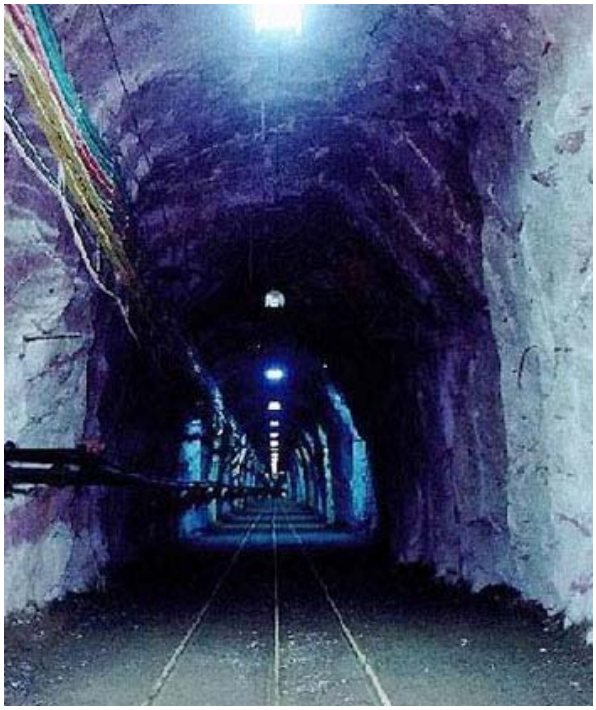
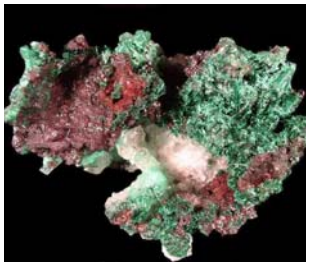
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

APUNTES DE
CURSO DE EXPLOTACIÓN DE MINAS



Preparado por Julián Ortiz C.

INTRODUCCIÓN



Un poco de historia

La minería ha sido parte de la historia del hombre desde la prehistoria. En Chile, la importancia de la minería se puede trazar a los incas. La relevancia de la minería durante la Colonia y en el Chile Republicano también es evidente. La Chilenización y Nacionalización del Cobre en épocas más recientes marcaron en buena parte la historia política de nuestro país.

A continuación se listan hechos relevantes en la historia de la minería en lo referente a Chile:

- Incas explotan oro (lavaderos), cobre y piedras preciosas (turquesa)
- Españoles en busca de riquezas mineras (oro)
- Chile republicano ha tenido dos guerras: ambas por razones mineras
    - Confederación Perú-Boliviana (1835) → Guano
    - Guerra del Pacífico (1879) → Salitre
- Altos y bajos en la minería del oro, fuerte desarrollo en el S. XVIII y decadencia en el S. XIX (Jesus María, Las Vacas, Andacollo, El Bronce de Petorca, etc.)
- Auge de la minería de la plata en el S. XIX (Agua Amarga, Chañarcillo, Chimberos, Tres Puntas, Caracoles, etc.)
- 1830-1860: Valor de producción de la plata superó lejos a todo el oro que se ha producido hasta esa fecha
- Desarrollo de la minería del Cobre: Chile primer productor del mundo entre 1860-1880
- Construcción de puertos y fundiciones en el Norte Chico
- Producción de 40.000 ton Cu / año era 25% de la producción mundial
- Entre 1830-1880 Atacama fue la provincia más prolífera del país
- Copiapó era centro político, cultural y económico
- Se construyó el primer ferrocarril en Chile entre Copiapó y Caldera
- Copiapó: primera ciudad de Chile con alumbrado a gas
- Se invierten ganancias en viñas, líneas de vapores, bancos, ferrocarriles y palacios en la zona central de Chile
- A mediados del S. XIX comienza paralelamente la explotación del carbón en el Golfo de Arauco: Se construye la primera central hidroeléctrica de Chile en 1897, en Chivilingo (Lota)
- Auge del salitre después de la Guerra del Pacífico y decadencia del cobre: Desarrollo de Iquique, Tocopilla, Antofagasta y Taltal

- El 28 de Diciembre de 1945 se perfora el primer pozo de petróleo en Tierra del Fuego
- A partir de 1965 comienza la ***Chilenización*** y posteriormente en 1971, la ***Nacionalización*** de la Gran Minería del cobre: Profesionales chilenos se hicieron cargo de las operaciones y desarrollo de la Gran Minería
- Impresionante auge de la minería del cobre y oro a partir de 1980
- Otras sustancias o elementos no han sido relevantes en la historia minera de Chile (razones geológicas)

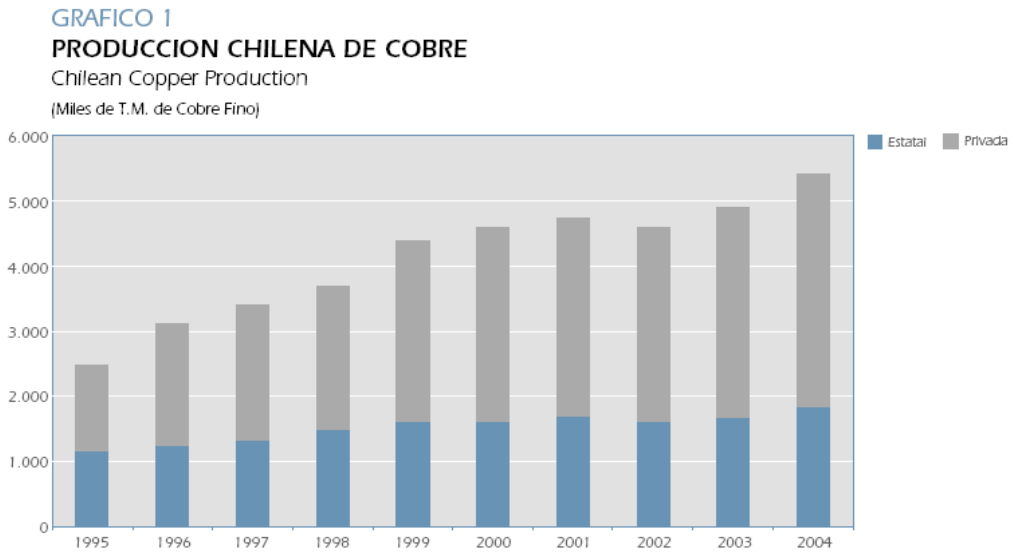
La minería hoy

La minería de hoy en Chile se destaca por sobre otras actividades económicas. Los montos de las ventas de productos mineros son gigantescos si se comparan con otras áreas de la actividad económica de Chile. En particular, el cobre lidera las ventas con un orden de magnitud más que cualquier otro producto.

Principales producciones mineras (2004)

Producto	Ton Anuales	Valor Producción Anual (millones de US$)
Cobre	5.412.000	14.500
Molibdeno	42.000	1.400
Oro	40	320
Plata	1.360	113
Hierro	8.000.000	160
Yodo	15.000	175
Salitre	1.400.000	80
Carbonato de Litio	50.000	65

Producción de Cobre (fuente: Cochilco)



Minería del Cobre

De la producción de cobre, aproximadamente el 85% proviene de faenas que explotan el recurso por rajo abierto, mientras que sólo el 15% restante lo hace a través de métodos de explotación subterráneos. Aproximadamente dos tercios del mineral extraído se procesa mediante el proceso típico para sulfuros (flotación-fundición), mientras que el resto corresponde al proceso de óxidos (proceso de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención). Sin embargo, se debe destacar que la producción mediante este proceso hidrometalúrgico corresponde aproximadamente al 60% de la producción mundial que se obtiene a partir de mineral oxidado en el mundo, poniendo a Chile en una posición de liderazgo en este tipo de procesos.

El desarrollo típico de un proyecto minero toma muchos años, tal como se muestra en la figura siguiente, donde se puede apreciar que pueden pasar fácilmente diez años desde que se inicia la exploración de un prospecto hasta que ésta pasa a ser una mina en producción.

Desarrollo de un proyecto cuprífero

La inversión necesaria típica para un proyecto cuprífero de gran minería bordea 4000-6000 US$/ton Cu fino por año. Es así como una mina que proyecta producir 100.000 tpa de Cu fino, requerirá una inversión de sobre 400 millones de dólares normalmente.

A continuación se entrega una lista de los mayores proyectos nuevos y expansiones de los últimos 15 años en Chile.

Los grandes proyectos de cobre de los últimos 15 años y las expansiones de Codelco (>100.000 tpa):

1ª Región
- Collahuasi
- Cerro Colorado
- Quebrada Blanca

2ª Región
- Escondida
- Radomiro Tomic
- El Abra
- Zaldivar
- Mantos Blancos
- El Tesoro
- Chuquicamata

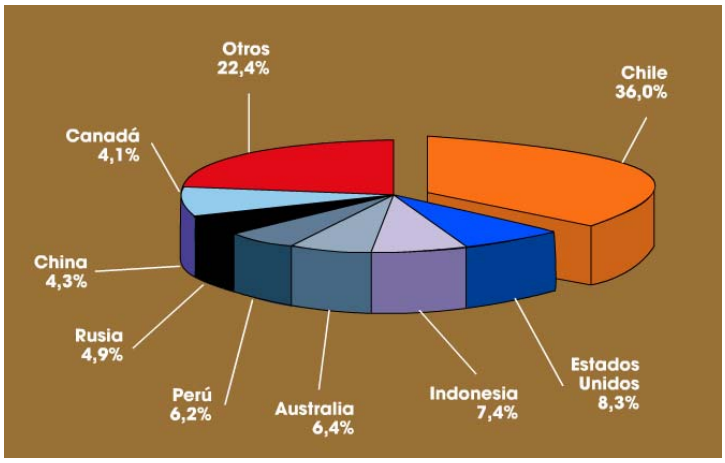
3ª Región
- Candelaria

4ª Región
- Los Pelambres

5ª, 6ª y Región Metrop.
- Andina
- Los Bronces
- El Teniente

A continuación se muestra una serie de estadísticas que indican la posición de Chile en cuanto a la producción de cobre mundial, al consumo, precio y costo de producción, obtenidas del sitio web de la Comisión Chilena del Cobre (www.cochilco.cl).

Producción Mundial de Cobre.
Participación de Chile (2003) (Fuente: Cochilco)



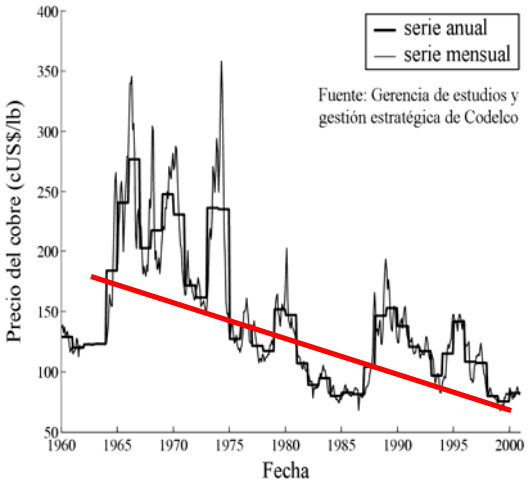
Principales consumidores del cobre en el mundo
(miles de Ton de Cu - 2003) (Fuente: Cochilco)

• China	3.065	• Italia	679
• Estados Unidos	2.326	• Taiwán	619
• Japón	1.202	• Francia	551
• Alemania	1.083	• Rusia	447
• Corea del Sur	900	• México	411

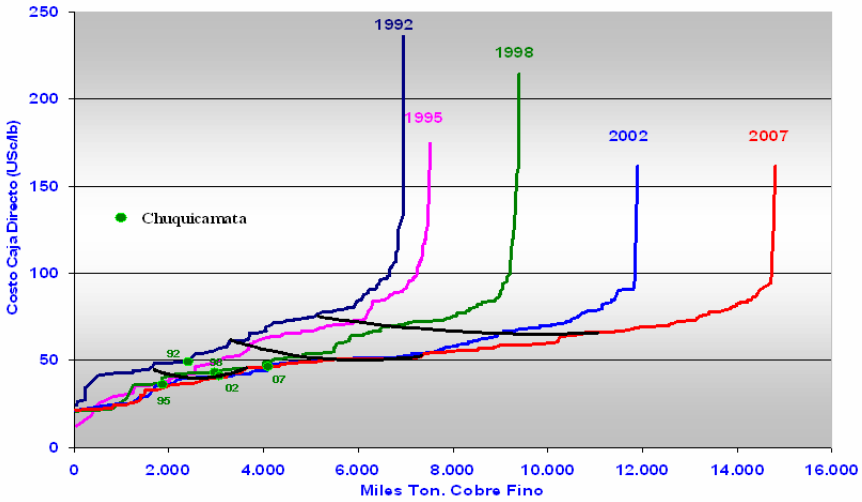
Consumo per cápita:

- 1 a 2 kg de Cu/hab año en paises en desarrollo
- 15 a 20 kg de Cu/hab año en paises desarrollados

Tendencias del precio del cobre:



Tendencias de los costos directos de producción



Desglose aproximado (en %) de costos directos

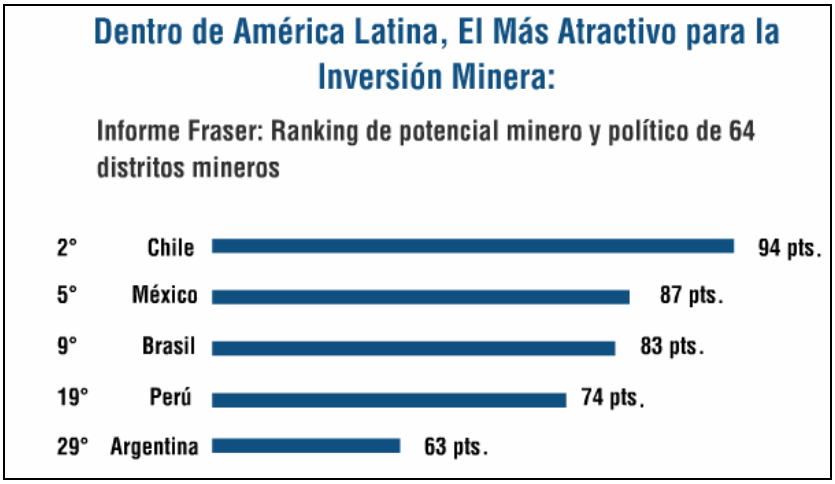
- Mano de obra propia 18%
- Insumos 35%
- Energía 12%
- Servicios de terceros 20%
- Otros 15%

→ Total (40 a 50 cUS$/libra): 180 a 220 millones de dólares al año para una faena de 200.000 tpa de Cu
→ Por cada centavo adicional en el precio del cobre Chile ingresa 120 millones de US$ anualmente

Fortalezas y debilidades

La minería en Chile tiene las siguientes fortalezas y debilidades, las que constituyen los desafíos de los profesionales de la minería de las próximas décadas:

- Fortalezas
  - Recursos minerales en abundancia y de buena calidad (especialmente cobre) → Aproximadamente 1/3 de reservas mundiales de cobre
  - Institucionalidad eficiente y marco jurídico claro
  - Infraestructura desarrollada. Cercanía a puertos
  - Proyectos en zonas desérticas
  - Mano de obra especializada y profesionales calificados
  - Costos razonables



	Posición 2004	
	A. Latina	Mundo
Cobre	1	1 (37,5%)
Molibdeno	1	1 (28,1%)
Plata	3	5 (7,3%)
Oro	3	13 (1,8%)
Nitrato	1	1 (100%)
Boratos	1	3 (9,9%)
Carb . Litio	1	1 (42%)
Yodo	1	1 (55%)

- Debilidades
  - Requerimiento de grandes inversiones
  - Fuertes fluctuaciones de los precios de los metales
  - Escasa comprensión de la comunidad, tanto local como del país
  - Baja inversión en investigación y desarrollo

- Imagen negativa en relación al medio ambiente y seguridad
- Proyectos en zonas remotas (sobre 3000 msnm)

Los encadenamientos en el proceso minero (cluster)

- Cluster: concentración de instalaciones físicas de empresas en torno a una misma actividad en una localidad geográfica determinada.
  - Desarrollo de mercados de insumos específicos
  - Mano de obra especializada
  - Se hace investigación y desarrollo en conjunto (entre todas las empresas) lo que conduce a innovaciones tecnológicas de punta
  - Educación superior focalizada
  - Empresas de ingeniería y construcción con énfasis en el tema del cluster
  - Instituciones financieras especializadas en minería

- Características de un cluster para Chile
  - Ventajas naturales en cuanto a reservas minerales
  - Tamaño del sector Cobre (5.500.000 tpa)
  - Importante flujo de dinero (por año):
    - Insumos en Chile
    - Remuneraciones
    - Serv. de terceros
    - Energía
  - Proyectos de la última década (por año)
    - Ingeniería
    - Construcción
    - Adquisiciones

Comentarios

- La minería ha sido para Chile el sector económico de mayor relevancia:
  - Del orden del 10% del PGB
  - Más del 50% de la entrada de divisas
  - La inversión materializada en los últimos años ha sido captada en más del 60% por la minería

- Grandes posibilidades en el mediano y largo plazo:
  - Recursos suficientes. Cada año aumentan: ¿recursos no renovables o no agotables?
  - Infraestructura adecuada
  - Tratados internacionales para fortalecer la demanda

- Minería globalizada. Las grandes empresas mineras internacionales están en Chile
- La sustitución del Cobre no se visualiza amenazante (consumo per cápita de cobre crece vertiginosamente en los países en desarrollo)
- País ordenado y socialmente estable

- Los desafíos a futuro:
  - Consolidar el liderazgo en la producción de cobre
  - Asegurar y desarrollar los mercados
  - Reforzar la investigación y las innovaciones tecnológicas para mantener competitividad: exportación de tecnologías y mayor valor agregado
  - Mantener marco jurídico y tributario estable, resolviendo adecuadamente el tema de distribución de las utilidades (royalty)
  - Desarrollar en serio el tema del cluster
  - Resolver el desarrollo sustentable (ambiental, social y económico)
  - Formar profesionales altamente capacitados en todos los niveles y en todas las especialidades de la ingeniería

ESTADÍSTICAS DE LA MINERÍA Y EL COBRE EN CHILE

La información que se presenta a continuación corresponde al reporte anual generado por Cochilco y que puede ser consultada en su versión completa en el sitio de Cochilco (www.cochilco.cl).

