que considerar, en depósitos que se extiendan a profundidad, el límite inferior de la excavación a tajo abierto, evaluando la posibilidad de continuar la operación por métodos subterráneos, o la opción de emplear ambos métodos simultáneamente si el tamaño y las características estructurales del depósito técnica y económicamente lo permiten. Algunas operaciones mineras en el mundo han empleado ambos métodos o han cambiado de uno a otro según se presentaron las condiciones del depósito. Por citar algunos ejemplos, la mina *Crestmore* en California, E.U.A. cambió del sistema de minado superficial a "hundimiento de bloques" y posteriormente a "salones y pilares" a medida que la operación se incrementó a profundidad. La mina *Cananea* en Sonora, México y la mina *Morenci* en Arizona, E.U.A., cambiaron sus sistemas originales de minado subterráneo a los métodos de explotación a cielo abierto, los cuales operan hasta la fecha. El mejoramiento y la mayor capacidad de los equipos para operaciones a cielo abierto, comparados con los equipos de minado subterráneo han sido factores importantes que han favorecido a los métodos superficiales, cuando pueden ser aplicados a los depósitos idóneos.

Para su estudio y operación existen cuatro métodos de minado a tajo abierto: *bancos individuales*, *bancos múltiples*, *descapote de mantos* y *explotación de canteras*.

#### **a) Bancos Individuales**

Un banco en una mina a tajo abierto, está constituido por un nivel individual de operación encima del cual los materiales en explotación (mineral y tepepate) están siendo excavados de la cara del banco (figura 4). El minado a cielo abierto de bancos individuales puede ser empleado para minar cualquier tipo de depósito somero, alojado en cualquier tipo de roca. De este modo, las variantes de *descapote* y de *canteras* pueden ser operaciones de bancos individuales si el depósito presenta características adecuadas.



**Figura 4 BANCO INDIVIDUAL A TAJO ABIERTO**

(Cummins, B.A., 1973)

La altura máxima estable y la pendiente recomendada dependerán del tipo de material rocoso que forme el banco. La altura normal de un banco individual puede variar entre 4 y 10 m (12-30 pies) para rocas que varíen de suaves a moderadamente resistentes, aunque en algunos casos muy especiales, la altura máxima puede alcanzar hasta 70 m (200 pies) en rocas muy competentes. En cuanto al área de explotación del banco no existen limitaciones físicas.

Depósitos minados típicamente por este método son los mantos de arena y grava, mantos o vetas de carbón con encape limitado y cercanos a la superficie (ver descapote de mantos) y rocas útiles para agregados de construcción (ver minado de canteras).

Los volúmenes de producción que se obtienen mediante el empleo de este método, únicamente se verán limitados por la capacidad de los equipos que operen dentro del banco y por el número de áreas a lo largo de la cara de explotación que puedan ser minadas simultáneamente.

Los terreros, las presas de jales, el ruido, el polvo, las vibraciones causadas por el uso de explosivos así como la restauración de la superficie original del terreno, crea los problemas ambientales más comunes de este tipo de operaciones.

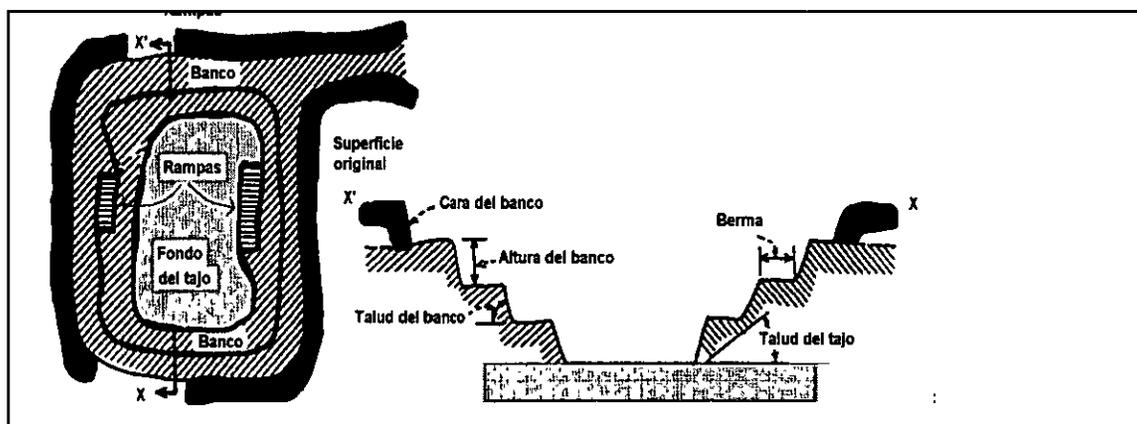
### **b) Bancos múltiples**

El sistema de bancos múltiples normalmente puede ser empleado en cualquier tipo de depósitos masivos, ya sean mantos, vetas anchas, chimeneas o cuerpos diseminados que se extiendan a suficiente profundidad, más allá de lo recomendable para el minado de bancos individuales. La roca encajonante deberá ser lo suficientemente competente como para permitir el desarrollo de bancos de altura económica. Estos materiales rocosos pueden ser desde semiconsolidados hasta rocas intemperizadas (con frecuencia altamente intemperizadas), es decir, material rocoso que sólo requiere del uso mínimo de explosivos para su excavación.

Si el depósito mineral se extiende a una profundidad más allá de los 17 metros (20-50 pies), muy probablemente se requerirá de más de un banco para su explotación. En tajos donde exista más de un banco, el ancho de éstos podrá variar de 7 a 25 m (20-75 pies), dependiendo fundamentalmente del tamaño del equipo de acarreo y del tipo de material por minar (figura 5). Las bermas de los bancos normalmente son usadas como caminos de rodamiento, ya sea en espirales que lleguen al fondo del tajo, o como rampas entre bancos horizontales. El ancho (o berma) de los bancos debe ser diseñado también para proporcionar protección, tanto al personal como al equipo, de pequeños derrumbes y deslizamientos de los taludes o paredes de los bancos. El ángulo de los taludes, usualmente es más pronunciado que el ángulo del talud final del tajo, debido a que la roca excavada se puede mantener más estable en paredes cercanas a la vertical cuando los bancos son de poca altura. Los taludes finales de un tajo varían de  $20^{\circ}$  a  $70^{\circ}$ , pudiendo incrementar esta pendiente durante la etapa terminal de la operación, con objeto de aumentar las recuperaciones de minado.

Problemas de naturaleza ambiental y ecológica derivados de la explotación a cielo abierto de un depósito mineral, son los asociados con la selección de áreas para terreros y presas de jales, ruido, polvo, vibraciones por el uso de explosivos y restauración de la topografía original del terreno. La presencia de acuíferos puede o no, causar problemas ambientales.

Casi siempre han existido reacciones adversas hacia las operaciones a tajo abierto, debido fundamentalmente a las alteraciones ambientales que éstas conllevan; sin embargo, muchas de las operaciones mineras subterráneas de gran productividad, como por ejemplo el hundimiento de bloques, produce casi inmediatamente problemas de subsidencia en la superficie del terreno, dejándola prácticamente inutilizada para otros trabajos propios de la superficie. En última instancia, la restauración del terreno para su posterior utilización, resulta más sencilla y menos costosa cuando se trata de una excavación producto de una operación a cielo abierto, que cuando se trata de áreas minadas por métodos subterráneos que eventualmente se hunden.



**Figura 5 MINADO A TAJO ABIERTO CON BANCOS MÚLTIPLES**  
(Cummins, B.A., 1973)

### c) Descapote de mantos

El término *descapote de mantos* se aplica fundamentalmente a las operaciones de minado de mantos de carbón cercanos a la superficie; sin embargo, otros depósitos de baja resistencia cohesiva, también podrán ser minados por este método. La mayoría de los descapotes se realizan en formaciones sedimentarias tipo mantos, donde el uso de explosivos para la remoción del material se podrá o no requerir, dependiendo del tipo de roca que forme el encape localizado encima del depósito.

La potencia de los mantos de carbón que se pueden minar por descapote, varía de 0.60 a +10 metros (2 a +30 pies). Cuando se presentan mantos de más de 12 metros o mantos múltiples, se recomienda emplear el sistema de bancos múltiples.

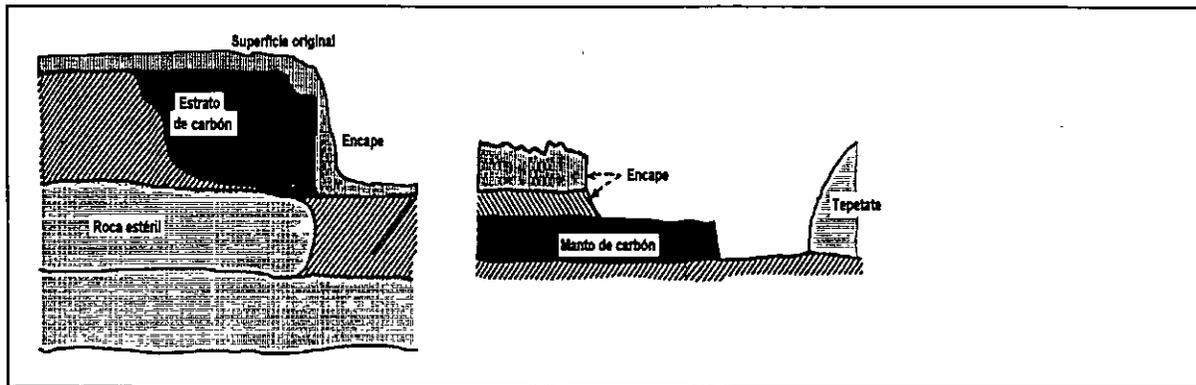
Con el empleo de los grandes y modernos equipos, las relaciones de descapote pueden llegar a ser tan altas como de 30:1, y aún resultar una operación rentable. Cuando las condiciones físicas del encape han sido favorables, se ha podido minar con éxito depósitos alojados a profundidades hasta de 50 m (150 pies). Las altas relaciones de descapote también dependerán de los costos de minado y de la eficiencia y disponibilidad de los equipos, los cuales varían ampliamente, en la mayoría de los casos, en función del control de la relación de carbón minable al espesor del encape.

El sistema de descapote usualmente se lleva a cabo mediante la remoción tanto del encape como del carbón, partiendo de una primera franja de dimensiones conocidas localizada a lo largo del depósito. A continuación y después de excavada la primera franja, se procede a excavar otra paralela a ésta pero en sentido opuesto, depositando el encape o roca estéril dentro del hueco que ocupó la primera. El ciclo completo se repite tantas veces como el área del depósito lo permita (figura 6).

El equipo de minado empleado en los sistemas de descapote normalmente es muy grande y puede descargar el encape removido ya sea directamente dentro del hueco dejado por la franja excavada con anterioridad, o bien en un sistema de bandas transportadoras. Ejemplos de estos equipos son las grandes ruedas excavadoras con cangilones, las cuales varían en capacidades que van desde una hasta más de 5 yardas cúbicas por cada cangilón; las dragalinas equipadas con cucharones de 7 a más de 220 yardas cúbicas; las palas de ataque con capacidades de cargado en el cucharón hasta de 100 yardas cúbicas. Para el minado del carbón propiamente dicho se emplean tractores (bulldozer) equipados con "ripper", y palas de ataque o cargadores frontales con volúmenes de cargado entre 6-12 yardas cúbicas o más.

En el minado por descapote, el mantenimiento de los taludes no es tan crítico como en el caso del minado de bancos en operaciones a cielo abierto; sin embargo, pilas muy altas de tepetate podrán causar problemas de afallamiento en los taludes.

Las condiciones ambientales (agua, variaciones térmicas, condiciones climáticas, etc.), cambios en las propiedades de las rocas, la relación de descapote y el transporte de los materiales, son los principales problemas que enfrenta el método de descapote de mantos. Adicionalmente, y al igual que en los métodos descritos con anterioridad, el problema de la depositación de desperdicios y la restauración del terreno original, deberán ser incluidos dentro del ciclo de minado lo que necesariamente se traducirá en una elevación de los costos de operación.



**Figura 6 DESCAPOTE DE MANTOS**  
(Cummins, B.A., 1973)

#### d) Explotación de Canteras

El término *cantera* se emplea para describir la explotación superficial de rocas tales como granito, mármol, caliza, pizarra, yeso, etc. las cuales poseen un valor comercial ya sea por sus propiedades mecánicas o químicas. Para este tipo de minado el depósito puede ser masivo, lenticular o estratiforme, lo que los hace adecuados para su explotación por el sistema de bancos.

La mayoría de los depósitos explotables por canteras, se encuentran alojados en rocas sedimentarias (calizas), sin embargo, algunos de tipo metamórfico (mármol) y otros de origen ígneo (granito), también podrán ser minados de esta manera.

Existen básicamente dos tipos de materiales producto de la explotación de una cantera: roca clasificada (agregados), y roca fragmentada (calizas químicas) o cortada (bloques de mármol).

Las canteras para agregados normalmente se explotan por bancos múltiples con las caras de éstos y la pendiente final del tajo muy pronunciadas (figura 7), por lo que la roca debe estar cementada a lo largo de cualquier fractura o junta para que produzca una resistencia cohesiva relativamente alta. La roca en explotación generalmente es fracturada o aflojada de alguna manera, o cortada en lugar de ser removida con explosivos, con objeto de conservar su forma y resistencia. La altura de los bancos de producción puede llegar a los 70 m (210 pies). La producción normalmente es muy selectiva y en cantidades limitadas.

El minado de canteras para producción de agregados y rocas químicas, generalmente se hace con explosivos, obteniendo diversos grados de fragmentación según el tamaño del producto final deseado. La mayoría de las canteras requiere de la remoción de un poco de encape, que en algunos casos sólo es tierra vegetal.

Los problemas comunes de este sistema de explotación son las filtraciones de agua, la restauración de la superficie original y el almacenamiento del encape. Además también se deberá considerar el polvo producido por las quebradoras, el ruido y las vibraciones generadas por el uso de explosivos como inconvenientes adicionales en una cantera productora de materiales agregados.

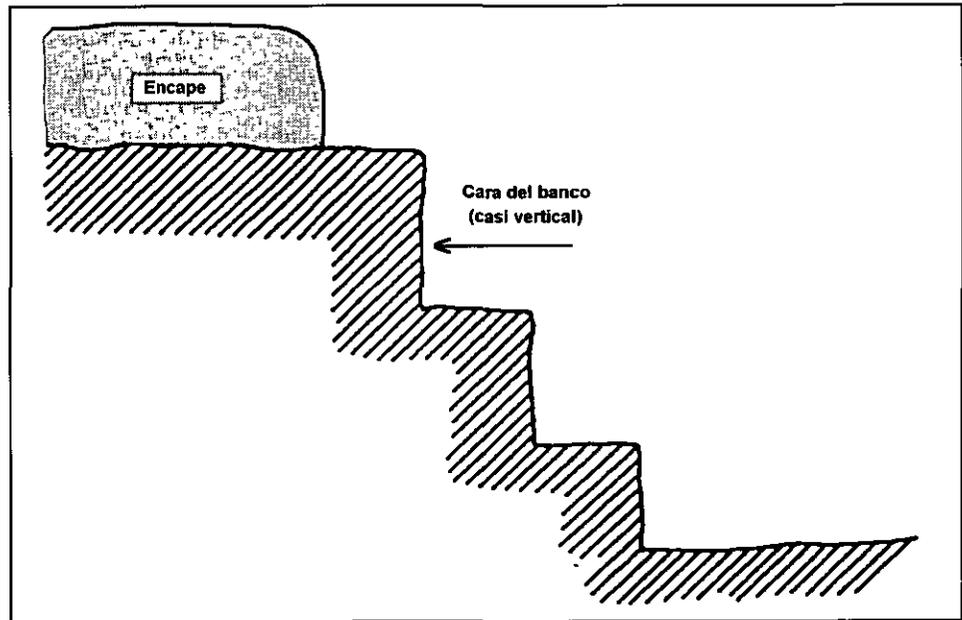
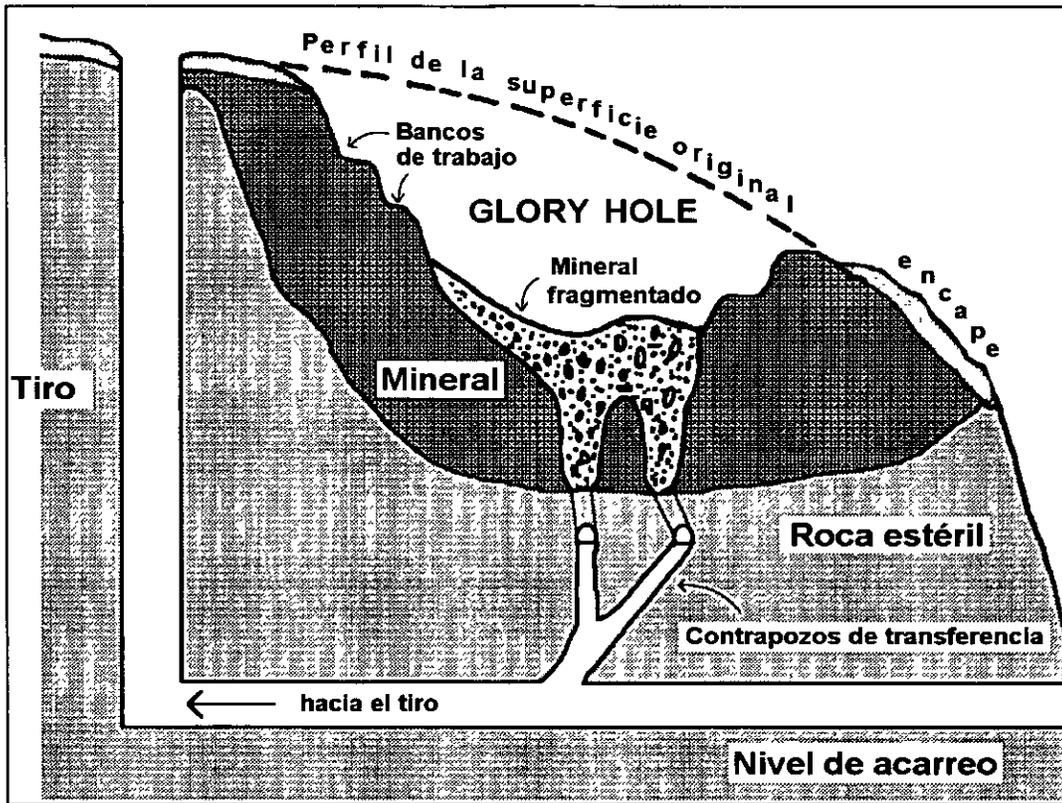


Figura 7 MINADO DE CANTERAS

- **GLORY HOLE**

El método de minado conocido como *glory hole*, implica una excavación a cielo abierto a partir de la cual el mineral es removido por gravedad a través de uno o más contrapozos comunicados a niveles de acarreo subterráneo (figura 8). La definición clásica, habitualmente lo describe como una operación o método de minado, donde el mineral alrededor de cada contrapozo es excavado de tal forma que caiga dentro del él por efecto de gravedad, dando como resultado una configuración en forma de embudo. Operaciones modernas de minado a cielo abierto acarrean el mineral hacia obras subterráneas verticales (que actúan como contrapozos de paso para el mineral) conectadas a instalaciones de manto con "skips", localizadas en o por debajo de los límites del tajo; todo esto con objeto de minimizar las distancias de acarreo de los grandes camiones "fuera de carretera" que se emplean para tal fin. Sin embargo estas modificaciones o similares, no llenan los requisitos de una verdadera operación de *glory hole*.

