

**Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras**

# **Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior**

(Serie “Introducción al Laboreo de Minas”)

**Madrid - 2020**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Escuela Técnica Superior  
de Ingenieros de Minas y Energía**

[www.minas.upm.es](http://www.minas.upm.es)



**POLITÉCNICA**

### ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito de difusicomercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de una valoración de su incidencia en los costes de inversión y explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.



Foto de portada: <https://www.mining-technology.com/>

DOI: 10.20868/UPM.book.62726

Archivo Digital de UPM: <http://oa.upm.es/62726/>

Copyright © 2020. Todos los derechos reservados  
1<sup>a</sup> Edición: 2014

Juan Herrera Herbert  
[juan.herrera@upm.es](mailto:juan.herrera@upm.es)

Universidad Politécnica de Madrid (Technical University of Madrid)  
E.T.S.de Ingenieros de Minas y Energía (H.T. School of Mines and Energy)  
Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras (Mining Technologies Innovation Lab)

Calle Ríos Rosas 21  
28003 Madrid (España)

.



Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner. Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.





## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE EXPLORACIÓN EN INTERIOR .....</b>	<b>7</b>
1.1. Importancia del método de explotación .....	7
1.2. La selección del método de explotación .....	9
1.3. Clasificación de los métodos mineros.....	11
1.3.1. Clasificación en función de la forma de arranque.....	12
1.3.2. Clasificación según la calidad de la roca mineralizada y la encajante .....	13
1.3.3. Clasificación por las necesidades de sostenimiento .....	14
1.4. Sistemas tecnológicos más empleados en cada método.....	16
1.5. Características comparativas de los métodos mineros .....	18
<b>2. MÉTODO DE CÁMARAS Y PILARES (ROOM AND PILLAR).....</b>	<b>19</b>
2.1. Características generales .....	19
2.2. Classic Room-and-Pillar Mining.....	22
2.3. Post Room-and-Pillar Mining.....	25
2.4. Step Room-and-Pillar Mining.....	27
2.5. Cámaras y pilares en minería de carbón.....	30
2.6. Cámaras y pilares de bajo perfil .....	34
<b>3. MÉTODO DE VETAS ANGOSTAS (VEIN MINING) .....</b>	<b>39</b>
<b>4. MÉTODO DE CÁMARAS ALMACEN (SHRINKAGE STOPING) ...</b>	<b>45</b>
<b>5. MÉTODO DE CÁMARAS POR SUBNIVELES (SUBLEVEL OPEN STOPING).....</b>	<b>51</b>
5.1. Características del método de cámaras por subniveles (Sublevel Open Stoping) .....	51
5.1.1. Variante de talud invertido.....	67
5.1.2. Variante de talud natural .....	68
5.2. Método de subniveles con tiros largos (gran diámetro).....	69
5.3. Método de subniveles con voladuras en cráter (VCR - Vertical Crater Retreating) .....	71
<b>6. MÉTODOS POR CORTE Y RELLENO (CUT AND FILL STOPING).....</b>	<b>77</b>
<b>7. MÉTODO DE HUNDIMIENTO POR SUBNIVELES (SUBLEVEL CAVING).....</b>	<b>89</b>
7.1. Características generales .....	89
7.2. Sutiraje por subniveles para minería de Carbón .....	95
<b>8. METODO DE Tajo Largo (LONGWALL MINING) .....</b>	<b>101</b>
8.1. Carácterísticas generales .....	101
8.1.1. Tipos de pilas y escudos .....	105
8.1.2. Cepillo.....	112
8.2.1. Rozadora .....	115
8.3. Aplicación del método de tajo largo a minerales duros .....	120
8.4. Método de Tajo Corto (Shortwall Mining) .....	123
<b>9. MÉTODO DE HUNDIMIENTO POR BLOQUES (BLOCK CAVING).....</b>	<b>125</b>
<b>10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>137</b>



# 1. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN EN INTERIOR

## 1.1. IMPORTANCIA DEL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

Las condiciones económicas actuales requieren que las operaciones mineras se basen en soluciones innovadoras con las que optimizar la extracción del recurso mineral. En minería, el concepto de mineral es un concepto económico. Se entiende como mena a aquella concentración de minerales que pueden ser explotados y convertidos en un producto vendible para generar una ganancia financieramente aceptable bajo las condiciones económicas existentes. El mineral no existe hasta que ha sido adecuadamente definido, para lo cual se requiere haber acreditado fehacientemente las leyes y calidades minerales presentes en el yacimiento y su distribución. Se necesita un conocimiento suficiente del depósito mineral, de la tecnología minera, los métodos de procesamiento y los costes y los mercados para llevar a cabo un estudio de viabilidad que evalúe la posibilidad de convertirse en una mina.

La expresión "condiciones económicas existentes" también requiere ser explicada, toda vez que la mena extraída de la mina está compuesta por uno o más minerales con igual o diferente valor de mercado, con roca estéril sin valor comercial. La mena tratada en la planta de concentración se procesa en diferentes concentrados. El valor del mineral in-situ puede calcularse aplicando precios de mercado al contenido de metal y deduciendo los costes de tratamiento y transporte de concentrados y tarifas de fundición. El

saldo debe cubrir los costes directos de minería y dejar un margen para el operador de la mina.

Una vez desarrolladas con suficiente detalle las etapas de prospección, exploración e investigación del yacimiento y se ha recopilado suficiente información para garantizar un análisis posterior, puede comenzar el importante proceso de selección del método o métodos de explotación minera más adecuados al yacimiento. Ya en la etapa de diseño conceptual se toma la decisión de acudir a una explotación por minería subterránea, decisión que predefine algunos de los lineamientos que llevarán a la selección del método de minería de interior más adecuado. En esta etapa, la selección es preliminar y solo sirve como base para el diseño del proyecto y el estudio de viabilidad. Más tarde, puede ser necesario revisar los detalles, pero los principios básicos para la extracción de mineral deben seguir siendo parte del diseño final.

### Selección del método minero

Factores habitualmente considerados cuando se aborda la decisión de selección del método minero:

- Maximización de la seguridad
- Minimización de costes
- Minimización del plazo y planificación para alcanzar plena producción
- Optimización de la recuperación
- Minimización de la dilución
- Maximización de la mecanización / automatización
- Minimización de la fase de pre-producción, preparación y desarrollo / preparación de tajos
- Maximización de la ayuda de la gravedad
- Maximización del sostenimiento natural
- Maximización de la flexibilidad y adaptabilidad

Con respecto a los principios básicos empleados, actualmente se utilizan un número relativamente corto de métodos mineros de interior. Debido a la singularidad de cada depósito de mineral, las variaciones en cada uno de estos métodos son casi ilimitadas. Es imposible incluir incluso las principales variaciones en este capítulo; El objetivo de este capítulo es resumir brevemente las características de los principales métodos de minería.



Cada cuerpo mineral es único. Cada depósito mineral tiene una geología específica, una ley y distribución de la misma que lo hace único, como lo es también su forma y volumen. De la misma forma que también la roca y sus condiciones son variables, al igual que las ideas de los ingenieros que diseñan las minas, el mundo de las minas siempre mostrará características especiales. Las variaciones en los depósitos de mineral son tan grandes y el estado de la tecnología minera tan dinámico, que se comprende rápidamente que el método de explotación es propio de cada mina, aunque venga a encuadrarse en una de las familias que se describen en ésta publicación.

Una vez comprobada y verificada la viabilidad económica del proyecto, se deben seleccionar los métodos de extracción más adecuados de acuerdo con las condiciones naturales, geológicas, geométricas y las características espaciales del depósito mineral.

Las consideraciones incluyen:

1. Características espaciales / geométricas del depósito en cuestión: forma, tamaño,

espesor, inclinación, buzamiento y profundidad.

2. Resistencia de la roca a techo, muro y del cuerpo mineralizado.
3. Valor económico de la distribución de mineral, ley y distribución de la misma dentro del depósito.

La selección del método de explotación en minería subterránea hecha durante la ingeniería del proyecto, se basa principalmente en la configuración geológica y espacial del depósito. Por lo tanto, la elección inicial de los métodos de explotación que pueden ser aplicables a la mina en cuestión de entre los que se puede elegir, debe basarse en un análisis pormenorizado y objetivo de:

- Costes operativos y de capital estimados.
- Tasas de producción
- Disponibilidad de trabajos
- Disponibilidad de materiales/equipos
- Consideraciones ambientales.

A partir del análisis de estos factores, se elige el método que ofrece la combinación más razonable y optimizada desde el punto de vista de la seguridad, economía, eficiencia y recuperación minera.

Actualmente las excavaciones mineras subterráneas persiguen los siguientes principios:

1. Lograr generar un diseño de explotación que se acomode a la forma del cuerpo mineralizado.
2. Maximizar la extracción del mineral de interés, minimizando el movimiento de material estéril o de poco valor económico.
3. Conseguir la capacidad de desestabilizar y permitir el hundimiento de las zonas localizadas que tienen valor económico (mena) para conseguir su extracción y mantener estables las que actuarán como pilares estructurales del diseño minero.



## 1.2. LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXPLORACIÓN

En operaciones subterráneas, la correcta elección del método de explotación depende de la forma y el tamaño del filón, el valor de los minerales contenidos, la composición, estabilidad y fuerza del estrato rocoso, así como de la demanda de producción y las condiciones de seguridad del trabajo (aspectos que a veces son casi incompatibles). Aunque las técnicas de minería han avanzado con el paso del tiempo y cada mina es diferente, en todas se intenta conseguir un entorno de trabajo seguro y un funcionamiento rentable.

Indicadores importantes de la minería subterránea, como la producción neta, la eficiencia, coste de excavación, las pérdidas de mineral, la dilución del mineral y los efectos financieros finales dependen de la correcta elección y aplicación del método de explotación. El objetivo más importante de la aplicación de un método de explotación es la consecución de un menor coste de excavación y en consecuencia un mayor beneficio económico. Sin embargo, la selección del método no puede basarse únicamente en estos criterios.

Los condicionantes del macizo encajante y del yacimiento sobre la seguridad del trabajo y las operaciones, los condicionantes sobre la excavación, la eficiencia y la dilución del mineral también son características importantes en la selección de un método de explotación. Por ello, la selección del método depende de un gran número de factores relevantes. Estos factores se pueden clasificar en tres grupos principales:

- Factores geológico mineros tales como condiciones del piso, hastiales y techo, espesor de la capa o yacimiento, forma, inclinación, buzamiento, profundidad bajo la superficie, la distribución de leyes, la calidad de los recursos, etc.
- Factores de técnica minera, tales como la productividad anual, el equipo aplicado, consideraciones ambientales, la recuperación de la mina, la flexibilidad de los métodos, maquinaria y ritmo de extracción, etc.
- Factores económicos como costes de capital, costes de operación, tonelajes de mineral explotables, leyes del yacimiento, valor de minerales, etc.

En la práctica, hay casos en los que los factores mineros y geológicos permiten la aplicación de un método de explotación determinado, pero su aplicación no está justificada desde el punto de vista de sus resultados financieros. También hay casos en los que un método considere la utilización de determinados tipos de maquinaria, pero no se justifica desde el punto de vista de los factores de la técnica minera. De todos modos, la selección del método es un largo y difícil proceso de ingeniería, que requiere un gran conocimiento y una experiencia avanzada. Para una evaluación adecuada y eficaz, la toma de decisiones puede incluir tener que analizar gran cantidad de datos y tener en cuenta muchos factores. Por ello, hay varias metodologías que se han desarrollado en el pasado para la selección del método.

Con carácter general, la elección del método más adecuado se hace por el procedimiento de modelo tecno-económico. Este modelo se basa en la estimación de los efectos financieros esperados, que pueden ser adquirido por la aplicación de cada método de un grupo de métodos aplicables. Se selecciona el método de explotación que ofrezca los mejores resultados financieros.

Entre los factores determinantes en la elección del método de explotación, cabe destacar:

- Geometría del yacimiento
  - Forma (masiva, tabular, filoniana, etc.).
  - Potencia y buzamiento.
  - Tamaño.
  - Regularidad.
- Aspectos geotécnicos
  - Resistencia (de la mena, techo y muro).
  - Fracturación (intensidad y tipo de fracturación).
  - Campo tensional in-situ (profundidad).
  - Comportamiento tenso-deformacional.
- Aspectos económicos:
  - Leyes de la mena.
  - Valor unitario de la mena.
  - Productividad y ritmo de explotación.



- Seguridad y medio ambiente:
  - Aspectos de seguridad.
  - Impacto ambiental (paisaje, subsidencia, aguas etc.).
  - Impacto social.



### **1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS MINEROS**

Existen diferentes clasificaciones de los métodos de explotación utilizados en interior, atendiendo al estudio de diferentes parámetros o enfoques en el análisis.