GRAFICO 1
PRODUCCION CHILENA DE COBRE
Chilean Copper Production
(Miles de T.M. de Cobre Fino)

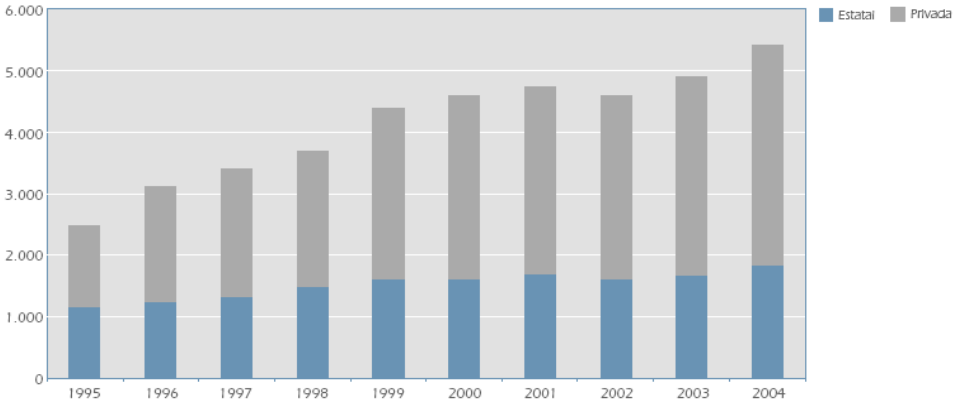
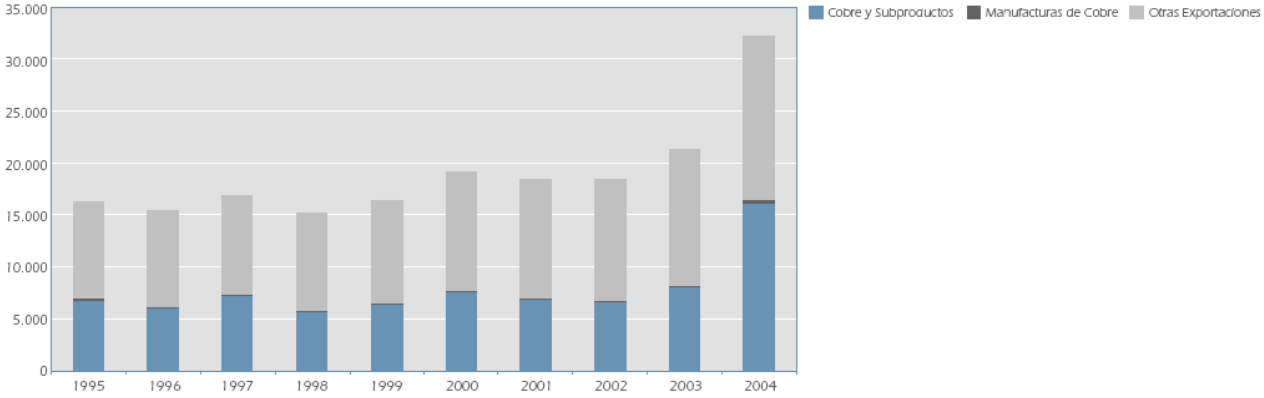
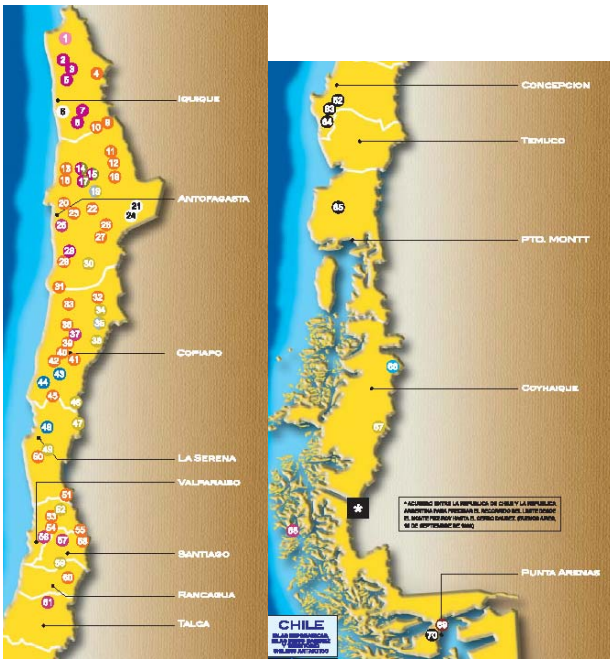


GRAFICO 2
EXPORTACIONES CHILENAS DE BIENES
Chilean Exports of Goods
(Millones de US$)





Productor	Producción Miles TMF Cu (2004)
Escondida	1195
Chuquicamata	691
Collahuasi	481
Los Pelambres	362
El Teniente	435
Radomiro Tomic	291
Sur Andes	300
El Abra	218
Andina	240
Candelaria	200
Mantos Blancos	155
Zaldívar	148
Cerro Colorado	120
El Tesoro	98
Enami	120
Quebrada Blanca	76

GRAFICO 3

EXPORTACIONES DE COBRE POR PRODUCTO

Copper Exports by Type of Product

(Miles de T.M. de Cobre Fino)

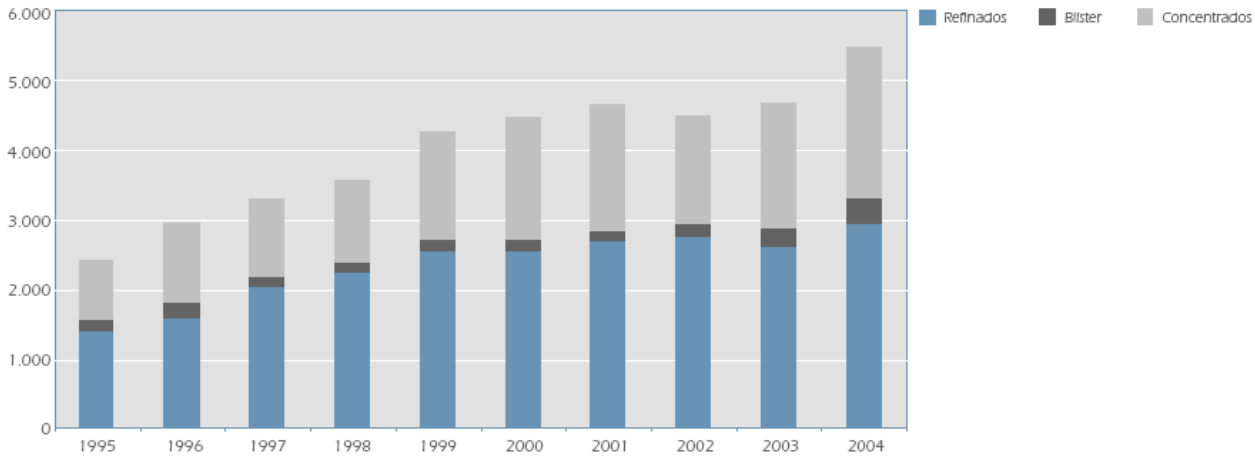


GRAFICO 4

EXPORTACIONES DE COBRE POR DESTINO

Copper Exports by Destination

(Miles de T.M. de Cobre Fino)

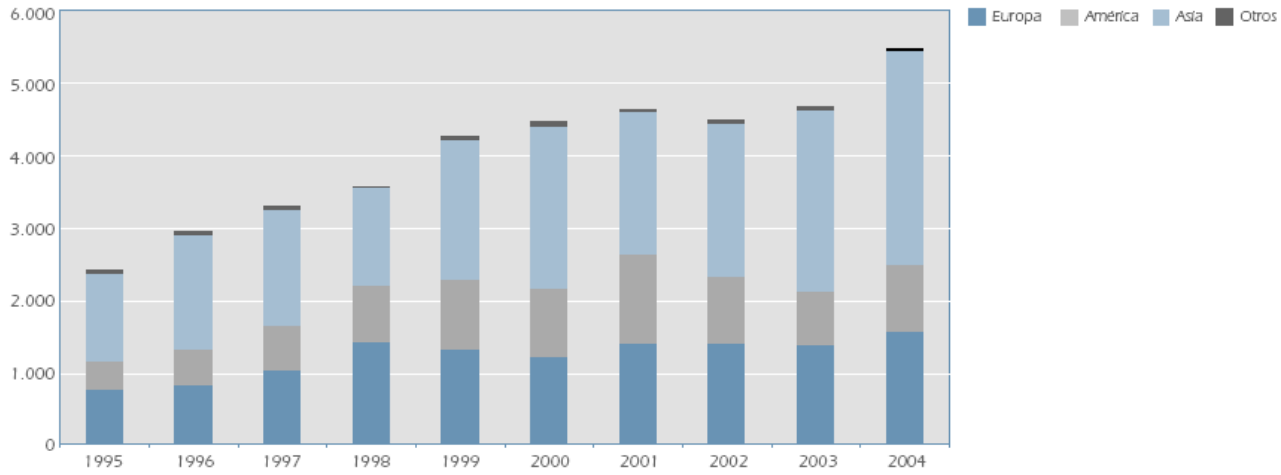
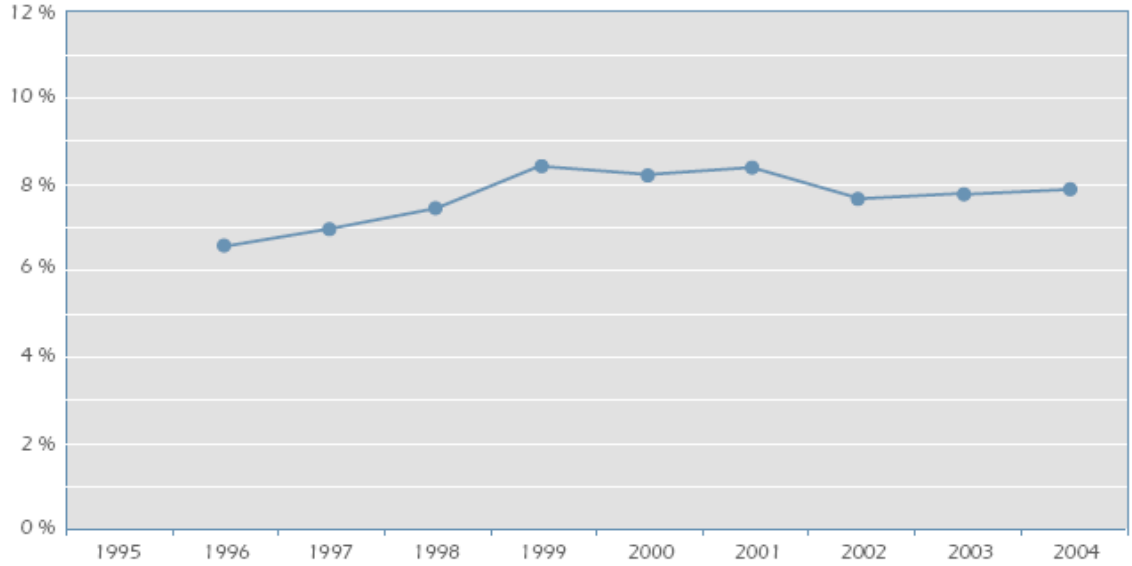


GRAFICO 5

PARTICIPACION DEL SECTOR MINERO EN EL PIB

Share of the Mining Sector in GDP

(% de participación)



Sector minero participa en ~8% del PIB

GRAFICO 6

INVERSION EXTRANJERA MATERIALIZADA

Effective Foreign Investment

(Millones de US$)

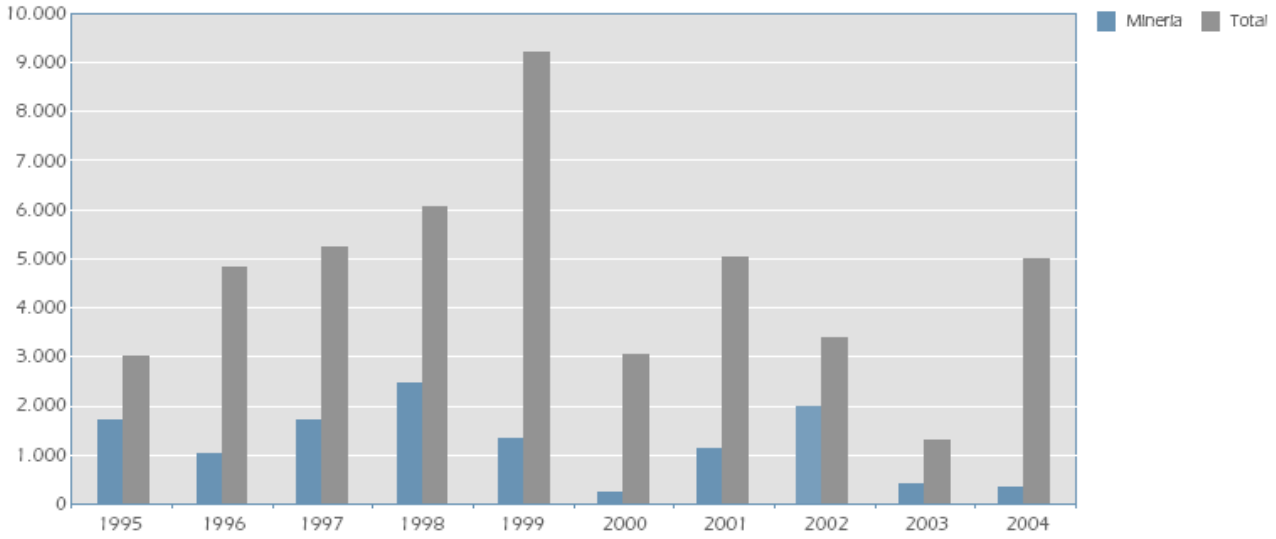
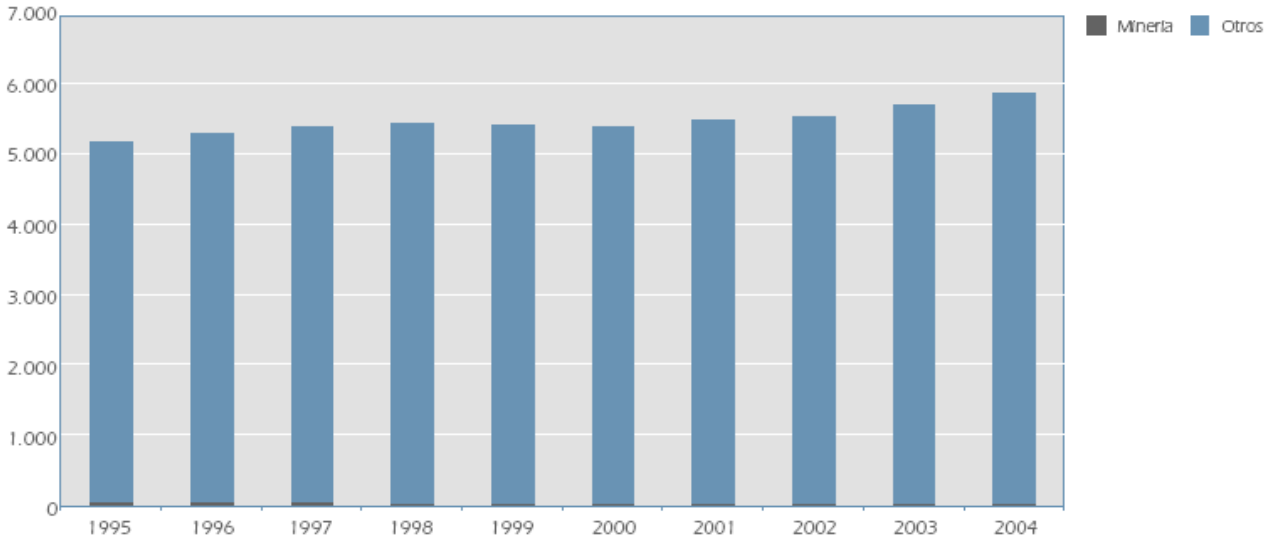


GRAFICO 7

EMPLEO Y MINERIA

Employment and Mining

(Miles de Trabajadores)



→ 0.86% de fuerza laboral total
→ 74% de fuerza laboral minera trabaja en minería del cobre

GRAFICO 8

PRODUCCION MUNDIAL DE COBRE DE MINA

World Mine Production of Copper

(Miles de T.M. en Cobre Fino)

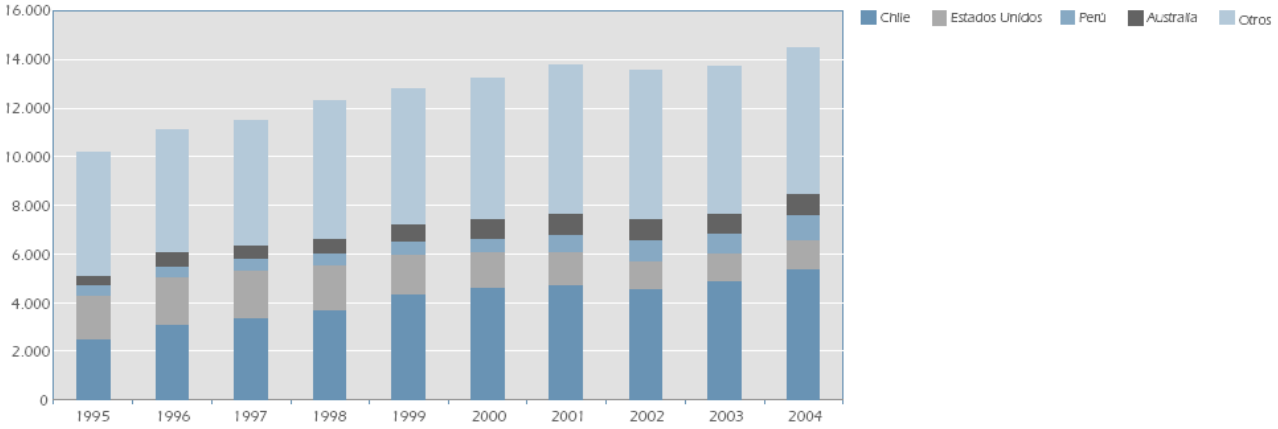


GRAFICO 9

PRODUCCION MUNDIAL DE COBRE SX-EW

World Production of SX-EW Copper

(Miles de T.M. en Cobre Fino)