El método de *glory hole* se emplea para explotar casi cualquier tipo de depósito susceptible de minarse por los métodos a cielo abierto, además de algunas vetas angostas con ángulos de buzamiento muy pronunciados. El material rocoso del depósito puede ser de cualquier tipo, pero no debe tener la tendencia a empaquetarse o a apretarse en las obras de extracción (draw- points).

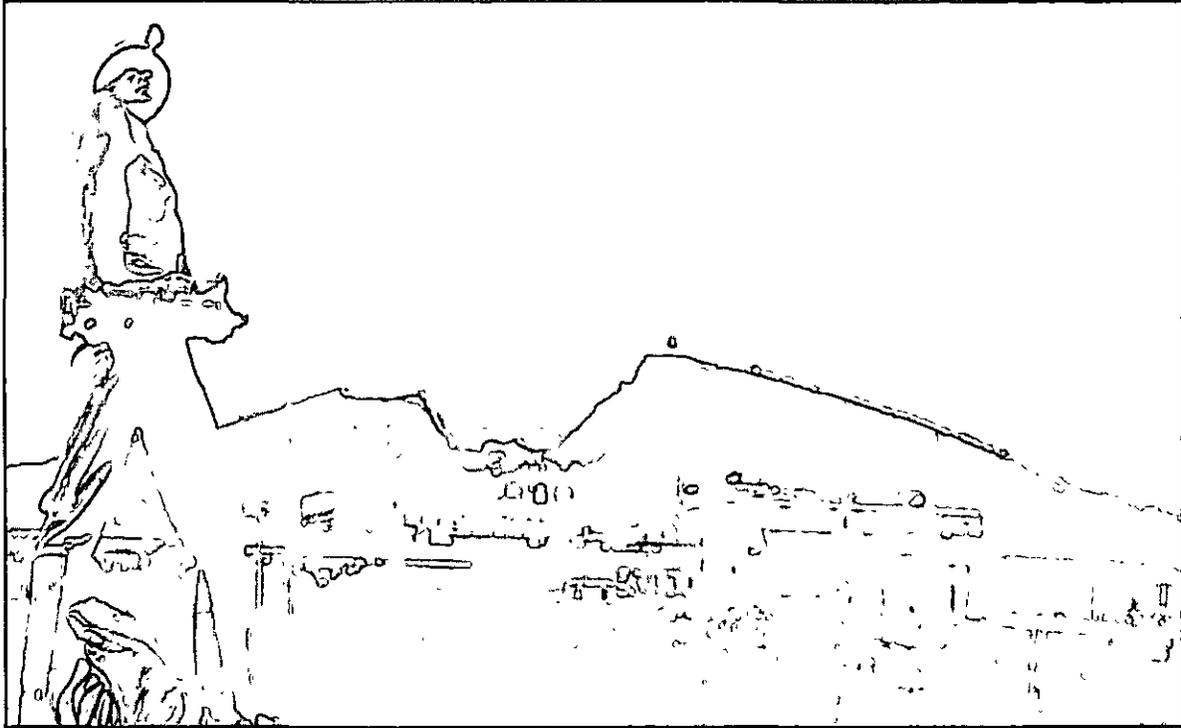


**Figura 8 MINADO POR "GLORY HOLE"**  
(Cummins, B.A., 1973)

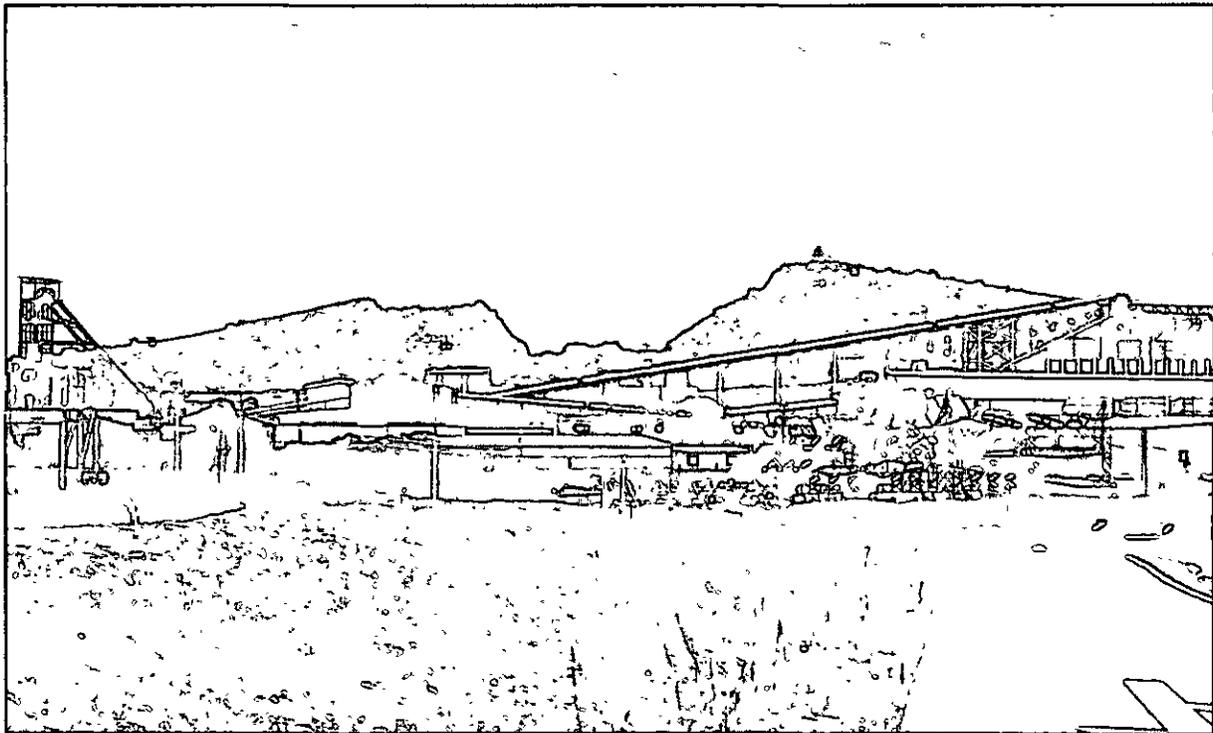
En este tipo de depósitos la excavación se puede hacer profunda, angosta y larga, por lo que es posible que los taludes formen bancos, lo que supone que el yacimiento pueda ser masivo, o si se presenta fracturado, que posea alta resistencia cohesiva. Los grandes tajos que alcanzan los límites inferiores costeables por este método y que se encuentran en la etapa de cambiar a un sistema subterráneo para continuar la explotación del yacimiento, cuentan con la opción del "glory hole" como un método experimental.

Problemas asociados con este tipo de minado son: el agua que en un momento dado puede ocasionar que el mineral se empaquete en los cruceros de extracción y que las paredes interiores del embudo se enloden.

Los problemas ambientales y ecológicos derivados de las maniobras de minado, estarán en función del tamaño de la operación, de las vibraciones y ruido producido por el empleo de explosivos, de las áreas afectadas por la depositación de materiales de desecho en terreros y presas de jales y de los requerimientos asociados a la restauración de la superficie original.



**Panorámica del cerro de Proaño (Fresnillo, Zacatecas),  
minado por *glory hole***



**Panorámica del *glory hole* de cerro de Proaño y planta de beneficio de la unidad Fresnillo**

#### 4.1.2. METODOS DE MINADO SUBTERRANEO

Las características físicas y estructurales de los depósitos minerales, se clasifican dentro de las siguientes categorías:

1. Posición, tamaño y forma.
2. Presencia o ausencia de planos de debilitamiento.
3. Zonas de alteración.
4. Zonas mineralizadas (débiles y resistentes).
5. Estratos competentes e incompetentes.
6. Estructura resistente de la roca.

La mayoría de estas características deben ser interpretadas en forma cualitativa, debido a que la estructura de las rocas es tan compleja, que solamente en casos muy específicos se podrán realizar análisis cuantitativos. Así, las características estructurales de los depósitos minerales, podrán ser estudiadas en relación con los tres tipos de depósitos más comunes: *estratiforme, tabulares y masivos*.

##### **Mantos y depósitos sedimentarios**

Depósitos de este tipo que no han sido alterados por fallas, pliegues u otras acciones dinámicas son relativamente fáciles de minar; por ejemplo, los estratos planos de un yacimiento de carbón. Los problemas de soporte, frecuentemente son inexistentes o mínimos, en cuyo caso se pueden resolver con un método sistemático de pilares para soportar tanto el techo del manto, como sus respaldos; sin embargo, rocas de pobre resistencia estructural (como las lutitas), pueden crear condiciones peligrosas de inestabilidad.

Ejemplos representativos de este tipo de depósitos lo constituyen los yacimientos carboníferos de la cuenca de Sabinas, la cuenca de Piedras Negras y otras en el estado de Coahuila. Uno de los problemas más serios en éste tipo de minas es el de determinar el número y distribución de los pilares que deberán dejarse como soporte para el techo.

##### **Vetas en fracturas y zonas de falla**

Una gran proporción de los depósitos minerales comerciales se encuentran asociados o dentro de zonas estructuralmente conflictivas (fracturas, discontinuidades, etc). Las rocas más favorables para la mineralización son siempre aquellas que fueron originalmente de relativa consistencia, quebradizas y competentes. Estas rocas favorables se fracturan sin sufrir daños notables, y son lo suficientemente fuertes como para mantener abiertas las fisuras y permitir la depositación de las soluciones mineralizantes. Yacimientos formados en estas estructuras, varían desde vetas hasta *chimeneas* y *clavos*, pudiendo adoptar formas regulares o irregulares, anchas o angostas y continuas o discontinuas; por lo tanto, es posible aplicar los diversos métodos de minado conocidos para la explotación de estos depósitos.

La formación estructural de las vetas se emplea como base para definir los diferentes tipos que de ellas existen, lo que resulta de mucha utilidad para examinar sus características.

### **Veta de fisura**

Se define como una masa de mineral que generalmente tiene forma tabular con irregularidades locales. Se forman rellenando fisuras o grupos de fracturas paralelas y muy cercanas entre sí, producidas en la roca encajonante.

### **Chimeneas**

Se forman cuando el control estructural guía a las soluciones mineralizantes a lo largo de canales de marcada continuidad vertical, pero de dimensiones horizontales relativamente pequeñas. Intersecciones por fallas son típicas de este tipo de depósitos.

### **Vetillas ramaleadas**

Se pueden extender a partir de la veta principal, ya sea hacia el alto o hacia el bajo. El minado de estas vetillas en la secuencia equivocada puede dar como resultado una alta concentración de esfuerzos en los pilares cercanos a las intersecciones de los ramaleos.

### **Sistemas conjugados de juntas**

Frecuentemente se presentan mineralizados, formando sistemas o paquetes de vetas. Arreglos de juntas como éstas, se suponía que eran el resultado de esfuerzos compresivos aliviados de tensiones por la formación de la junta, antes que por la formación de la fisura.

Es interesante hacer notar que todos los tipos de vetas aquí descritos, fueron formados a lo largo de los planos de debilitamiento existentes en el macizo rocoso. Donde una fisura ha sido completamente rellenada por la mineralización subsecuente, la veta resultante comúnmente tiene la tendencia a ser menos resistente a una fuerza de ruptura que el resto de la roca que la rodea; consecuentemente, movimientos de postmineralización pueden encontrar zonas de alivio de tensiones a través del material fracturado o quebrado de la veta. En el eventual caso de que un sistema de vetas sea formado por minerales duros y coherentes, será razonable esperar que la roca encajonante alivie o absorba algunos de los esfuerzos producidos por los procesos de postmineralización.

### **Depósitos masivos**

Los depósitos diseminados de cobre del Noroeste de México son típicos de esta clase de yacimientos, los cuales frecuentemente son minados por operaciones a cielo abierto, aunque también existen otros tipos de depósitos susceptibles de ser minados por el mismo método. Aquellos cuerpos que poseen un encape lo suficientemente potente como para hacer prohibitiva su explotación por métodos de minado a cielo abierto, usualmente son minados por el sistema de hundimiento de bloques. Los pórfidos cupríferos, por regla general, son masivos, planos y relativamente regulares. Contienen minerales de baja ley, pero a cambio de ello, sus reservas minerales normalmente se cuantifican en millones de toneladas. La concentración de minerales valiosos en los yacimientos, se debe a procesos de enriquecimiento secundario, lo cual en su momento generalmente significa encapes lixiviados y débiles.

- ***Rebajes naturalmente soportados.***

Los rebajes naturalmente soportados, también conocidos como *aberturas autosoportadas*, son excavaciones subterráneas en las cuales las cargas dinámicas ejercidas por el macizo rocoso circundante sobre la abertura, son soportadas por las paredes de la obra o por pilares labrados sobre la misma roca. Estos rebajes pueden ser excavados en cualquier roca de características estructurales adecuadas, con excepción de los depósitos de placer.

No obstante, las dimensiones de la abertura que podrá ser excavada, dependerán del tipo de material rocoso del que estén constituidos las paredes y los pilares que se dejarán como ayuda de soporte. Por ejemplo, el "claro" (abertura mínima de pared a pared, de pared a pilar o de pilar a pilar) que podrá permanecer sin soporte, varía virtualmente desde casi cero (para materiales muy fracturados o materiales rocosos en estratos laminares muy delgados; en los cuales prácticamente no existen fuerzas cohesivas a través de las juntas), hasta más de 35 metros (100 pies) en cuerpos de roca masiva y competente. De esta manera y en términos generales, las dimensiones de un rebaje autosoportado dependerán del espaciamiento y de la resistencia a través de los defectos mecánicos en el material rocoso y de la profundidad y orientación de la abertura.

También, cuando no se deba permitir el hundimiento de la superficie original, o cuando los estratos suprayacentes tengan que ser protegidos contra efectos de fracturamiento o hundimiento, tendrán que emplearse los rebajes soportados para mantener la estabilidad de las excavaciones. Los métodos que emplean pilares de soporte, generalmente son los mas efectivos para prevenir o minimizar los efectos de derrumbe en el entorno del hueco creado, en tanto que los métodos que emplean el relleno como material de soporte podrían prevenir algunas acciones de fracturamiento, pero muy probablemente se alcancen a producir algunos derrumbes en las paredes de la obra.

Los métodos de minado que emplean aberturas autosoportadas, se clasifican genéricamente en dos clases: ***rebajes abiertos y salones y pilares***".

### **Rebajes abiertos.**

Dentro de las clasificaciones de métodos subterráneos de minado se encuentra el de *Rebajes Abiertos*. Este sistema de minado se puede definir como: *espacio abierto en el subsuelo capaz de soportar las cargas dinámicas ejercidas por el macizo rocoso que circunda a la abertura, sin necesidad de elementos de soporte artificial*. Por consiguiente, se deberá considerar la competencia del mineral y de la roca encajonante como factores de gran importancia.

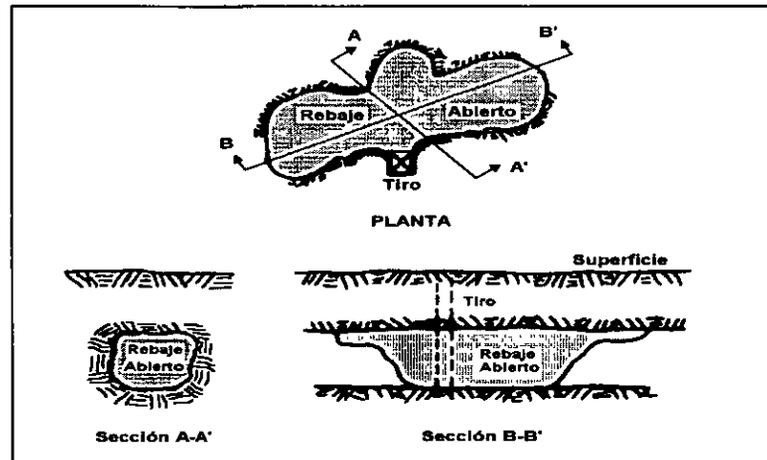
Definido estrictamente, un *rebaje abierto* es una obra o abertura subterránea de donde ha sido extraído el mineral valioso que alojaba y en donde no se requiere hacer uso ni de madera, ni de ningún otro tipo de material de soporte para mantenerla abierta. Por costumbre, también se suele clasificar como rebajes abierto a aquellas obras en las que las paredes y/o el techo pueden ser soportados por pilares naturales de mineral o de estéril *in-situ*, por trancas de madera, por pernos-ancla o por otros medios semejantes. En este manual, se suscribe la definición más reciente, que desde el punto de vista estructural clasifica los rebajes abiertos en dos tipos: *aberturas aisladas* o rebajes individuales, y *aberturas con pilares* o rebajes múltiples.

#### **(a) Aberturas aisladas**

Una abertura aislada (o individual) es un rebaje sin pilares y, en otras circunstancias, es una obra subterránea sin soporte, que esencialmente se localiza fuera de la zona de influencia de otros trabajos subterráneos vecinos. Por medio de este método se pueden minar *bolsas, lentes y clavos* de mineral que por su origen, se formaron aisladamente con relación al resto del cuerpo mineral principal. Se puede incluir dentro de este tipo de rebajes, el cuele de obras específicas tales como tiros, frentes de desarrollo y excavaciones para proyectos de ingeniería civil (túneles, cámaras subterráneas para subestaciones hidroeléctricas, etcétera).

En general, el cuele de rebajes individuales puede realizarse en cualquier tipo de roca, cuyas características estructurales y mecánicas lo permitan. El "claro" máximo que puede ser minado en un rebaje abierto individual, dependerá de la profundidad del depósito y de los parámetros físicos y

geológicos de la roca que rodea al cuerpo mineralizado. Por ejemplo, se ha podido minar cuerpos alojados en brechas de pedernal a profundidades de 300 pies (100 m) con claros de 100 pies (30 m). Otros, con claros de 50 a 75 pies (15-25 m) en jaspilita fracturada, a profundidades de 1,000 pies (350 m). Con claros de 50 a 60 pies (15-20 m), también se ha podido trabajar en calizas dolomíticas sin fracturas a profundidades de 300 pies (100 m). La figura 10 ilustra de manera esquemática una abertura aislada o rebaje individual.