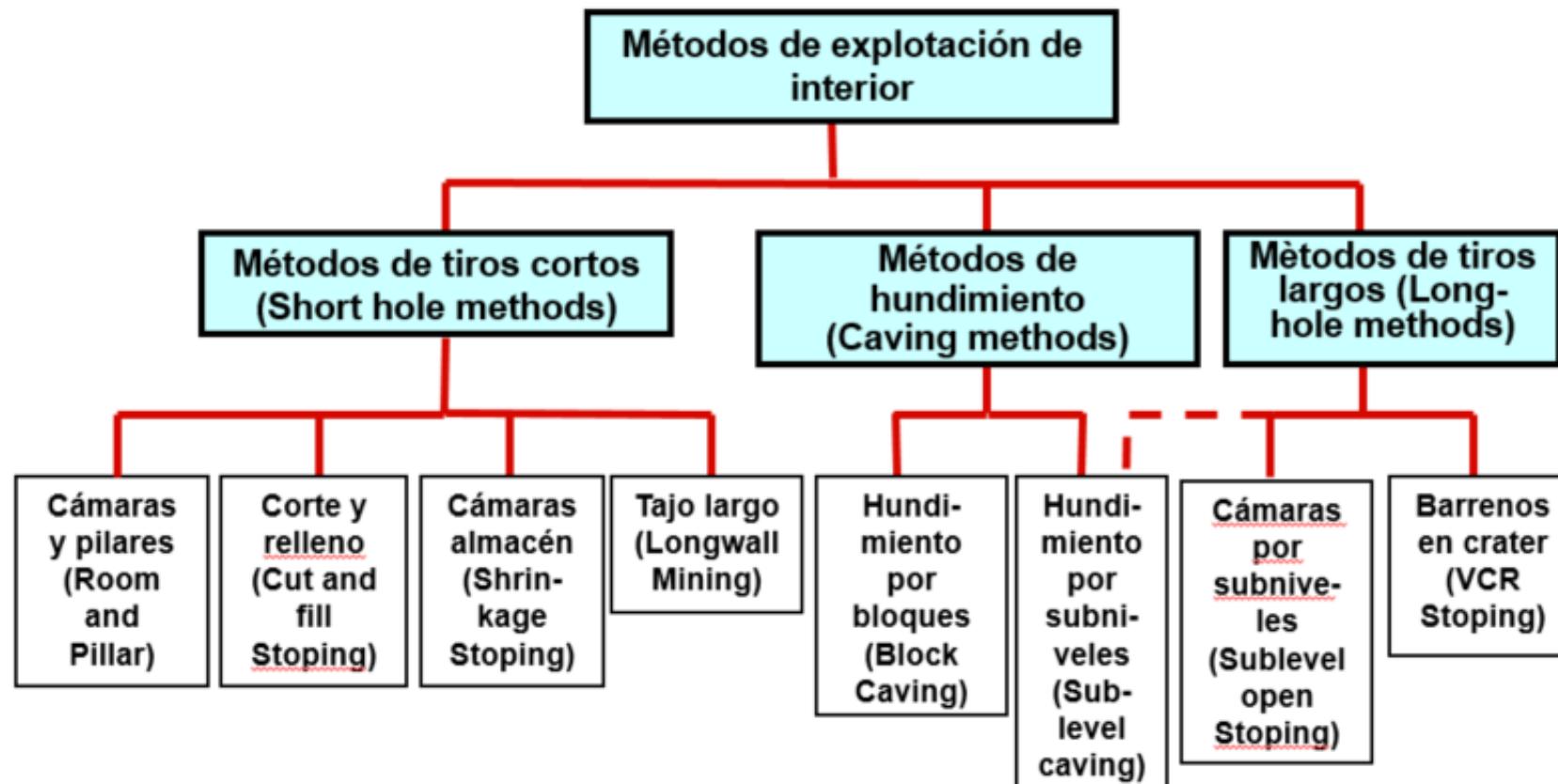
El diseño de un proyecto minero se ve continuamente desafiado por la naturaleza diversa de los depósitos subterráneos. La ingeniería debe lidiar con diferentes parámetros y características de un yacimiento al diseñar un proyecto minero. A modo de ejemplo, el

espesor, buzamiento y su orientación pueden suponer un problema a la hora de dimensionar la red de accesos. La dureza del mineral es importante, ya sea porque se derrumba fácilmente o porque sea necesario volarla para recuperarla. El mineral puede ser duro y sin embargo, la roca de techo ser susceptible de derrumbarse fácilmente. La roca a muro puede ser blanda e incapaz de soportar muchos de los requisitos que supone una extracción minera. Buzamientos inferiores al ángulo de reposo pueden

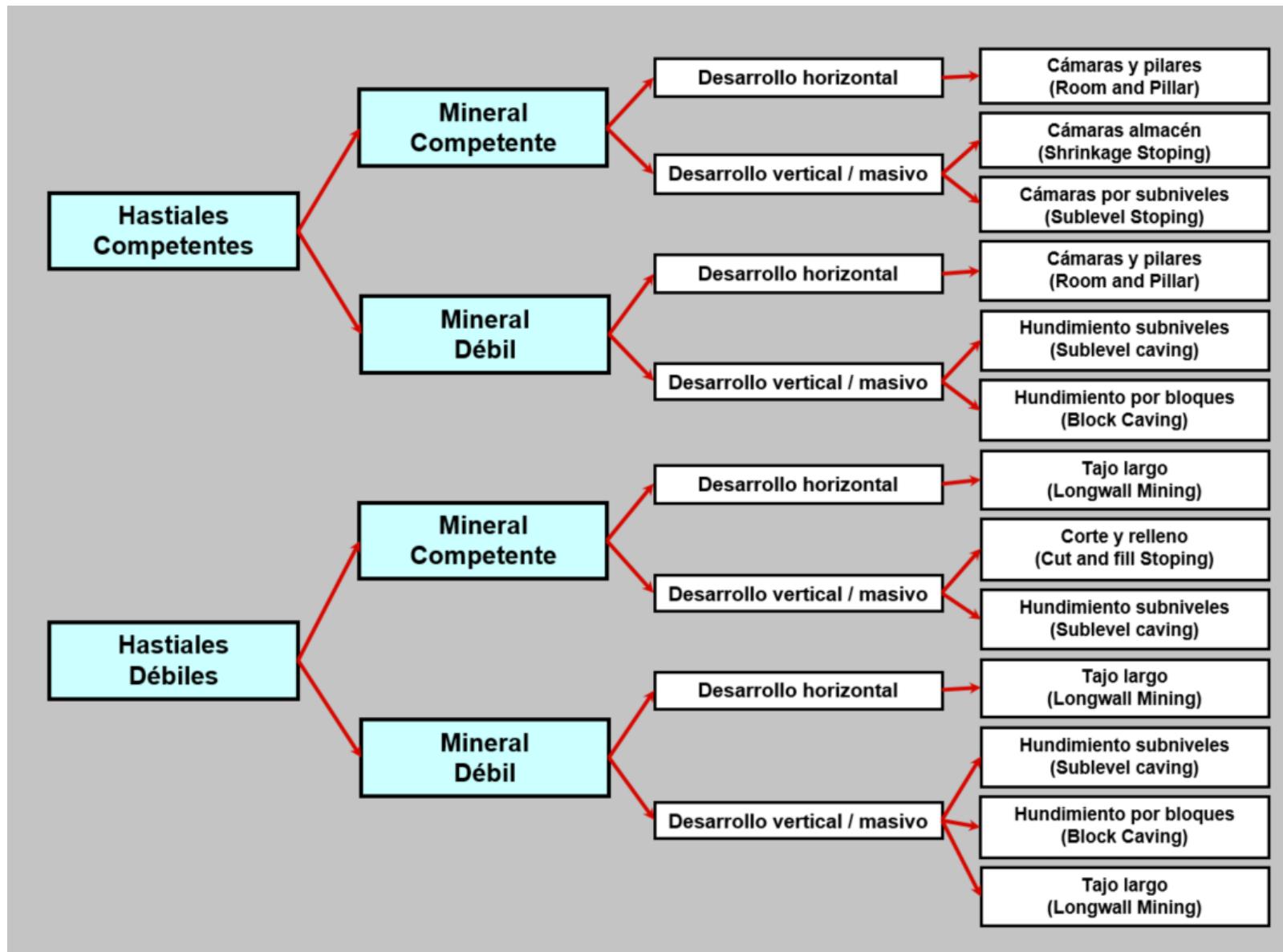
causar problemas de recuperación, ya que el mineral no se moverá por gravedad sobre las superficies tan planas que se van creando. El agua puede ser un problema. Estos son solo algunos de los factores que deben considerarse.



### 1.3.1. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA FORMA DE ARRANQUE



### 1.3.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CALIDAD DE LA ROCA MINERALIZADA Y LA ENCAJANTE





### 1.3.3. CLASIFICACIÓN POR LAS NECESIDADES DE SOSTENIMIENTO

En función del grado de soporte requerido, se establecen tres grupos de métodos de explotación:

- AUTOPORTANTES:
  - Cámaras y pilares (Room/stope and pillar).
  - Cámaras almacén (Shrinkage stoping).
  - Cámaras por subniveles (Sublevel stoping).
- CON SOSTENIMIENTO ARTIFICIAL:
  - Corte y relleno (Cut and fill).
  - Cámaras almacén.
  - Entibación cuadrada (antigua minería del carbón).
  - Testeros (antigua minería del carbón).
- POR HUNDIMIENTO:
  - Hundimiento por subniveles (Sublevel caving)
  - Hundimiento por bloques (Block caving)
  - Tajo largo (Long wall)
  - Tajo corto (Short wall)

Los métodos considerados “autoportantes” o de “sostenimiento natural” no requieren un sistema de sostenimiento artificial importante o de gran desarrollo para el soporte de los huecos excavados, sino que dependen de la competencia natural de la roca, de la forma de las excavaciones y de los pilares diseñados. Esta definición de métodos autoportantes no excluye el uso de pernos de sostenimiento en techo o de conjuntos estructurales ligeros de madera o acero, siempre que dichos elementos de sostenimiento artificiales no alteren significativamente la capacidad de carga de la estructura natural.

El método de cámaras y pilares se emplea para la extracción de depósitos subhorizontales y tabulares, mientras que los métodos de cámaras almacén y de cámaras por subniveles se aplican fundamentalmente a cuerpos mineralizados verticales o de alta inclinación.

El método de cámaras almacén fue muy utilizado antiguamente en minería distinta a la del carbón ha sido muy popular en el pasado, particularmente en la minería sin

carbón y donde la gravedad se utilizaba para el transporte de mineral y la mena fragmentada quedaba almacenada dentro del hueco de excavación, actuando como plataforma de trabajo para continuar la excavación hacia arriba al tiempo que se conseguía un sostenimiento de los hastiales de manera temporal. Fue particularmente utilizado en el periodo anteriores a la mecanización, cuando prevalecían operaciones a pequeña escala en depósitos tipo veta. Sin embargo, con el aumento de los costes, la escasez de mano de obra cualificada y la tendencia hacia la mecanización, el método se vio desplazado en gran medida por el de subniveles y el de corte y relleno.

Los métodos con sostenimiento artificial requieren una fuerte utilización de técnicas de entibación y sostenimiento artificial para mantener la estabilidad en los huecos de explotación, así como un control sistemático del macizo en toda la mina. Estos métodos de explotación se usan cuando los huecos de producción excavados (cámaras) no son lo suficientemente estables como para permanecer abiertos durante la operación, pero se requiere mantener necesariamente abiertos estos huecos para prevenir hundimientos y subsidencias. Por tanto, son métodos que se emplean cuando los métodos autoportantes o los métodos de hundimiento no son aplicables. El tipo de roca en éste caso varía de moderadamente competente a mala. En el diseño de sistemas de sostenimiento artificial para proporcionar diferentes grados de control de rotura de las paredes y hundimiento, es un pre-requisito tener un buen conocimiento de la capacidad de carga de la estructura de roca natural y en función de ella, se diseña la solución de entibado más adecuada.

El método de corte y relleno y el de cámaras almacén están pensados para rocas moderadamente competentes, mientras que los métodos de entibación son indicados para entornos de roca menos competente. La utilización de estos métodos fue progresivamente decayendo a partir de los años 50 del siglo XX, básicamente porque de ellos, solamente el método de corte y rellenos prestaba a la mecanización, además de ser métodos muy intensivos en utilización de mano de obra, a la par que una muy baja productividad.

Los métodos de hundimiento se definen como aquellos en los que, de una manera controlada, calculada y predefinida, se consigue el progresivo hundimiento y colapso tanto del mineral del yacimiento, como de la roca encajante o estéril. Los tres métodos más importantes son:



- Método de Tajo Largo
- Método de hundimiento por subniveles
- Método de hundimiento por bloques

La minería por tajo largo se usa en depósitos subhorizontales de tipo tabular (fundamentalmente es el caso del carbón), mientras que los otros dos tienen aplicación en los casos de depósitos masivos inclinados o verticales, por lo que son utilizados casi exclusivamente en minería metálica y no metálica (de minerales industriales). Aquí, los principios de la mecánica de rocas se aplican para inducir

controladamente el hundimiento, evitando al mismo tiempo que éste pueda producirse libremente. Para ello, la excavaciones y labores de desarrollo deben diseñarse y ubicarse para resistir cualquier movimiento inducido por la excavación del terreno. El hundimiento de la superficie como resultado de la propagación hacia arriba de la subsidencia es inevitable y debe permitirse en el caso de hundimiento por subniveles y hundimiento por bloques. La producción debe mantenerse a un nivel constante y continuo para evitar interrupciones o paradas en la actividad de hundimiento. Una tecnología minera altamente avanzada, así como una gestión experimentada, son indispensables para una correcta y acertada operación de hundimiento.