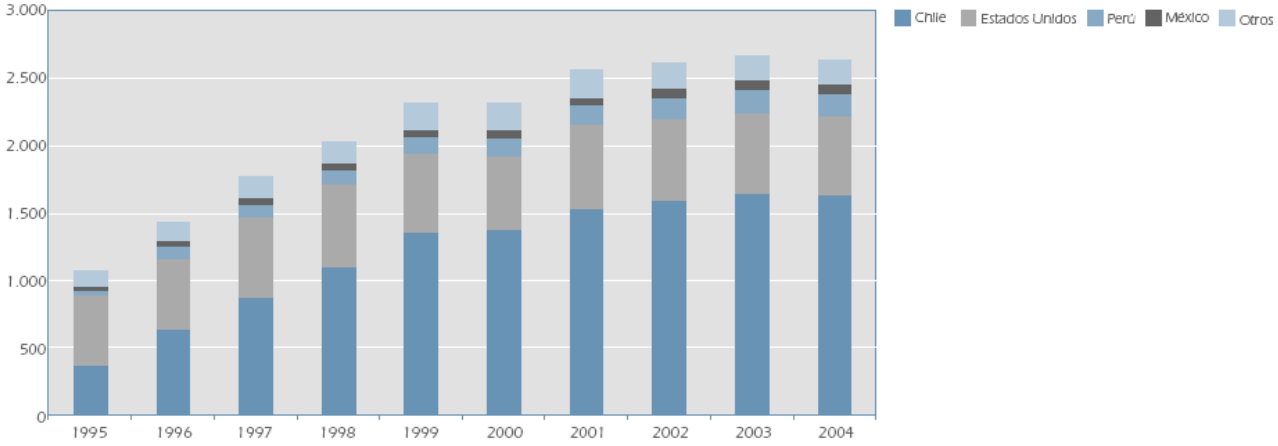


GRAFICO 10

PARTICIPACION EN EL CONSUMO MUNDIAL DE COBRE REFINADO 2004

Participation in World Comsumption of Refined Copper 2004

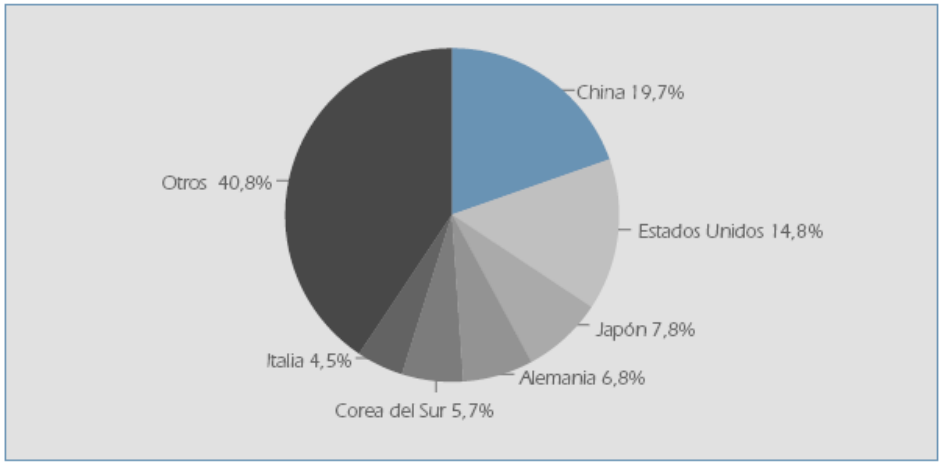


GRAFICO 11

VARIACION EN EL PRECIO RELATIVO DEL COBRE 1985-2004

Change in Copper Relative Price1985-2004

(%)

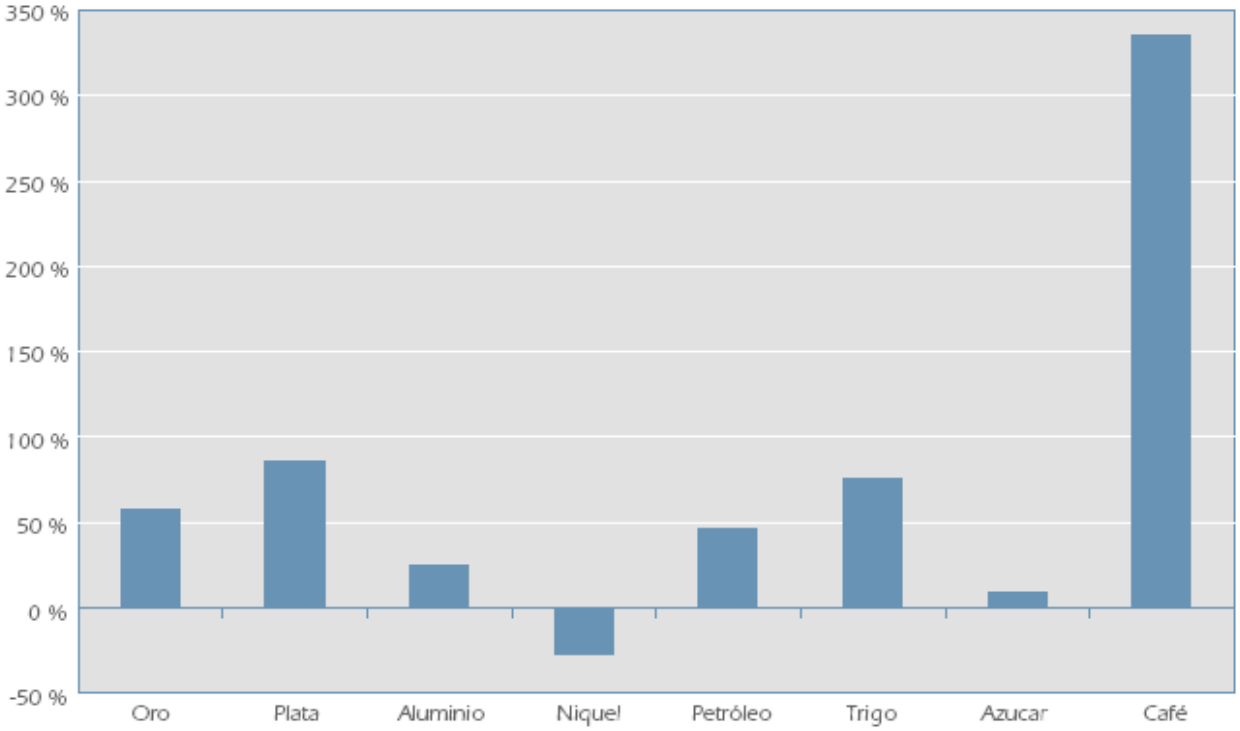


GRAFICO 12

PARTICIPACION REGIONAL EN INVERSION EXTRANJERA MATERIALIZADA EN MINERIA 1974-2004 SEGUN DL-600

Regional Participation in Effective Foreign Investment in Mining 1974-2004 under DL-600

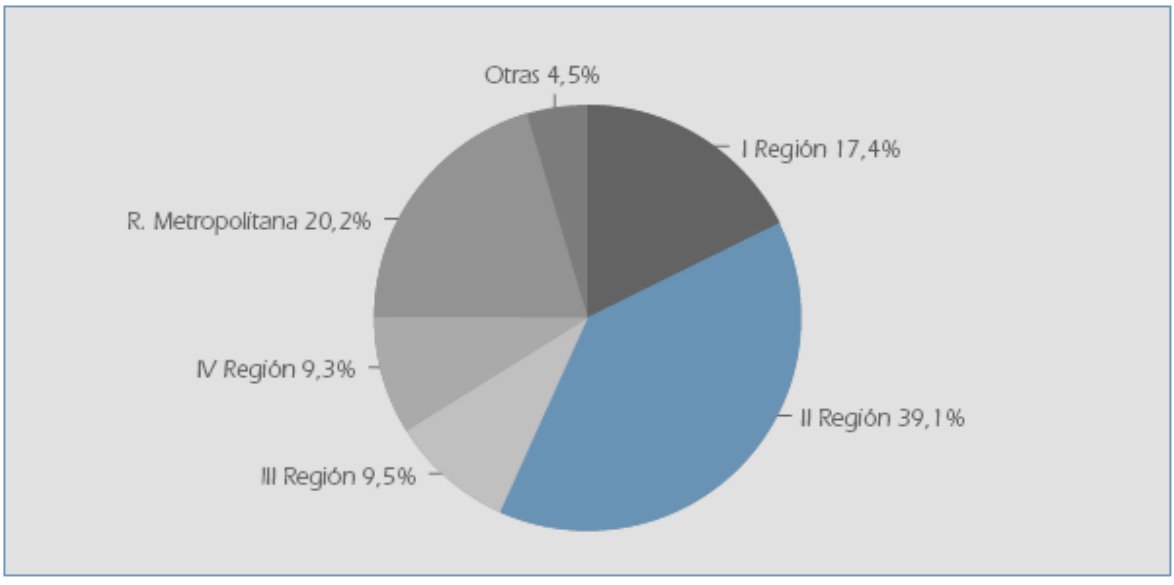


GRAFICO 13

PARTICIPACION REGIONAL EN LA PRODUCCION DE COBRE 2004

Regional Participation in Copper Production 2004

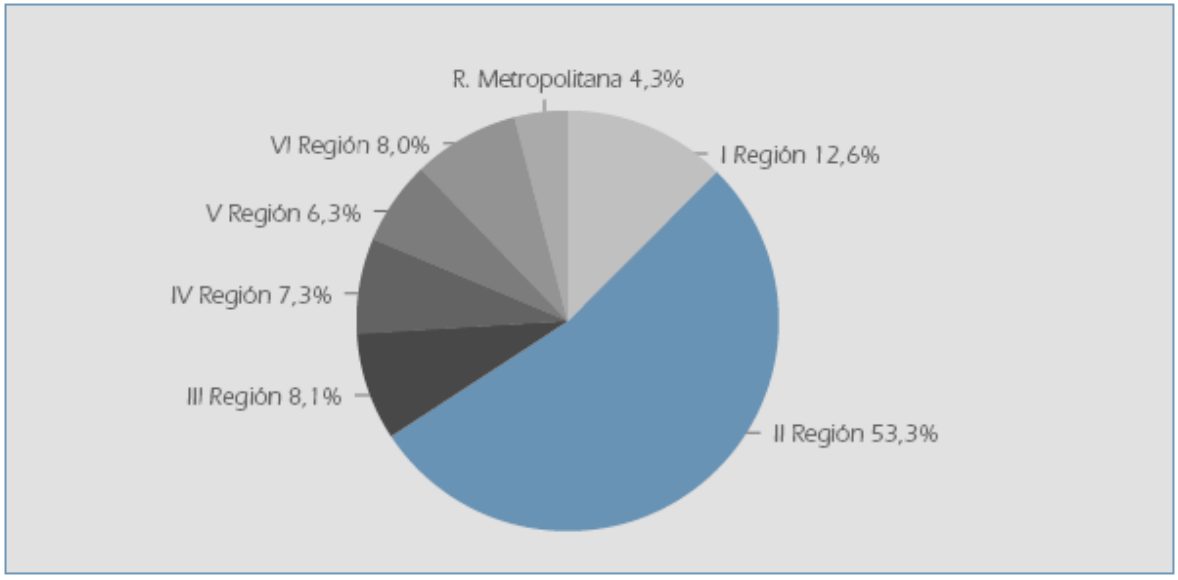
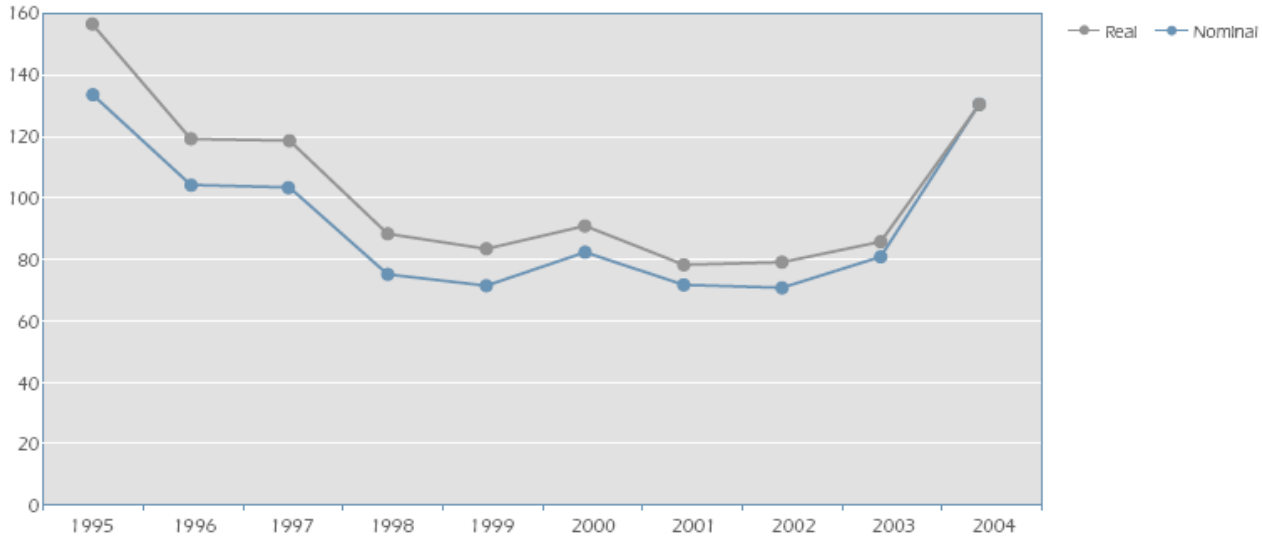


GRAFICO 14

PRECIO DEL COBRE BOLSA DE METALES DE LONDRES

Copper Price in London Metal Exchange

(¢ / Lb)



Precio del Cobre Promedio

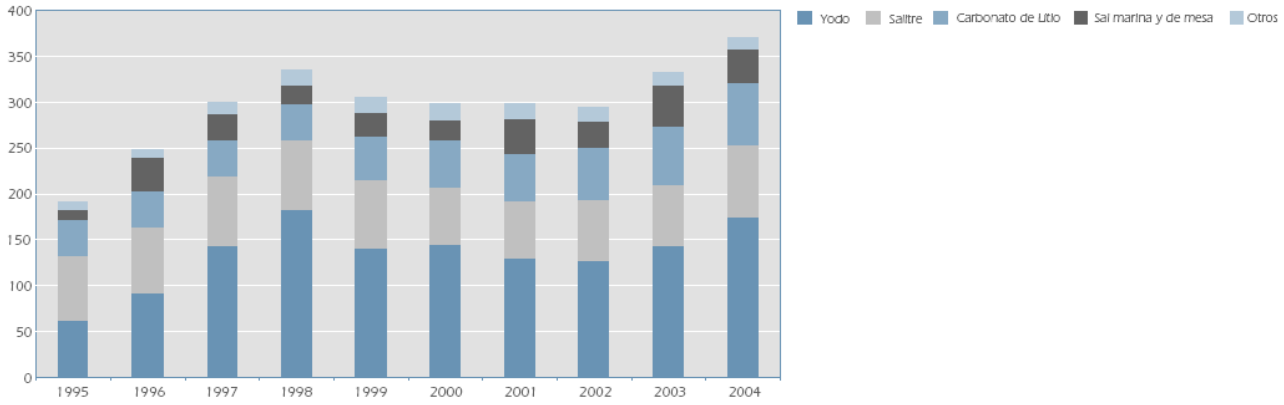
- 2003: 80.7 cUS$/lb
- 2004: 130.1 cUS$/lb
- 2005: 167.1 cUS$/lb
- 2006*: ~220 cUS$/lb

GRAFICO 15

EXPORTACIONES MINERIA NO METALICA

Export of Industrial Minerals

(Millones de US$)



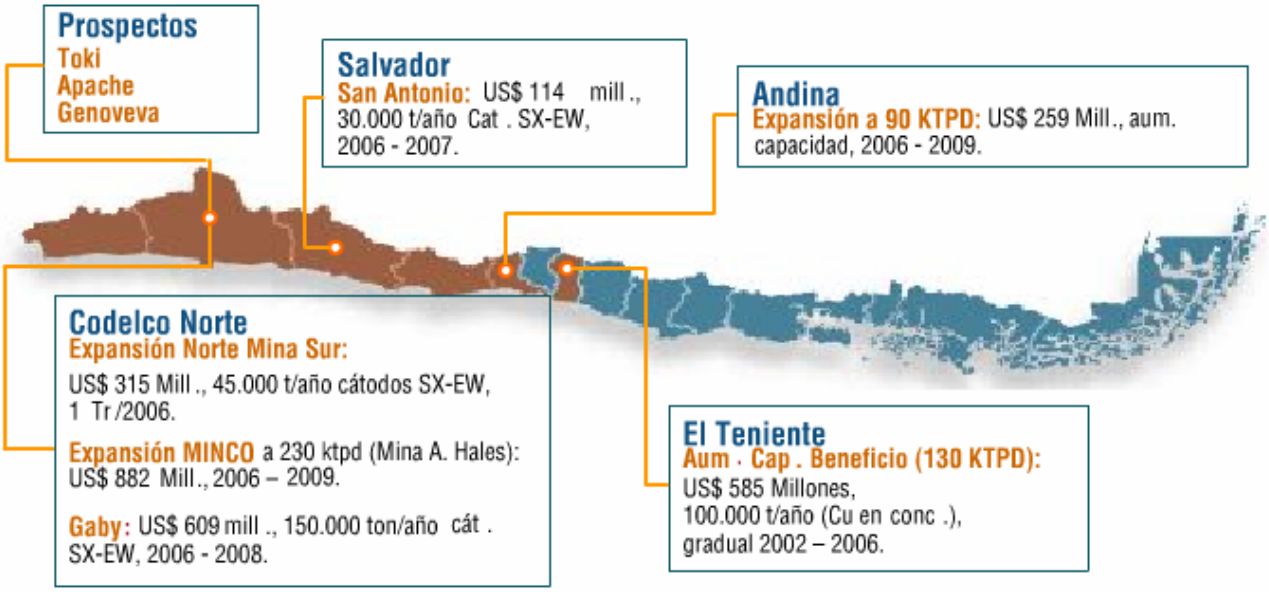
Chile es :