**Figura 10 ABERTURA AISLADA**  
(Rebaje individual sin pilares)

### b) Aberturas con pilares

Por lo general, depósitos minerales de áreas muy extensas, como es el caso de vetas, bolsas o lentes mineralizados, no pueden ser minados como rebajes abiertos individuales sin soporte. Para mantener la estabilidad de las obras, es necesario el uso de alguna clase de soporte dentro del depósito, y si este soporte consiste en dejar áreas sin excavar en la propia abertura, el sistema de minado se debe designar como *rebaje abierto con pilares*.

Desde el punto de vista estructural estos rebajes corresponden al sistema de aberturas múltiples, esto es, aberturas tan cercanas entre sí, que la distribución de esfuerzos alrededor de una obra determinada, se ve afectada por la repartición de éstos en la vecindad de las obras adyacentes y viceversa. El minado de rebajes abiertos se puede realizar de dos formas: dejando pilares casuales y dejando pilares regularmente distribuidos, siguiendo un patrón o configuración predeterminada, como las mostradas en la figura 13.

*Rebajes abiertos con pilares casuales*

Este tipo de rebajes con pilares irregularmente espaciados y/o con dimensiones aleatorias, se ilustra en la figura 11. Esta variante resulta adecuada para el minado de depósitos que van desde muy horizontales (mantos) hasta muy verticalizados (vetas, chimeneas, etcétera), con material mineralizado y respaldos ó paredes muy firmes y consistentes. La aplicación del método es viable en los siguientes tipos de depósitos:

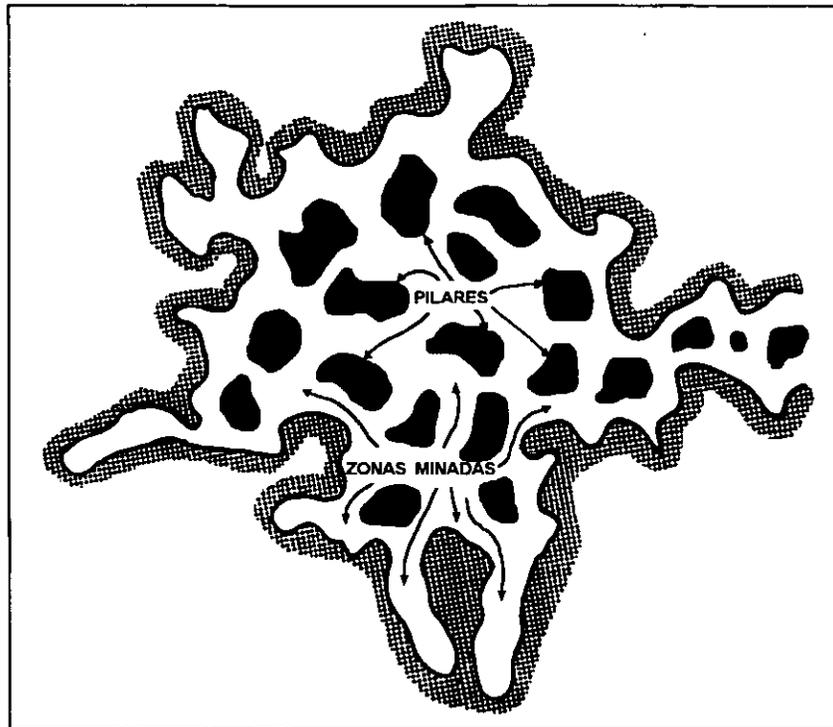
1. Grandes bolsas o lentes mineralizados, especialmente si la ley del mineral y/o la potencia del depósito es variable. Cuando sea posible, los pilares deberán dejarse en mineral pobre o estéril. Si la ley del mineral es muy alta y la estabilidad de la obra obliga a dejar pilares en este material, algunas veces éstos pueden ser recuperados en la etapa final de la vida productiva de la mina empleando otro sistema de minado especialmente diseñado para ello.
2. En mantos y vetas (angostas o relativamente anchas) que profundicen con cualquier ángulo de buzamiento menor de  $45^\circ$ , es decir, a un ángulo tal que el mineral fracturado no ruede por efecto de la fuerza de gravedad. Esta variante del método también es aplicable cuando la ley del mineral o la potencia del cuerpo sean variables.

En las obras con pilares casuales, las dimensiones del claro dependerán de la calidad de la roca del techo. Si es masiva, la abertura podrá soportar claros hasta de 30 m (100 pies), como es el caso de brechas pedernalosas, domos salinos y estratos potentes de caliza. En rocas con juntas y fracturas parcialmente recementadas, no resultan insólitos o extraordinarios claros de 15 a 30 m (50-100 pies). En estratos donde el techo ha formado una separación, el claro dependerá de la potencia de los estratos localizados inmediatamente arriba del dañado. En estratos con espesores de 0.60 m (2 pies) o más, se han podido minar aberturas con claros de 12 a 24 m.

En bolsas o lentes de pequeñas dimensiones, el área de extracción obtenida dependerá de la profundidad del depósito y de las propiedades mecánicas tanto del mineral y/o de la roca que forman los pilares, como del material rocoso que se encuentra formando el techo, el piso y las paredes del depósito. Por regla general, a profundidades menores de 650 m (2000 pies), se obtienen porcentajes de extracción en el área abierta del orden del 60 al 80%.

Ocasionalmente y cuando sea posible, se pueden dejar pilares en mineral de baja ley ó en roca estéril (para evitar la remoción y manejo de este material no económico, más que como elemento de soporte). Áreas pequeñas de terreno “malo” o “pesado”, se pueden soportar artificialmente por medio de pernos de anclaje, “trancas”, postes o por cualquier otro medio semejante, pero en general éste método de minado es el más apropiado para explotar terrenos firmes, donde es seguro confiar en el juicio personal para la determinación de la cantidad de soporte requerido, en lugar de realizar estudios complicados y costosos de mecánica de rocas para concluir en lo mismo.

Frecuentemente cuerpos pequeños con respaldos firmes pueden ser explotados por rebajes abiertos, sin necesidad de ningún tipo de soporte artificial adicional.

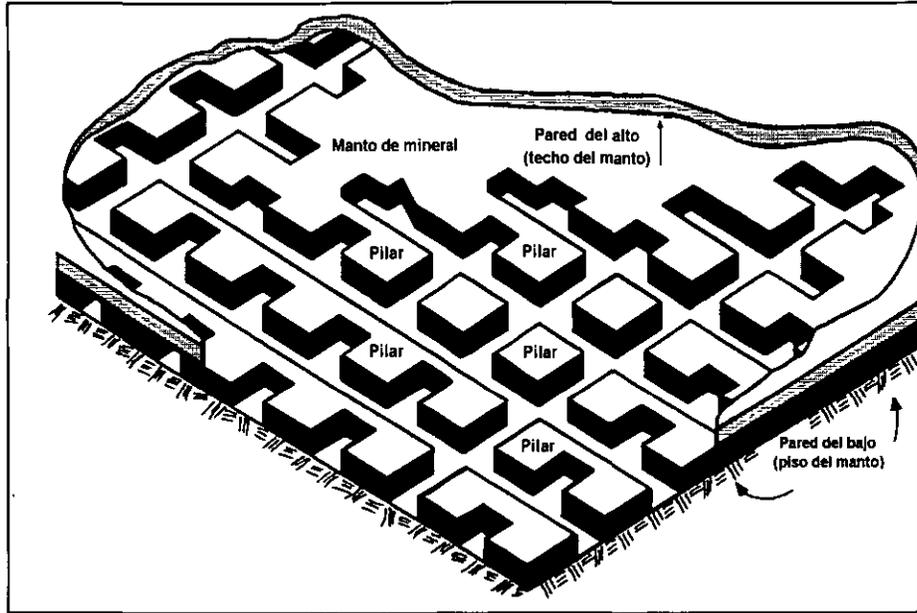


**Figura 11 REBAJE ABIERTO CON PILARES CASUALES**

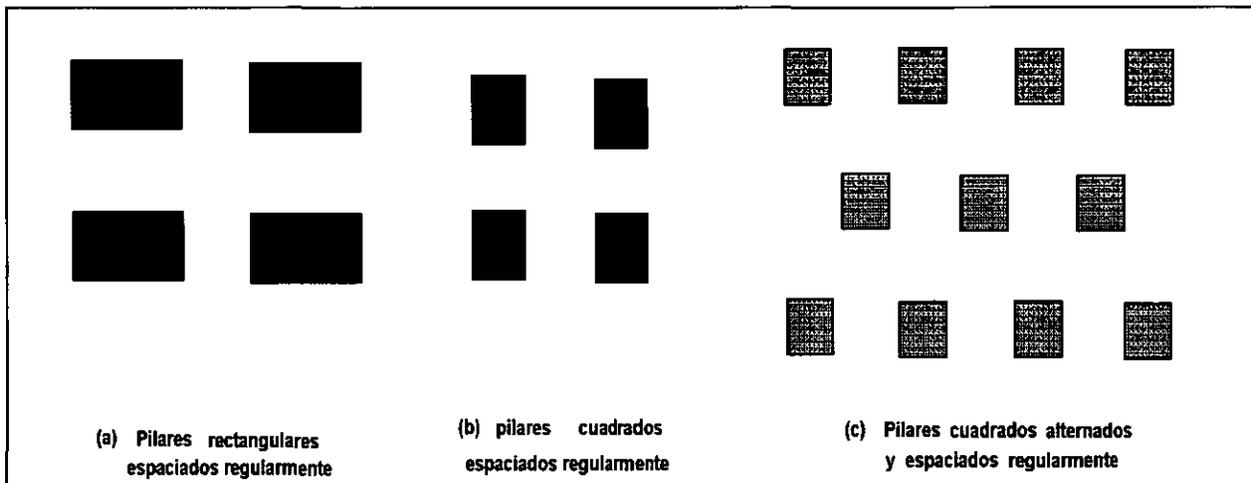
*Rebajes abiertos con pilares regularmente distribuidos*

Generalmente el uso del sistema de pilares regularmente distribuidos resulta ser el más recomendable para la explotación de mantos y vetas de gran extensión, en las cuales tanto la ley como la potencia del cuerpo son relativamente uniformes. Es un sistema en el que tanto el contorno de la sección transversal y tamaño de los pilares como el espaciamiento entre ellos, son uniformes. Un típico rebaje abierto con pilares regularmente distribuidos, se muestra en la figura 12.

El sistema de pilares regularmente distribuidos también tiene uso muy difundido en depósitos masivos potentes, en los cuales se emplean sistemas de minado de niveles múltiples. En éstos, los pilares de un nivel se superponen con sus correspondientes en los siguientes niveles inferiores. pilares, los rebajes se rellenan posteriormente con jales, dando lugar a un sistema combinado.



**Figura 12 REBAJE ABIERTO CON PILARES  
REGULARMENTE DISTRIBUIDOS**  
(Cummins, B.A., 1973)



**Figura 13 CONFIGURACION DE PILARES**

Para la correcta aplicación del método de rebajes abiertos, es importante realizar un buen estudio de mecánica de rocas, debido a que el hueco creado será un espacio aislado soportado únicamente por la propia roca. El estudio también deberá considerar el efecto meteórico que se produce en la roca, al momento de realizar las aberturas de las obras de minado.

**Aplicación:** Como ya se mencionó, este método se puede aplicar a cuerpos aislados como “*bol-sas*”, “*lentes*” y “*clavos*” que por su origen no forman parte del cuerpo principal del yacimiento. Tanto el cuerpo mineral como la roca encajonante deberán ser competentes y sensiblemente verticales. Cuando el depósito se encuentra inclinado se podrán aplicar dos diferentes variantes: *Rebajes Abiertos de Piso* y *Rebajes Abiertos de Cabeza* los cuales se tratarán más adelante.

**Preparación:** Se puede decir que no se requiere gran cantidad de obras de preparación, ya que sólo se necesitan obras de ventilación, caminos de acceso y nivel de acarreo.

**Explotación:** Las operaciones de explotación son llevadas a cabo sobre el cuerpo a minar, por lo que se puede considerar como un método altamente selectivo ya que las labores de minado son realizadas directamente sobre el mineral de interés, consiguiendo con esto bajas diluciones en el mineral. La dilución puede fluctuar desde 0 hasta 30%, y se pueden clasificar de la siguiente manera: 0 a 15% se considera como baja dilución, de 5 a 15% como dilución media y del 15% en adelante se puede hablar de una dilución alta.

El mineral se transporta directamente de la frente de trabajo por medio de equipos de acarreo, ya que la disponibilidad del mineral es inmediata. No requiere de gran cantidad de mano de obra pues el sistema de minado admite cierto grado de mecanización. Se deberá proyectar adecuadamente los espacios disponibles para obtener una buena movilidad del equipo. Por lo anterior, el método de rebajes abiertos se puede considerar como un sistema flexible. El área abierta dependerá de la estabilidad del mineral, el tamaño del cuerpo mineral y el alcance del equipo. El objetivo de todo método de minado es el extraer el mineral completamente sin poner en peligro la integridad física del personal y del equipo.

Es un sistema de explotación que por las características del depósito es considerado dentro de los *rebajes naturalmente soportados*. Debido a que no requiere de soportes artificiales, el sistema representa una ventaja importante de ahorro en la inversión. La productividad es alta y por ser un método selectivo no es necesario sacrificar mineral, es decir, si la resistencia de la roca encajonante lo permite se puede manejar claros tan grandes que incluso en ocasiones es posible extraer el mineral en su totalidad. La producción estará en función directa al tamaño del cuerpo, y la productividad en función de la capacidad y eficiencia del equipo, de la capacitación y habilidad de los operadores, y de los volúmenes de mineral en los rebajes.

#### *Rebajes abiertos de piso*

Esta variante de rebajes abiertos se aplica a cuerpos tabulares (vetas) cuyo ángulo de inclinación sea mayor de 20° y que por su limitada extensión horizontal ó potencia no pueda ser trabajado como un rebaje abierto simple.

Para la aplicación de éste sistema se utilizan barrenos de piso verticales y paralelos al buzamiento del cuerpo mineral. Para la explotación se requieren de muchas obras de preparación, como por ejemplo: subniveles, nivel inferior de acarreo, cruceros de extracción, contrapozos de ventilación y metaleras. Debido a la cantidad de obras se puede obtener buena ventilación dentro del rebaje pero con un costo de inversión alto, la disponibilidad del mineral es casi inmediata, posterior al colado de las obras de preparación. Debido a que se van dejando pisos de trabajo sobre el mineral "in-situ", los rebajes se consideran firmes, por lo que el depósito se puede explotar casi en su totalidad dejando un poco de mineral en los pilares de costilla. En este método la mecanización es casi nula por las condiciones de trabajo en pisos desnivelados, con lo que aumenta la mano de obra y baja la productividad y la producción, en comparación con el método simple de rebajes abiertos.

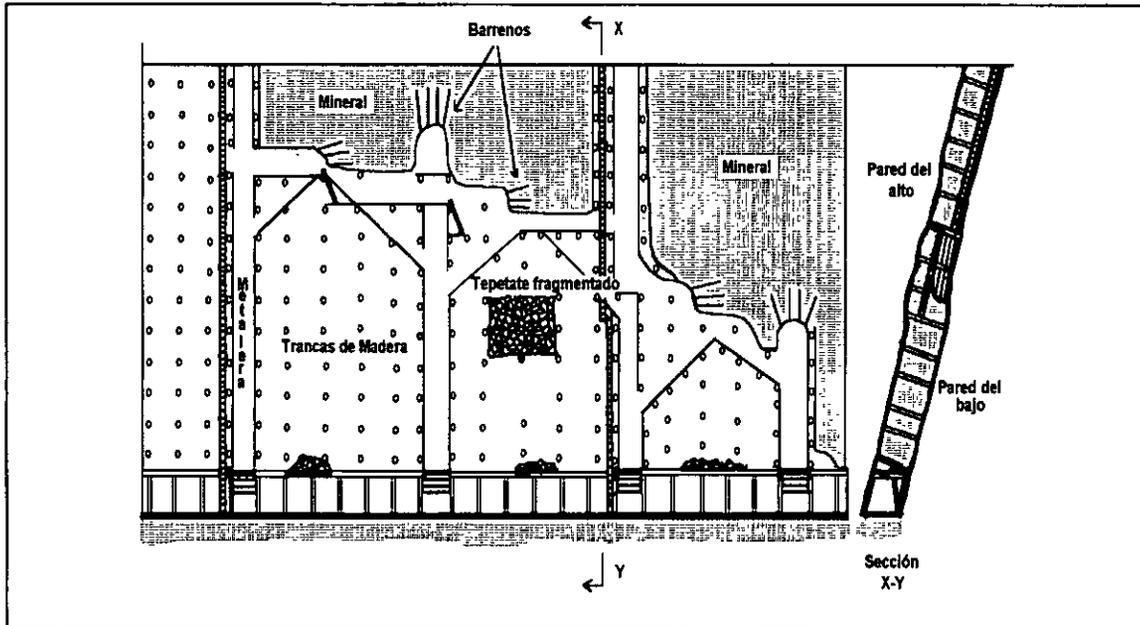
#### *Rebajes abiertos de cabeza*

Este sistema constituye otra de las variantes de los rebajes abiertos simples. Su aplicación corresponde a cuerpos vetiformes con ángulos de buzamiento superiores a los 20°.

La aplicación de éste método es similar al anterior pero con la diferencia de que la barrenación es ascendente y paralela al buzamiento del cuerpo mineral. Se pueden ir colando subniveles para dar piso de trabajo, utilizando la fuerza de gravedad para el flujo del mineral durante las maniobras de rezagado. Una de las ventajas del método, es la flexibilidad que existe para poder cambiar de método de minado ya sea a *corte y relleno, tumba sobre carga, tumba por subniveles*, o alguna otra variante similar de minado. La ventilación por lo general es forzada y poco eficiente. También es frecuente el uso de madera para tapanco por lo que el piso de trabajo no resulta 100% firme y seguro.

#### *Rebajes abiertos con "trancas" horizontales*

El sistema de rebajes abiertos con "trancas" horizontales es un método en el cual se emplean elementos de fortificación a base de madera (trancas o rollizos), colocados perpendicularmente y en forma sistemática o aleatoria entre las paredes del alto y del bajo de la veta. La veta podrá presentarse con ángulos de buzamiento diversos: desde muy horizontales, hasta casi verticales; con potencias no mayores de 4 m (12 pies), figura 14.