## 1.4. SISTEMAS TECNOLÓGICOS MÁS EMPLEADOS EN CADA MÉTODO

Sistemas de explotación más utilizados:

- **Sostenimiento y fortificación:**
  - Cuadros (madera o acero).
  - Bulones y pernos.
  - Rellenos.
  - Posteo.
  - Entibaciones mecanizadas (carbón).
- **Arranque:**
  - Por gravedad (Hundimiento controlado).
  - Perforación y voladura.
  - Arranque mecánico (rozadoras, perforadoras, etc.).
- **Carga y desescombro del frente:**
  - Sistemas discontinuos (Cargadoras)
  - Sistemas continuos (Transportadores continuos)
- **Transporte en interior:**
  - Sistemas discontinuos (LHD, Camiones).
  - Sistemas continuos (Transportadores de banda, panzeres).
- **Extracción:**
  - Pozos de extracción.
  - Planos inclinados para transporte por banda.
  - Rampas para camión.
  - Sistemas hidráulicos.
- **Servicios:**
  - Ventilación.
  - Drenaje y desagüe.
  - Etc.



	Cámaras y pilares	Cámaras por subniveles	Corte y relleno	Hundimiento
<b>Sostenimiento de cámaras</b>				
Relleno	Recuperación pilares	Recuperación pilares	X	
Bulones	X		X	
Cables cementados	X	X	X	
<b>Arranque</b>				
Gravedad				X
Perforación y voladura	X	X	X	X
Arranque mecánico	X			
<b>Carga en el frente</b>				
Sistemas continuos	X			
Cargadores	X			
LHD	X	X	X	X
<b>Transporte</b>				
LHD	X	X	X	X
Camiones	X	X	X	X
Transporte continuo (bandas, etc.).	X			
<b>Extracción</b>	Todos	Todos	Todos	Todos
<b>Servicios</b>	Todos	Todos	Todos	Todos



## 1.5. CARACTERÍSTICAS COMPARATIVAS DE LOS MÉTODOS MINEROS

Método	Producción (t/hombre y turno)	Dilución (%)	Pérd mineral (%)	Min de trab des (%)	Coste relativo	Coste mano de obra en costes totales (%)
Minería a cielo abierto	50 – 250	5	0 – 5	-	1,0	25 – 35
Room and pillar	10 – 40	10 – 15	15 – 40	5 – 10	1,2	50 – 60
Cut and fill stoping	5 – 35	5 – 10	5 – 15	5 – 10	4,5	50 – 60
Shrinkage stoping	5 – 30	10	10	5 – 10	6,7	50 – 60
Longwall mining	10 – 40	10 – 15	5 – 15	10 – 15	1,7	50 – 60
Sublevel stoping	25 – 120	10 – 15	5 – 15	5 – 10	1,3	40 - 50
UG Benching	50 – 150	10 – 20	5 – 15	10 – 15	1,2	40 - 50
VCR stoping	50 – 150	10	10	5 – 10	2,0	40 - 50
Sublevel caving	20 – 65	20 – 30	15 – 30	15 - 45	1,5	40 - 50
Block caving	25 - 200	15	5	< 5	1,0	20 - 50

## 2. MÉTODO DE CÁMARAS Y PILARES (ROOM AND PILLAR)

### 2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Este método de explotación es utilizado de manera muy extensa debido a su bajo coste de explotación, a la vez que permite una explotación moderadamente selectiva. Desde muy antiguo, una de sus principales ventajas fue que puede llegarse a una mecanización completa, lo que reduce ampliamente los costes de explotación.

El método de explotación por cámaras y pilares está pensado para depósitos de tipo tabular horizontal o de ángulo de buzamiento bajo y de espesor limitado, como es el caso de algunos yacimientos de lutitas cupríferas, carbón, sal común, potasa, calizas, dolomitas, etc., dejando una o varias cavidades vacías, manteniendo el hueco creado estable, bien de forma natural o bien mediante escasos elementos de refuerzo. El método requiere dejar pilares para soportar el techo de las cámaras abiertas, ya que estos huecos quedan abiertos y vacíos una vez que concluyen las labores de explotación. Permite la explotación sin problemas de cuerpos mineralizados ubicados paralelamente y separados por zonas de estériles. La recuperación del yacimiento, aun no siendo del 100 %, puede llegar a recuperaciones satisfactorias del orden del 90 %.

Con el fin de recuperar la mayor cantidad posible de mineral, se intenta dejar los pilares lo más pequeños posibles. El techo debe permanecer intacto, por lo que es frecuente que se instalen bulones en el techo como refuerzo.

Las cámaras y los pilares normalmente están dispuestos con arreglo a patrones regulares. Los pilares se pueden diseñar con secciones transversales circulares o cuadradas o bien en forma de paredes alargadas que separan las cámaras. El mineral contenido en los pilares no es recuperable y, por tanto, no están incluidos

en el cálculo de reservas explotables. Diferentes condiciones geológicas dan lugar a variaciones en el método de cámaras y pilares.

Existen tres variantes del método, habitualmente conocidas por su denominación en inglés:

**Classic room-and-pillar mining.** variante que se aplica a depósitos horizontales o subhorizontales, con espesores de capa de moderados a gruesos y a depósitos inclinados con capas de mucho mayor espesor. La extracción del cuerpo mineral crea grandes huecos donde la maquinaria puede desplazarse fácilmente sobre un piso plano. Los cuerpos mineralizados con grandes alturas verticales se extraen en franjas horizontales comenzando por la parte superior y descendiendo de forma escalonada.

**Post room-and-pillar mining.** Esta variante del método se aplica a yacimientos tabulares inclinados con ángulos de inclinación de 20º a 55º. Se trata de explotaciones donde las cámaras pueden alcanzar grandes alturas verticales, por lo que el hueco explotado se va rellenando secuencialmente para mantener estables los pilares y los huecos, a la vez que el propio relleno sirve de apoyo para la circulación y operación de la maquinaria para la explotación de la siguiente franja.

**Step room-and-pillar mining.** Es una adaptación del método a los casos en los que el buzamiento del cuerpo mineralizado o de la capa es demasiado alto como para permitir la libre circulación y operación de



vehículos y maquinaria sobre neumáticos. Por esta razón los accesos y las extracciones se orientan con un cierto ángulo, dejando un escalonado. Son explotaciones en las que, en muchos casos, solo pueden operar máquinas de perforación y de arranque y carga sobre orugas. La explotación avanza en sentido descendente.

Criterios de selección del método		
	Aceptable	Optimo
GEOMETRIA DEL YACIMIENTO		
Potencia	> 1 m	> 3 m
Buzamiento	< 30°	Horizontal
Tamaño	Cualquiera	Cualquiera
Regularidad		
ASPECTOS GEOTÉCNICOS		
Resistencia (techo)	>300 k/cm <sup>2</sup>	> 500 k/cm <sup>2</sup>
Resistencia (mena)	s/profundidad	> 500 k/cm <sup>2</sup>
Fracturación (techo)	Baja	Muy baja
Campo tensional in-situ (Profundidad)	< 1000 m	< 600 m
Comportamiento tenso-deformacional	Elástico	Elástico
ASPECTOS ECONÓMICOS		
Valor unitario de la mena	Bajo	NA
Productividad y ritmo de explotación	Alto	NA

Dependiendo de las características del mineral explotado, pueden extraerse las siguientes características resumidas del método:

### Variantes del método de cámaras y pilares

Potencia	Buzamiento < 7°	Buzamiento > 7°
< 10 m	Convencional Pasada única	Escalonado Pasada única
10 – 20 m	Convencional Pasada múltiple	Escalonado Pasada múltiple
> 20 m	Room & Pillar con Subniveles Room & Pillar con Relleno	

### Cámaras y pilares (mineral duro: arranque con explosivo)

- **Explotación:**
  - Cámaras de altura igual a la potencia del yacimiento con pilares de mineral repartidos y, ocasionalmente, pilares barrera de dimensiones 3 o 4 veces la altura de excavación. Los pilares pueden recuperarse con relleno o pilares artificiales.
- **Preparación (mínima, casi nula):** En yacimientos inclinados, niveles horizontales de acceso y transporte a distinta cota o rampas orientadas según pendientes asequibles.
- **Variantes:**
  - Piso: Horizontal, inclinado, escalonado
  - Arranque: Según potencia:
    - Una pasada
    - Dos pasadas:
      - Apertura a muro + realce (H/V)
      - Apertura a techo + banqueo inferior (H/V)
    - Varias pasadas: Con relleno y pilares a veces infradimensionados que permiten una rotura controlada.  
<>"Corte y relleno con pilares".
- **Pilares:** Regulares o irregulares.



- **Sistema:** Discontinuo:
  - PERFORACIÓN
    - Horizontal (manual o jumbo)
    - Vertical (manual o carro)
  - VOLADURA
  - CARGA:
    - LHD
    - Cargadora convencional
    - Scraper
  - TRANSPORTE:
    - Camión 40-50 t
    - Tren
  - SOSTENIMIENTO:
    - Bulonaje
    - Cables
- **Aplicación:**
  - Yacimientos horizontales - subhorizontales / semihorizontales (< 30°).
  - Mineral y techo competentes, al menos por un tiempo.
  - Depósitos de pequeña potencia (2 a 9 m). Con relleno, hasta 30 m.
  - Generalmente minerales metálicos (duros).
  - Profundidad <600 m (máx 900 m con mineral muy competente).
- **Cámaras y pilares (mineral blando: arranque mecánico o con explosivo)**
  - **Explotación:**
    - Dividida en paneles de 600-1200m de longitud y 90-120m de anchura con calles en sentido longitudinal de las que parten otras en dirección perpendicular u oblicua (maniobrabilidad del minador).
    - La altura es igual a la potencia del yacimiento y la anchura de las calles varía entre 4 y 9 m con pilares de anchura igual o tres veces superior según sostenimiento y tiempo de utilización.
    - Los pilares pueden extraerse por hundimiento (70-90 % de recuperación) o no recuperarse (40 - 60 % de recuperación).
  - **Preparación:**
    - Red de galerías longitudinales y transversales de acceso y transporte excavadas en mineral. Con más de una entrada y recortes a 90° cada 30 m aproximadamente si la mina es grisosa (USA).
  - **Sistema:**
    - Cílico (requiere más tajos disponibles):
      - Apertura por roza (Cortadora de brazo)
      - Perforación (Jumbo)
      - Voladura
      - Carga (Cargadora de bandeja / Cargadora LHD)
      - Transporte (Shuttle-car D/E o Cinta)
      - Sostenimiento
    - Continuo (requiere menos tajos disponibles)
      - Arranque y carga (Minador)
      - Transporte (Shuttle-car o cinta)
      - Sostenimiento
  - **Aplicaciones:**
    - Yacimientos horizontales/semihorizontales (< 30°) de minerales blandos, generalmente no metálicos (carbón, potasa, etc.).
    - Mineral y techo competentes, al menos por un tiempo.
    - Depósitos de pequeña potencia (1 a 3 m). Máx 4 - 5 m.
    - Profundidad: < 450 m (carbón); < 900 m (potasa).



## 2.2. CLASSIC ROOM-AND-PILLAR MINING.

En el método clásico de cámaras y pilares el trabajo en labores de desarrollo se reduce al mínimo, ya que una vez iniciada la explotación en los tajos iniciales, el propio avance va preparando los sucesivos tajos y las vías de comunicación se establecen dentro y aprovechando al máximo las posibilidades que ofrecen las propias cámaras abiertas. La excavación de desarrollo se puede combinar perfectamente con la de producción y los propios rebajes mineros pueden servir como rutas de transporte. La explotación del mineral requiere en muchas ocasiones las mismas técnicas de perforación y voladura que para la apertura de galerías y las dimensiones de estas se equiparan a las dimensiones de la cámara en anchura y altura. Cuando las condiciones geológicas son favorables, las cámaras pueden ser muy amplias y la perforación ser entonces desarrollada con jumbos de grandes prestaciones.