- 1er productor de cobre del mundo
- 13º productor de oro del mundo
- 5º productor de plata del mundo
- 1er productor de molibdeno

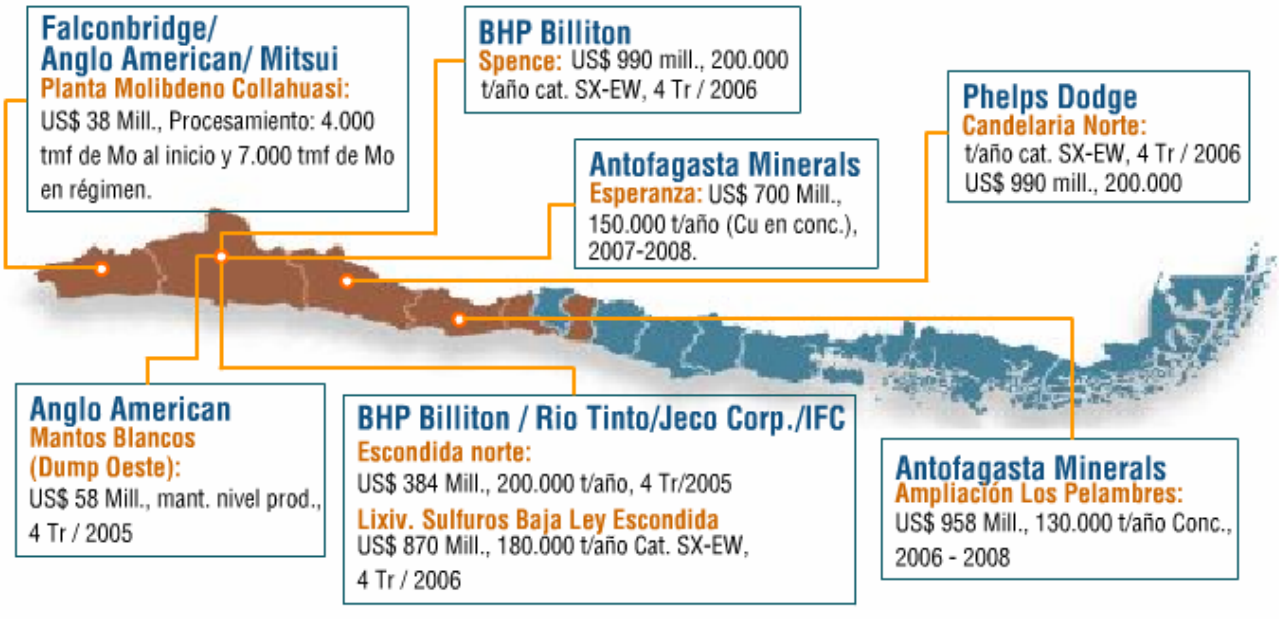
	Posición 2004	
	A. Latina	Mundo
Cobre	1	1 (37,5%)
Molibdeno	1	1 (28,1%)
Plata	3	5 (7,3%)
Oro	3	13 (1,8%)
Nitrato	1	1 (100%)
Boratos	1	3 (9,9%)
Carb . Litio	1	1 (42%)
Yodo	1	1 (55%)

Inversiones Mineras en Chile: 2005-2010 Principales Proyectos

Codelco - Chile



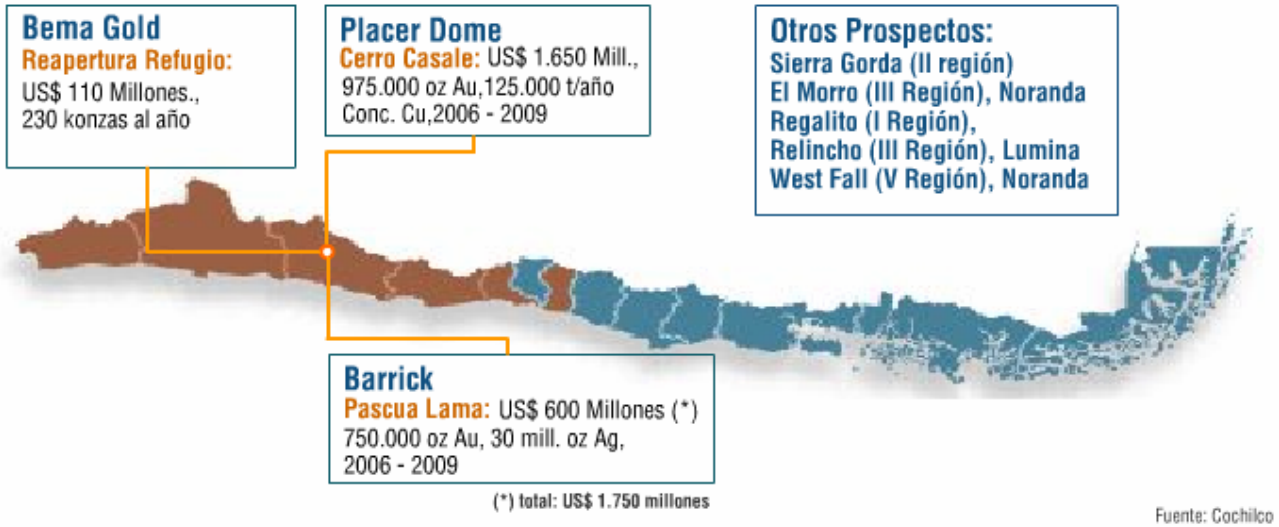
Inversiones Mineras en Chile: 2005-2010 Principales Proyectos



Inversiones Mineras en Chile: 2005-2010 Principales Proyectos

Inversión Minera 2005 - 2010 (US$ millones)

I Región	II Región	III Región	IV Región	V Región	VI Región	TOTAL
38	4.820	3.000	960	260	590	10.218



(*) total: US$ 1.750 millones

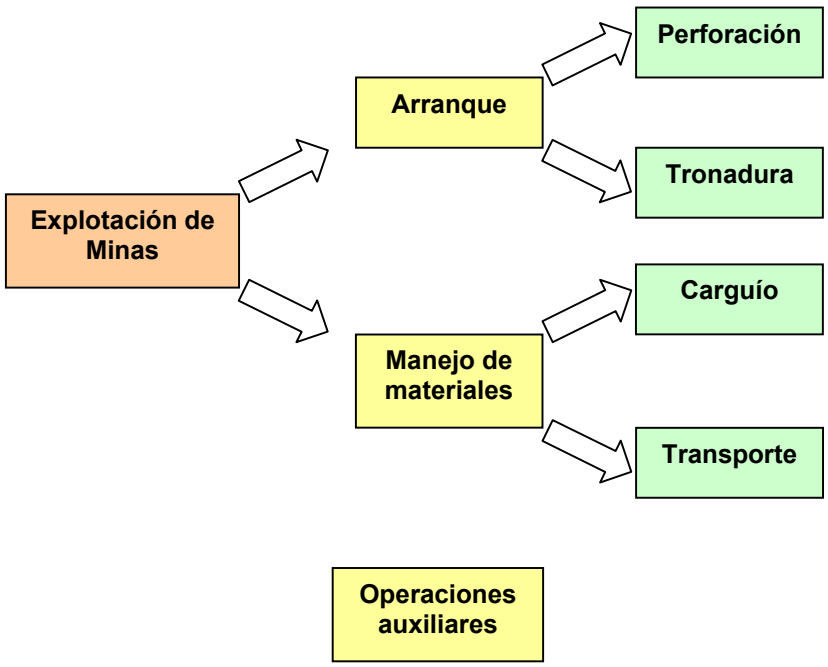
Fuente: Cochilco

LA EXPLOTACIÓN DE MINAS

La **explotación de minas** es el conjunto de actividades, operaciones o trabajos que es necesario realizar para separar físicamente los minerales desde su ambiente natural y transportarlos hasta las instalaciones de procesamiento. Consiste, por lo tanto, en la ejecución secuencial de dos operaciones básicas: el arranque y el manejo de materiales.

Arranque: Se denomina arranque al proceso de separar o arrancar el mineral de la corteza terrestre. Salvo algunas excepciones, esta operación se realiza en la mayoría de los casos haciendo detonar cargas explosivas emplazadas en huecos cilíndricos perforados en el macizo rocoso. Se distingue así entre las suboperaciones de **Perforación** y **Tronadura**.

Movimiento o manejo de materiales: Este proceso implica a su vez la ejecución combinada, en varias instancias, de las suboperaciones de **Carguío** y **Transporte**.



La perforación, tronadura, carguío y transporte, junto con la ventilación, se denominan operaciones unitarias. Son las operaciones independientes que realizadas en cierta secuencia permiten la explotación de un depósito, o su desarrollo.

Antes de comenzar a describir las operaciones unitarias, es necesario definir ciertos términos para evitar confusión posteriormente, cuando se describan éstas y cuando se detallen los métodos de explotación.

Mineral: Es una sustancia inorgánica de ocurrencia natural en la corteza terrestre, que posee un conjunto distintivo y característico de propiedades físicas y una composición que puede ser expresada por una fórmula química. Es decir, los minerales son combinaciones definidas y precisas entre elementos químicos.

De las minas, por lo general, se extraen rocas. Sólo en casos excepcionales se extraen elementos químicos o minerales en estado puro. Las rocas son agregados de minerales, es decir, combinaciones variables entre diferentes minerales.

En la actualidad, se conocen del orden de 104 elementos químicos. Entre ellos, 15 han sido obtenidos en forma sintética en laboratorios, sin detectarse su presencia en forma natural en la corteza terrestre y otros pocos, los gases nobles, han permanecido siempre en la corteza terrestre. Del resto, sólo 8 elementos constituyen el 92% de la corteza terrestre: O 47%, Si 28%, Al 8%, Fe 5%, Na – Mg – K – Ca un poco menos de 4%. Estos elementos, conjuntamente con los otros menos comunes dan origen a aproximadamente 2.000 minerales diferentes.

Recursos geológicos: Se entiende por recursos al conjunto de unidades de roca, generalmente definidas a través de un modelo de bloques con leyes estimadas mediante algún método, que poseen una concentración de un elemento o mineral anómala respecto a su entorno y que posee características de continuidad geológica confirmadas mediante sondajes y mediante la interpretación experta de un geólogo con experiencia en ese tipo de mineralización.

Reservas mineras: Corresponden a la porción de los recursos que es factible de extraerse generando un beneficio económico y que considera las características de continuidad de la mineralización, continuidad de las leyes y una serie de factores que modifican el valor del recurso, tales como factores políticos, financieros, medioambientales, laborales, geográficos, etc. Las reservas son la parte del recursos que puede extraerse una vez que se han tomado en cuenta los factores tecnológicos de diseño y las condiciones financieras del momento y lugar del proyecto.

Yacimiento minero: Se habla de yacimientos en un sentido amplio al referirse a una anomalía geológica que implica la concentración fuera del nivel normal que se encuentra en la roca, de algún elemento o mineral de interés (recursos geológicos). Implica una concentración desde un punto de vista geológico, sin necesariamente hablar de su potencial beneficio económico. Sin embargo, en el marco de este curso, se entenderá por yacimiento minero a un sector limitado de la corteza terrestre que posee concentraciones de minerales o elementos que tienen un potencial interés económico y que por lo tanto pueden ser extraídos generando un beneficio. En este contexto, un yacimiento es sinónimo de un depósito.

Es importante notar que esta definición es relativa e incluso ambigua, dado que la factibilidad económica de un proyecto minero varía según diversos factores. Por ejemplo, un cambio tecnológico puede hacer que recursos que anteriormente no fueron considerados entre las reservas del yacimiento, lo sean ahora, dado que, por ejemplo, se puede profundizar un rajo con un mayor ángulo de talud a un costo bajo. Por otro lado, regulaciones ambientales pueden transformar reservas mineras en recursos, dado que por un cambio legislativo, la concentración máxima permitida de un elemento contaminante puede subir, haciendo que su eliminación del concentrado o del producto final de la mina tenga un costo adicional que antes de la promulgación he dicho reglamento no existía. Otros factores, como el precio del producto obtenido, avances en tecnología de explotación y procesamiento del mineral, pueden afectar el balance del beneficio, generando más reservas en un depósito, sin variar sus recursos. También puede ocurrir que yacimientos muy similares en cuanto a sus características físicas y mineralógicas sean o no explotables dependiendo de su ubicación geográfica, condiciones climáticas, etc.

Se distinguen tipos de yacimientos según el producto que generan:

- **Yacimientos metálicos**: cobre, oro, plata, molibdeno, manganeso, hierro, plomo, zinc, etc.
- **Yacimientos no metálicos**: sales, calizas, sílice o cuarzo, yeso, azufre, yodo, arcillas, etc.
- **Yacimientos de combustibles fósiles**: carbón, antracita, esquistos bituminosos.

En Chile predomina la minería metálica, pero pueden encontrarse yacimientos de todos los tipos anteriores. La explotación de minas en el sentido que se entiende en este curso se aplica principalmente a la minería metálica. Las principales diferencias con otros tipos de minería están en que muchas veces estos últimos no involucran la perforación y tronadura para extraer el material que se lleva a proceso, y que estos procesos son completamente distintos (si se requieren) que en el caso de la minería metálica.

Mina: Corresponde al lugar físico de la faena organizada que permite la extracción de un determinado mineral o elemento. Es una excavación hecha en la corteza terrestre con el propósito de extraer estos minerales. La excavación puede ser superficial (en rigor, diremos que está permanentemente expuesta a la superficie) o subterránea. También pueden coexistir ambos tipos.

En el primer caso, se habla de minas a rajo abierto o cielo abierto (open-pit, en inglés). También se las llama canteras, término principalmente aplicado a minerales industriales, que se extraen directamente para la venta. Adicionalmente, existen otros tipos de explotación de depósitos: los lavaderos o placeres corresponden a depósitos de arena sedimentarios en antiguos lechos de ríos o playas que permiten la recuperación de oro, piedras preciosas u otros elementos químicos valiosos. Asimismo, existe la minería por disolución, para extraer azufre u otras sales en yacimientos muy profundos. También existe investigación en la aplicación de minería costa afuera para recuperar nódulos de manganeso depositados en fondos marinos.

En el caso de la explotación subterránea, se diferencian según el método de explotación utilizado.

ETAPAS DE UN PROYECTO MINERO

Un proyecto minero pasa por varias etapas, en cada una de las cuales se va mejorando el conocimiento del depósito y se aumenta el nivel de detalle en la ingeniería desarrollada.

Prospección y Exploración

La fase de prospección consiste en identificar la ubicación de concentraciones anómalas de minerales, tanto metálicos, como no metálicos y fósiles. Puesto que los depósitos se encuentran generalmente en el subsuelo, se utilizan métodos directos e indirectos para encontrar estas anomalías. Un método directo consiste en la identificación visual ya sea de un afloramiento o de detritos arrastrados del sitio de la anomalía. Esto se complementa con estudios geológicos del sitio, lo que es ayudado por fotografías aéreas y mapas topográficos y estructurales de la zona. Métodos indirectos consisten principalmente en geofísica, donde se detectan anomalías sísmicas, magnéticas, gravitacionales, eléctricas, electromagnéticas y radiométricas. La geofísica permite explorar áreas extensas y definir a escala más local la existencia de cuerpos que pueden constituir un depósito. La geoquímica y geobotánica también se utilizan en prospección.

La segunda etapa, de exploración, se ocupa de determinar lo más precisamente posible, con la escasa información disponible, la extensión (volumen o tonelaje) y calidad (ley) del depósito, pudiéndose ya tener una primera idea de su valor económico. En esta etapa se realiza un muestreo más regular y sistemático de manera de definir más precisamente los límites del depósito. Las muestras, obtenidas en trincheras, o a través de sondajes, son evaluadas a través de análisis químico, espectral o de rayos X. Aunque existen varios tipos de sondajes, en esta etapa se suelen usar métodos que permiten recuperar testigos, lo que permite mapear las estructuras del subsuelo.

La prospección y exploración concluyen con la elaboración de un estudio de factibilidad Este estudio define si se debe continuar o no con el proyecto y, aunque es principalmente

económico, también debe considerar otros factores (legal, tecnológico, medioambiental,…). Algunos de los puntos de mayor importancia de este estudio son la definición de reservas, recuperación metalúrgica, tasa de producción, costos (exploración, capital, mina, planta, impuestos), ingresos (precio futuro del elemento de interés) y aspectos financieros (inversión, depreciación).

Desarrollo

Esta etapa constituye el comienzo de la minería propiamente tal, pues se debe acceder al mineral ya sea removiendo la sobrecarga o iniciando excavaciones subterráneas.

Sin embargo, previo a ello, es necesario salvar algunas otras etapas, como la elaboración de una evaluación de impacto ambiental, la adquisición de derechos sobre la propiedad minera, derechos de agua, desarrollo de caminos y de infraestructura eléctrica.

En el caso de minería de superficie (rajo abierto, canteras) el desarrollo implica extraer la sobrecarga e ir despejando varias frentes donde se iniciará la explotación, de manera de reducir el riesgo de cambios en las leyes estimadas en el estudio de factibilidad. La secuencia típica comprende en muchos casos las mismas operaciones unitarias que la explotación misma, es decir, perforación, tronadura, carguío y transporte del lastre al botadero. En casos que la sobrecarga no tenga el grado de consolidación suficiente, la tronadura puede no ser necesaria.