**Figura 14 REBAJES ABIERTOS CON "TRANCAS" HORIZONTALES**  
(Hustrulid, A.W., 1982)

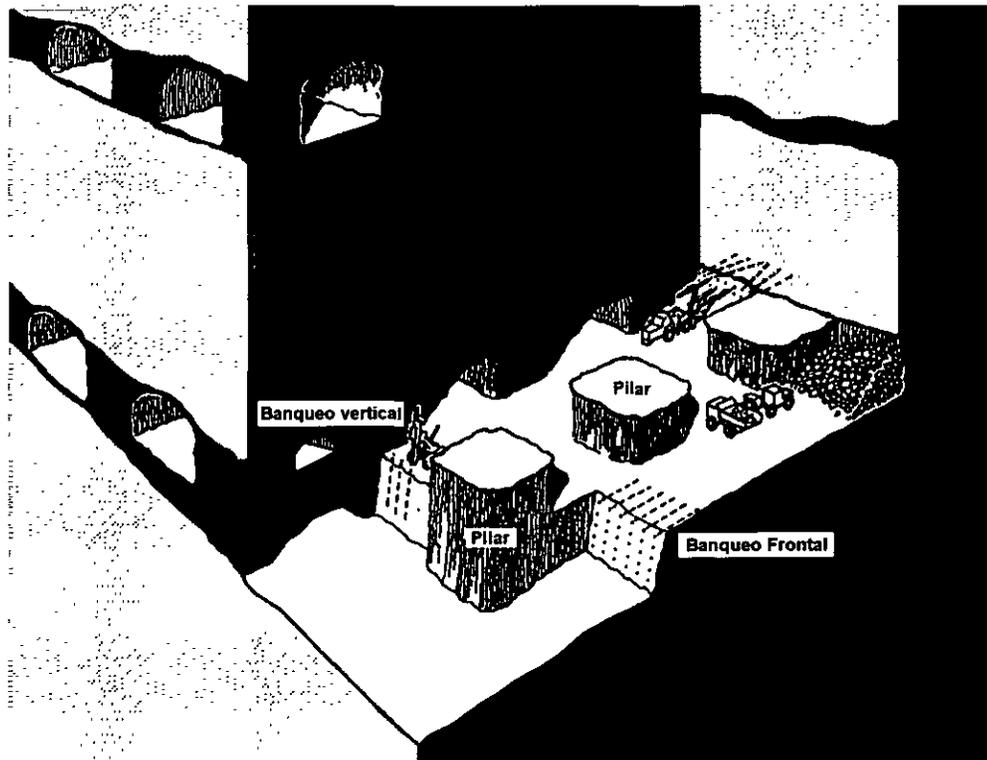
Las trancas o rollizos son piezas de madera de sección circular, en diámetros que varían de 4 a 8 pulgadas, con longitudes de 1.20 a 3.60 m (4-12 pies). Por regla general estas trancas proporcionan al rebaje el único soporte artificial, por lo que se requiere que el alto y, algunas veces también el bajo, sean moderadamente competentes; como por ejemplo, mantos delgados o cierto tipo de rocas con plegamientos parciales, juntas y fracturas. Para proporcionar "piso de trabajo", se colocarán tabloncillos apoyados en las trancas, que se retirarán antes de la pegada con objeto de no dañarlos con la caída del mineral.

Los rebajes con trancas horizontales han sido usados en depósitos de cobre a profundidades de 1170 m (3500 pies) en mantos de 3 a 4 m de espesor, con inclinación de  $30^\circ$  aproximadamente y donde la mineralización se presenta en un conglomerado felsítico. Para cuerpos minerales que excedan de 4 m (12 pies), se requerirá de otro sistema de soporte más complejo.

### c) Salones y pilares

El diseño para un arreglo de salones y pilares es esencialmente el mismo que para un sistema de rebajes abiertos con pilares regulares, con la excepción de que el primero se encuentra limitado a de

ósitos relativamente planos y horizontales (mantos generalmente), en los cuales el mineral tiene leyes y espesores prácticamente uniformes, tal y como es el caso de los mantos de carbón o de minerales evaporíticos (mantos de sal, de potasa, de trona y de bórax). Ocasionalmente, algunas otras operaciones subterráneas en depósitos minerales metálicos diferentes a los mantos, también emplean el sistema de salones y pilares. Este método minero resulta adecuado para la explotación de grandes cuerpos sedimentarios estratiformes, donde la consistencia del mineral sea resistente y el techo principal lo suficientemente competente como para soportar claros tan grandes como lo permita el material rocoso, figura 15



**Figura 15 SALONES Y PILARES EN UN MANTO HORIZONTAL**  
(Hustrulid, A.W., 1982)

Un techo secundario débil localizado por encima del principal y de unos cuantos centímetros de espesor, generalmente se puede soportar artificialmente por medio de pernos de anclaje, postes u otros medios. Es deseable tener un piso que vaya de moderadamente firme a firme, ya que en las minas de carbón profundas, un yacimiento quebradizo con techos duros, puede conducir al *estallamiento* de los pilares de soporte (fracturamiento repentino). La máxima profundidad práctica para rebajes de salones y pilares, depende de la resistencia de los pilares. En minas de carbón esta profundidad fluctúa entre 300 y 600 m., a menos que se esté empleando alguna variante del método, tal y como resulta la técnica de los pilares “cedentes”.

La sección geométrica de los pilares se aproxima al círculo o a la elipse, ensanchándose en la parte superior e inferior para incrementar el área de contacto con el techo y con el piso.

El método se desarrolla mediante el minado de una retícula de frentes y cruceros en la etapa preparatoria, para después continuar el tumbe con el ensanchamiento de los paneles formados por la retícula. El tumbado de ampliación continuará hasta dejar una zona sin minar, que pasará a constituir los pilares con las dimensiones, forma y posición calculadas con anterioridad. Existen muchos y diferentes diseños de retículas usados hoy en día, incluyendo sistemas con pilares de costilla y pilares de sección cuadrada con espaciamientos y configuraciones semejantes a un tablero de ajedrez o damas chinas.

Los salones usualmente se diseñan tan grandes como las reglas de seguridad lo permiten; su área estará limitada por las características y propiedades mecánicas de las rocas que conforman el techo de la obra. Las dimensiones de la sección transversal de los pilares, en conjunción con el ancho de los salones, determinarán los índices de extracción de mineral y, a su vez, las dimensiones de los pilares de soporte dependerán de la profundidad del depósito, de la resistencia de la roca y de algunas otras propiedades inherentes al material que formará dichos pilares.

En la minería del carbón, el claro de los salones fluctúa entre 5 y 17 m (15-50 pies), considerando 10 m (30 pies) como promedio. El índice de extracción varía de 50 a 70% (60% en promedio). En el minado de materiales evaporíticos el rango de los salones resulta comparable con los de la minería del carbón, pero los índices de extracción son sensiblemente más altos (entre el 60 y el 90%).

En el método de salones y pilares el yacimiento es minado casi en su totalidad, dejando sólo algunos pilares de mineral como soporte (pilares de costilla, de piso y de cabeza). Las dimensiones de las áreas minadas, así como la robustez de los pilares, dependen de factores de estabilidad referentes a la competencia del material, tanto del mineral como de la roca encajonante así como también de la potencia del propio yacimiento, lo que conduce al objetivo final de intentar extraer el mineral en su totalidad. Usualmente los pilares se labran con formas regulares siguiendo patrones preestablecido, por lo que éstos pueden ser circulares, cuadrados, rectangulares o formando paredes longitudinales (muros o bordos).

**Aplicaciones:** El método se aplica a cuerpos horizontales ó de pendientes suaves que no excedan los 30°. La roca encajonante y el cuerpo mineral deberán ser de competencia relativamente alta. Con respecto a la estabilidad del mineral y de la roca encajonante, el método se puede considerar relativamente flexible debido a que se podrá incrementar ó disminuir el número de pilares y variar su robustez, compensando de esa manera la baja resistencia o competencia del material roco

so. En algunos yacimientos las condiciones de resistencia cambian dentro del mismo cuerpo debido a factores diversos, por lo que en algunas zonas muy definidas, el mineral tiene que ser “sacrificado” quedando in-situ como elemento de soporte a pesar de que los claros calculados en otras zonas del mismo cuerpo sean mayores.

En algunos casos y debido a las características del cuerpo, al alcance y capacidad del equipo de minado y por factores de seguridad que se aplican para incrementar la estabilidad del rebaje, se utiliza un pilar de cabeza, por lo que este concepto es ampliamente utilizado en el método de salones y pilares.

El método sólo es aplicable a depósitos sensiblemente horizontales limitados por el espesor del propio cuerpo. Para tener éxito se recomienda realizar previamente un estudio de mecánica de rocas. Los depósitos donde más se emplea el sistema de salones y pilares, son los de tipo sedimentario, incluyendo los de cobre, de carbón y muchos otros minerales industriales similares, tales como caliza, sal y potasa.

Dentro del método de salones y pilares, se consideran tres diferentes sistemas de minado que pueden ser adoptados: el primero y más empleado se aplica a depósitos horizontales, figura 14, aunque se ha llegado a aplicar en depósitos de gran espesor con pisos moderadamente inclinados que permiten la movilidad del equipo rodante de minado.

El segundo sistema es aplicado a cuerpos minerales con inclinaciones que puedan variar entre 20° y 30°, figura 16, donde la barrenación puede ser ascendente y paralela al buzamiento del cuerpo (es importante la nivelación del piso pues influye en la movilidad del equipo y por consiguiente en la cuota de producción).

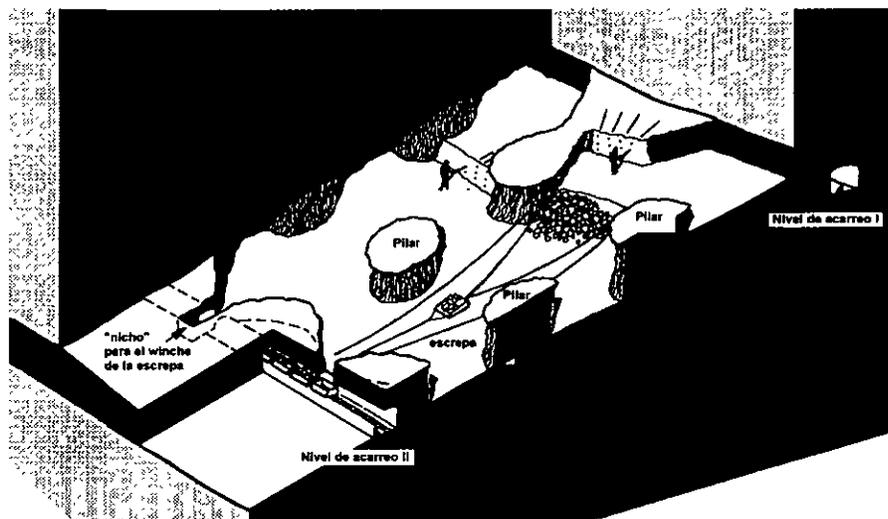


Figura 16 SALONES Y PILARES EN UN MANTO INCLINADO  
(Hustrulid, A.W., 1982)

El tercer sistema se aplica con barrenación horizontal siguiendo la inclinación del cuerpo. La secuencia de barrenación y explotación deberá ser tal que se dejen pisos firmes de trabajo.

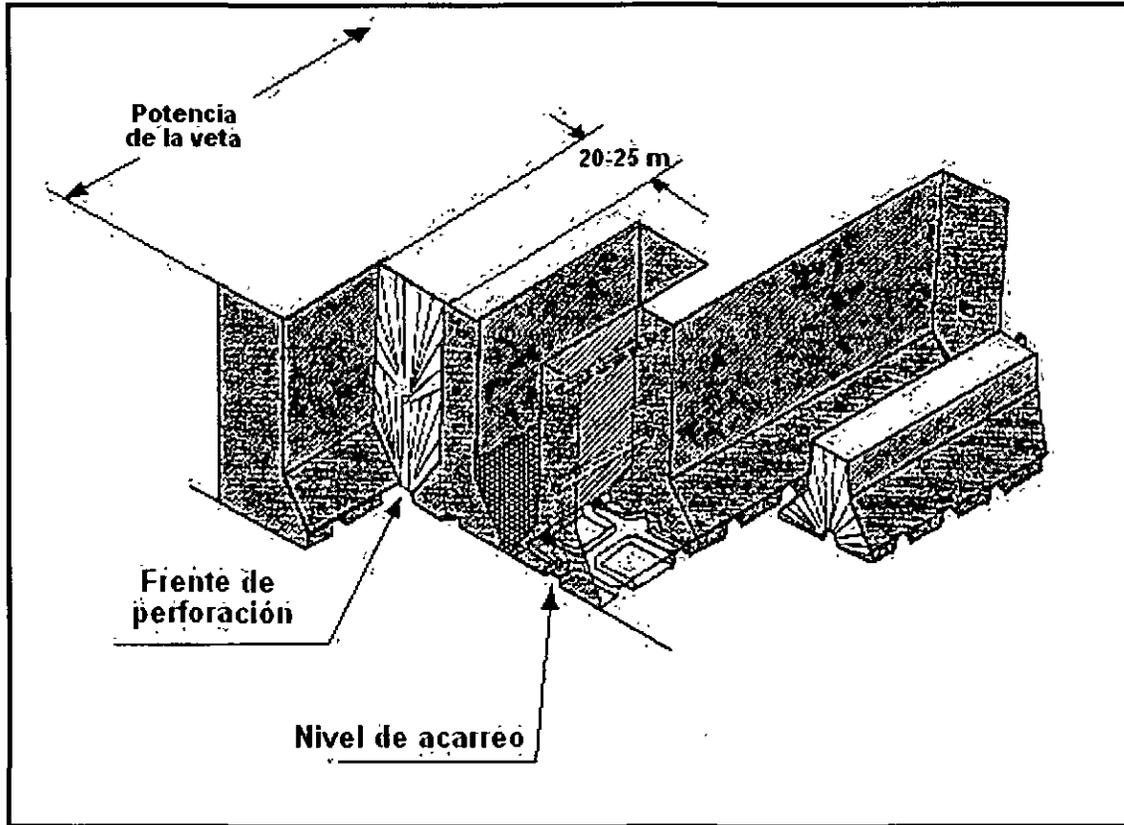
#### **d) Tumba por subniveles**

El método de tumba por subniveles se aplica a la explotación de vetas (anchas y angostas) con buzamiento muy pronunciado (ángulos del orden de  $50^\circ$ ), mantos de gran potencia y chimeneas que puedan ser minados por rebajes transversales en retirada, a partir de uno de los respaldos. En ocasiones, también se ha empleado con éxito en depósitos relativamente planos y potentes.

El espesor del depósito puede ser variable, pero la ley del mineral debe ser bastante uniforme, dado que la mecánica de explotación no permite la selectividad del mineral. El material rocoso del *alto* y del *bajo* debe ser relativamente competentes. Si bien algunos desprendimientos de los respaldos no serán de peligro para los trabajadores, las paredes de las obras deberán ser lo suficientemente firmes como para que la dilución, no sea un problema. El mineral también deberá de ser firme, aunque puede ser un poco más débil de lo que se requiere para los métodos de rebajes abiertos, debido a que los trabajos mineros colados en terreno sólido, sólo serán cortados por subniveles angostos.

El método de tumba por subniveles es un método de minado subterráneo que se clasifica dentro de los rebajes naturalmente soportados. Como se indicó, se aplica a depósitos de tipo tubular (chimeneas), depósitos estratiformes (mantos de gran potencia) y depósitos tabulares (vetas anchas y angostas). El ángulo de buzamiento del cuerpo mineral deberá ser mayor a  $45^\circ$  y/o superior al ángulo de reposo del mineral fragmentado.

En el método de tumba por subniveles se emplean dos tipos de configuraciones básicas para la explotación de los rebajes: *transversal* (figura 17) y *longitudinal* (figuras 18 y 19). En ambas, el mineral se tumba a partir de los subniveles (colados previamente como obras de preparación), realizando cortes de piso en forma de banco por medio de barrenos largos colados de arriba hacia abajo y de subnivel a subnivel, por medio de abanicos de barrenación o anillos de barrenación colados de abajo hacia arriba y de subnivel a subnivel. En cualquiera de las tres opciones, el mineral deberá caer o rodar por gravedad hasta las tolvas de captación (drawpoint), y de ahí a los cruceros de extracción colados estratégicamente a la altura del nivel inferior de acarreo y perpendiculares a éste.



**Figura 17 TUMBE POR SUBNIVELES USANDO ABANICOS DE BARRENACIÓN, EN VETAS ANCHAS CON REBAJES TRANSVERSALES**

La característica geológico-estructural más importante es que tanto el mineral, como los respaldos al "alto" y al "bajo" de la veta, deberán ser competentes. El espesor del cuerpo puede ser variable, pero la ley mineral debe ser uniforme ya que el método es NO selectivo.

Los rebajes longitudinales son comúnmente empleados en la explotación de vetas angostas con gran ángulo de buzamiento en donde los subniveles (y posteriormente los rebajes) se colarán en forma paralela al rumbo del depósito con una longitud limitada por la extensión del cuerpo. El ancho o *claro* del rebaje estará limitado por la potencia o ancho de la veta. En vetas muy anchas, se acostumbra dejar pilares de soporte dentro del rebaje, ya sea que se distribuyan en forma aleatoria o en retículas geométricas. Algunos yacimientos con potencias de hasta 20 m (70 pies) han sido minados empleando la técnica de pilares.

Los pilares de piso en el nivel de tolvas, normalmente se diseñan en forma regular, ya que éstos formarán en la parte superior, el piso del rebaje, y por la parte inferior el techo del nivel principal de acarreo. Si el depósito tiene un buzamiento muy pronunciado, estos pilares de piso también

soportarán las presiones laterales. Con este diseño de rebajes se pueden alcanzar índices de extracción cercanos al 75%, ya que es posible que ocurra algún tipo de dilución por efecto de "caídos" de roca estéril proveniente de los respaldos (tablas) del cuerpo. Ocasionalmente también se permite un poco de "descostre" o de desgaste en el pilar de piso, pero el hundimiento generalizado de pilares y respaldos deberá evitarse a toda costa.