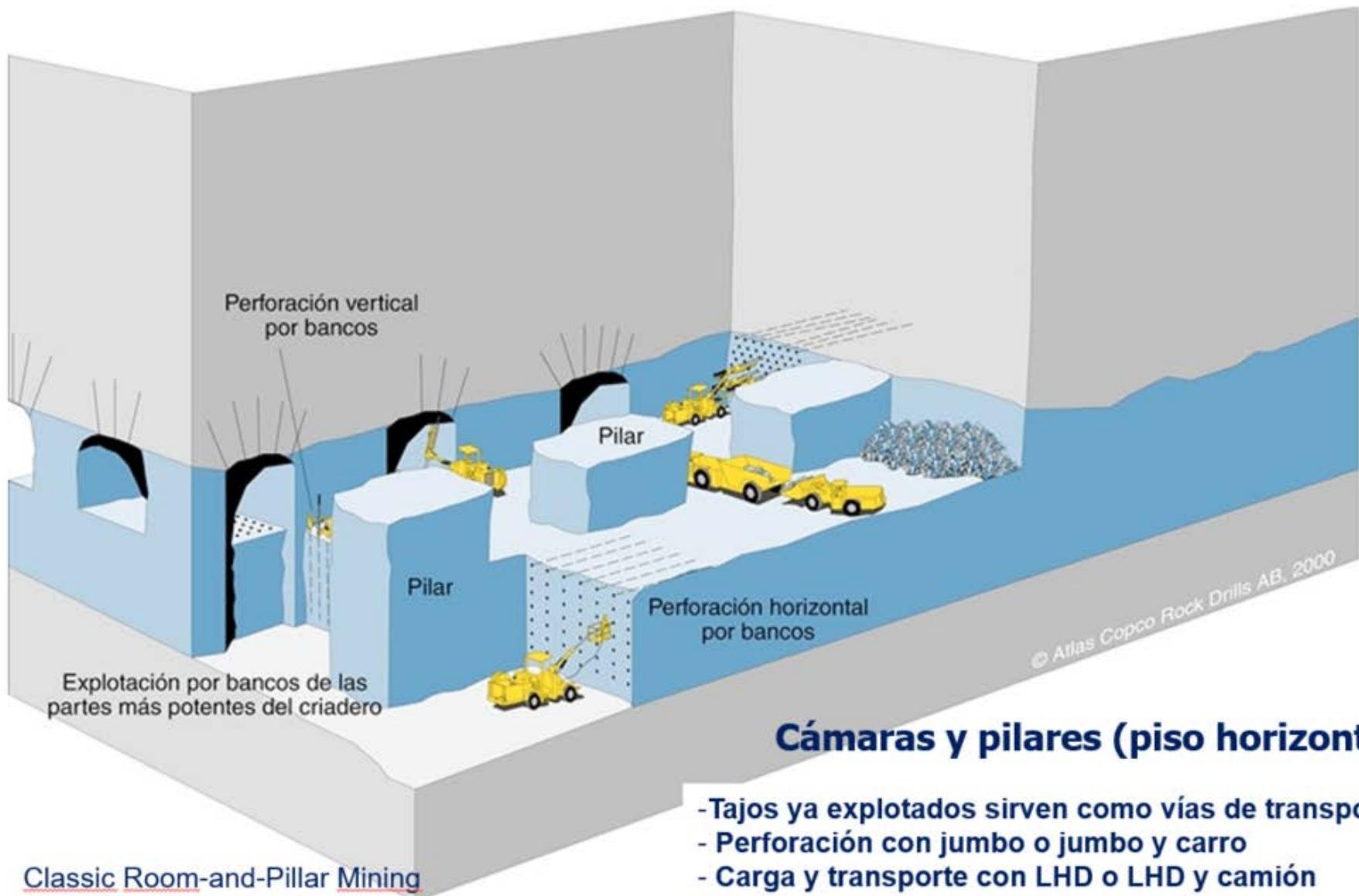
Los depósitos de elevado espesor y que consecuentemente se traducen en importantes alturas de cámara, se explotan por franjas o rebanadas horizontales, empezando por la franja superior, inmediatamente por debajo del techo de la cámara. En ésta etapa, se van colocando bulones para el control del techo, dimensionados con la longitud suficiente para un anclaje adecuado. Las secciones por debajo de esta primera franja se recuperan en una o varias etapas por banqueo utilizando perforadoras convencionales, mucho más prácticas y que permiten optimizar la utilización del explosivo en las voladuras, quedando los jumbos de perforación utilizados para las zonas donde el banqueo no sea posible. El mineral volado se carga por medio de cargadoras frontales y en cuanto al transporte, se puede acudir a diferentes alternativas, dependiendo de la altura del rebaje y la distancia de transporte. Cuando la abertura de la cámara es lo suficientemente alta, el camión volquete convencional proporciona un transporte

con un coste suficientemente económico a la vez que rápido y flexible. En los



cuerpos mineralizados delgados, se tendría que acudir, por el contrario, a maquinaria de perfil bajo como la utilizada en carbón, especialmente construida para minas con cámara de pequeña altura. En estos casos, la carga del mineral se hace con equipos LHD de bajo perfil y la carga se transfiere a camiones estacionados en bahías de carga especiales y permitir un transporte a largas distancias. Este tipo de equipo móvil es ideal en cuerpos de mineral planos o ligeramente inclinados.

En el diseño de cámaras y pilares, se pueden establecer varias áreas de producción, y las comunicaciones son directas y simples en todos los casos, factores todos ellos que permiten una alta tasa de utilización del personal y la maquinaria en un sistema sumamente eficiente en la recuperación del mineral.



- Tazos ya explotados sirven como vías de transporte
- Perforación con jumbo o jumbo y carro
- Carga y transporte con LHD o LHD y camión



Fuente: <https://www.groffengineering.com>



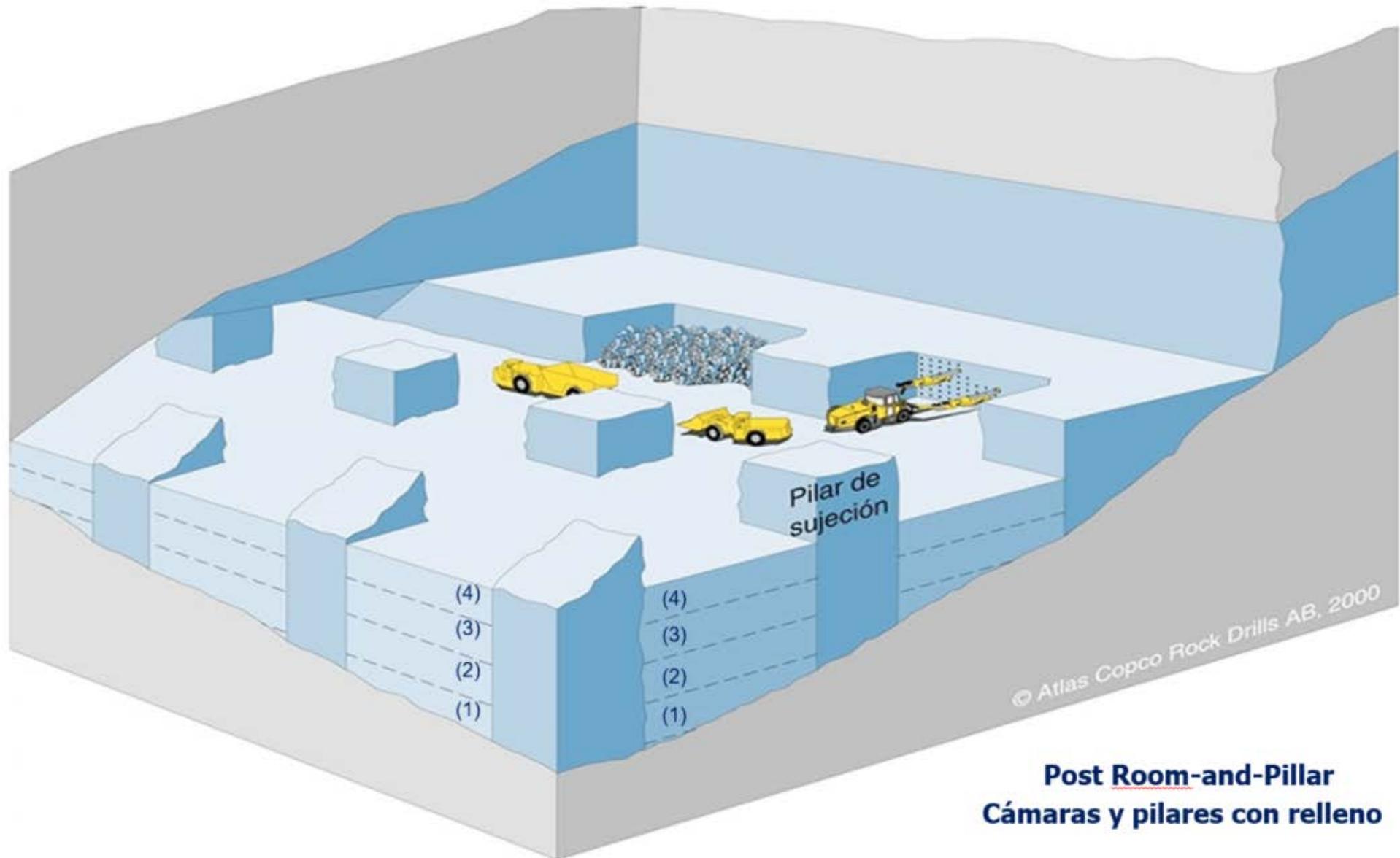
Fuente: <https://www.volvoce.com>



### **2.3. POST ROOM-AND-PILLAR MINING.**

En la práctica viene a ser un método combinado entre el de cámaras y pilares y el de corte y relleno. El mineral se recupera en franjas horizontales comenzando en éste caso por la parte más baja o fondo de la cámara, y avanzando hacia arriba. Los pilares se dejan dentro del rebaje para sostener el techo, pero el espacio excavado se va llenando hidráulicamente con estériles de planta y el siguiente corte se extrae con maquinaria que trabaja desde la superficie de llenado, es decir, con pleno apoyo sobre el relleno. Los pilares no se extraen y van quedando rodeados por las sucesivas capas de relleno. El relleno granular con materiales tipo arenas permite la posibilidad de modificar el diseño del rebaje y adaptar el método

a las variaciones que se presenten en las condiciones de la roca y los límites del cuerpo mineral. Tanto el relleno hidráulico como el relleno de arena aumentan la capacidad de soporte del pilar, lo que permite una mayor tasa de recuperación de mineral que el que se obtendría solo con el método clásico de cámaras y pilares, ya que el método “post room and pillar” combina las ventajas del método de minería por corte y relleno, lo que permite trabajar en pisos planos y lisos, con la amplitud de espacios que permite la minería por cámaras y pilares. El fácil acceso a múltiples puntos de producción favorece el uso de equipos mecanizados eficientes.





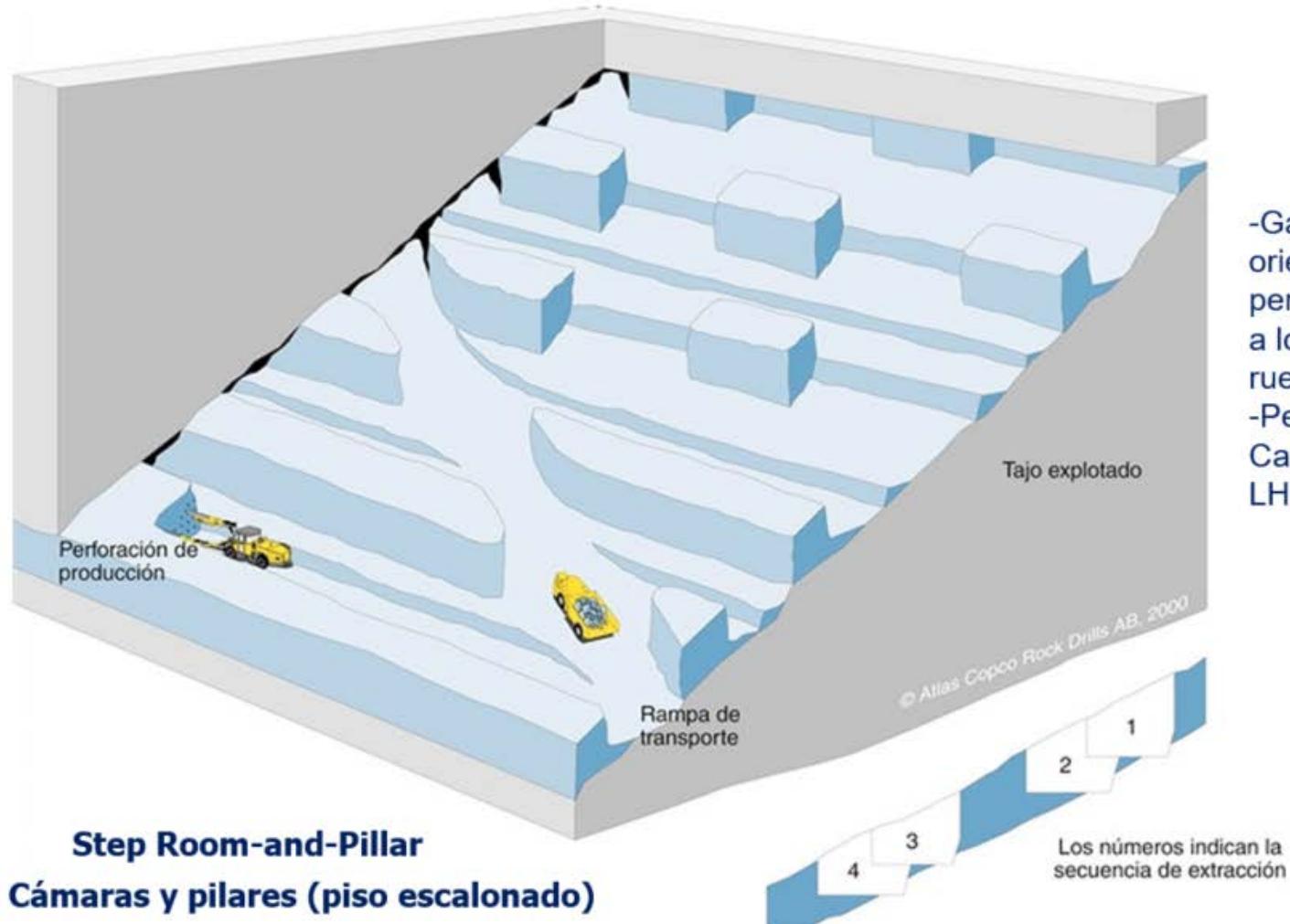
## 2.4. STEP ROOM-AND-PILLAR MINING.

Es una variación en la cual la parte de muro de un cuerpo mineralizado se adapta para conseguir que pueda maniobrar maquinaria sobre orugas, aunque modernamente éstas han ido quedando desplazadas y sustituidas por maquinaria sobre neumáticos.

Aunque las aplicaciones no se pueden generalizar por completo, ésta minería por escalones se aplica a depósitos tabulares con espesores de 2 a 5 m y buzamientos que oscilan entre 15º y 30º.