En el caso de minas subterráneas, el desarrollo es mucho más costoso pues implica la construcción de galerías o piques, los cuales tienen un alto costo y son de lenta ejecución. Estas excavaciones deben permitir el acceso de personal y equipos para el posterior desarrollo de los niveles principales de explotación y de las excavaciones auxiliares de ventilación. Además, en muchos casos, el método de explotación contempla cámaras de chancado subterráneas, por lo que se requiere construir estas cámaras.

El desarrollo se hace de manera de poder iniciar la explotación y abastecer a la planta de mineral de manera ininterrumpida. Labores de desarrollo continúan una vez que la mina ya ha iniciado su producción. Esto asegura la continuidad futura de la alimentación a planta.

Explotación

La última etapa es la de explotación, donde se inicia de manera sostenida la alimentación a planta con importantes cantidades de mineral.

El método de explotación seleccionado depende principalmente de la forma, tamaño y localización del cuerpo mineralizado. Además, juegan un importante rol, factores económicos, tecnológicos y de seguridad. Dependiendo de la ubicación respecto a la superficie y su forma, se definen principalmente dos tipos de métodos de explotación: de superficie y subterráneos.

Métodos de explotación de superficie consideran rajo abierto, canteras y otras variantes, así como también la explotación de placeres. Métodos de explotación subterránea pueden clasificarse principalmente en tres tipos dependiendo del tratamiento que se hace de la cavidad que deja la explotación. Se pueden considerar métodos donde, tras la extracción del mineral, la cavidad queda soportada por las paredes del caserón o por pilares, sin un soporte adicional. Otra opción es el uso de algún material para rellenar la cavidad de manera de permitir la continuidad de la operación. Una última alternativa consiste en sacar mineral al mismo tiempo que material de menor ley o estéril rellena la cavidad que se va generando.

Las etapas de la explotación de minas corresponden a:

- Arranque:
  - Perforación
  - Tronadura
- Manejo de materiales:
  - Carguío
  - Transporte
- Operaciones auxiliares:
  - Ventilación
  - Acuñadura
  - Fortificación
  - …

INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

Previo a describir los distintos métodos de explotación, es necesario conocer los principales componentes de un complejo minero. En particular, en una mina subterránea, se cuenta con los siguientes elementos:

Infraestructura básica:

- Túneles de acceso de personal y/o transporte de minerales
- Piques de acceso de personal y/o extracción de minerales
- Rampas de acceso de personal y/o transporte de minerales
- Túneles y/o piques principales de ventilación
- Cámaras o estaciones de chancado subterráneas
- Piques principales de traspaso de mineral
- Cámaras o estaciones de aire comprimido
- Cámaras o talleres de mantención mecánica
- Polvorines
- Oficinas, comedores y posta de primeros auxilios

Labores de desarrollo:

- Galerías y rampas de acceso a los cuerpos mineralizados
- Galerías o subniveles de perforación
- Embudos o zanjas recolectoras de mineral
- Piques de traspaso de minerales
- Galerías y chimeneas de ventilación
- Galerías de transporte de mineral

Instalaciones

- Puntos de extracción
- Parrillas de control de tamaño
- Estaciones de reducción de tamaño (martillos picadores)
- Buzones de carguío
- Subestaciones eléctricas
- Vías férreas
- Estaciones de bombeo

El método de explotación describe la estrategia o los principios generales según los cuales se ejecutan las operaciones básicas para el arranque y manejo del material. Como se mencionara anteriormente, se puede diferenciar entre la explotación a rajo abierto y la subterránea. En este último caso, los métodos se diferencian según el tratamiento que se le da a la cavidad que se produce al extraer el material. Así, se distingue entre:

- Métodos de caserones abiertos, que corresponden a aquellos que consideran la extracción del mineral y dejar la cavidad que éste ocupaba vacía. Para ello, el caserón debe mantenerse estable en forma natural (ser autosoportante) o requerir escasos elementos de refuerzo. Estos caserones se dejan vacíos una vez que concluye la explotación.
- Métodos de caserones que requieren elementos de soporte para mantenerse estables y/o que se rellenan con algún material exógeno.
- Métodos de hundimiento, esto es, donde las cavidades generadas por el mineral extraído son rellenas con el material superpuesto (mineral, mientras dura la explotación, y estéril, una vez finalizada). El hundimiento y consecuente relleno de las cavidades se produce simultáneamente a la extracción del mineral.

La selección del método de explotación depende de muchos factores, siendo los más relevantes la ubicación, forma (cuerpo tabular vertical o sub-vertical, cuerpo tabular horizontal o sub-horizontal, cuerpo masivo de forma irregular), tamaño, topografía de superficie, profundidad de la mieralización, tipo de mineral (oxidado, sulfurado, mixto; roca primaria, secundaria), regularidad de la mineralización, calidad del macizo rocoso desde un punto de vista geomecánico, etc.

A continuación se muestran algunos esquemas que ilustran distintos complejos mineros y métodos de explotación y donde se muestran los elementos antes mencionados.

Los métodos que se revisarán en este curso son:

- Room and Pillar
- Shrinkage Stoping
- Sub-Level Stoping
- Cut and Fill
- Sub-Level Caving
- Block Caving

Adicionalmente, se revisarán los conceptos fundamentales de la explotación por rajo abierto.

Antes de concluir esta introducción, es importante señalar que la industria minera posee ciertas características que la distinguen de otras actividades productivas. Por ejemplo:

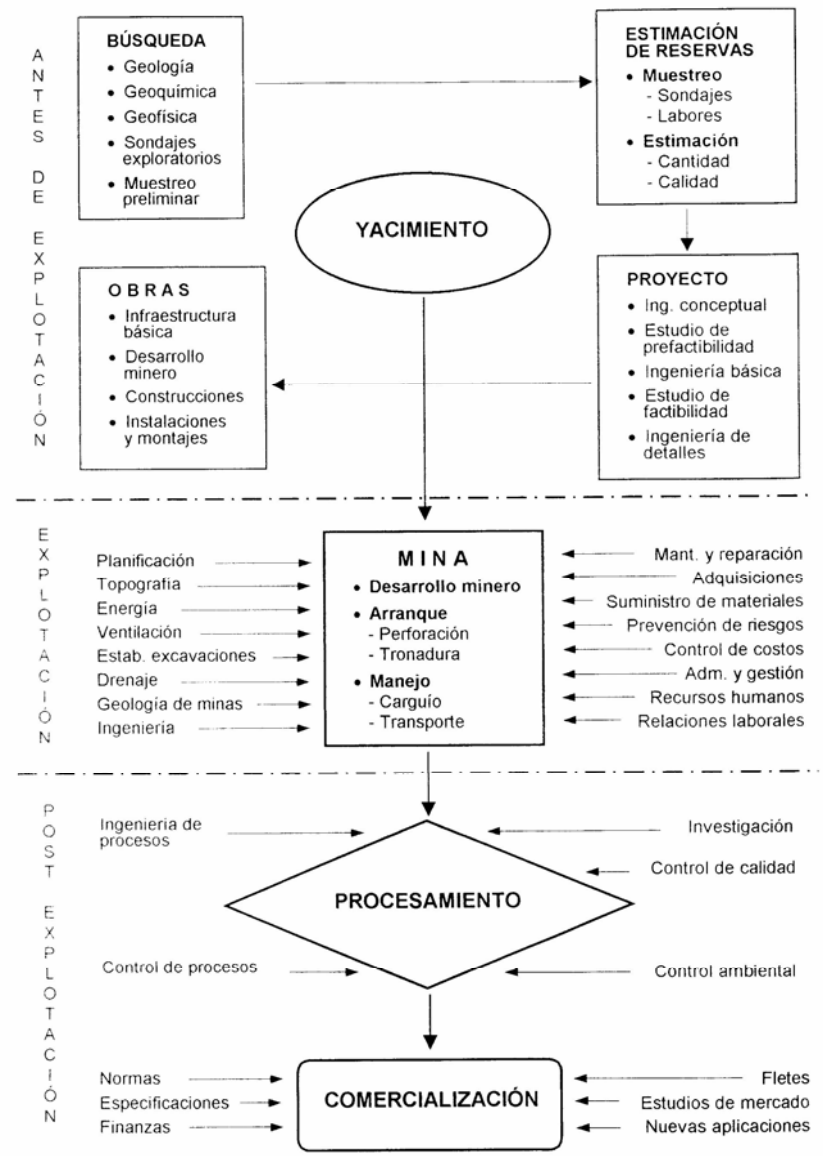
- El yacimiento minero es un fenómeno natural y por lo tanto hay que explotarlo en el lugar donde se ubica. Esto implica que en muchos casos, se debe construir caminos de acceso, suministrar energía eléctrica, captar y conducir el agua para el proceso y para el consumo humano en faena, construir campamento, etc. Se debe dotar a la faena de toda la infraestructura física y de servicios que permita el desarrollo normal

de las actividades. Esto implica la participación de diferentes especialidades de la ingeniería en la construcción, puesta en marcha y operación de una mina, así como la realización de importantes inversiones que deben recuperarse y generar un beneficio en un plazo razonable.

- Los recursos de los depósitos son finitos y no renovables, por lo que es necesario realizar inversiones importantes para explorar y encontrar recursos adicionales para satisfacer la demanda, en la medida que los yacimientos en explotación se van agotando. Una empresa minera que no invierte en exploración inevitablemente desaparece.
- El riesgo desde el punto económico y financiero en la industria minera es alto comparado con otras industrias más convencionales. Los recursos son inciertos y la geología del yacimiento se va comprendiendo mejor en la medida que se explota, una vez que la decisión de invertir en el proyecto ya se ha tomado. Por esta misma razón, la tasa de retorno de proyectos mineros suele ser mayor que la que se considera en un proyecto normal de inversión.
- La industria minera tiende a expandirse para generar productos con valor agregado. En el caso de la minería metálica chilena, se consideran en la producción una serie de procesos físicos y químicos que permiten la obtención final de metales de consumo industrial. A pesar de ello, muchas veces sigue siendo un excelente negocio vender un producto intermedio como los concentrados.

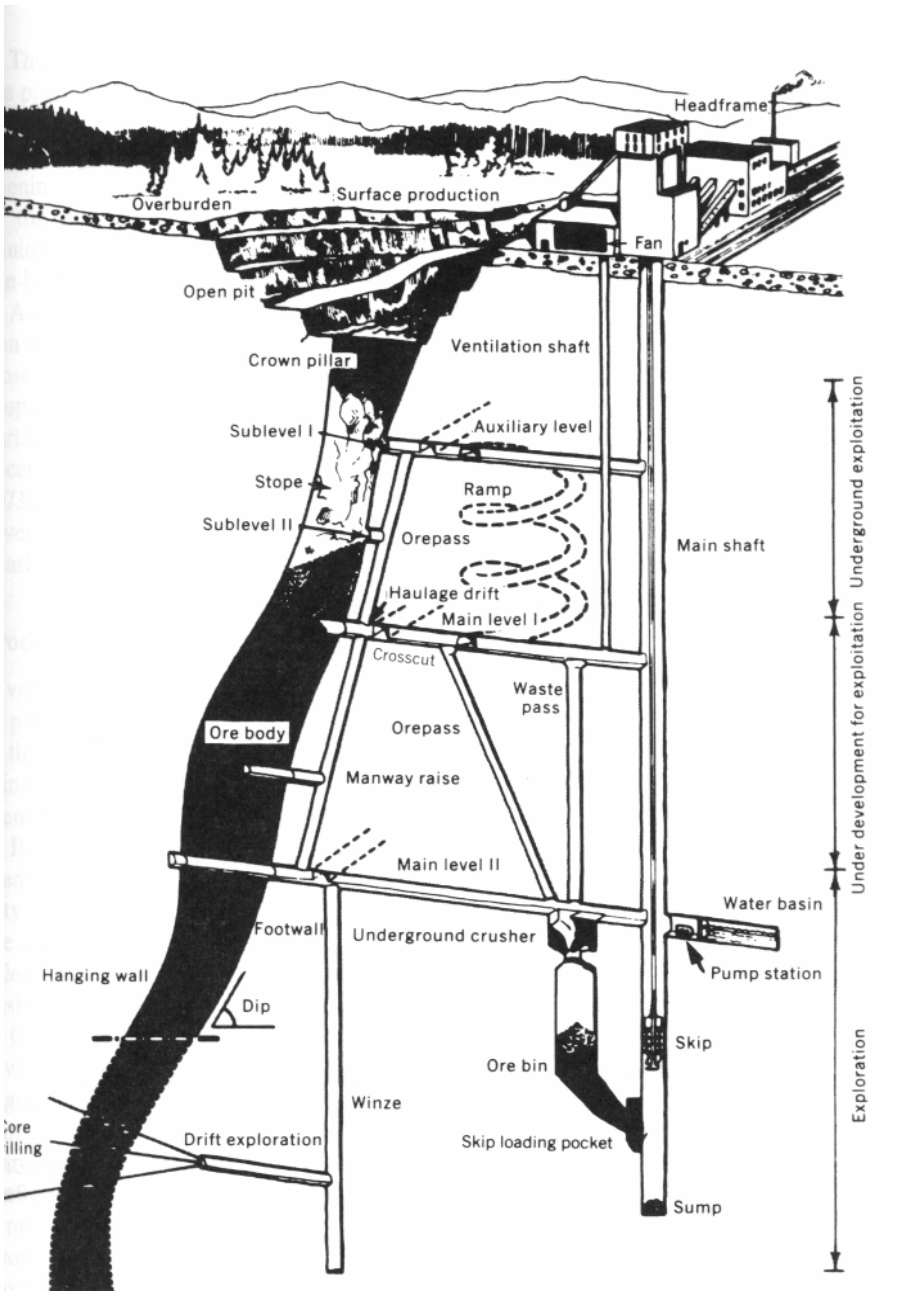
INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

El proceso productivo minero involucra una serie de actividades que deben ser desarrolladas en forma coordinada. La figura siguiente muestra cómo se relacionan estas actividades en cada etapa de un proyecto minero.

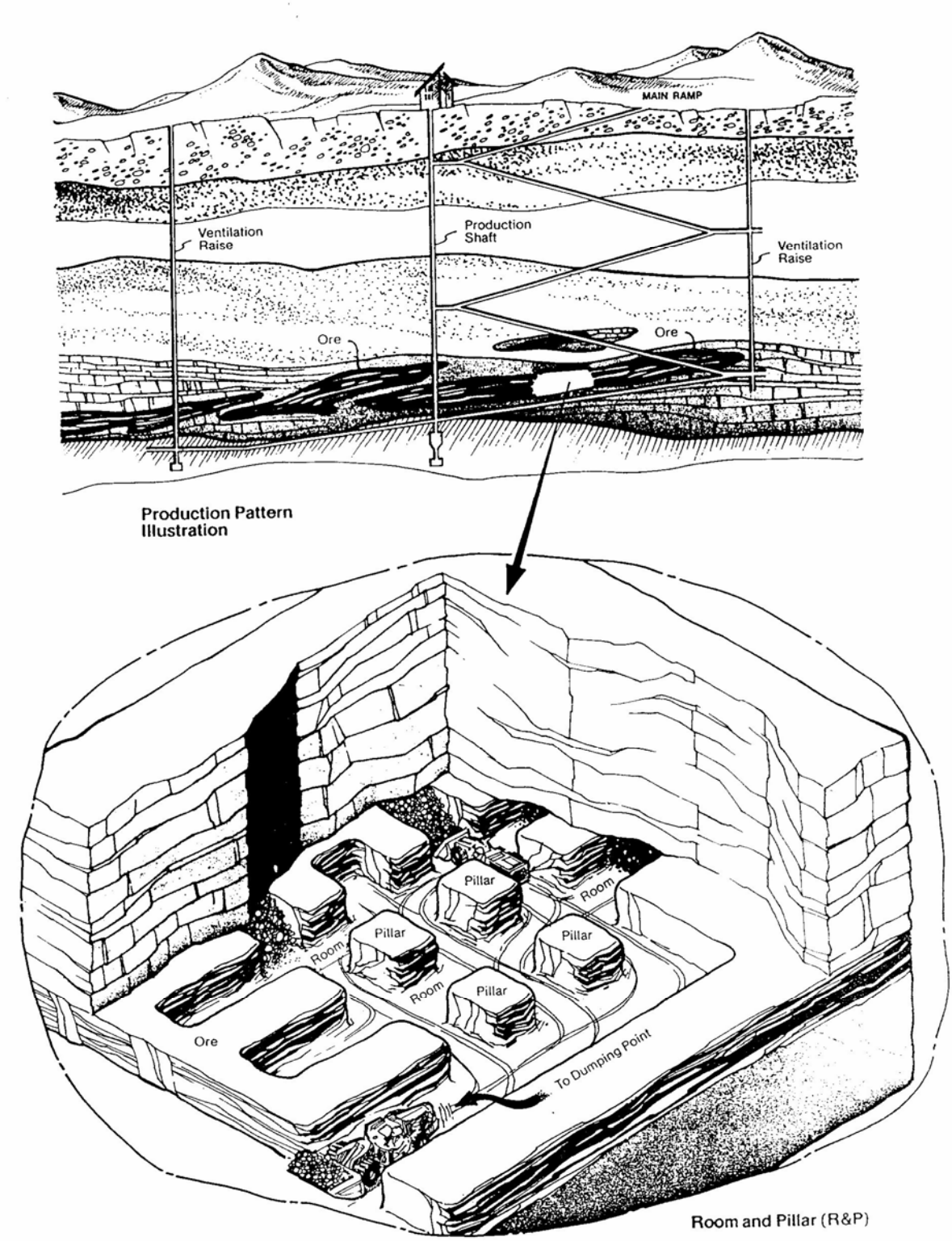


A continuación, se muestra un esquema donde se ilustran la infraestructura general de una mina. En la zona superficial, existe una explotación por rajo abierto, pero por las características de la mineralización, la explotación continúa como una mina subterránea. Para ello, se puede ver que se construyó un pique (excavación vertical descendente) que permite el acceso a los distintos niveles de la mina, y se desarrollan subniveles que permiten acceder a los caserones en explotación, piques de traspaso para llevar el mineral al nivel inferior y cargar el balde (skip). Adicionalmente, se pueden ver rampas que conectan subniveles y otros desarrollos de exploración en los niveles inferiores de la mina.