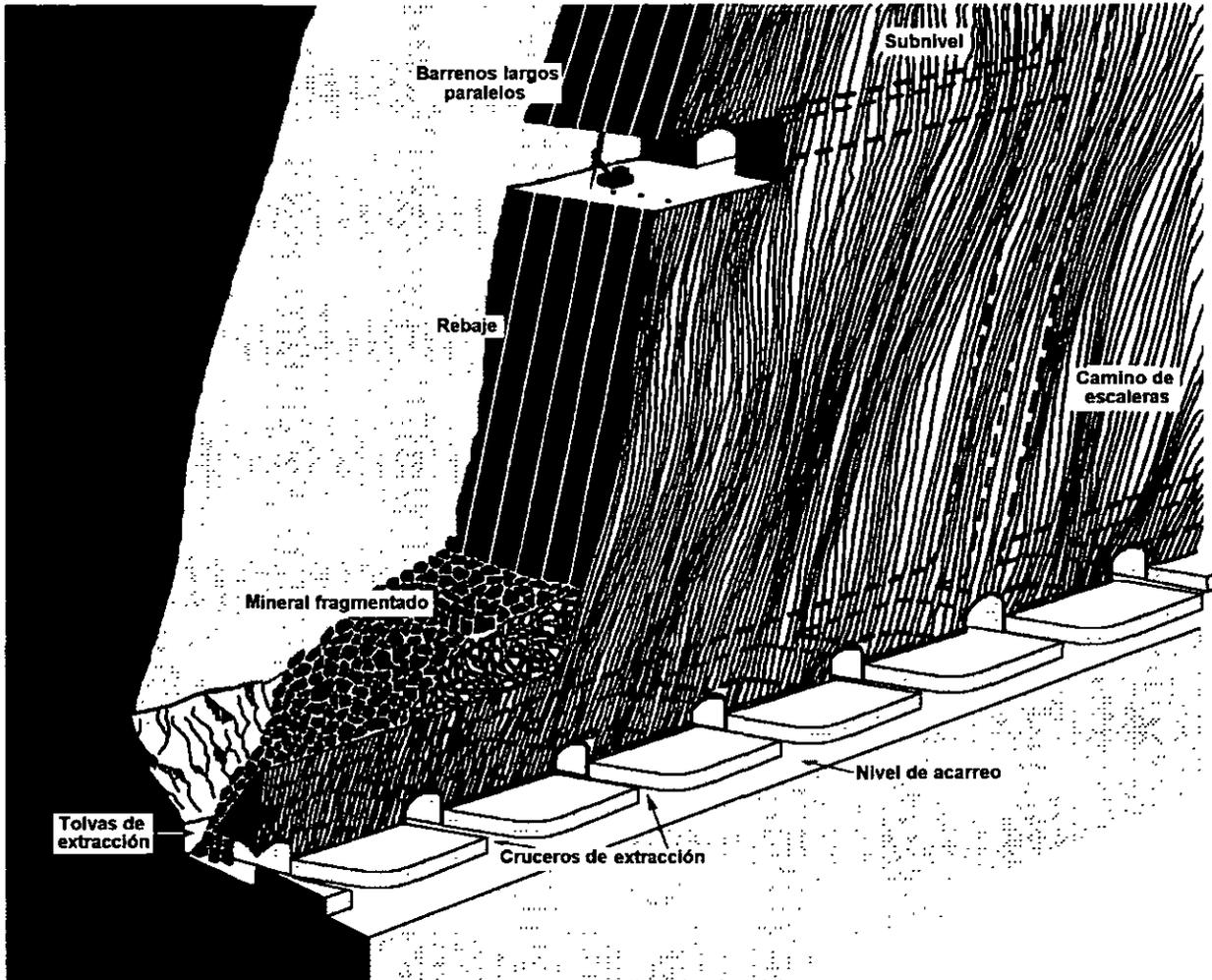
Para depósitos muy anchos (de más de 20 m), lo usual será emplear la variante de rebajes transversales, figura 17, en donde las obras se excavarán en forma perpendicular al rumbo del cuerpo, limitados en longitud por el ancho o potencia del depósito.

La secuencia de la variante de minado longitudinal (figura 18), se visualiza como ejemplo, a través de tres unidades mineras en México: "La Negra", "El Monte" y "Santa Bárbara". Básicamente las tres unidades emplean barrenación larga de la siguiente manera:

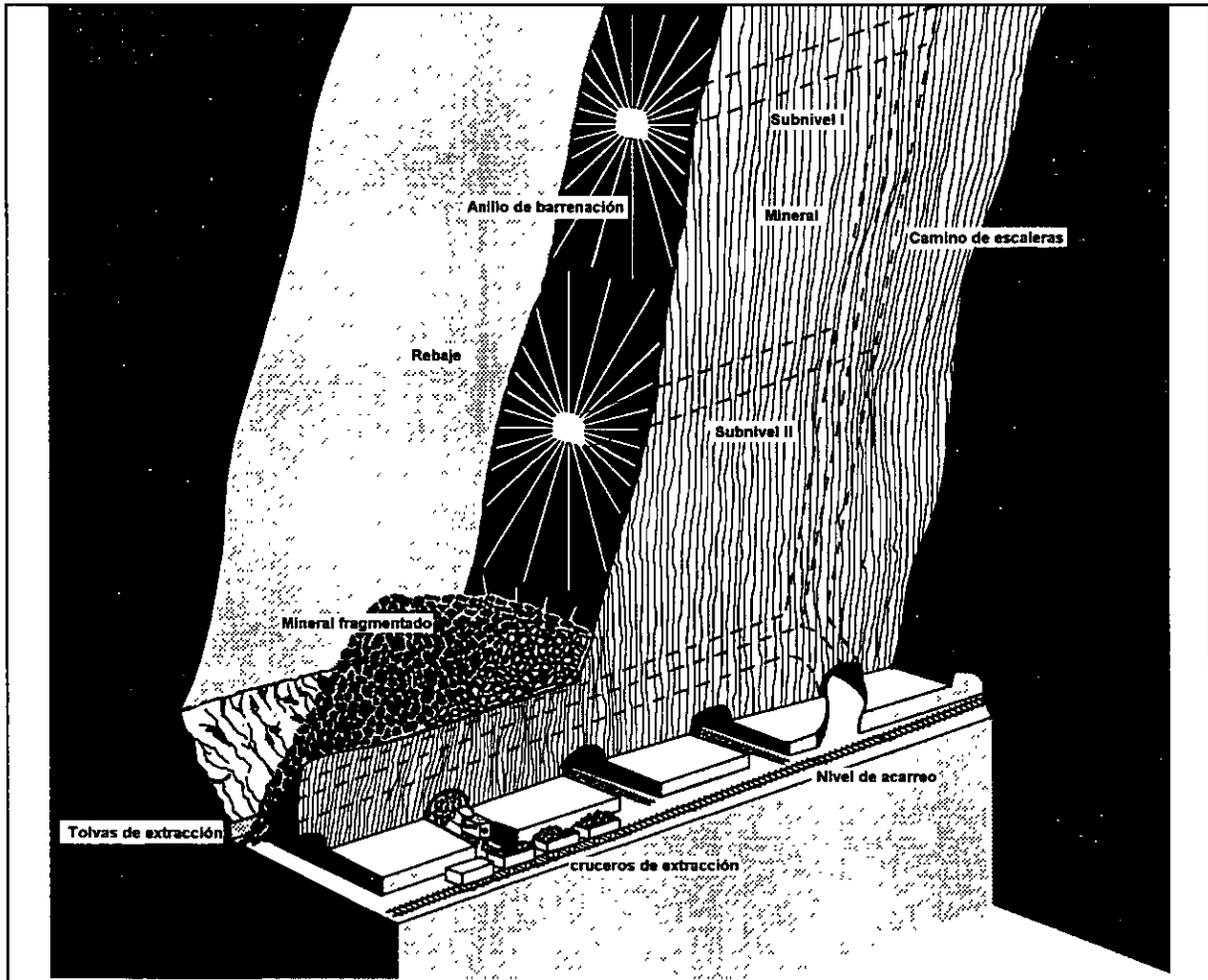
**Aplicación:** El método es aplicable a cuerpos minerales con características de alta competencia y con echados mayores a  $45^\circ$ , con objeto de que dicho ángulo resulte mayor al de reposo del mineral fragmentado. Con lo anterior, se logran resultados eficientes en las operaciones de rezagado, ya que de esta manera el flujo del mineral se hace por acción de la fuerza de gravedad hacia la zona de extracción.

La sección óptima de los subniveles de producción, será aquella que mejor se ajuste al tamaño y movilidad de los equipos de minado. Dada la importancia que reviste la barrenación larga, la mano de obra deberá ser de calidad y bien capacitada para obtener los mejores resultados del método, ya que en ello estriba el porcentaje de dilución que se permitirá (se considera un promedio del 20% de dilución como aceptable).

**Preparación:** Se considera como etapa de preparación, el cuele de todas las obras mineras que necesariamente se requieren para dejar un depósito mineral listo para su explotación. Las obras constan de subniveles, cruceros de extracción, contrapozos para caminos, metaleras, ventilación, contrapozos-ranura y "draw-points" o conos de captación.



**Figura 18 TUMBE POR SUBNIVELES EN REBAJES LONGITUDINALES USANDO BARRENACIÓN LARGA EN VETAS ANCHAS**  
(Hustrulid, A.W., 1982)



**Figura 19 TUMBE POR SUBNIVELES USANDO ANILLOS DE BARRENACIÓN, EN VETAS ANGOSTAS CON REBAJES LONGITUDINALES**  
(Hustrulid, A.W., 1982)

La preparación de los rebajes se inicia en la parte inferior del cuerpo con un acceso de rebaje comunicado a la rampa principal. Se cuelan contrapozos dentro del cuerpo para delimitar el rebaje y posteriormente se procede a colar los cruceros de extracción en el nivel principal, así como la apertura del primer subnivel inmediato superior o subnivel de conos. Se comunican los cruceros de extracción a dicho subnivel y se dejar listo para formar los conos. Se continúa el cuele de los subniveles superiores y la profundización de la rampa principal.

**Producción.** El tumbado de mineral se inicia con la formación de los conos de captación, procediendo a minar el siguiente banco en forma ascendente a partir del contrapozo “cuña” o contrapozo “ranura”, avanzando en “retirada” hacia la entrada o acceso original del subnivel.

La producción por barrenación larga es considerada como la más eficiente de todos los métodos de minado a gran escala usados hoy en día. Las estadísticas de producción normalmente muestran bajos costos con extracción grande y eficiente de mineral. Como regla general, los métodos de barrenación larga están asociados a depósitos minerales sustancialmente grandes. Estos métodos muestran altos perfiles de producción y bajos costos de minado.

**Fortificación.** El sistema de soporte que más comúnmente se emplea, es a partir de pernos de anclaje, los cuales pueden ser colocados en barrenos colados por la misma máquina que se emplea para dar los barrenos de producción. La supervisión de la barrenación y de las voladuras es fundamental, ya que por este medio se puede tener un buen control para evitar el fracturamiento de las tablas y respaldos por efecto de sobre barrenaciones indeseables que darían índices de dilución muy altos.

Como ejemplo de aplicación del tumbado por subniveles en México se mencionaran dos unidades mineras: mina “El Monte” en Zimapán, Estado de Hidalgo (actualmente fuera de operación), y la mina “Coyote” en Santa Bárbara, Estado de Chihuahua.

ZIMAPAN.- En esta unidad se utilizaba el método de tumbado por subniveles con barrenación larga. El primer paso en la preparación era delimitar el cuerpo mineral longitudinal y transversalmente en el nivel de desplante. Posteriormente se procedía al desarrollo de una rampa de acceso ascendente, localizada al bajo del cuerpo con una pendiente de 14% y separada del contacto 15 metros. Se continuaba con el cuele de los subniveles, espaciados entre sí 16 metros, medidos de piso a piso. Paralelo al nivel de desplante, se colaba una contrafrente de acarreo dejando entre el contacto del bajo y la tabla de la obra, un pilar de 12 metros, para dar a continuación, unos cruces de comunicación al cuerpo a cada 18 metros entre centros. Estos cruces eran posteriormente los puntos de extracción del mineral tumbado.

En los extremos del cuerpo se colaban contrapozos que se ampliaban longitudinalmente hasta los contactos con las tablas, formando una “ranura” que servía de cara libre para la “salida” de los barrenos de producción. También formaban parte del circuito de ventilación, ya que estas obras unían el nivel inferior con los restantes subniveles del rebaje y con los niveles superiores de la mina. Se continuaba con la misma operación en orden ascendente, hasta terminar la preparación del bloque.

El tumbado se realizaba a partir de los contrapozos ranura, avanzando éstos en “retirada” hasta terminar en la entrada del subnivel correspondiente. La operación se repetía en los bancos superiores, utilizando para ello una máquina marca Boart, equipada con propulsión y perforadora neumática.

Para el rezagado se utilizaban scoop-tram. El acarreo se hacía con camiones de volteo convencional, desde las estaciones de cargado en los rebajes del interior de la mina, hasta la tolva de gruesos en la planta de beneficio de "El Carrizal" localizada a aproximadamente 50 km.

SANTA BARBARA: Al igual que en Zimapán, en esta mina se utiliza el método de tumbe por subniveles con barrenación larga. Para vetas con más de 6 m de potencia e inclinación mayor de 70°; se diseñan los subniveles a rumbo de veta con una separación entre ellos que depende de la capacidad de barrenación del equipo con el que se cuenta, además de las condiciones geológico-estructurales. Actualmente la separación entre subniveles es de 60 metros.

En un extremo del cuerpo se cuela un contrapozo y sobre este se barrena el desborde para hacer la ranura de salida. A partir de esta ranura, se barrena en forma paralela y en retroceso hasta el otro extremo del cuerpo. La barrenación se da en forma descendente con una máquina *Simba de Atlas Copco*. La extracción se efectúa por medio de scoop-tram de 8 yardas a través de los cruces colados al bajo, para luego vaciar en las metaleras generales.

Entre las principales ventajas de este método, se pueden mencionar las siguientes:

1. No requiere fortificación.
2. Alta productividad (15 a 30 ton/hombre/turno, aunque se ha alcanzado producciones de 70 ton/hombre/turno).
3. Facilidad para alcanzar índices importantes de mecanización.
4. Requerimientos bajos de mano de obra.
5. Bajos costos de operación.
6. Altos índices de seguridad (85% de seguridad relativa).
7. Se pueden realizar operaciones simultáneas de preparación y explotación.
8. Buena recuperación de mineral (75%).
9. Baja dilución (20% aproximadamente).
10. Disposición inmediata del mineral.
11. Se aprovecha la fuerza de gravedad en el tumba y rezagado del mineral.
12. Buenas condiciones de ventilación en los rebajes.

Algunas de las desventajas son:

1. No es un método selectivo.
2. La inversión inicial por concepto de preparación, es elevada, debido a la gran cantidad de subniveles que previamente se tienen que colar.

3. Por su condición de obras “ciegas”, prevalece una mala ventilación en las obras de preparación en tanto no sean comunicadas al resto de las obras del rebaje.
4. La gran cantidad de explosivos que se requieren durante la etapa de producción, puede generar vibraciones excesivas y daños estructurales importantes.
5. Si el fracturamiento no resulta adecuado, se hará necesario realizar voladuras secundarias (moneos y/o plasteos).

#### (e) **Tumbe sobre carga**

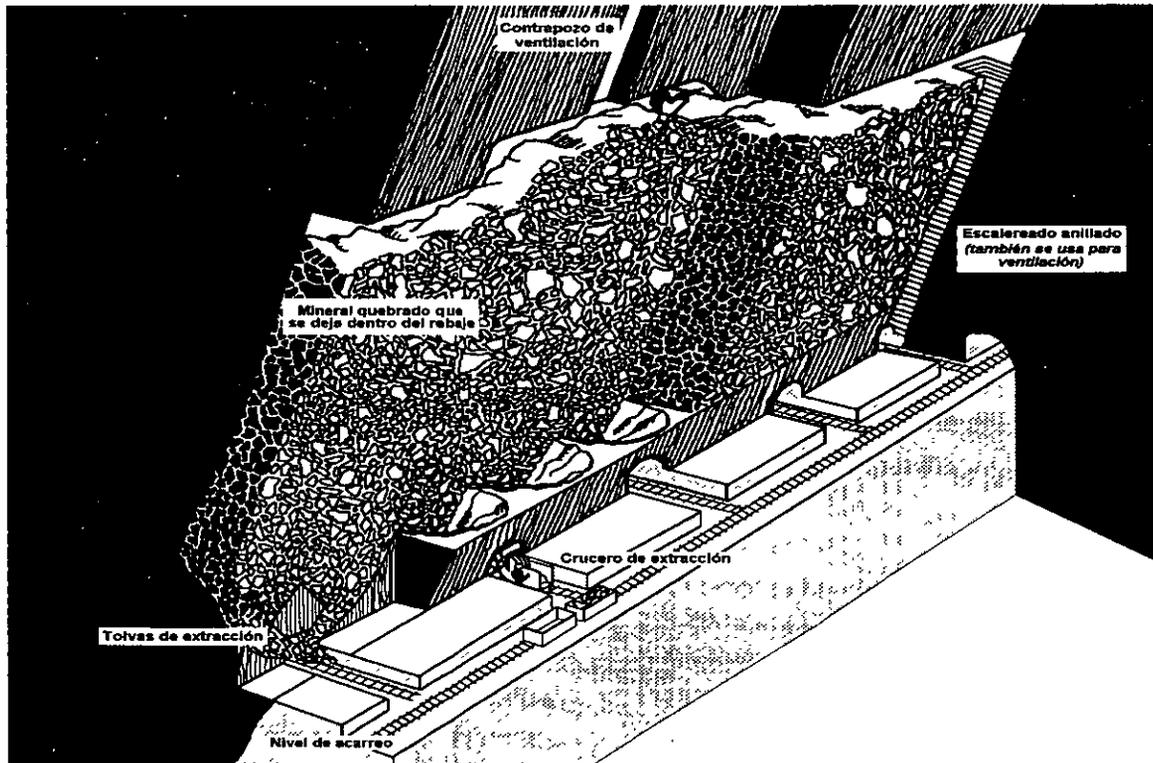
El minado de depósitos minerales por el método de *tumbe sobre carga* (figura 19), es aplicable a vetas (anchas o angostas) y algunas veces, a depósitos sedimentarios (mantos) con buzamiento pronunciado. Este método es básicamente un sistema en el cual una porción del mineral tumbado se acumula dentro del rebaje, hasta que se termina su explotación. El incremento de volumen debido al “abundamiento” del mineral tumbado y fracturado dentro del rebaje, requiere que una porción de éste (entre el 30 y 50%) deba ser *rezagada* periódicamente durante las operaciones de producción, a través de contrapozos (chutes) o por medio de cruceros de extracción, con objeto de mantener un espacio de trabajo adecuado entre el piso (formado por el mineral tumbado) y la cabeza del rebaje, para poder continuar el minado ascendente del mineral.

En términos generales el material de los respaldos del cuerpo mineralizado deberá poseer características estructurales lo suficientemente favorables como para mantener a los rebajes autosoportados. Adicionalmente, el mineral fragmentado y dejado dentro del rebaje, no deberá compactarse a grado tal que se dificulte su extracción. En depósitos verticales o cercanos a la vertical, tanto el respaldo del *alto* como el del *bajo* deberán ser lo suficientemente competentes como para prever la dilución excesiva del mineral y los *caídos* de las tablas por falla del material.

Durante la etapa de minado del rebaje, ambos respaldos se soportan y estabilizan en cierto grado por el mineral fragmentado que permanece dentro del rebaje. Cuando se procede al “*vaciado*” del rebaje y mientras el mineral quebrado remanente se extrae, ocurren eventualmente algunos desprendimientos de material estéril de los respaldos, aunque por regla general los espacios vacíos creados por la operación, permanecen abiertos después de que la maniobra de extracción ha sido completada. Los pilares de piso y de costilla que permanecen dentro del rebaje vacío, proporcionan soporte suficiente a los respaldos.