El método presenta un diseño en el que los rebajes y las vías de transporte cruzan la dirección de buzamiento del cuerpo mineral. Al orientar los rebajes en ciertos ángulos a través de la pendiente, los pisos de rebaje asumen un ángulo que los vehículos sin orugas recorren cómodamente. Las rutas de transporte se cruzan en la dirección opuesta para establecer el acceso desde la pista a los rebajes y para transportar el mineral arrancado directamente al exterior o bien al pozo de extracción o banda transportadora de salida según el caso.

El desarrollo principal del escalonamiento y de los pilares incluye una red de galerías de transporte paralelas que atraviesa el yacimiento en direcciones predeterminadas. Los pisos de estas galerías se mantienen en unas pendientes que pueden remontar los camiones de mina. Las cámaras se excavan desde las galerías de transporte ramificándose en un ángulo predeterminado. La abertura se avanza entonces a modo de cámara hacia adelante en un modo similar a como se hace en una galería y se excava otra inmediatamente contigua pero ligeramente por debajo y siguiendo la pendiente, quedando adyacente a la primera. Este procedimiento se repite hasta que el tramo del techo se vuelve casi demasiado ancho para permanecer estable. Asimismo, se deja a modo de pilar una franja de roca alargada y paralela a los rebajes. El siguiente tramo se excava de la misma manera, y la explotación minera continúa hacia abajo paso a paso. Los números en la figura indican la secuencia de extracción.



- Galerías de acceso orientadas según pendientes, y asequibles a los equipos sobre ruedas
- Perforación con jumbo. Carga y transporte con LHD o LHD y camión

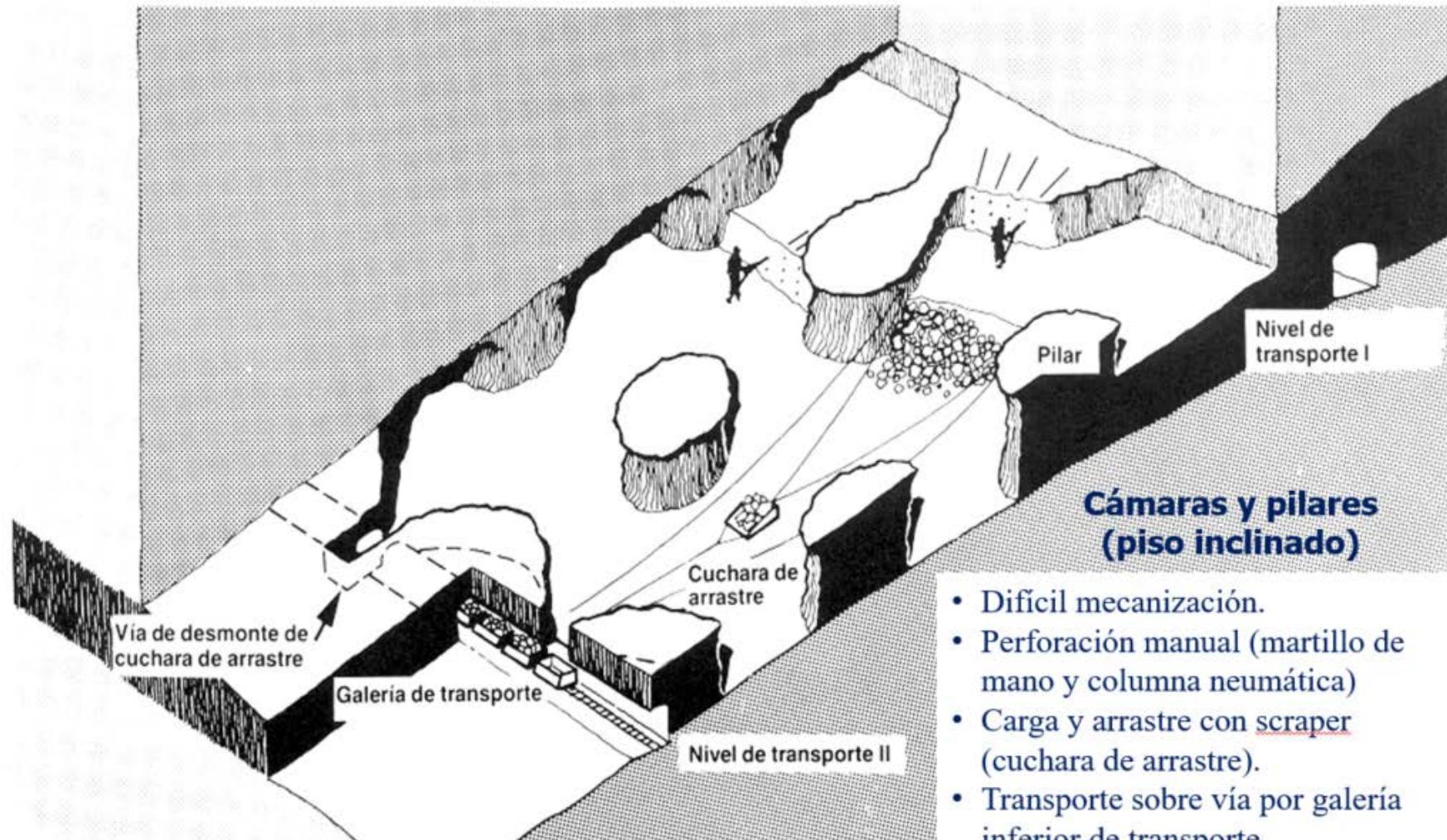
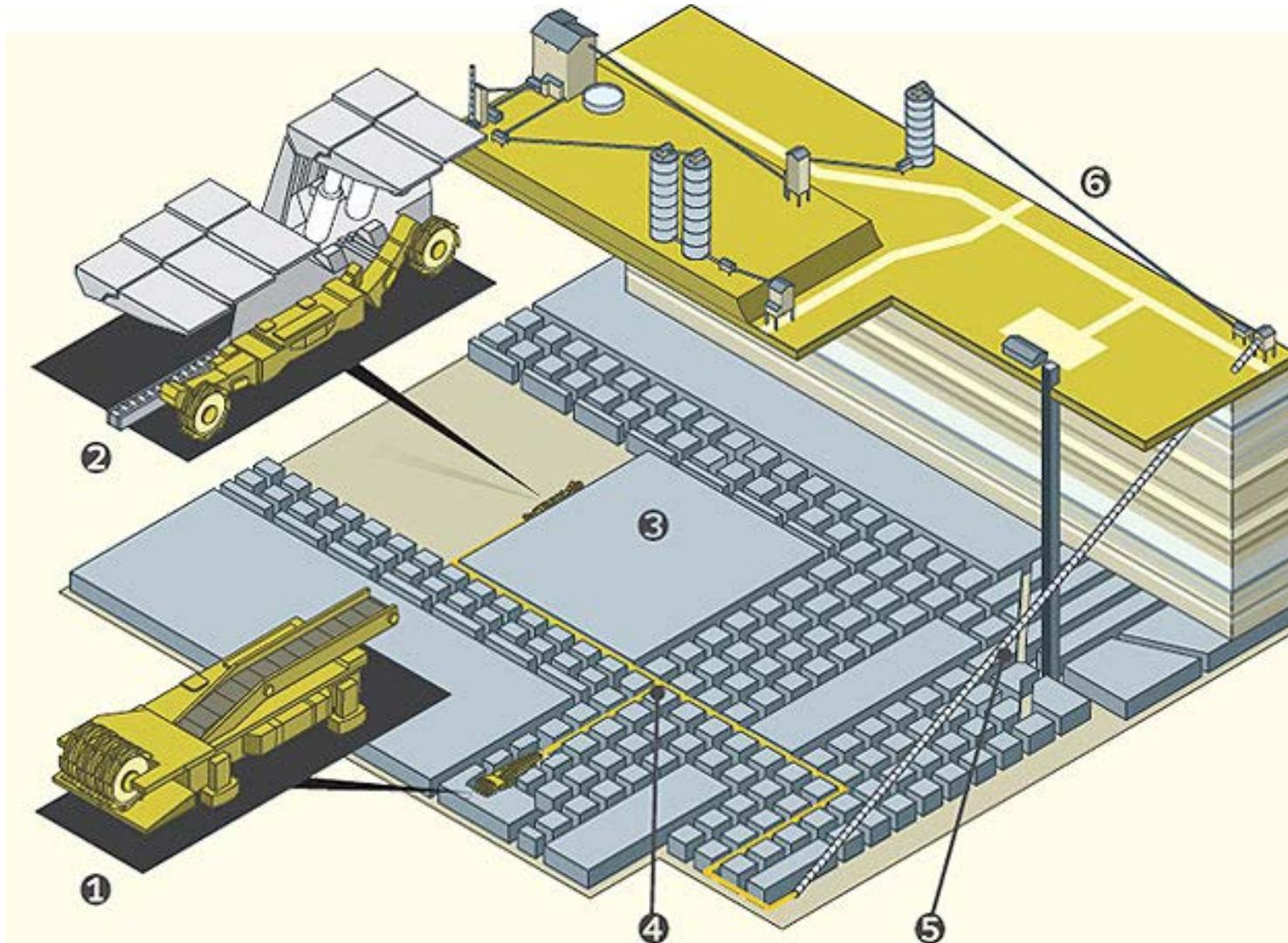
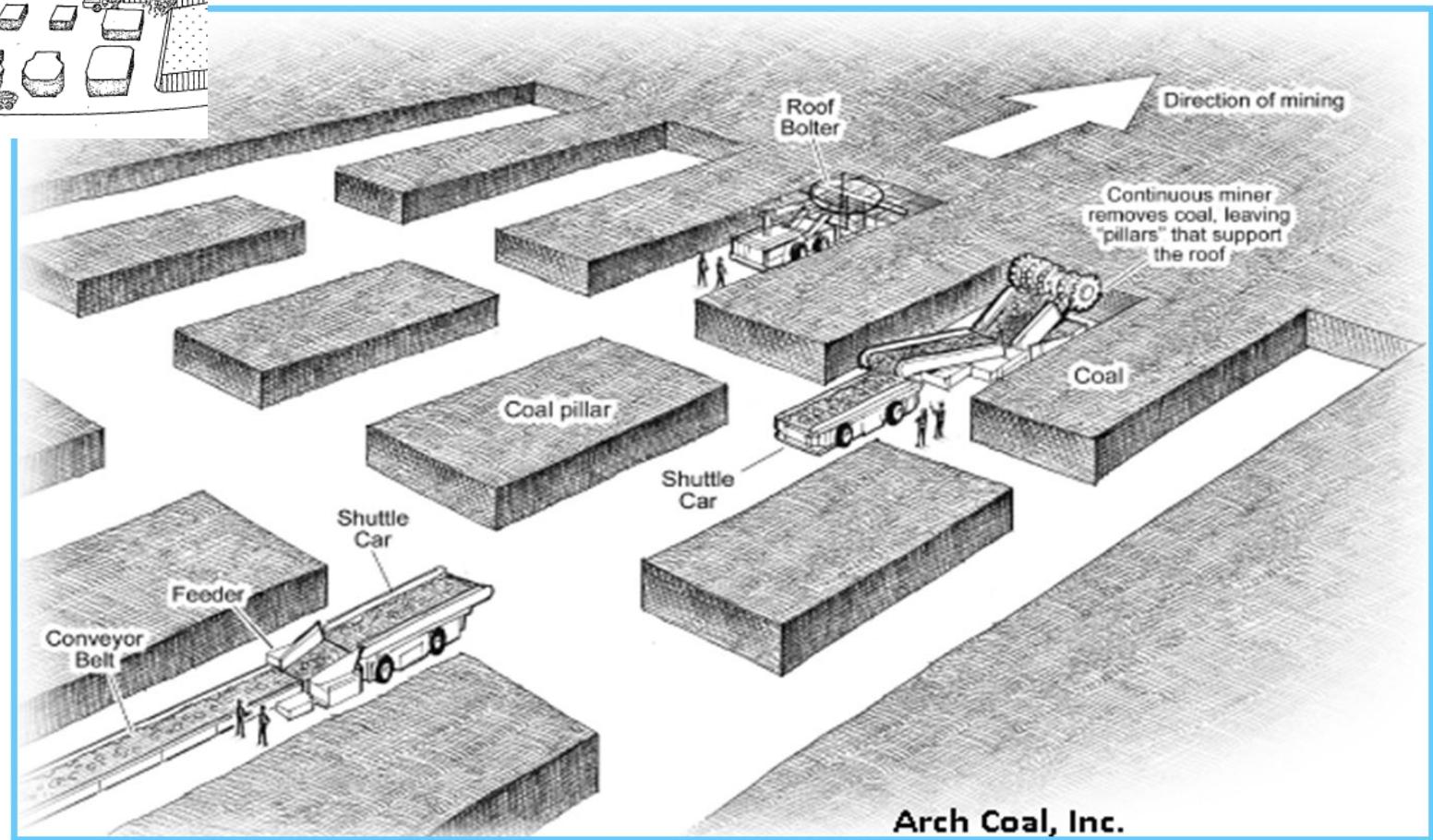
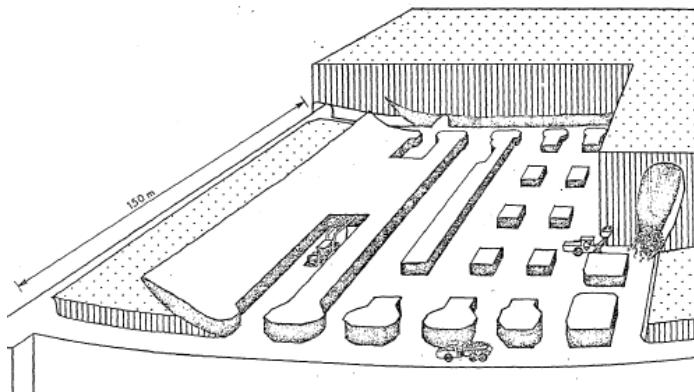


Imagen gráfica de cómo se aplicaba el método antiguamente.