Este tipo de infraestructura es típico de un complejo minero. Normalmente, las minas, tanto a rajo abierto como subterráneas, explotan varias frentes, muchas veces coordinando en paralelo la explotación de algunos sectores y la preparación de otros.

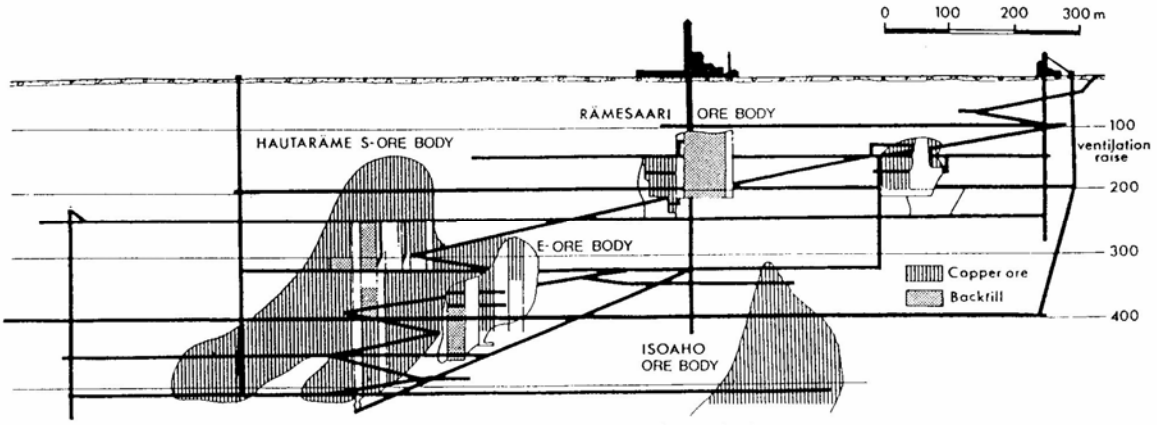


La figura siguiente muestra el esquema típico en una situación donde lo que se explotan son mantos. Se muestra, en particular como se realiza la explotación de un sector.

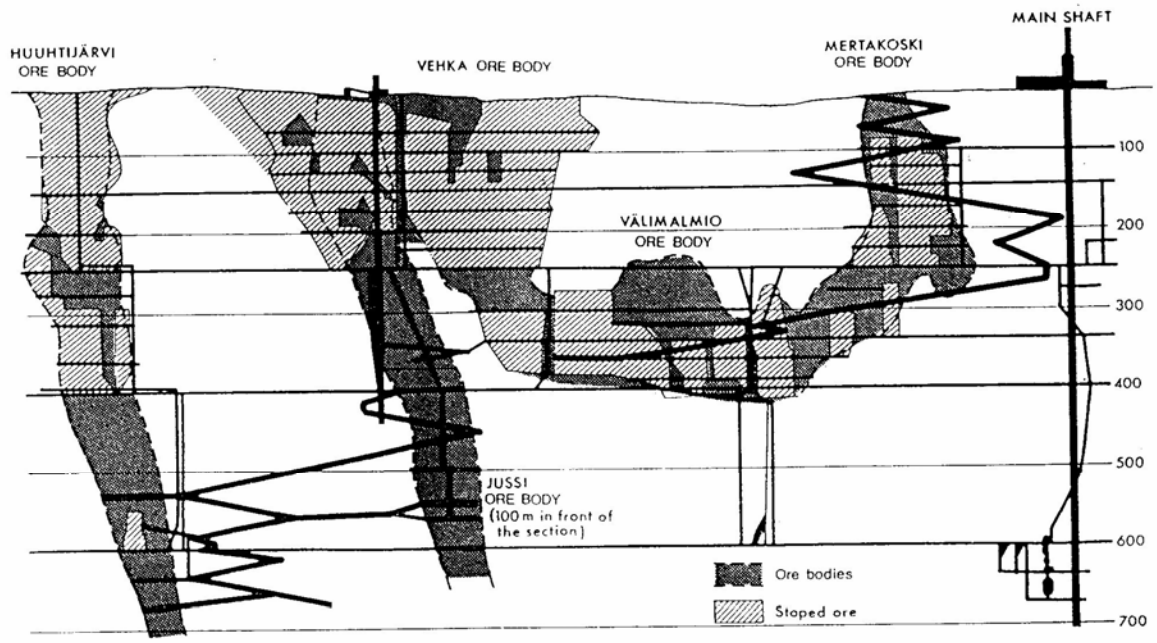


SECCIÓN ESQUEMÁTICA DE UN COMPLEJO MINERO SUBTERRÁNEO
Y DETALLE DE UN SECTOR PRODUCTIVO

A continuación, se muestra un complejo minero que constan de varias minas, todas ellas explotadas de manera coordinada, de modo de minimizar los costos de desarrollo de infraestructura (como piques, niveles de transporte, accesos) y mejorar la rentabilidad del negocio.



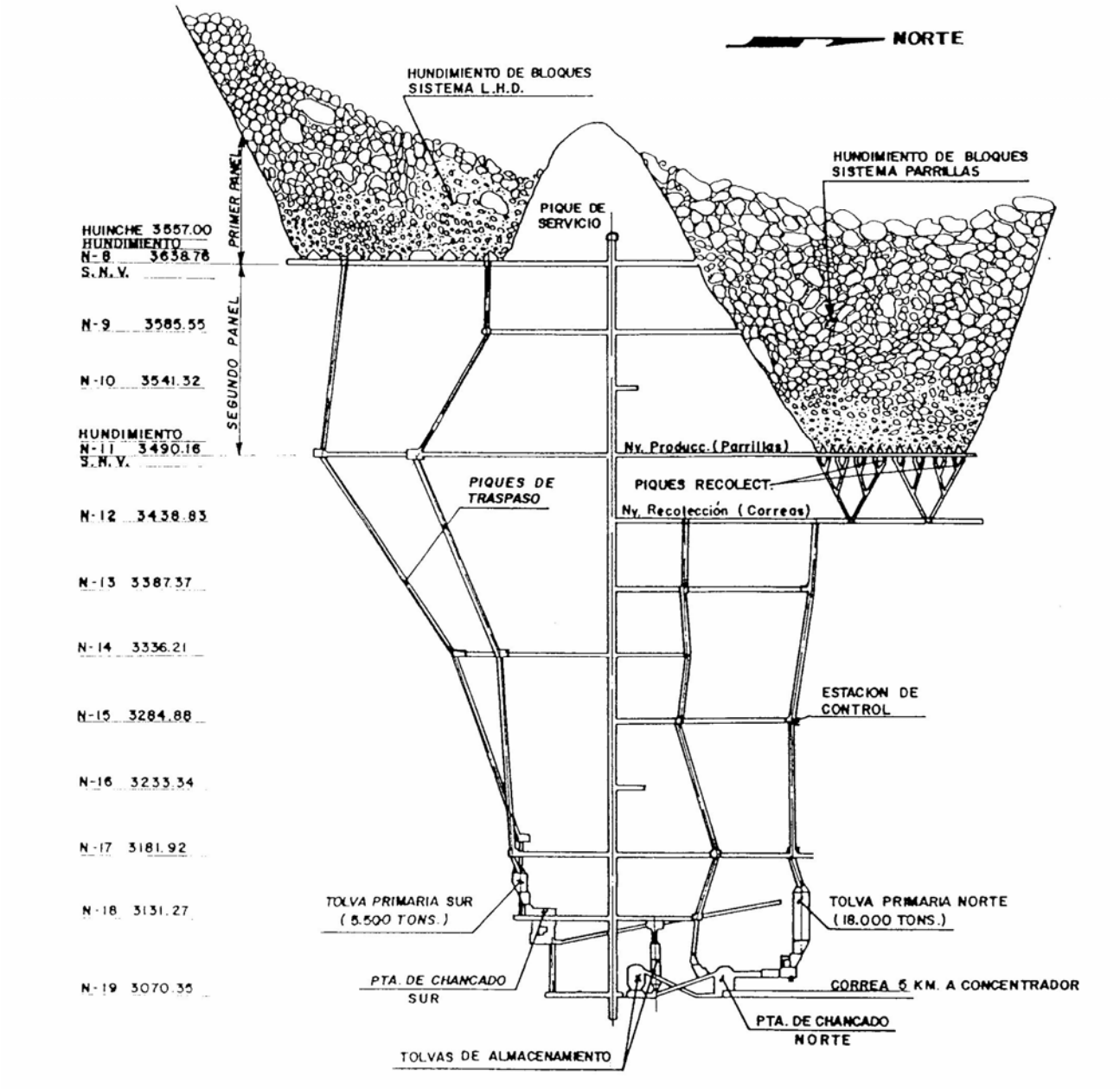
Longitudinal sections of the Vihanti mine.



Longitudinal section of the Kotalahti mine.

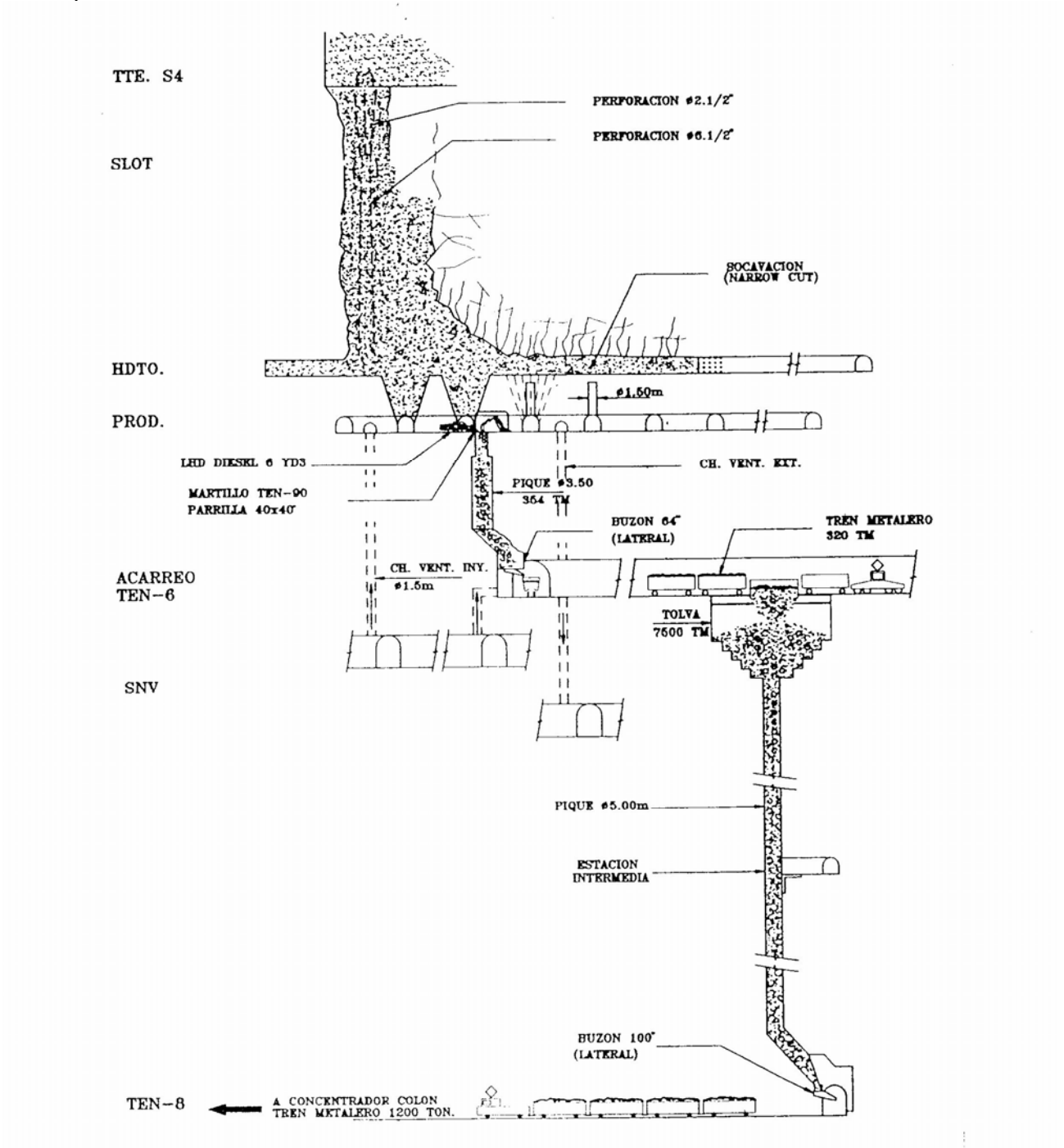
SECCIONES ESQUEMÁTICAS
COMPLEJO MINERO SUBTERRÁNEO

En esta figura se muestra un sección típica de la explotación de la mina Río Blanco de División Andina. Se aprecian dos sectores principales, uno donde se explota por block caving con LHD (palas de bajo perfil) y otro donde el escurrimiento de la roca fragmentada se realiza con parrillas. Se puede ver que la organización general de la infraestructura permite la explotación de ambos sectores, con el mejor aprovechamiento posible de ésta.



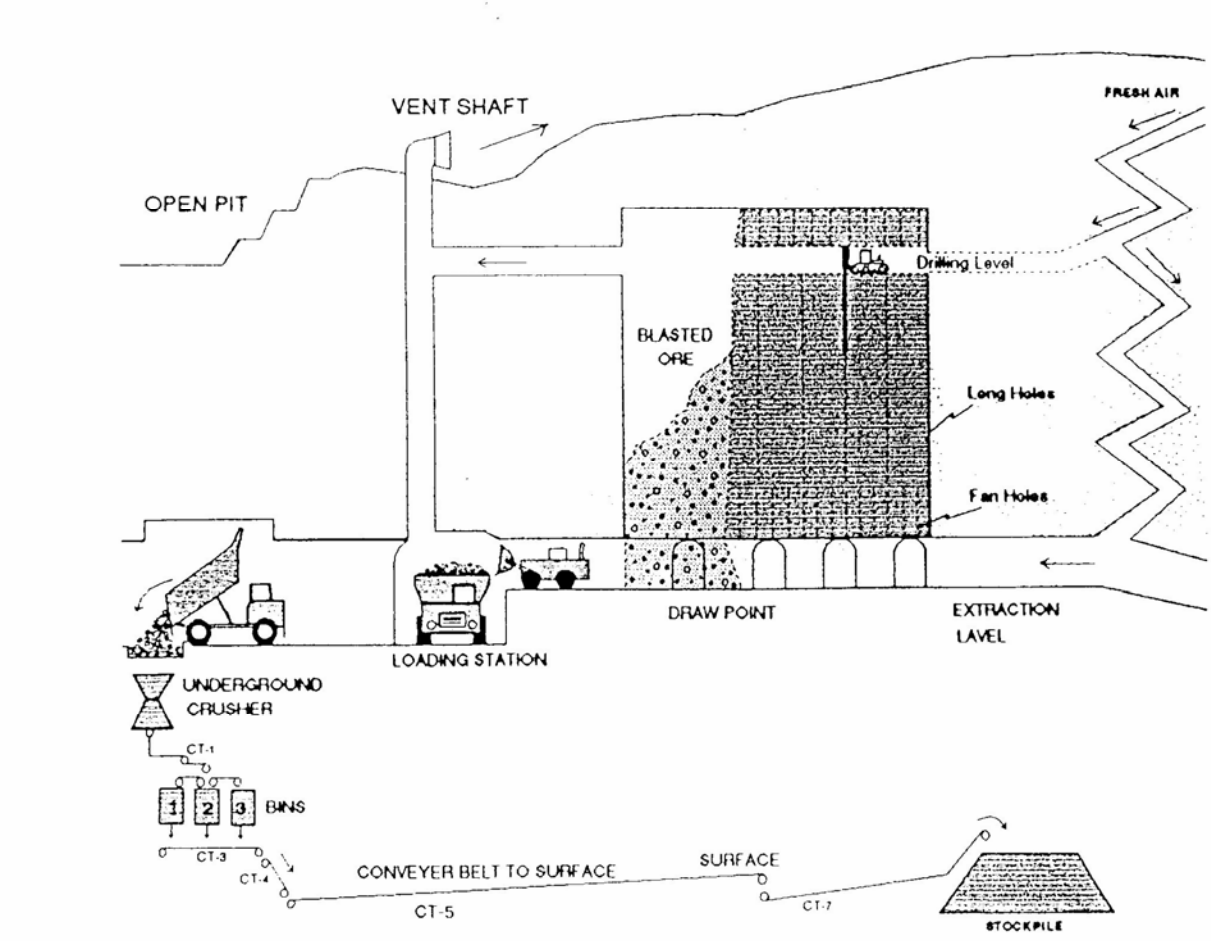
SECCIÓN ESQUEMÁTICA MINA RÍO BLANCO
CODELCO CHILE – DIVISIÓN ANDINA

Con un método de explotación similar al de Andina, se muestra aquí una descripción esquemática de los distintos niveles de una mina operada por block caving. Este caso corresponde a El Teniente, de Codelco Chile.