El minado de *tumbe sobre carga* ha sido empleado con éxito a profundidades de más de 850 m (2550 pies), con recuperaciones de mineral que varían de 75 a 85%. Algunas operaciones en depósitos de fluorita han trabajado sin problemas con “claros” de 12 m (35 pies). También se han logrado “claros” de 25 m (75 pies) en vetas de pirita y calcopirita, donde el *alto* ha estado limitado

por una falla y el *bajo* formado por mineral marginal dentro de la veta, con pizarra, esquistos y grauvaca en la vecindad del cuerpo.



**Figura 19 REBAJE DE TUMBE SOBRE CARGA**

(Hustrulid, A.W., 1982)

- ***Rebajes artificialmente soportados.***

Una abertura soportada se puede definir como aquella obra en la cual una parte significativa de la carga o del peso de la roca circundante, se puede sostener por algún sistema de soporte artificial (por ejemplo: puntales, marcos, relleno, arcos, trancas, postes hidráulicos, etcétera).

Debido a que el peso del material rocoso en la vecindad de una abertura ejerce en promedio una carga gravitacional de una libra por pulgada cuadrada, una obra subterránea que se localice a 150 m (500 pies) de profundidad requerirá un sistema de soporte capaz de resistir una presión de 36 ton/pie<sup>2</sup>, en caso de que parte de la carga gravitacional originalmente soportada por la roca en la abertura, no pueda ser transferida a la roca que rodea a la obra después de realizada la excavación.

Sistemas de soporte artificial con capacidad de resistencia a la compresión como el caso mencionado arriba, generalmente resultan imprácticos y antieconómicos, debido a la robustez y dimensiones que requerirían los elementos estructurales que lo formen, con excepción de un sistema de explotación con relleno en las etapas finales de minado. Los puntales, trancas, marcos de madera y otros tipos de soporte ligero, probablemente sólo podrán soportar un porcentaje muy bajo de la carga gravitacional, aunque su diseño y utilización sean empleados al máximo; en cambio, es muy probable que el uso de postes hidráulicos proporcione un mejor soporte, resistiendo un mayor porcentaje de la carga. Por ejemplo, para una obra localizada a 150 m (500 pies) de profundidad, postes hidráulicos de 160 toneladas de capacidad colocados a 1.20 m de centro a centro, podrán soportar alrededor del 36% del peso ejercido sobre la obra. Postes acuñados en combinación con "huacales" o marcos conjugados rellenos y compactados con material estéril, soportan hasta el 50% de la carga en rebajes de grandes dimensiones con claros muy amplios, si se colocan lo suficientemente cercanos unos de otros. En rebajes de relleno, éste proporciona un efecto de sostenimiento capaz de soportar el 100% del peso del material que sobreyace a la obra, después de que las capas superiores subsidan y compacten el material de relleno.

#### **a) Corte y relleno**

Este sistema de minado en sus cuatro modalidades (con relleno de tepetate, con relleno de gravas y arenas de arroyos, con relleno hidráulico de jales y relleno con pastas), es el más indicado para el minado de vetas, mantos y en general cuerpos mineralizados cuyos ángulos de buzamiento sean mayores al de reposo del material fragmentado (figura 20). El mineral podrá ser masivo y parcialmente cementado, pero lo suficientemente competente como para autoportar claros tan anchos como el propio cuerpo durante la etapa de extracción. La roca encajonante, en particular la tabla del alto, usualmente está compuesta por un tipo de roca que no podrá permanecer soportada por un período de tiempo muy prolongado sin la ayuda de algún tipo de soporte, ya sea natural o artificial.

Para la aplicación de este método, primero se prepara el rebaje delimitando la zona de explotación por medio de dos niveles y dos contrapozos; a esta operación se le denomina bloqueo del rebaje. Las dimensiones del rebaje o área de explotación se definen de acuerdo con el tipo de yacimiento, consistencia de las tablas y del mineral, calidad y ley de los valores, posición de los respaldos, tipo y disponibilidad del equipo de minado que a usar. Un rebaje de corte y relleno con respaldos y mineral de consistencia media, se dimensiona a cada 50 m de separación entre niveles con longitudes variables de hasta 100 m, empleando equipos de minado de alta productividad (máquinas contrapoceras, jumbos de perforación, trascavos neumáticos).

Una vez que el rebaje ha sido delimitado, se procede a ejecutar las obras de preparación que constan fundamentalmente, dependiendo del tamaño del rebaje, de un subnivel colado de 3 a 5 m (10-17 pies) por encima del nivel inferior, del cuele de las tolvas de extracción, y si las dimensiones del rebaje lo requieren, del cuele de uno o más contrapozos que inician en el subnivel de preparación y llegan hasta el nivel superior. Las funciones de estas obras serán de ventilación, de camino de acceso y de "chorreaderos" del material de relleno que proviene de arriba y de fuera del rebaje. En algunos casos estos contrapozos también cumplen con la doble función de chorreadero y camino de escaleras, siempre y cuando se dividan en toda su longitud en dos compartimentos mediante un "partido" construido a base de trancas de madera forradas con tablones gruesos o "rajas".

Una vez concluidas las obras de preparación, se inician los trabajos de explotación propiamente dichos, para lo cual se harán cortes ascendentes a todo lo largo y ancho del rebaje, iniciando a partir de los contrapozos extremos o intermedios. Si se requiere que alguno de los contrapozos colados de nivel a nivel permanezca abierto durante todo el tiempo de la explotación del rebaje, se deberá proteger aquel dejando pilares de costilla en toda su extensión; en caso contrario, el contrapozo (usualmente empleado como chorreadero) se irá perdiendo en su porción inferior, conforme ascienden los cortes de cabeza.

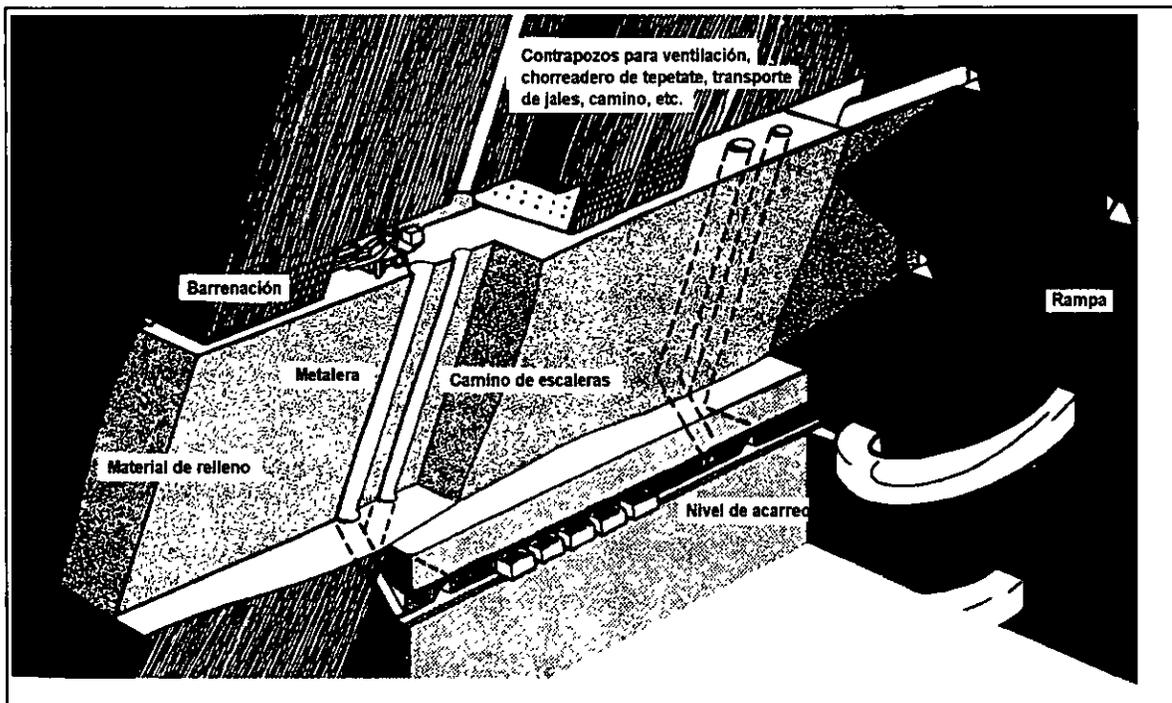
Después de realizados los cortes de cabeza, se procede a efectuar la extracción del mineral quebrado producto de tales cortes. Esta maniobra se efectúa a través de las tolvas que previamente se colaron en el pilar inferior de protección, con equipos especialmente diseñados, como es el caso de las "escrepas" o cuchillas de arrastre, trascavos neumáticos montados sobre llanta, carretillas de mano, etcétera. Una vez que el mineral quebrado se ha extraído, se procede a rellenar con material estéril el hueco que ocupó aquel, con lo que se proporciona un nuevo piso de operación que permitirá continuar con otro nuevo corte de cabeza.

Antes de depositar el material de relleno, se deben "levantar" los contrapozos de extracción mediante el empleo de rollizos o piezas de madera cuadrada ensamblados entre sí, de manera que se vaya formando un contrapozo artificial, que deberá "crecer" a medida que los cortes y el relleno avancen en su trayectoria ascendente.

Cuando los contrapozos de extracción alcanzan la altura deseada, se procede a chorrear y a "aplanillar" el material de relleno formado por tepetate, arena y/o gravas, tierra, arenas clasificadas de molienda (jales), pastas de jal y cemento portland o cualquier combinación de estos materiales. Existe también la posibilidad de soportar una parte de los esfuerzos ejercidos sobre la obra, con pilares de mineral labrados dentro del rebaje.

Si se pretende minar vetas extremadamente angostas se puede usar una variante del método llamada *resuing* o "descostre". En este sistema se trata de minar la parte mineralizada de la veta, que por su potencia tan reducida no proporciona un espacio de trabajo suficientemente amplio como para ser considerado seguro. Lo anterior obliga a tumbar una porción del respaldo (del alto o del bajo) en estéril, hasta alcanzar las dimensiones mínimas requeridas en el interior del rebaje que impone la ley o el contrato colectivo de trabajo correspondiente. Para conseguir lo señalado, se deben fracturar por separado cada una de las porciones descritas, procediendo primero al tumbado y extracción de la parte mineralizada y después al desborde de la parte estéril, misma que se dejará dentro del rebaje como el total del relleno o como parte de él.

El método de corte y relleno ha sido aplicado exitosamente en depósitos vetiformes cuarcíferos localizados a 2,250 m de profundidad con 3.0 m (10 pies) de potencia, en roca encajonante formada por esquistos de lava y pórfidos. También se ha empleado a profundidades de 1,100 m (3600 pies) en vetas de cuarzo y pirita con potencias variables entre 1.50 y 30.0 m (5.100 pies).



**Figura 20 REBAJE DE CORTE Y RELLENO**  
(Hustrulid, A.W., 1982)

### b) Cuadros conjugados

A pesar de que este método se emplea para el minado de casi cualquier tipo de depósito y en cualquier tipo de roca, por lo general se usa en la explotación de depósitos estructuralmente muy débiles, donde las fallas y fracturas de la roca encajonante y del mineral son particularmente notables, lo que hace que todo el conjunto de material rocoso sea poco competente e inestable al momento de la explotación.

El método es adaptable a todo tipo de depósitos con contornos regulares o irregulares y ángulos de buzamiento del orden de 45° o más, por lo que resulta extremadamente flexible en yacimientos donde el tipo y la calidad del mineral varían en zonas muy cercanas entre sí. Técnicamente puede ser aplicable en cuerpos donde todos los demás métodos han probado ser inadecuados, asegurando recuperaciones de minado cercanas al 100%. Sin embargo, la desventaja más grande del sistema resulta ser su alto costo de operación (mano de obra y materiales), por lo que su aplicación sólo se justifica en yacimientos que presenten leyes muy altas y valores comercialmente atractivos.

La metodología de minado consiste básicamente en minar secuencialmente del respaldo del alto hacia el respaldo del bajo en cortes ascendentes, abriendo espacios lo suficientemente grandes como para colocar uno o más conjuntos de cuadros conjugados (cubos, estrictamente hablando) con dimensiones aproximadas entre 2.40 y 3.00 m (8-10 pies) por cara, rellenos o vacíos. La operación de colocar y rellenar cada cubo, forma parte integral del ciclo normal de minado que exige el método, y no como una operación independiente y aislada de adomado o soporte estructural.

A medida que la operación avanza, todos los conjuntos de cuadros o cubos conjugados son rellenos con tepetate o cualquier otro tipo de material estéril, con la finalidad de proporcionar una mayor estabilidad y resistencia a la estructura formada. La excepción serán aquellos cubos alineados verticalmente que se usarán como conductos de ventilación, chorreaderos de mineral y caminos de acceso (figura 21).

En su calidad de método selectivo, la operación de separación se puede realizar dentro del rebaje dejando el material estéril en él como parte constitutiva del relleno. La estructura formada por los cubos conjugados, soporta eficientemente únicamente la porción posterior del rebaje y la zona inmediata alrededor del alto y del bajo, por lo que el relleno, cuando se hace necesario, soporta una parte proporcional del total de la carga sobrepuesta y puede, eventualmente, soportar el 100% como hundimiento o como fenómeno de subsidencia en curso.

El minado por cuadros conjugados se ha practicado a profundidades mayores de 2,550 m (8500 pies) en minas de plomo, plata y oro con respaldos formados por esquistos, pórfidos, cuarcitas fuertemente alteradas, lutitas, calizas y granitos.

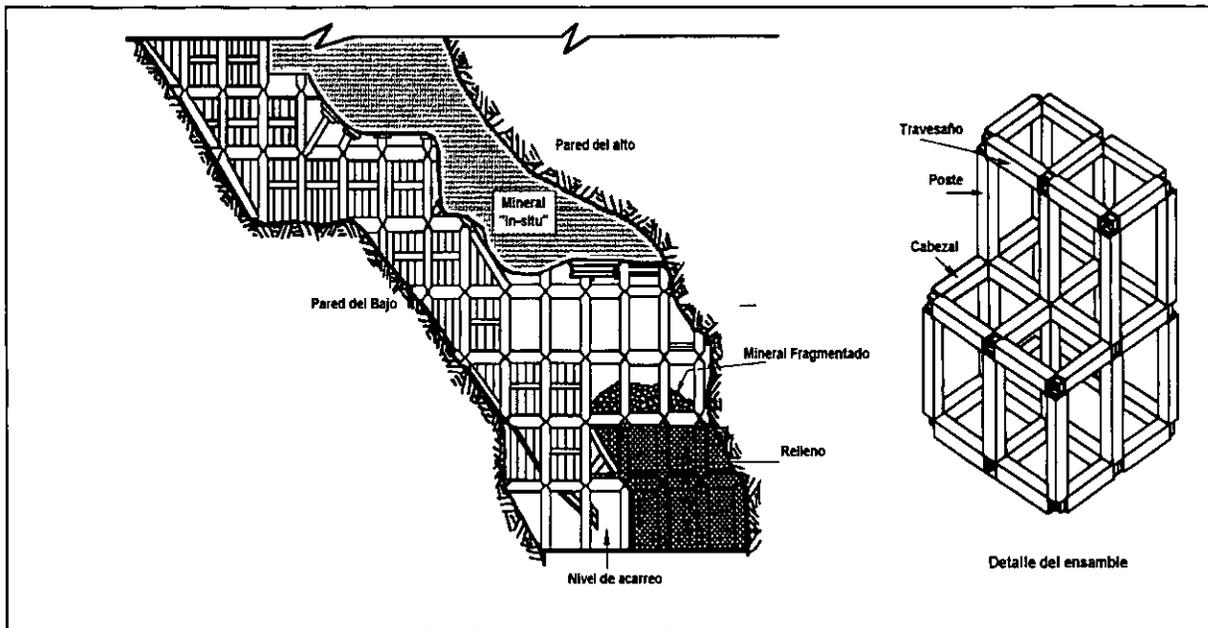


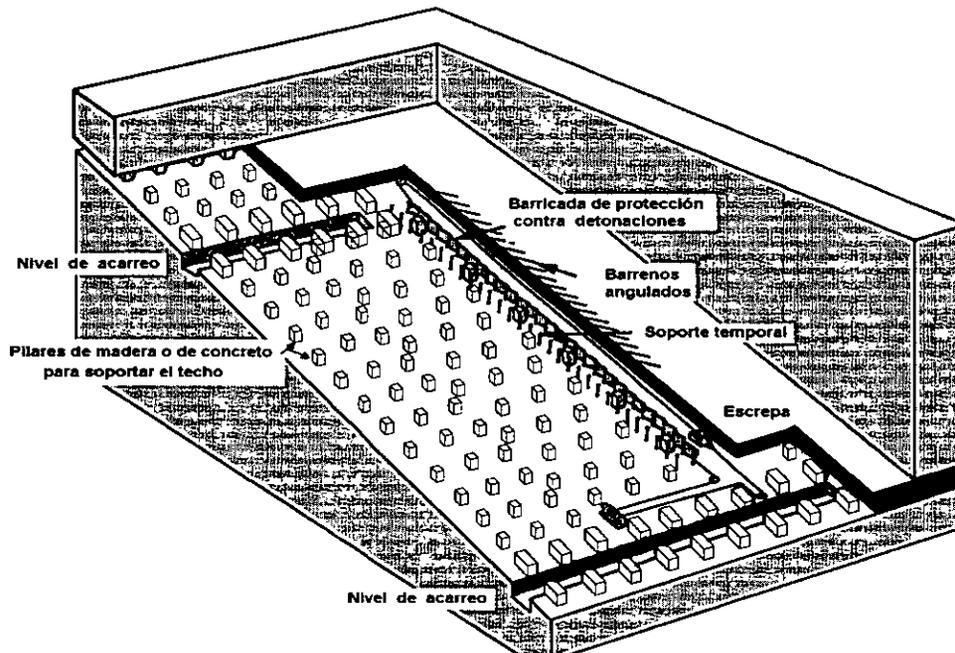
Figura 21 CUADROS CONJUGADOS  
(Cummins, B.A., 1973)

En la actualidad y debido fundamentalmente a factores ecológicos, los cuadros conjugados han caído en la obsolescencia dado los altos consumos de madera, la tala inmoderada de árboles, la baja productividad y, consecuentemente, a los elevados costos de operación que todo esto genera.

### c) Frentes largas

El minado por frentes largas, en su conceptualización original, se emplea fundamentalmente para la explotación de mantos de carbón, sin embargo, este proceso con algunas modificaciones ha sido empleado con bastante éxito en el minado de minerales metálicos; por ejemplo, en la explotación de minerales de oro y uranio.

El método es aplicable al minado de depósitos tabulares con potencias variables de 0.90 a 2.40 m (3-8 pies), con ángulos de buzamiento de hasta  $12^\circ$ , localizados a profundidades de 900 m (3000 pies) o más, siempre y cuando el material del techo de la obra se presente en estratos delgados horizontales y relativamente incompetentes y que se hundan (o subsidan) libre y totalmente por detrás de la línea de ademado o soporte (figura 22).