## 2.5. CÁMARAS Y PILARES EN MINERÍA DE CARBÓN







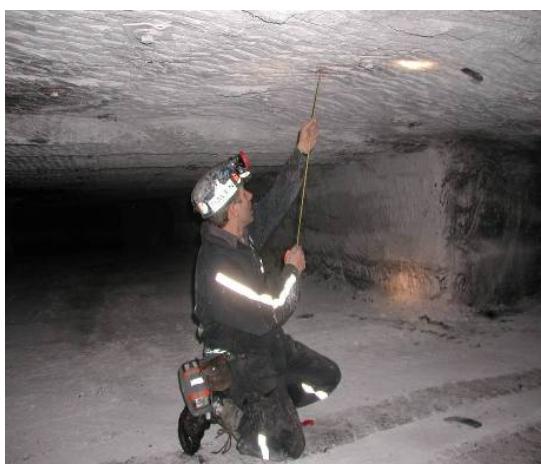
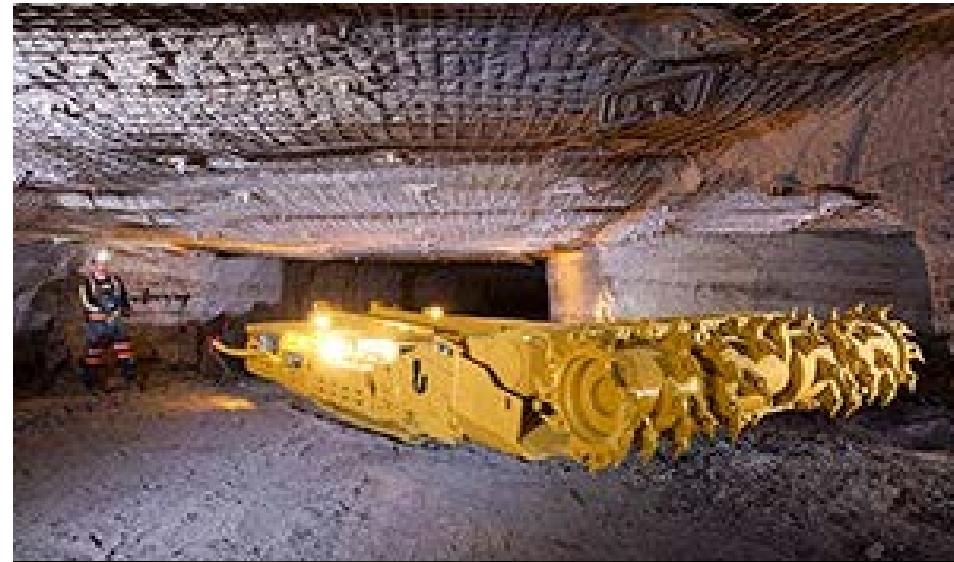
Twentymile Coal Mine, Co, USA  
Coal being discharged from one of the electric-powered  
shuttle cars used in gateroad development.





© 2006 JOY MINING MACHINERY

## 2.6. CÁMARAS Y PILARES DE BAJO PERFIL











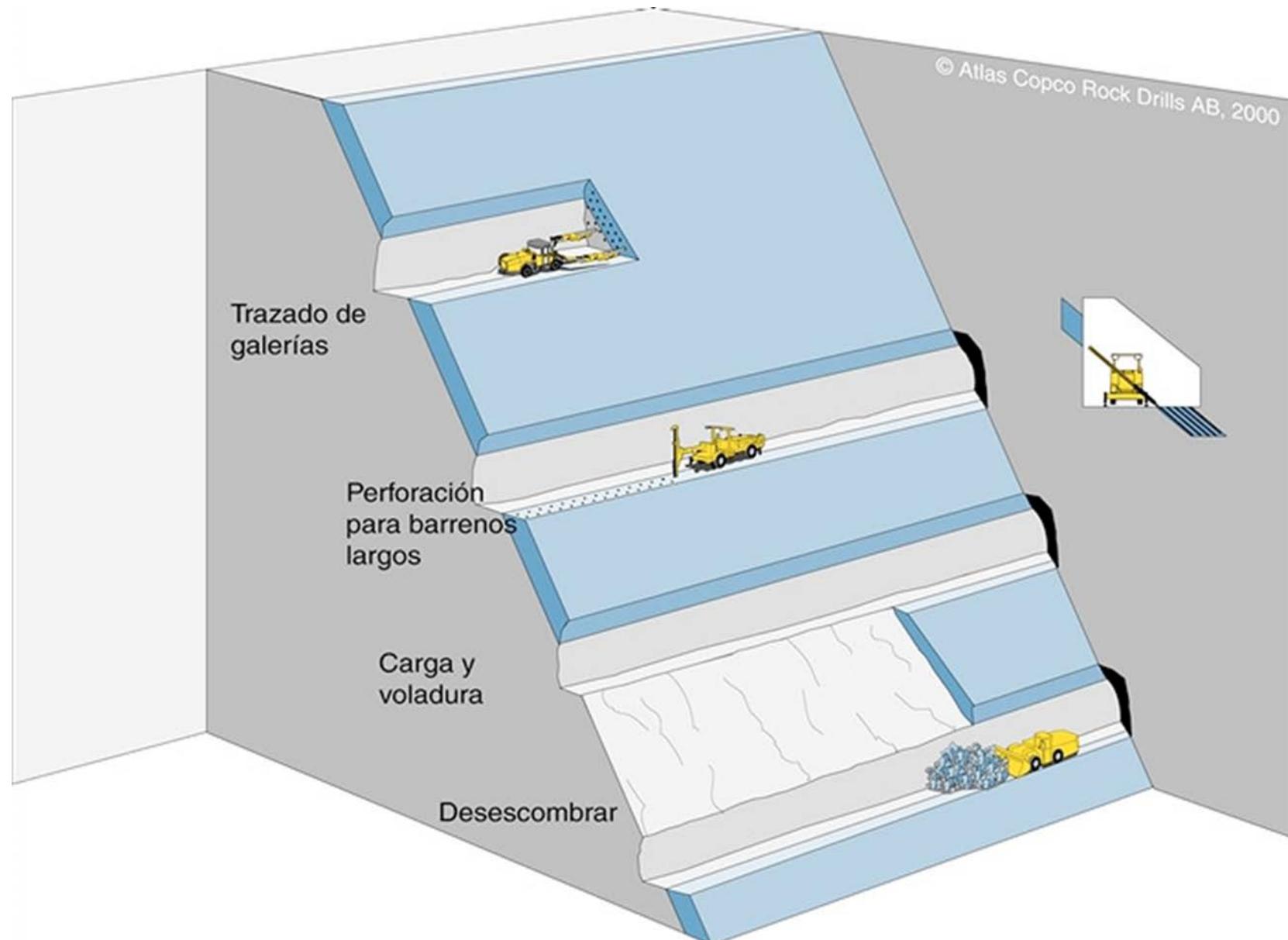
### 3. MÉTODO DE VETAS ANGOSTAS (VEIN MINING)

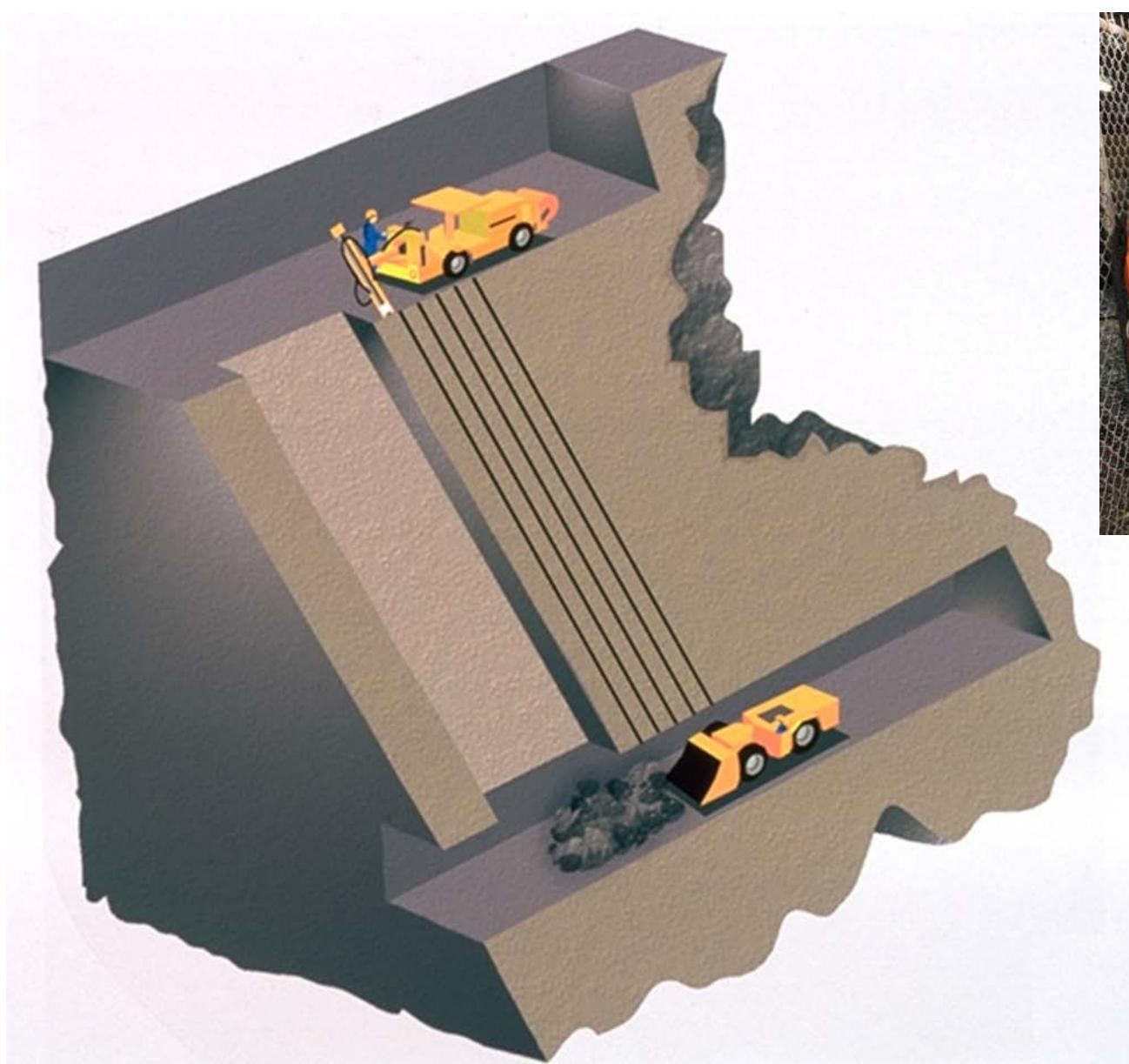
En el caso de vetas minerales, las dimensiones de los depósitos minerales son muy variables, de tal manera que un cuerpo mineralizado puede ser desde una formación grande y masiva de varios kilómetros cuadrados de superficie hasta una veta de cuarzo de apenas 0,5 m de ancho que contiene unos 20 g/tonelada de oro.

En este caso, la explotación minera apunta a recuperar el valor del mineral, pero dejando tanto la roca a muro como a techo, intactas. En los depósitos mayor grosor, la máquina puede operar dentro del hueco excavado entre las paredes del cuerpo mineralizado. Sin embargo, cuando la zona mineralizada se estrecha a un ancho de unos pocos metros, las máquinas pueden ser demasiado anchas para caber dentro de los límites del cuerpo mineralizado y, en estos casos, la excavación de hueco en la roca encajante solo para abrir el espacio necesario para que la maquinaria pueda caber, además de plantear el problema de una dilución del mineral, incrementa los costes de mano de obra y de gestión del estéril, aparte de incurrir posiblemente en prácticas ineficientes, como sería el aumento de trabajos manuales.