SECCIÓN ESQUEMÁTICA PROCESO PRODUCTIVO SECTOR “ESMERALDA”
CODELCO CHILE – DIVISIÓN EL TENIENTE

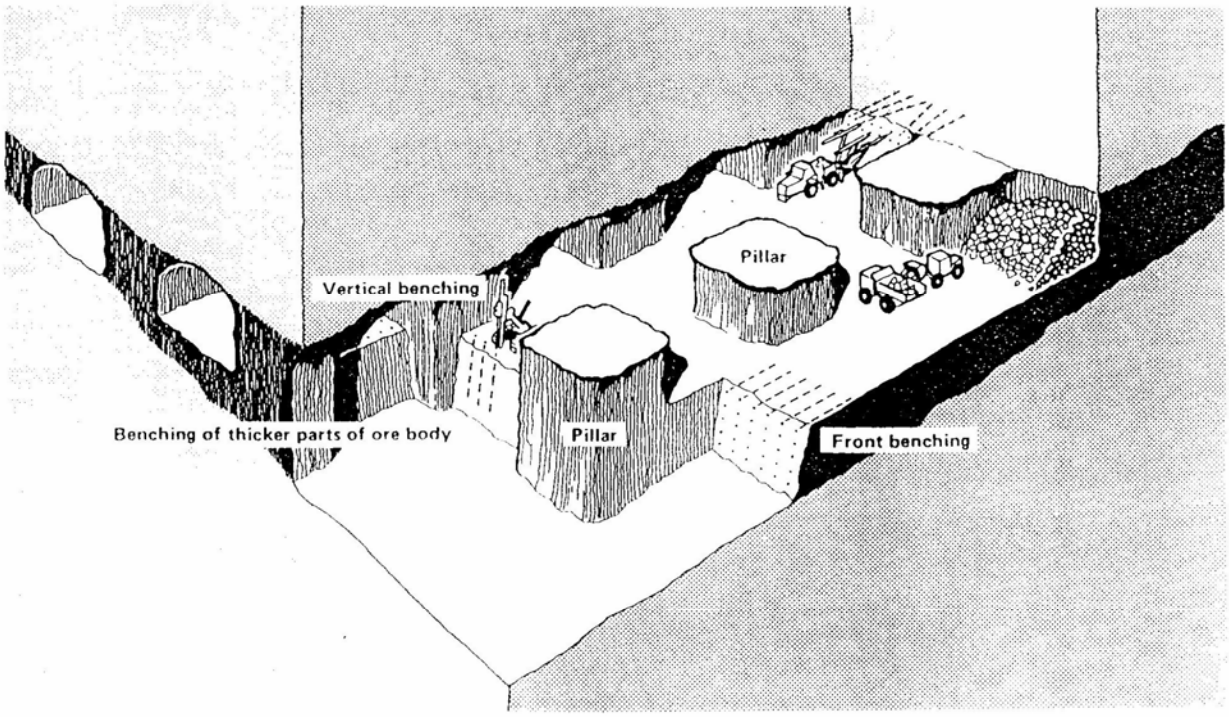
Con un método de explotación diferente, en este caso un sublevel stoping, se ilustra en esta figura el proceso productivo de la mina Mantos Blancos de Anglo American Chile.



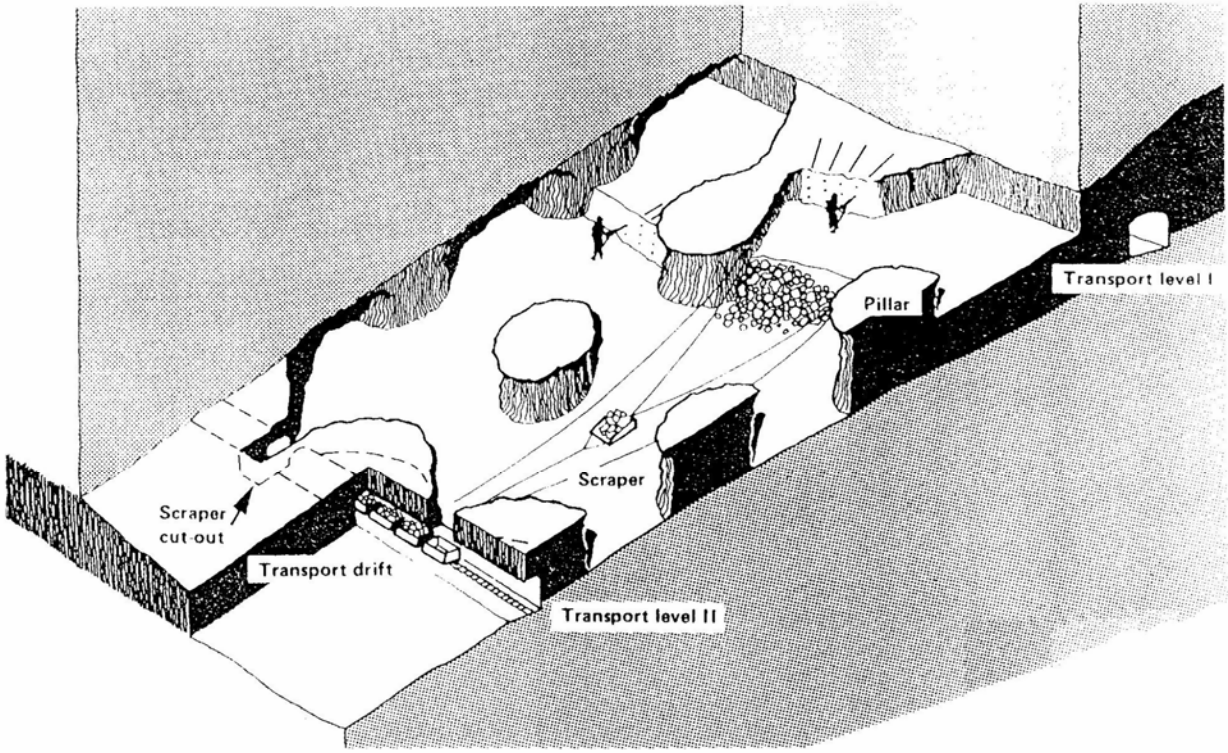
SECCIÓN ESQUEMÁTICA
PROCESO PRODUCTIVO MINA “MANTOS BLANCOS”
ANGLO AMERICAN CHILE

Las figuras siguientes muestran esquemas típicos de los métodos de explotación siguientes:

- Room and Pillar
- Shrinkage Stoping
- Sub-Level Stoping
- Cut and Fill
- Sub-Level Caving
- Block Caving

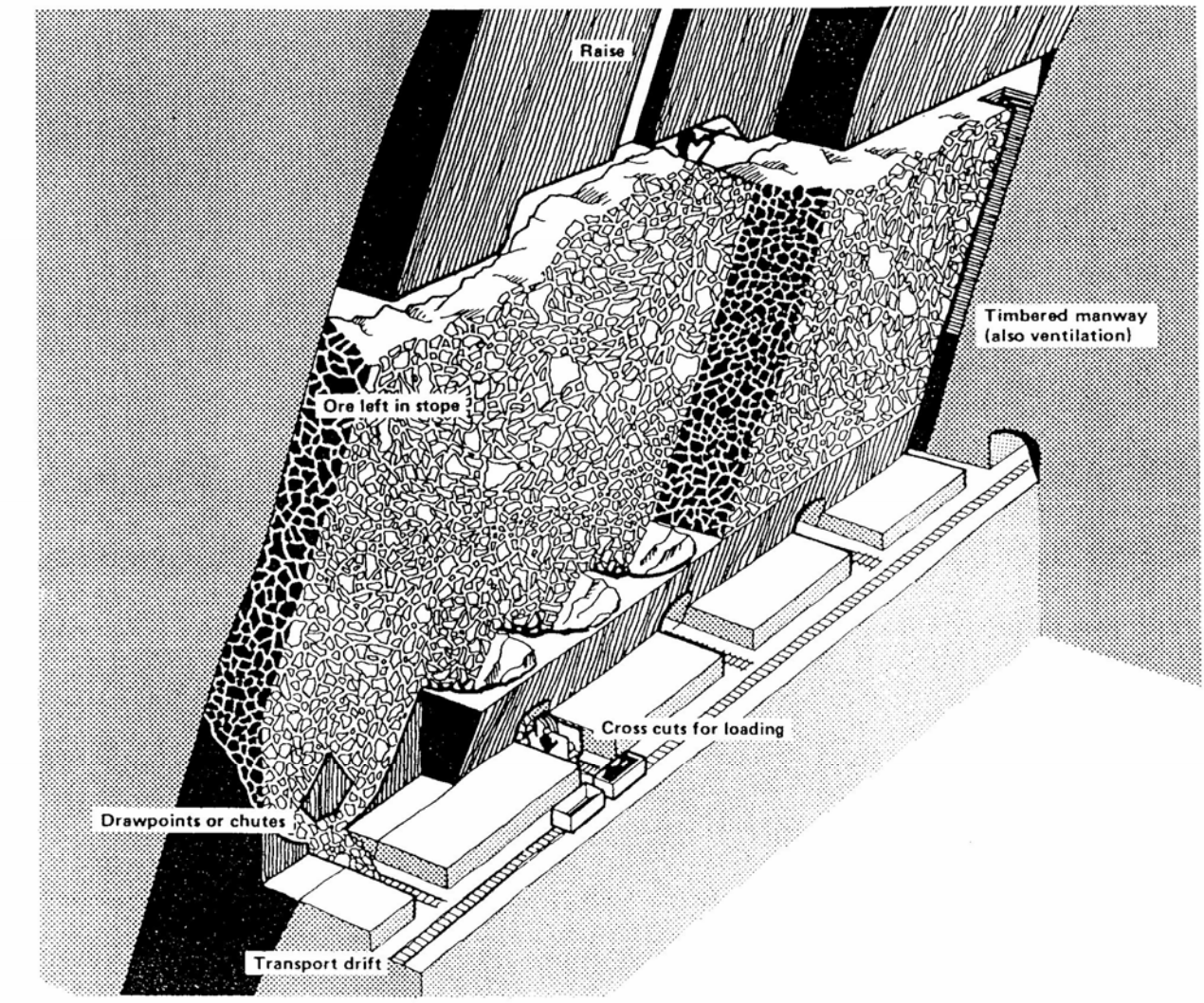


Room-and-pillar mining of a flat ore body.

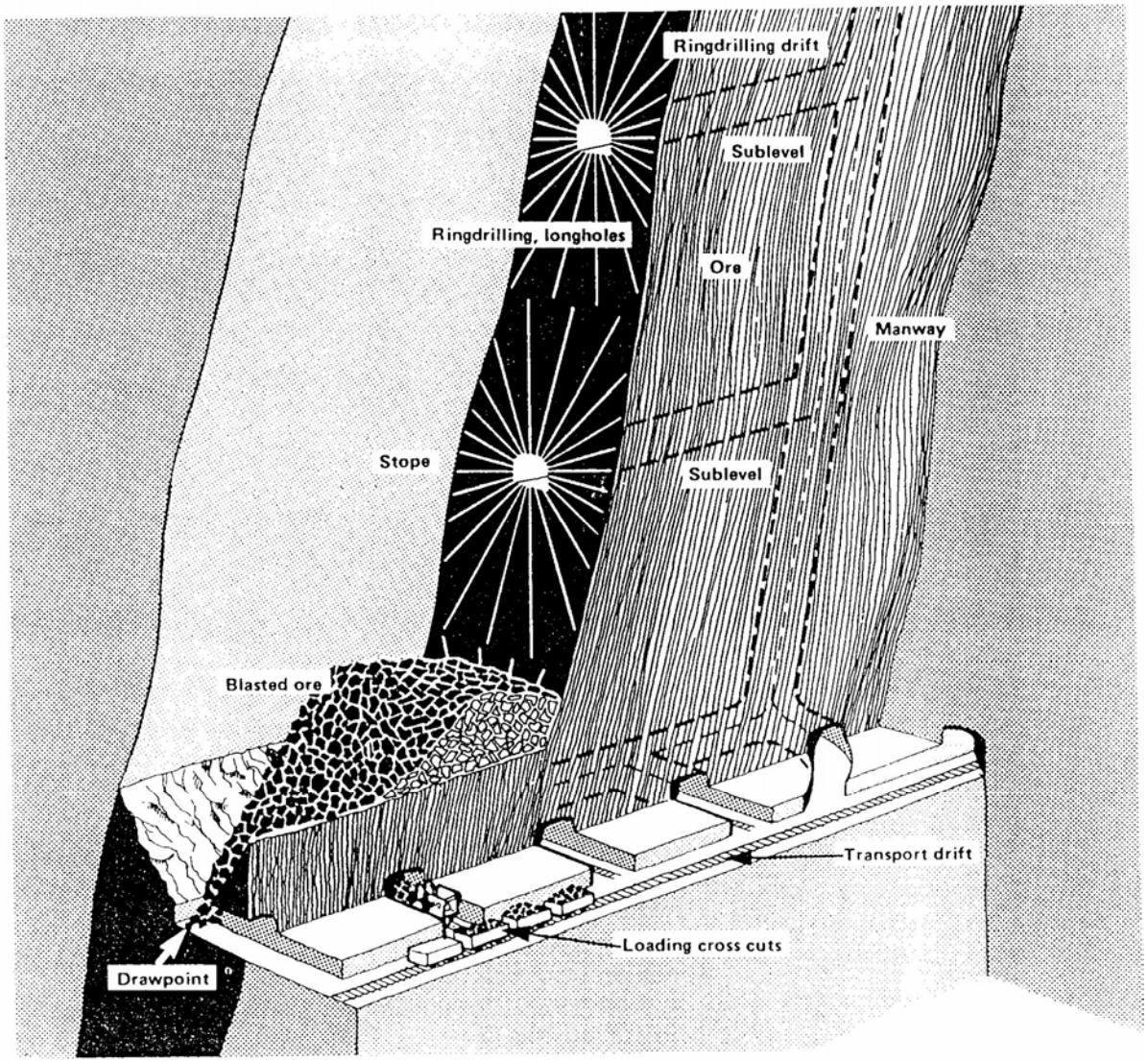


Room-and-pillar mining of an inclined ore body.

ROOM AND PILLAR
CUERPO TABULAR HORIZONTAL O SUBHORIZONTAL



SHRINKAGE STOPING
CUERPO TABULAR VERTICAL O SUBVERTICAL
Vetas angostas (2 a 5 metros)



SUB-LEVEL STOPING
CUERPO TABULAR VERTICAL O SUBVERTICAL
Vetas anchas (5 a 20 metros)

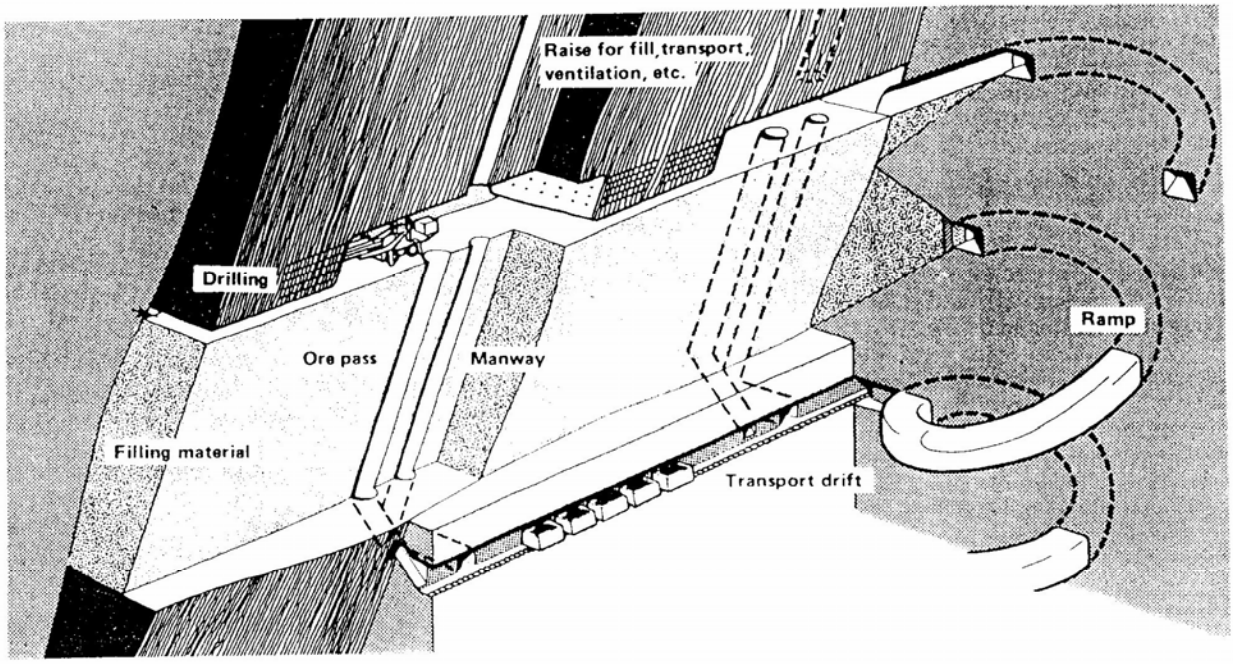
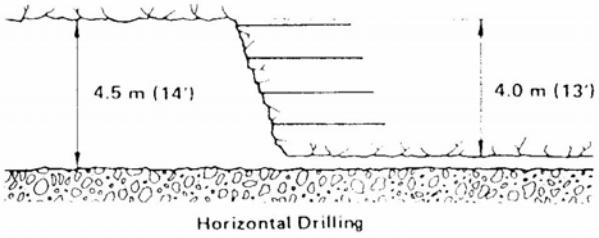
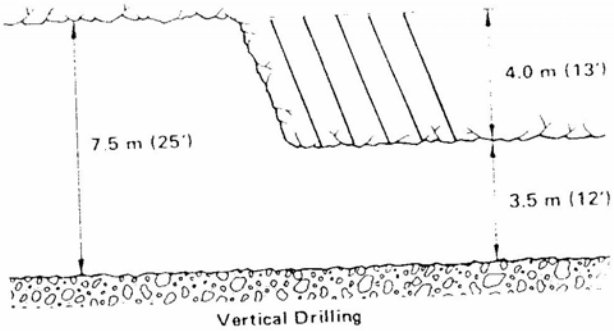
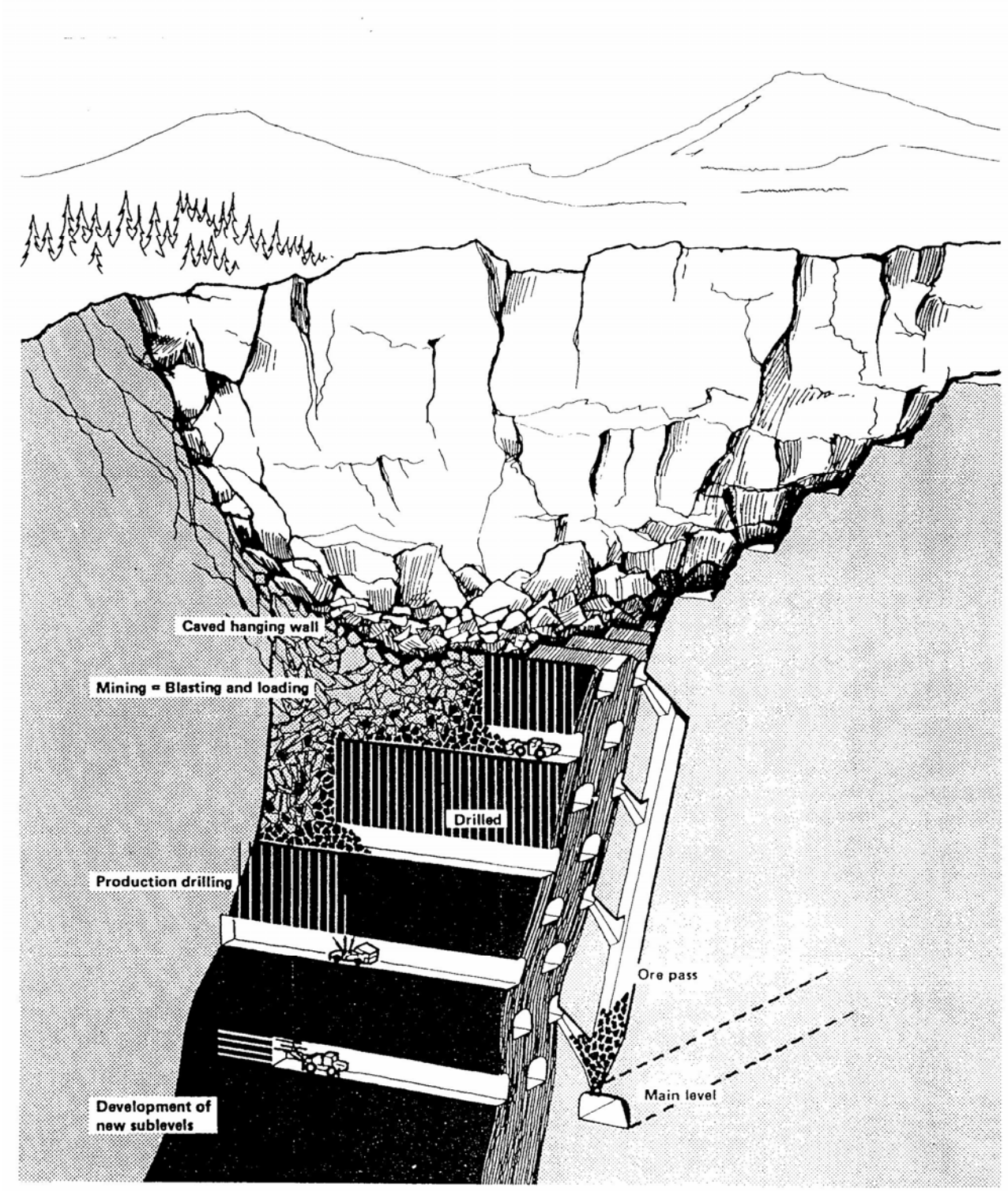