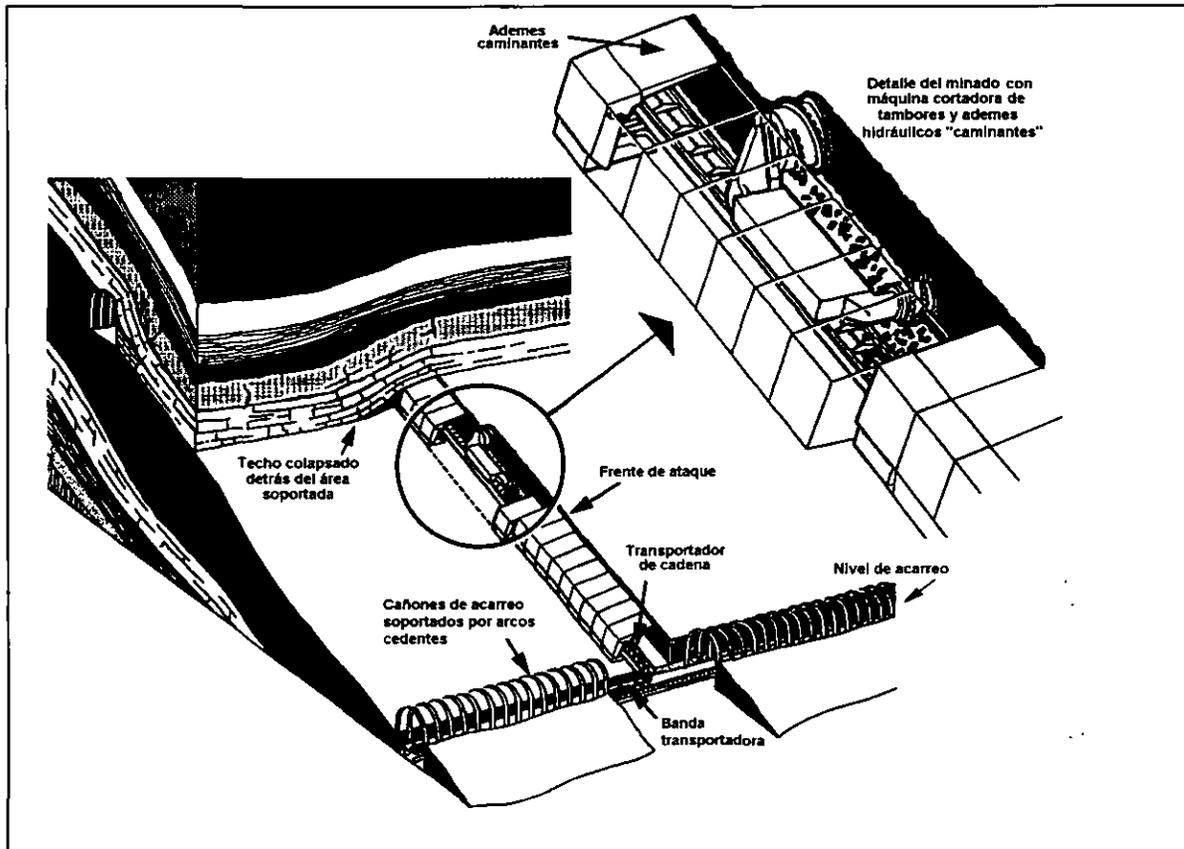


**Figura 22 EXPLOTACIÓN POR FRENTES LARGAS EMPLEANDO EXPLOSIVOS**  
(Hustrulid, A.W. 1982)

Debido a que el método requiere del empleo de un sistema masivo de ademes para soportar el techo sobre la frente y las áreas de trabajo, el sistema de frentes largos está clasificado como un método de explotación artificialmente soportado, a pesar de que se debe inducir el hundimiento en las áreas previamente minadas.

En la operación de una frente larga, el material de la cara se fragmenta y se arranca con máquinas cortadoras, con *rippers* rasgadores o con herramientas similares, aprovechando las características de delesnabilidad del material (carbón, potasa), para inmediatamente ser extraído de la frente mediante el uso de transportadores de oruga, transportadores blindados y/o bandas de hule, figura 23.

Habitualmente es posible alcanzar ritmos de extracción cercanos al 100% cuando la continuidad y regularidad del manto lo permiten. Debido a la casi total extracción del manto mineralizado, la roca encajonante del techo se debe hundir para ocupar el hueco dejado por el material minado (el efecto de subsidencia en la superficie es relativamente completo y uniforme). En algunas minas europeas de carbón que emplean el método de frentes largos, el hundimiento y por lo tanto la subsidencia del terreno, se limita mediante la colocación de paquetes rocosos de relleno dentro de las áreas minadas.



**Figura 23 MINADO POR FRENTES LARGOS EN UN MANTO DE CARBÓN  
USANDO MÁQUINA CORTADORA Y ADEMES CAMINANTES**  
(Hustrulid, A.W. 1982)

#### d) Frentes cortas

El método de frentes cortas se utiliza en los mismos tipos de depósitos y en los mismos materiales rocosos a los cuales es aplicable el de frentes largos. La diferencia fundamental entre estos dos métodos estriba en la longitud de la frente o cara de trabajo. En el minado por frentes cortas, la cara de ataque normalmente tiene una longitud de 45 a 48 m (150-160 pies), mientras que en las frentes largas dichas dimensiones son del orden de 210 m (700 pies) en adelante. La modalidad de las frentes cortas se debió fundamentalmente a razones de seguridad, particularmente en áreas con cielos (techos) extremadamente flojos y estructuralmente inestables aun por períodos muy cortos. El equipo utilizado y los resultados obtenidos con el uso de este método, son muy similares a los mencionados para el minado por frentes largos.

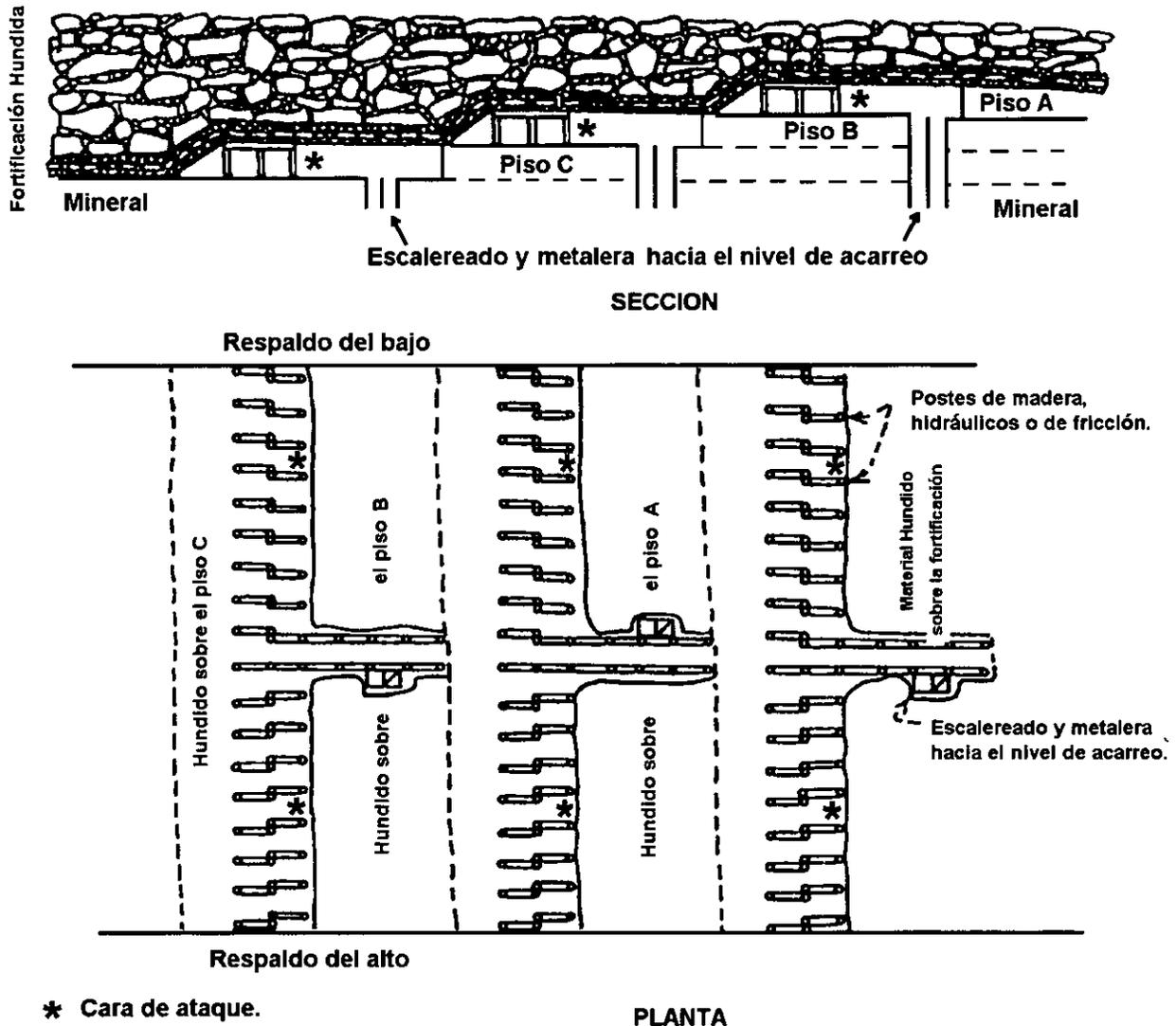
### e) Rebanadas descendentes

Las rebanadas descendentes (o top slicing), es esencialmente un método empleado para el minado de depósitos masivos presentes en mantos potentes ó vetas anchas (mayores de 4.5 m) de potencia, que contienen mineral de poca consistencia y respaldos (o roca encajonante) que no pueden permanecer autosoportados, excepto en claros muy pequeños. La explotación del mineral se hace por medio de cortes o rebanadas horizontales (o muy cercanas a la horizontal) cuyos huecos vacíos dejados por la extracción, deben ser inmediatamente soportados por puntales o marcos de madera. Dichos trabajos se empiezan en la parte superior del rebaje, para continuar hacia abajo en rebanadas descendentes, de ahí el nombre del método.

Para iniciar los trabajos, lo primero que se debe hacer es colocar un tendido o tarima de tablas en el piso del primer corte, para luego hundir el encape localizado encima de éste. A medida que avancen los subsecuentes cortes, se debe inducir el hundimiento del encape mediante la detonación de pequeñas cargas explosivas colocadas en los puntales de soporte, con objeto de romperlos y obligarlos a ceder por el peso del material de arriba y de atrás de la frente ó zona de extracción, cuidando de mantener suficiente espacio de trabajo entre la tarima superior y el piso (figura 24).

La alta concentración de madera de soporte tanto en la frente de trabajo como en la tarima, colocan a este método de minado bajo la clasificación de rebajes artificialmente soportados, aun cuando en el resultado final, la explotación se pudiera considerar como un método de hundimiento. Este método no es selectivo debido a que resultaría imposible realizar algún tipo de clasificación de mineral dentro del rebaje, sin embargo resulta aplicable a cuerpos con contactos irregulares, en los que se alcanzan índices de extracción bastante altos.

Las rebanadas descendentes han sido aplicadas con éxito en depósitos de hematita blanda e hidratada, localizados a profundidades de 750 m (2500 pies), con encapes friables y altamente fracturados de pedernal cubiertos por relleno glaciar. El sistema ha trabajado igualmente bien en algunas otras minas de hierro a profundidades de 45 a 120 m (150-400 pies).



**Figura 24 REBANADAS DESCENDENTES**  
(Cummins, B. A., 1973)

● **Métodos de hundimiento.**

Generalmente se reconocen tres métodos de hundimiento: hundimiento por subniveles; hundimiento de bloques y rebanadas descendentes. Ya se comentó en el capítulo anterior que las rebanadas descendentes o top slicing, por su alto consumo de madera, algunos autores lo clasifican como método de soporte artificial. En todos los casos, los métodos de hundimiento son aplicables a depósitos minerales de tipo masivo con grandes desarrollos horizontales, tal y como es el caso de mantos muy potentes, vetas masivas o muy anchas, etc. Para la aplicación de estos métodos de

minado, la consistencia del mineral debe ser débil, pero si se presenta muy duro y consistente, deberá ser perfectamente fracturado y separado de sus contactos, mediante el uso de cargas explosivas. El encape se presenta desde roca muy firme hasta depósitos glaciares; pero en cualquier caso, debe ser susceptible de colapsarse para seguir el hundimiento del mineral conforme sea removido y extraído a través de las tolvas, las cuales fueron previamente construidas en la base del bloque.

El material rocoso en el depósito mineral así como el encape, deberán ser competentes pero altamente afallados o fracturados y virtualmente sin material cementante entre los planos de fractura y/o de falla. Estos materiales rocosos, debido a su patrón de fractura deben hundir cuando se remueva el soporte de un área suficientemente grande que podrá estar comprendida entre 3 y 60 m<sup>2</sup> (10-200 pies<sup>2</sup>)

Para algunos tipos de yacimientos con rocas medianamente consistentes, se requerirá de algún tipo asistencia adicional para iniciar el hundimiento, por ejemplo, delinear y debilitar el área que va a ser hundida por medio del cuele de contrapozos en las esquinas del bloque, por medio de "anillos de despegue" o ranuras periféricos colados con obras horizontales en los cuatro costados del bloque y por medio de "abanicos" de pre fracturación realizados con barrenos largos a partir de las obras anteriores.

Después de que el área mineralizada ha sido "despegada" de la roca que la rodea, debe hundirse bajo la acción de su propio peso, moviendo la masa por efecto de gravedad para producir fragmentos de tamaño adecuado como para ser manipulados a través de los chutes y tolvas de descarga.

Los métodos de hundimiento, en la mayoría de los casos, son aplicables a grandes depósitos de baja ley y suficientemente profundos como para que resulte poco práctico e incosteable una operación a cielo abierto. Dado que el hundimiento puede afectar la superficie natural del terreno, el método sólo podrá ser empleado en áreas donde tales perturbaciones puedan ser toleradas.

#### **a) Hundimiento por subniveles**

El hundimiento por subniveles se emplea para el minado masivo de grandes bolsas mineralizadas, vetas muy anchas que tengan ángulos de buzamiento muy pronunciados o chimeneas de dimensiones considerablemente grandes. El método generalmente se emplea para minar cuerpos de gran extensión horizontal, siempre a profundidades por debajo de los rangos considerados para el minado de un tajo abierto, donde la irregularidad de las paredes u otros factores lo hagan un sistema más adecuado que el hundimiento de bloques.

El material rocoso del depósito debe ser moderadamente competente, como es el caso de rocas fracturadas con poca resistencia en las juntas. La roca no deberá presentar "hundimiento libre" o espontáneo, pero cuando se fracture por efecto del hundimiento provocado, se deben formar fragmentos pequeños más manejables.

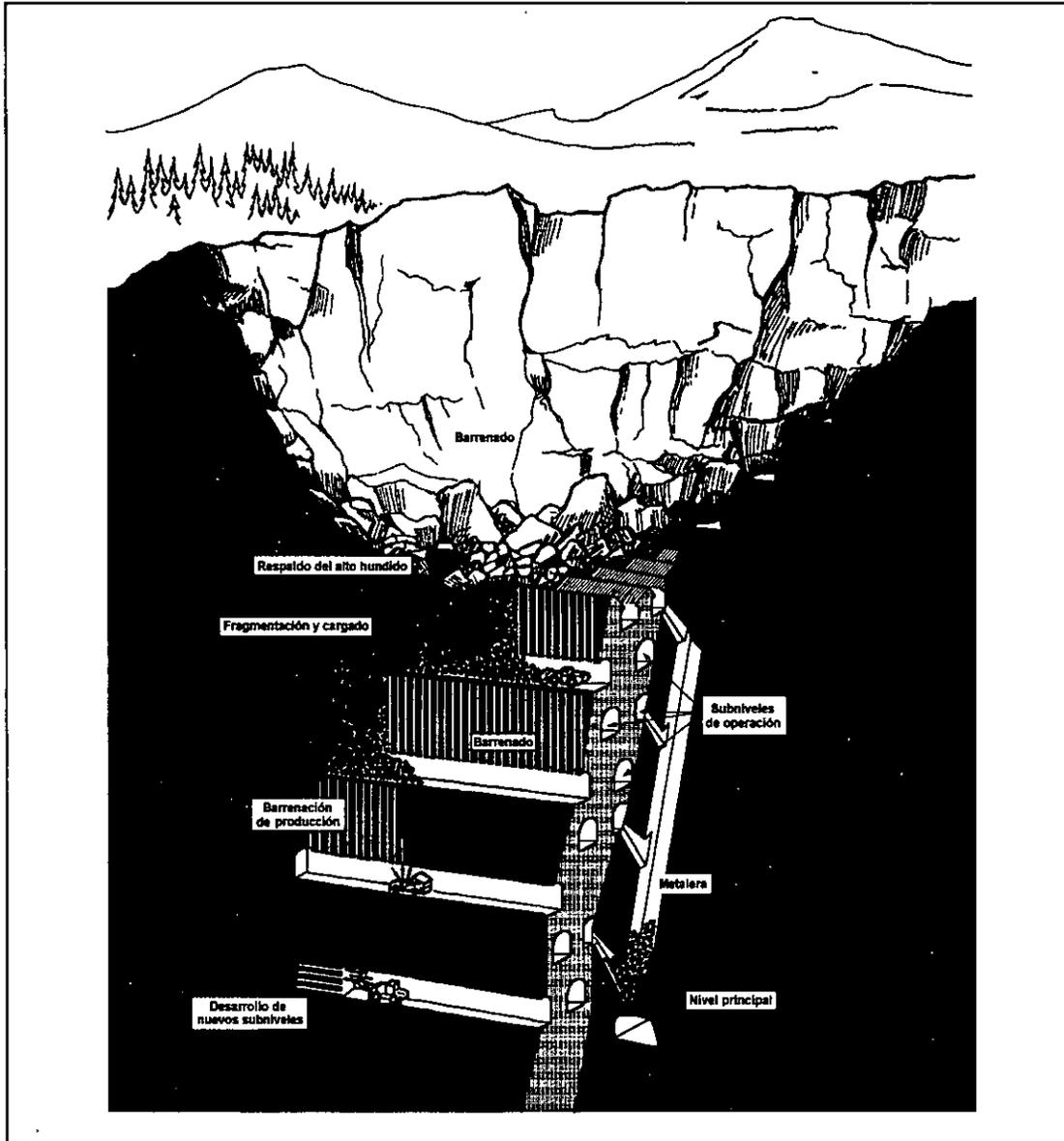
Este método, dentro de sus limitaciones, también se utiliza para el minado de materiales blandos y pegajosos que tengan la tendencia a "empaquetarse". El encape también debe estar fracturado y presentar cementación parcial, para que una vez iniciado el hundimiento de la masa mineralizada, pueda "seguirla" sin que se mezcle o se diluya con ella, evitando dejar huecos o espacios vacíos entre ambos materiales. Cuando el encape empiece a hundirse, deberá formar fragmentos de tamaños medianos y pequeños con muy pocos finos.