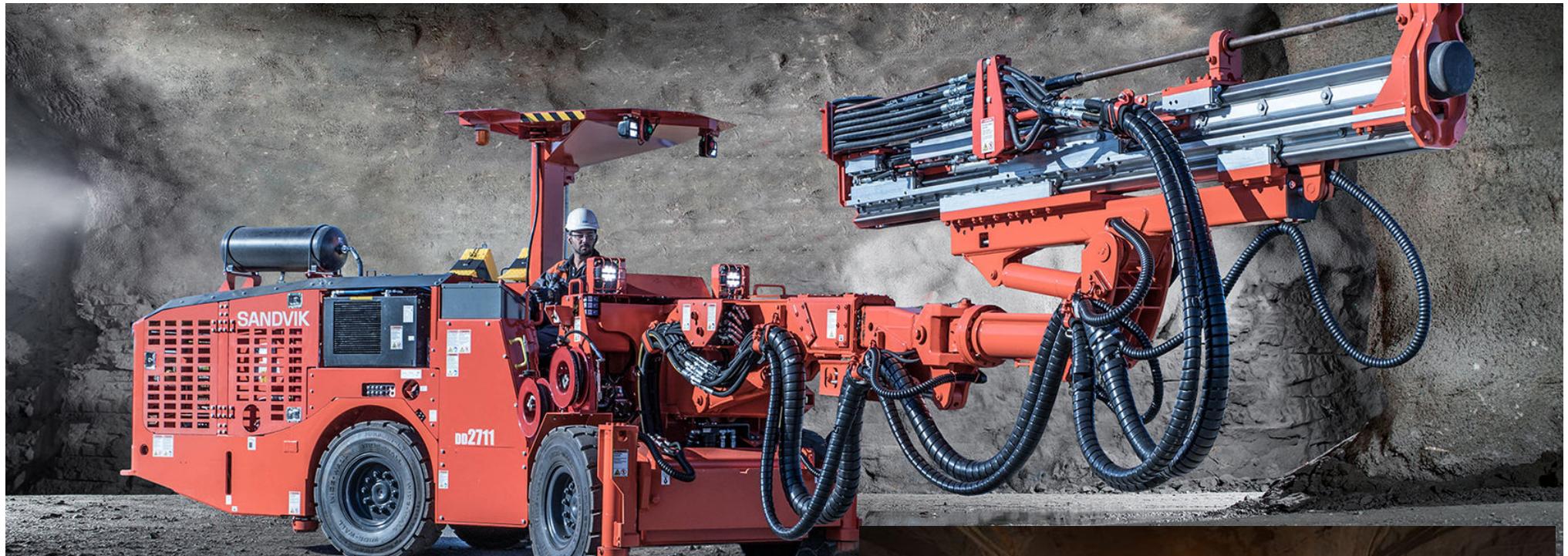
Existe un abanico de máquinas mineras de anchura extremadamente corta que permiten la extracción mecanizadas en filones de apenas 2 m de ancho. Entre éste abanico de máquinas existen jumbos frontales, cargadoras LHD con un cucharón de 2 m<sup>3</sup> y demás máquinas que proporciona todas las capacidades necesarias para la extracción mecanizada de una veta de 2 m de ancho.











Fuente: Sandvick





## 4. MÉTODO DE CÁMARAS ALMACEN (SHRINKAGE STOPING)

En el método de cámaras almacén, el mineral va siendo excavado por franjas y en sentido ascendente, comenzando por la parte baja del cuerpo mineralizado y avanzando progresivamente hacia arriba. Parte del mineral arrancado va quedando en la cámara que se va formando como consecuencia de la excavación, para servir de plataforma de apoyo para extraer el mineral que se encuentra inmediatamente por encima y, al mismo, tiempo realizar la entibación y soporte de las paredes de la cámara.

Como consecuencia del esponjamiento de la roca arrancada tras la voladura, su volumen se incrementa en aproximadamente un 50%, por lo que se va extrayendo progresivamente y de manera continua del orden de un 40% del mineral arrancado, con el fin de mantener un espacio libre adecuado y suficiente entre la parte inferior del yacimiento a arrancar y la parte superior del mineral fragmentado por la voladura. Cuando la excavación ha progresado hasta el borde superior del rebaje planeado, se suspende y continúa extrayéndose por debajo el restante 60% del mineral previamente volado hasta vaciar la cámara.

Los cuerpos mineralizados más pequeños se pueden extraer con un único rebaje, mientras que los yacimientos más grandes se dividen en rebajes separados con pilares intermedios para mantener estable el conjunto. Estos pilares generalmente se pueden recuperar al finalizar la extracción regular.

Este método puede usarse en yacimientos con:

- Buzamientos muy pronunciados (debe ser superior al ángulo de reposo).
- Mineral de características firmes y competentes.
- Hastiales en roca encajante y base de la cámara relativamente estables.
- Límites regulares del mineral.
- Mineral que no se ve afectado por el almacenamiento en la cámara. Algunos minerales que contienen sulfuros tienden a oxidarse y

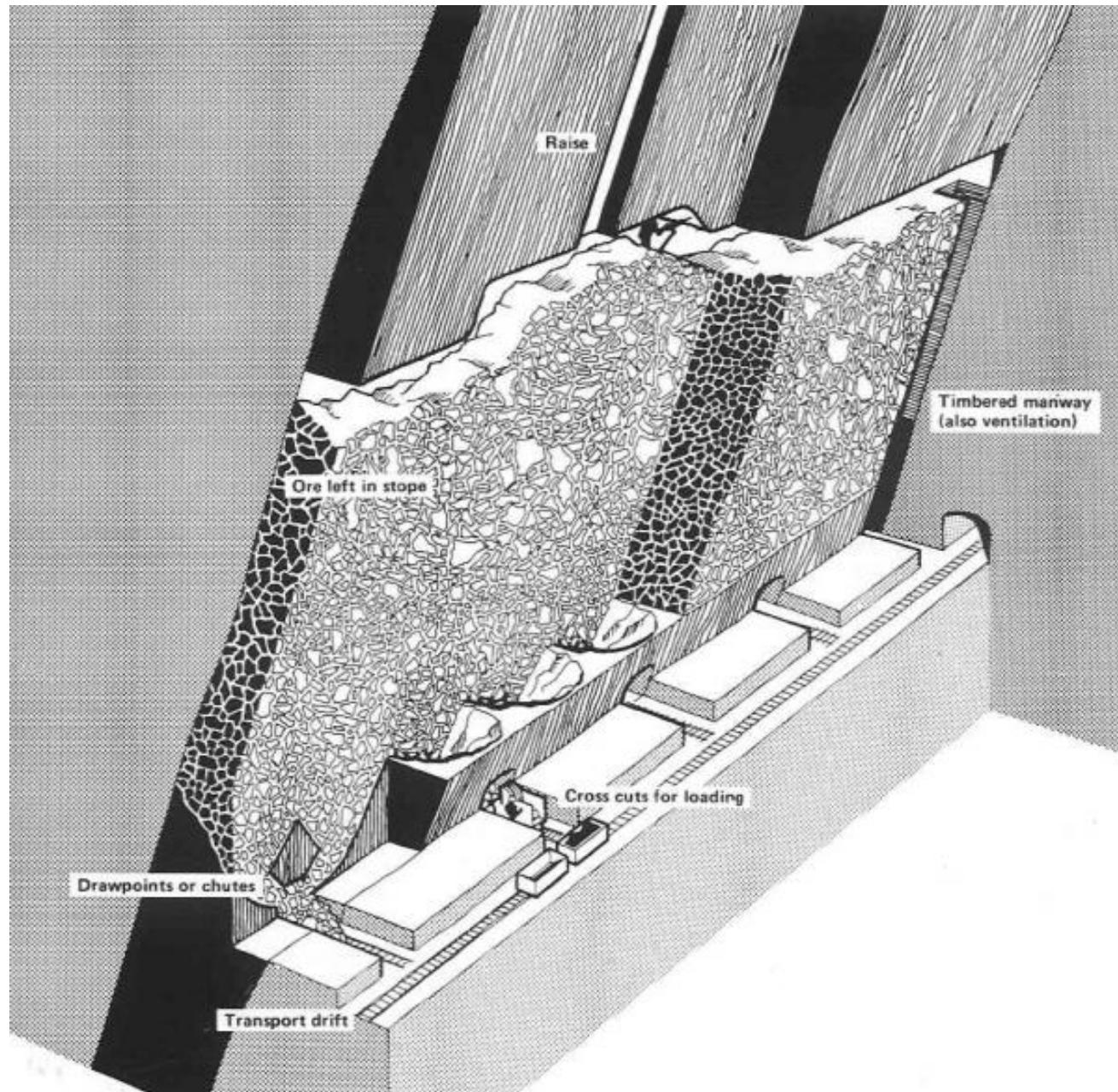
descomponerse cuando se exponen a la atmósfera.

El desarrollo necesario para la aplicación del método de cámaras almacén consiste en:

- Una galería de transporte a todo lo largo y paralela a la parte inferior del cuerpo mineralizado.
- Una serie de galerías transversales que cruzan por debajo de la cámara almacén.
- Pozos piquera que comunican desde las transversales con la parte inferior de la cámara almacén y conos de encauzamiento del mineral.
- Un corte por la parte inferior de la cámara, de entre 5 y 10 m por encima de la galería de transporte.
- Un pozo de ventilación y acceso desde el nivel de la galería de transporte y a través de la cámara y hasta la parte superior de la misma, para garantizar el acceso y la suficiente ventilación.

El desarrollo de la sección inferior del rebaje se puede simplificar de la misma manera a como se hace en el método de subniveles, es decir, suprimiendo los pozos piquera y desarrollando transversales directamente a la parte inferior de la cámara que actuarán como puntos de extracción y carga de equipos LHD.

La perforación y la voladura se llevarán a cabo en sentido ascendente. Sin embargo, el mineral arrancado en las voladuras anteriores y amontonado en la cámara impide el uso de equipos de perforación mecanizados. Es por ello que éste método todavía utiliza en la mayoría de los casos perforación manual con equipos Jack-leg o perforadoras con pie de apoyo.



## Evacuación por trinchera



Con respecto a la carga, antiguamente ésta operación se realizaba consiguiendo un vertido directo del mineral a vagonetas desde los cargaderos instalados en los pozos piquera. Hoy en día, en las minas en las que todavía se aplica éste método, el sistema ha cambiado a la utilización de equipos LHD en los puntos de extracción antes mencionados, que son más eficientes.

El método de cámaras almacén era mucho más común e importante antiguamente, cuando la minería era mucho más intensiva en la utilización de mano de obra y mucho menos mecanizada. Presentaba la ventaja de ser un método en el que se eliminaba la carga manual del mineral. En la actualidad, ninguno de estos postulados es válido en un entorno de total mecanización de la minería y donde la necesidad de mantener unos estándares de seguridad, salud y protección de los trabajadores, hacen prácticamente inviable su utilización. En la actualidad,

Presenta serios inconvenientes de cara a su utilización, como son la alta necesidad de mano de obra, las difíciles y peligrosas condiciones en las que debe realizarse el trabajo, la fuerte limitación en la productividad y que la mayor parte del mineral permanece almacenado en la cámara durante un largo período de tiempo. Por esta razón, el método de cámaras almacén ha caído en desuso y ha sido reemplazado por otras técnicas y métodos, como son subniveles, hundimiento por subniveles, corte y relleno, entre otros, métodos que generalmente se pueden aplicar en condiciones similares.

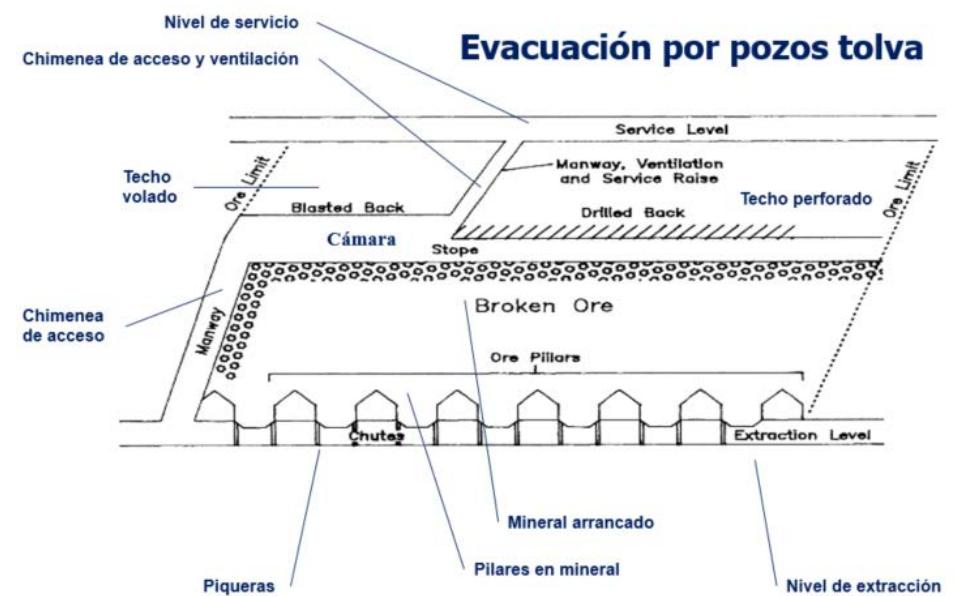
## VENTAJAS:

- Método sencillo.
- Baja inversión en equipamiento.
- Mínimo sostenimiento.
- No excesiva preparación.
- Alta recuperación (75-100%).
- Baja dilución (10-25%).

## INCONVENIENTES:

- Difícil mecanización → Minas pequeñas.
- Mucha mano obra.
- Riesgo de atranque en las cámaras.
- Difíciles condiciones de trabajo.
- 60% del mineral almacenado hasta el final.