Fig. 8. Cut-and-fill mining in a large vertical ore body.

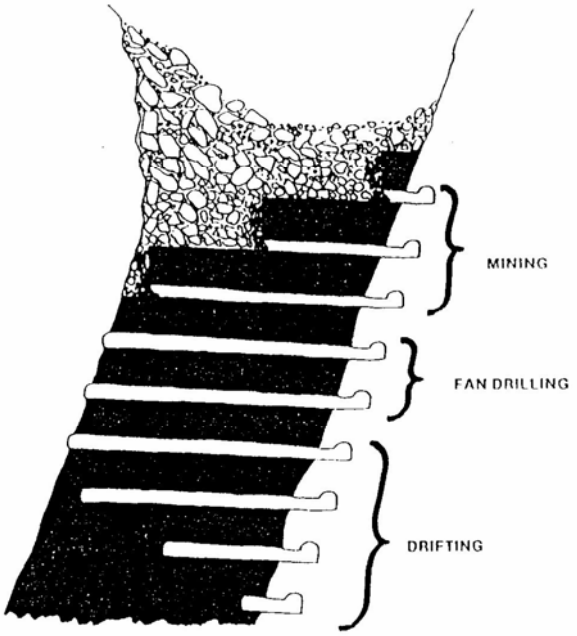




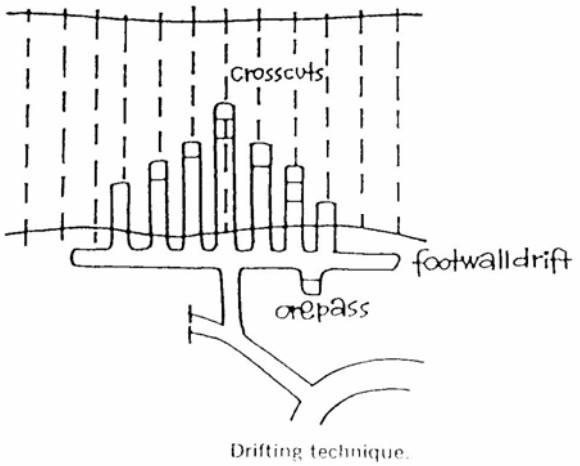
CUT AND PILL
CUERPO TABULAR VERTICAL O SUBVERTICAL



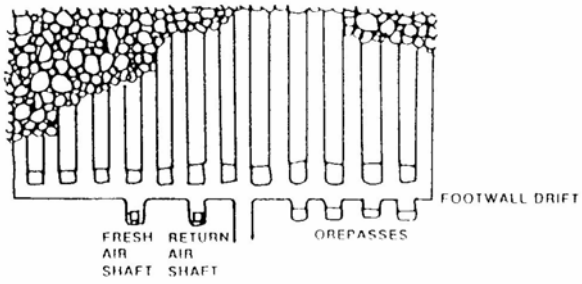
SUB-LEVEL CAVING
CUERPO TABULAR VERTICAL O SUBVERTICAL DE GRAN ESPESOR (30 A 60 metros)
Se aplica también en cuerpos masivos de forma irregular



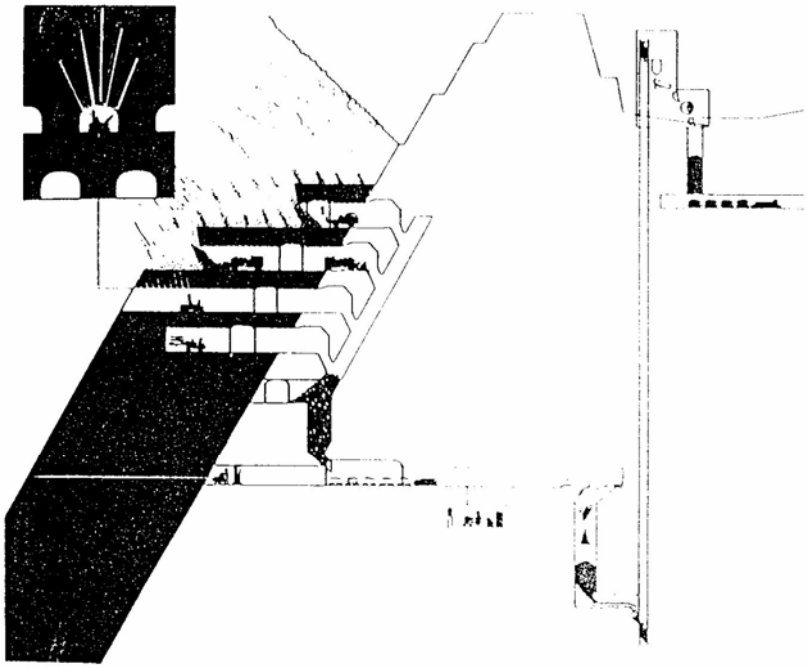
Cross section showing the present mining system.



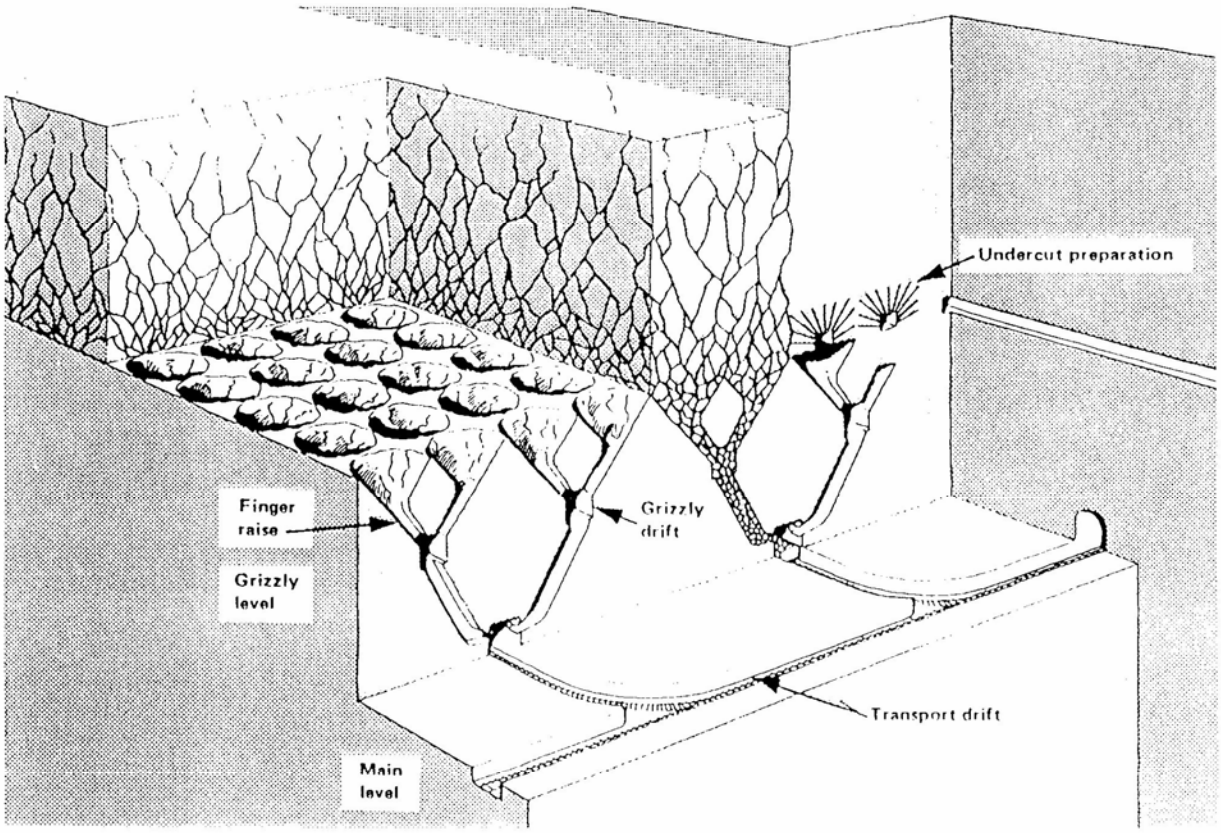
Drifting technique.

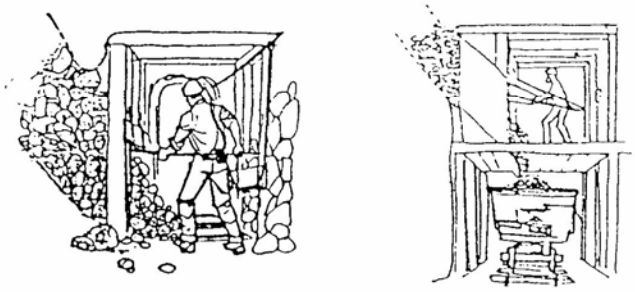


Main haulage level where ore is transported by train to crushers, then hoisted in skips to sorting plants, and finally transported by train to the harbor for shipment.



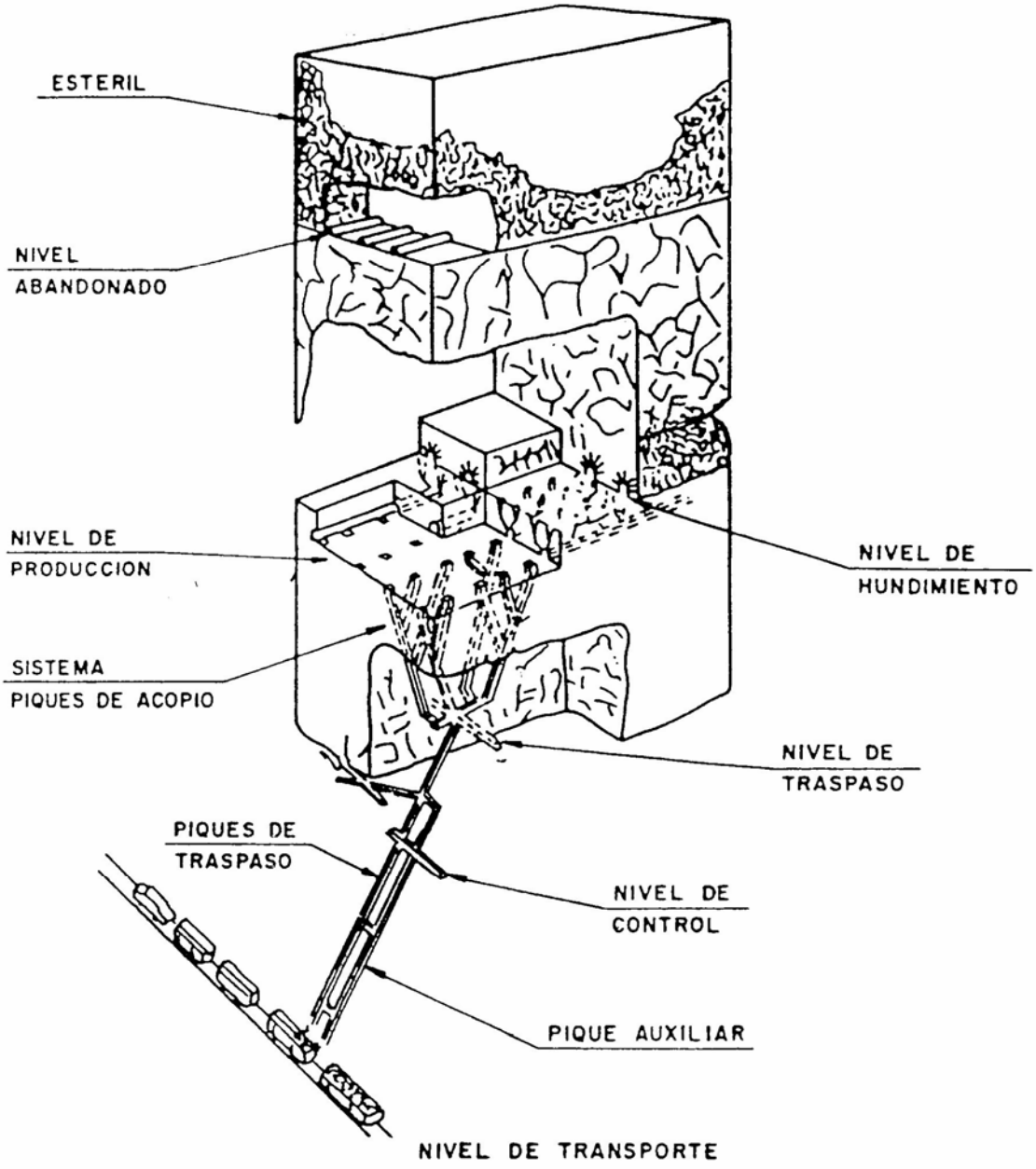
SUB-LEVEL CAVING
Disposición general de las labores





N. de Producción N. de Transporte

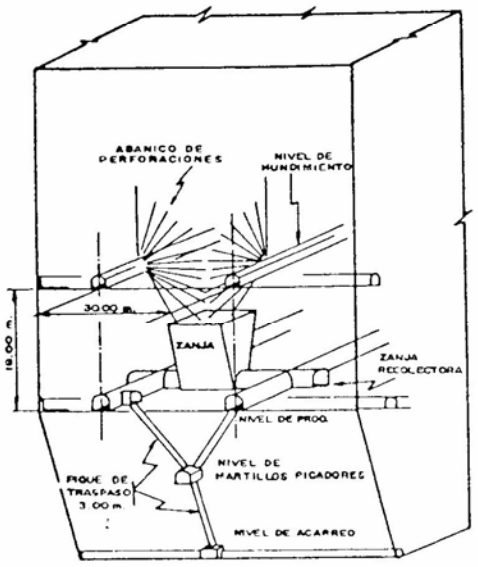
BLOCK CAVING
Cuerpos masivos de forma irregular



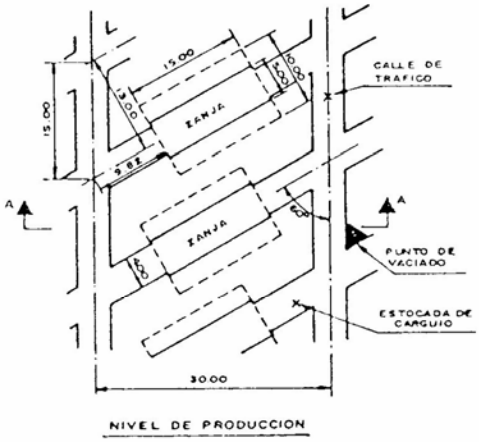
BLOCK CAVING EN SU MODALIDAD TRADICIONAL
CODELCO CHILE – DIVISIÓN EL TENIENTE

BLOCK CAVING

DISPOSICIÓN GENERAL DE LAS LABORES



SISTEMA DE EXTRACCION
LHD



MINA EL TENIENTE
SISTEMA DE EXTRACCIÓN MECANIZADO
GRANULOMETRÍA GRUESA