Los subniveles de operación se cuelan entre niveles principales y paralelos a éstos, con una separación entre subniveles que puede variar entre 6 y 12 m (20-40 pies). Los bloques de mineral formados entre los subniveles, constituyen el material que se va a minar mediante el empleo de barrenos largos y cargas explosivas (figura 25). Conforme la roca se fragmente y se colapse dentro del subnivel en explotación, el encape se debe hundir inmediatamente sobre el mineral fragmentado.

La metodología de minado del yacimiento requiere que se realice en forma descendente, por lo que no es posible realizar la clasificación o selección del mineral de alta ley dentro del rebaje, en consecuencia, el sistema de hundimiento por subniveles cae dentro de la categoría de métodos no selectivos.

Este método es generalmente usado para el minado de depósitos de baja ley con respaldos irregulares, por lo que se puede considerar como normal una recuperación de minado del orden de 75-80%, con una dilución substancial del 15 al 20%.

El hundimiento por subniveles ha sido empleado en yacimientos minerales de hematita blanda, donde el respaldo del alto ha estado formado por cuarcitas y pizarras silicosas y el respaldo del bajo por una formación de hierro pedernaloso fracturado y cementado parcialmente.

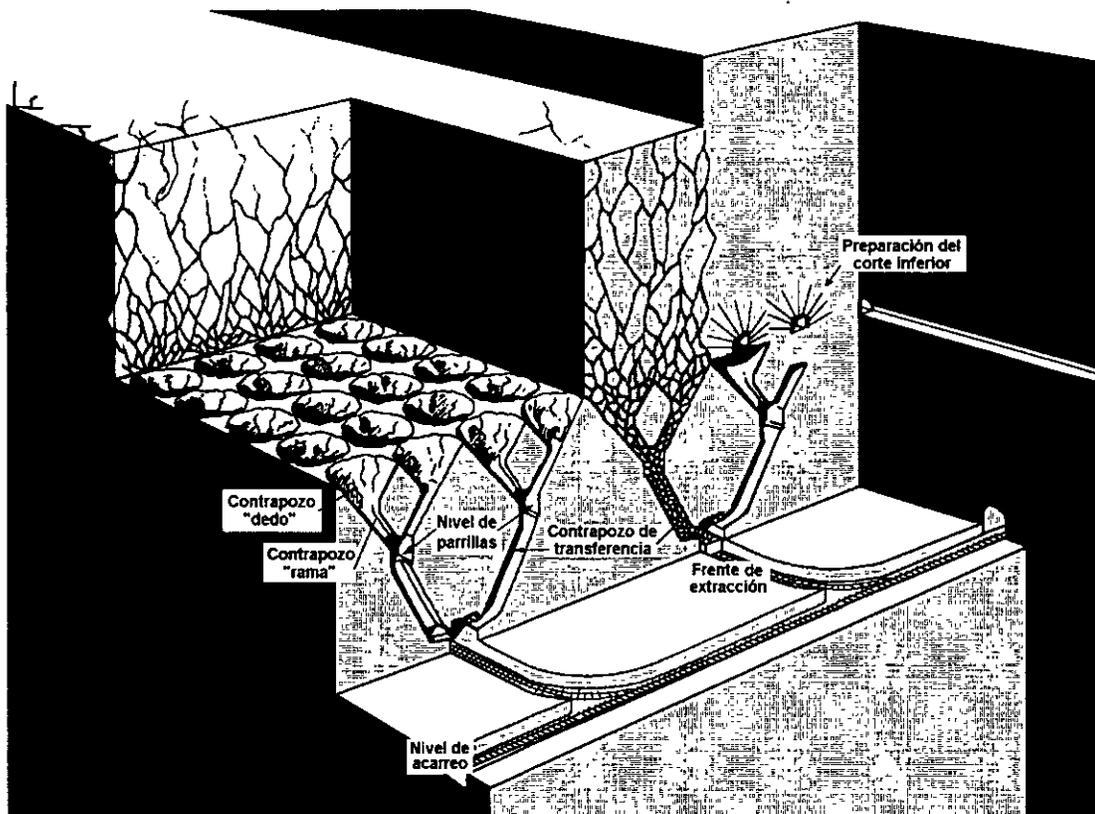


**Figura 25 HUNDIMIENTO POR SUBNIVELES**  
(Hustrulid, A.W., 1982)

**b) Hundimiento de bloques**

Este método de minado es aplicable a depósitos minerales masivos y diseminados, de grandes dimensiones horizontales y estructuralmente débiles (figura 26). El material mineralizado y el encape deben estar formados por rocas incompetentes que hundan libremente después de iniciados los trabajos de explotación. Los materiales típicos de esta clase de yacimientos serán formaciones rocosas altamente fracturadas o de estratos delgados, con resistencia muy baja a los esfuerzos de compresión en las juntas, fracturas y planos de contacto. El tipo del material del encape normalmente no es tan importante como el espaciamiento en juntas o fracturas, el grado de alteración de la roca y la ausencia de material cementante en las fracturas. Este tipo de material se debe fracturar o romper fácilmente, pero no debe tener tendencia a empacarse o a apretarse una vez que ha empezado el proceso de hundimiento, lo cual permite que la acción de fracturamiento de la roca por efecto del peso gravitacional sobre ella, se efectúe adecuadamente durante el ciclo.

El método de hundimiento de bloques es considerado por los expertos como un proceso de bajo costo y alta productividad, pero no selectivo. Los niveles principales de acarreo así como los cruceros de extracción, son construidos en la base del bloque por hundir como obras de preparación



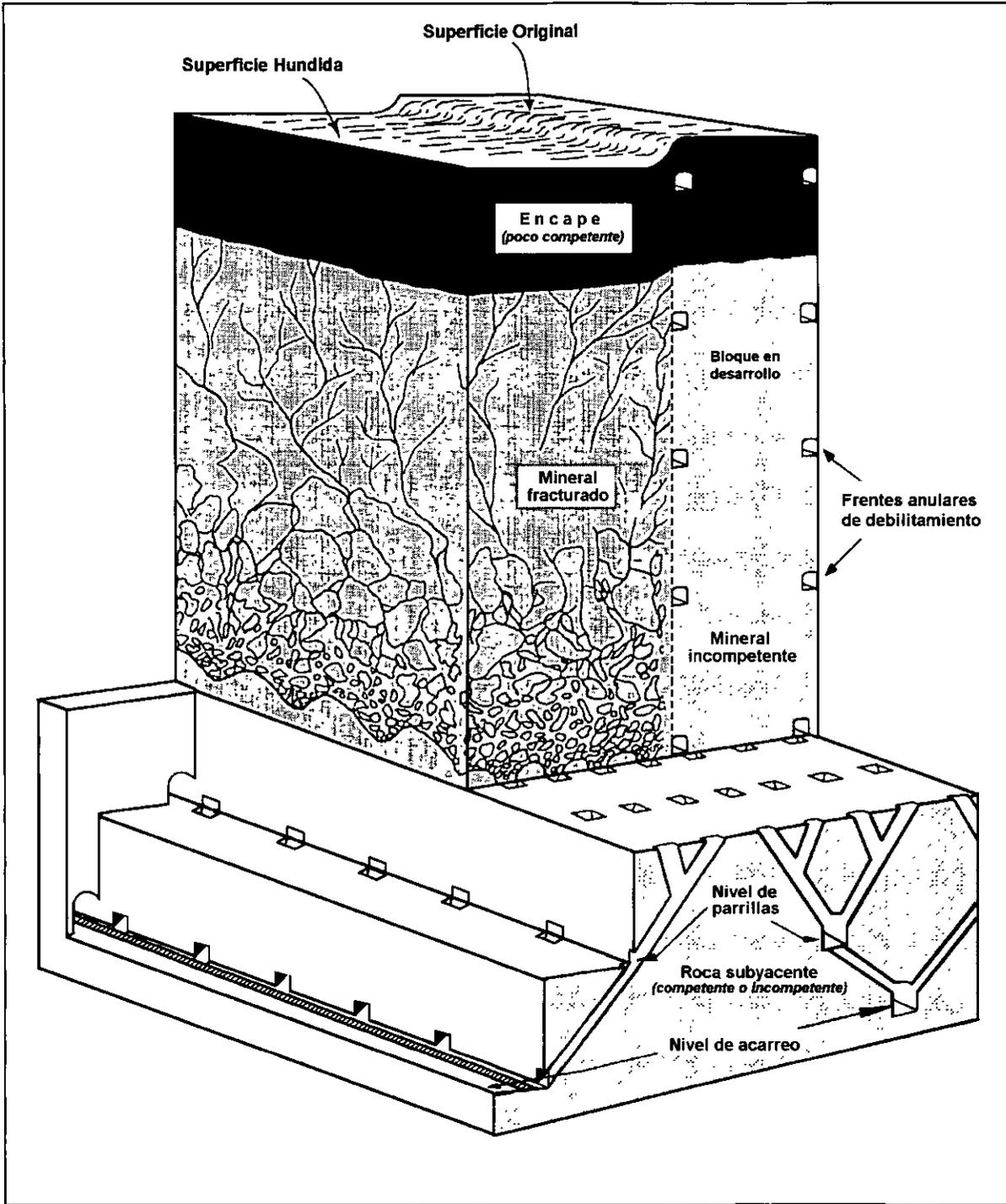
**Figura 26 HUNDIMIENTO DE BLOQUES EN UN CUERPO MASIVO**  
(Hustrulid, A.W., 1982)

previas a los trabajos de explotación. La altura de un bloque normalmente debe ser mayor a 30 m (100 pies), con una base que puede variar en dimensiones de acuerdo al tipo y consistencia de la roca. Durante la etapa de preparación, el bloque debe ser "cortado" en toda su base. Para ello, se debe abrir una gran "rebanada" o ranura horizontal en la parte inferior del bloque, para dejar a éste apoyado solamente en unos cuantos pilares distribuidos en la base, para posteriormente inducir el colapso o hundimiento del bloque mediante la voladura con explosivos de los pilares de apoyo y por acción de su propio peso. Al caer el bloque, el mineral se fragmenta y se extrae a través de múltiples tolvas coladas con anterioridad en el nivel de parrillas que conducen al nivel principal de acarreo. La acción de extracción en la base, promueve el movimiento vertical descendente del bloque por efecto de su propio peso, con lo cual se logra fracturar el mineral por cizallamiento

El bloque inicial requiere de algún tipo de acción que le permita "despegarse" de la roca encajonante para que se inicie el proceso de hundimiento. Esta acción se logra mediante el debilitamiento de los contactos del bloque con la roca huésped y con los bloques adyacentes de mineral, mediante el cuele de obras horizontales y verticales en toda la periferia del bloque (contrapozos, anillos, obras periféricas y abanicos de despegue), ver figura 27.

Con este minado se han logrado recuperaciones cercanas al 100%, sin embargo, debido a diluciones que existen durante el proceso, se requiere de cálculos frecuentes para actualizar la ley de corte, con lo que la recuperación total se reduce en alguna cantidad.

El hundimiento de bloques ha sido utilizado en depósitos diseminados de cobre en el suroeste de los Estados Unidos (Arizona); en depósitos de molibdeno en Colorado, depósitos de fierro en Michigan y depósitos de asbesto en Canadá. El método ha operado con bastante éxito a profundidades mayores de 600 m (2,000 pies).



**Figura 27 OBRAS DE PREPARACION PARA EL HUNDIMIENTO DE BLOQUES**  
(Clark & Lewis, 1964)

- ***Métodos especiales.***

Los métodos especiales de minado subterráneo, también llamados métodos indirectos, son fundamentalmente sistemas que emplean técnicas de disolución de los valores contenidos en el yacimiento. Son indirectos debido a que no es necesario "penetrar" físicamente al yacimiento para realizar su extracción, tal y como es el caso de los sistemas descritos con anterioridad. El minado por soluciones se usa en depósitos de tipo masivo, mantos estratificados, lenticulares o bolsas mineralizadas, donde el material rocoso se presenta en forma laminar, masiva o fracturada y el mineral que se va a recuperar es soluble en algún tipo de medio acuoso. Algunos minerales que son susceptibles de recuperación por estos sistemas, son: sal, potasa, azufre cobre, uranio y oro. La roca encajonante que rodea el mineral que se va a minar debe ser relativamente impermeable, con un encape lo suficientemente competente como para evitar hundimiento o cavitación durante el proceso.

Los minerales también se recuperan a partir de rocas fracturadas y trozos mineralizados remanentes después de la terminación de un sistema de minado convencional, ya sea subterráneo o superficial. Rebajes que ya fueron minados, pueden ser inundados con soluciones lixiviantes, estériles o pobres (provenientes de una planta de tratamiento por lixiviación) o permitir la percolación de aguas pluviales o freáticas al interior de los rebajes por tratar. En otros casos las soluciones lixiviantes se distribuyen por gravedad o por bombeo y se esparcen sobre el mineral por medio de tubos perforados, regadores, aspersores o cualquier otro medio adecuado de distribución de la solución.

Posteriormente las soluciones enriquecidas se recuperan por algún medio natural o mecánico para proceder a la extracción química del metal (generalmente por precipitación), en una planta de tratamiento metalúrgico. En la gran mayoría de los casos, todos los trabajos de "minado" son ejecutados en forma indirecta desde el exterior de la mina.

Existen dos tipos de riesgos ambientales en los procesos de extracción por solventes o lixiviación: la contaminación de las aguas subterráneas y la subsidencia o hundimiento de la superficie original del terreno. La contaminación radioactiva de las aguas en el tratamiento de minerales de uranio, es particularmente crítica.

En la actualidad existen tres métodos básicos para el minado por soluciones:

1) proceso Frasch; 2) disolución de minerales con agua caliente y 3) procesos de lixiviación.

**a) Proceso Frasch**

Este procedimiento se utiliza para el minado de domos de azufre, donde el material rocoso del encape es relativamente impermeable y competente, constituido generalmente por anhidrita, yeso o caliza. Estos materiales normalmente están cubiertos por estratos sedimentarios de diferentes grados de competencia. Los depósitos de azufre ocurren cerca de la parte superior y en los flancos externos de los domos salinos.

Para la aplicación del proceso *Frasch*, se requerirá disponer de una fuente abundante de agua de tratamiento, la cual debe ser sobrecalentada por encima de los 100°C de temperatura, con objeto de alcanzar el punto de fusión del azufre nativo o elemental. Para lograr el sobrecalentamiento sin llegar al punto de evaporación, el agua tiene que ser inyectada a presión dentro del depósito a través de tubos concéntricos instalados en barrenos o pozos previamente colados en retículas diseñadas específicamente para tal fin, de manera que algunos de estos barrenos sirvan como vía de inyección y otros (colados hacia la "falda" del domo) sirvan como "pozos" de desfogue para las aguas residuales que han perdido su temperatura de fusión.

El azufre fundido se bombea por sifoneo en forma fluida y caliente a través del espacio anular formado por los tubos concéntricos que acarrearán el agua sobrecalentada y el aire a presión, pasando en estas condiciones a la red de tubos de transporte que lo conducirán, ya sea a los depósitos o "vats" de solidificación o a los tanques térmicos que lo conservan fundido para su manejo y transporte en estado líquido.

Este método se usa extensivamente en los grandes depósitos azufreros de los estados de Louisiana, Texas y Florida, a profundidades mayores de 450 m (1500 pies). En México se explotan grandes yacimientos de azufre por el método Frasch en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca y Veracruz. Es importante destacar la presencia de graves problemas ambientales si no se tiene un buen manejo y deposición de las aguas residuales. También resulta normal que ocurran diferentes grados de subsidencia durante el proceso de minado, debido al desalojo del material dentro del domo.

**b) Disolución con agua**

Las técnicas de disolución se emplean en la explotación de mantos y domos salinos así como en depósitos de potasa. Este tipo de yacimientos, en general, están cubiertos por mantos sedimentarios relativamente impermeables y competentes. Las propiedades estructurales del material rocoso del

encape son más importantes que las de las rocas que constituyen el depósito, dado que se debe evitar el efecto de cavitación o hundimiento durante el proceso de extracción. La técnica de minado consiste básicamente en disolver los minerales solubles en agua dentro del mismo depósito, para lo cual se hace uso de grandes cantidades de agua que deben ser inyectadas al yacimiento a través de los barrenos de producción previamente colados. Durante el proceso el agua disuelve el mineral y la solución enriquecida o saturada, es retornada por bombeo de succión a las instalaciones de superficie para su tratamiento posterior. El método ha probado su eficiencia a profundidades mayores de 1800 m (6000 pies).

### c) Lixiviación

El proceso de lixiviación o de disolución de valores con soluciones ácidas, se emplea en depósitos auríferos, cupríferos y uraníferos, de forma que si se pretenden explotar in-situ, el encape del depósito tiene que ser removido por algún método adecuado, y el mineral perfectamente fracturado, por lo general con explosivos, para que las soluciones lixiviantes tengan contacto directo con el mineral pasando a través de las caras expuestas de los fragmentos. Otra forma de explotación consiste en minar el material por cualquiera de los sistemas subterráneos o superficiales tradicionales, depositando la roca fragmentada en terreros diseñados con propósitos específicos o en tinajas o piletas de lixiviación, en cuyo caso, el mineral debe pasar por una etapa previa de trituración para reducir aun más su tamaño. El objeto de lo anterior es el de disponer de una área suficiente para la irrigación y oxidación del mineral por efecto de las soluciones lixiviantes que se esparcen sobre el lote así formado. A ésta técnica en particular, se le conoce como lixiviación en terreros; y a la de inmersión en piletas como lixiviación en piletas.

La lixiviación también se emplea para la recuperación secundaria de minerales a partir de las colas o jales de una planta de concentración, razón por la cual algunos autores consideran las técnicas de lixiviación como un proceso metalúrgico y no como un método de minado propiamente dicho. La lixiviación de minerales se realiza por medio del paso de las soluciones ácidas a través del material rocoso permeable, las cuales actúan química y/o bacteriológicamente con el mineral, disolviéndolo de su matriz para ser removido en forma de solución.

Es de singular importancia que los minerales que se van a lixiviar posean una matriz con bajo contenido de constituyentes consumidores de ácido (ejemplo: calizas), para evitar el encarecimiento del método. El ácido más comúnmente empleado es el ácido sulfúrico por ser el más comercial y el más barato, aunque también se puede emplear con buenos resultados (dependiendo del tipo de mineral a tratar), el ácido nítrico, el clorhídrico y algunos otros más caros. En la preparación de soluciones para la disolución de valores auríferos se emplea el cianuro de sodio y/o el cianuro de potasio, por lo que a este procedimiento en particular también se le conoce con el nombre específico de *cianuración*.