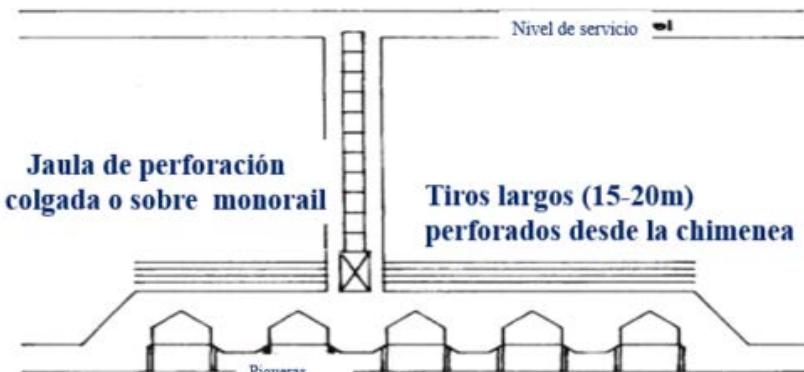
## Evacuación por pozos tolva



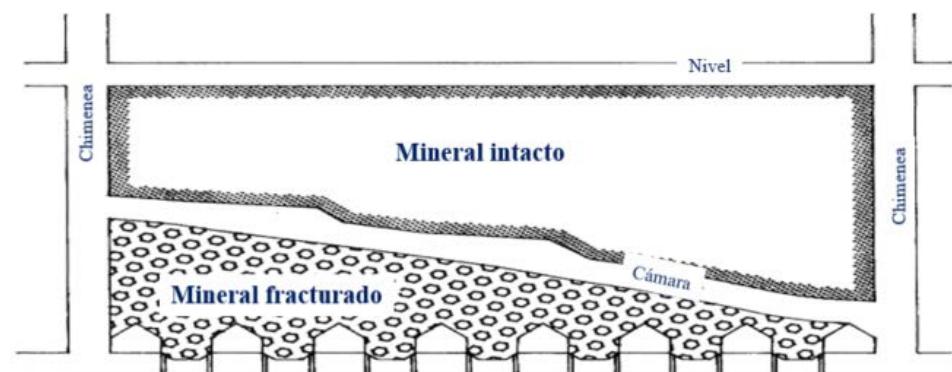


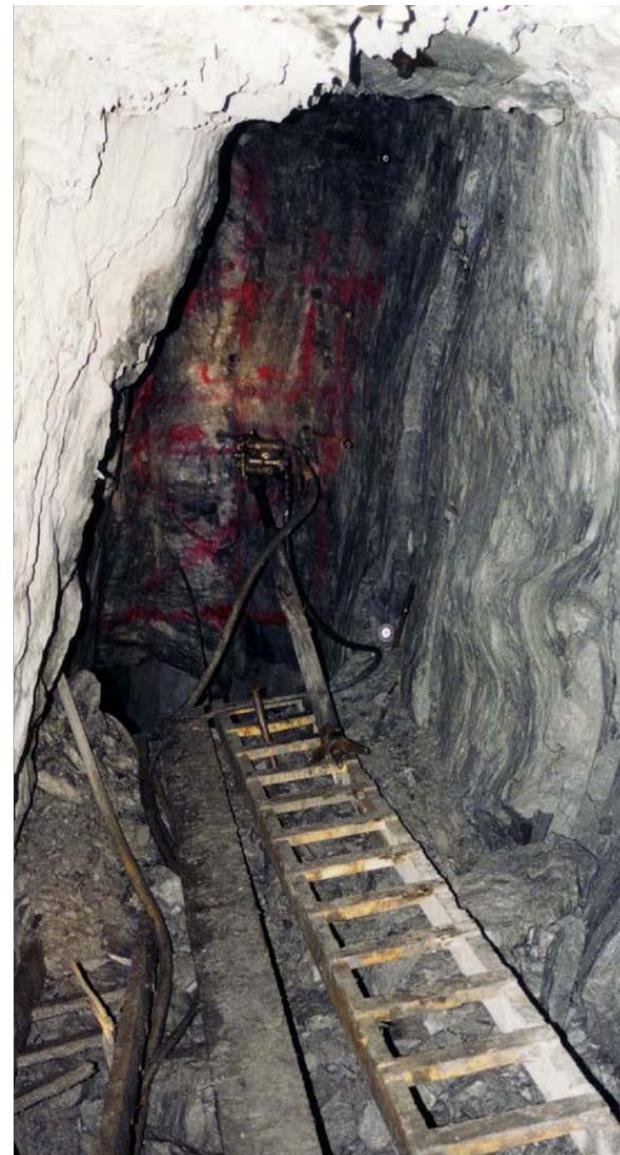
- **Explosión:**
  - Cámaras de 45-90 m largo, 45-90 m alto, 1-30 m ancho, separadas por pilares horizontales y verticales.
  - Extracción paulatina del mineral arrancado (35-40 % para un 50-60 % de esponjamiento)
- **Preparación:**
  - Niveles de transporte con galerías en estéril a muro 5-10 m por debajo de la cota inferior del tajo, separados 45-180 m verticalmente.
  - Subniveles de servicio con piqueras de mineral si la altura de las cámaras es menor.
  - Transversales de carga cada 5-15m.
  - Sistema de carga-evacuación mediante pozos tolva o pozo de evacuación corrido.
  - Chimeneas de acceso y ventilación entre niveles.
- **Sistema:**
  - Perforación V/H (Martillo manual con empujador o columna neumática).
  - Voladura
  - Carga (por gravedad / LHD).
  - Transporte (Tren / Camión).
- **Variantes:**
  - Explotación sobre piso inclinado para mayor número de tajos.
  - Arranque por tiros largos desde chimenea.
- **Aplicaciones:**
  - Yacimientos verticales/semiverticales (buzamiento > ángulo de reposo)
  - Generalmente de pequeña potencia (1 a 30 m) y ley media-alta.
  - Mineral firme, exento de arcillas, no combustible, oxidable ni degradable.
  - Hastiales regulares y estables (para evitar dilución y/o sostenimiento)
  - Profundidad: <750 m.

## Cámara almacén por barrenos largos



## Cámara almacén sobre piso inclinado







## 5. MÉTODO DE CÁMARAS POR SUBNIVELES (SUBLEVEL OPEN STOPING)

### 5.1. CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO DE CÁMARAS POR SUBNIVELES (SUBLEVEL OPEN STOPING)

En el método de cámaras por subniveles, el mineral se explota en cámaras de grandes dimensiones que se van conformando a partir de labores de arranque mediante perforación y voladura. Se utiliza fundamentalmente para extraer depósitos minerales con las siguientes características:

- Yacimientos verticales/semiverticales, con buzamiento muy pronunciado, con una inclinación que supera el ángulo de reposo (buzamiento > ángulo de reposo).
- Cuerpo mineralizado de media / gran potencia (> 6 m).
- Profundidad: hasta 2.000 m.
- Roca estable tanto en los hastiales de la cámara como en los frentes de mineral pendientes de ser volados.
- Roca encajante y mineral de características competentes y resistentes.
- Límites regulares de mineral. La existencia de hastiales regulares y estables permite mantener una dilución de menos de un 20 %.

Es un método seguro, de gran productividad debido a que las labores de preparación se realizan en su mayor parte dentro del mineral, pero poco selectivo, con aproximadamente un 75 % de recuperación (90 % recuperando pilares).

Las ventajas de este método, son:

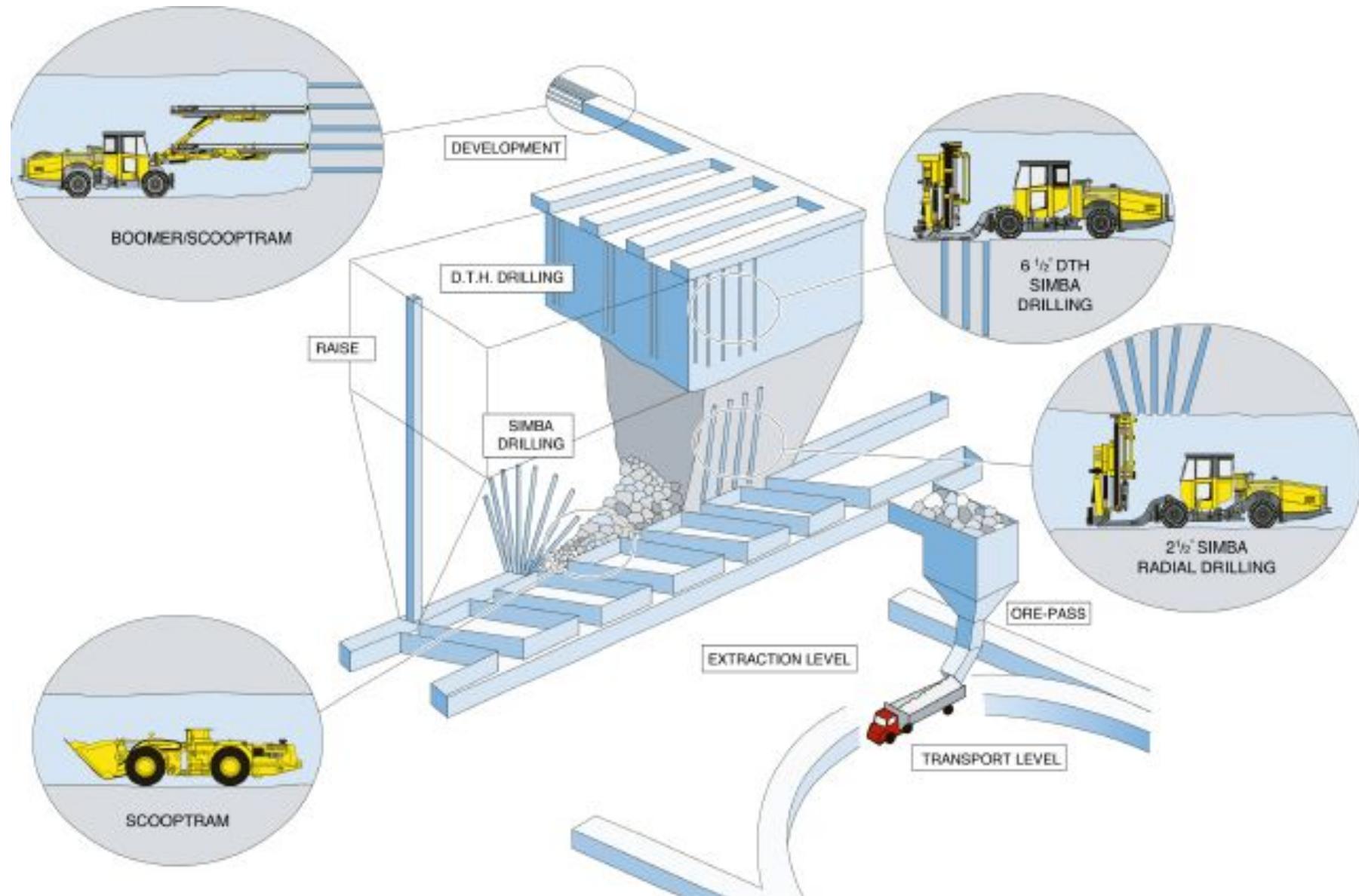
- El trabajo es continuo, sin interrupción para rellenar.
- El coste por tonelada es bajo y exige poca mano de obra.
- La relación de la producción a la preparación es alta.
- Hay gran seguridad para el personal.

- La ventilación es buena.
- La conservación es mínima.
- Toda la maquinaria se recupera al terminar cada cámara.

En la arquitectura de éste método, se diseña una cámara que sea estable dentro del conjunto de la explotación y encuadrada dentro del cuerpo mineralizado. A continuación, se excava una galería general de transporte por la parte inferior de la cámara y desde ella, se perforan transversales a la parte inferior de dicha cámara para que constituyan en puntos de extracción y carga de mineral dentro de la cámara. En niveles superiores, se perforan galerías que atravesarán la cámara y desde las cuales se perforarán y posteriormente se cargarán y dispararán secuencialmente los barrenos de producción.

Como parte del sistema de ventilación de la cámara y de las galerías, es necesario construir un pozo dentro del cuerpo mineralizado de la cámara que posteriormente, al inicio de las labores de explotación servirá como cuello inicial y cara libre de los barrenos de producción.

De esta forma, el cuerpo mineralizado queda dividido en distintas cámaras y, entre las mismas, quedan secciones de mineral a modo de pilares que soportan estructuralmente la arquitectura de la mina. En algunos casos es posible recuperar estos pilares en una etapa posterior, cuando las cámaras contiguas han sido llenadas y pueden entrar en carga a contribuir al sostenimiento estructural de la mina.





La explotación se realiza en sentido ascendente, dando a las cámaras unas dimensiones variables en función de las características geomecánicas. Desde un punto de vista absolutamente general, la longitud de la misma suele ser inferior a los 150 m. La anchura también puede variar de una a otra en la misma mina, pero suele ser también siempre inferior a los 50 m y las alturas varían entre los 40 y los 120 m. El talud puede ser invertido, vertical o natural. La ampliación en lo posible de las dimensiones de la cámara influye directamente en la eficiencia de la excavación minera. Por ello se apunta a que en los diseños se apunta a que las cámaras sean las mayores posibles, pero siempre sin poner en riesgo la estabilidad y seguridad estructural.

El techo de la cámara también tiene una función estructural en cuanto a la estabilidad del conjunto y recibe el nombre de "Pilar Corona". El macizo o pilar que queda en la base y por el que discurre el sistema de extracción, también tiene una función estructural, además de separar de las cámaras que se ubican en niveles inferiores.

Durante la etapa de desarrollo, en los niveles de transporte las galerías se excavan en estéril, siempre a muro y a unos 5 - 10 m por debajo de la cota inferior de la cámara. Para las voladuras se excavan en mineral uno o varios subniveles intermedios, con una o varias galerías por subnivel según anchura de la cámara para barrenos en abanico. El diámetro de estos barrenos es de más de 51 m Si la cámara se va a explotar por banqueo con barrenos verticales, es necesario dar franqueo en toda la anchura de la cámara para los mismos. También se realiza un corte completo o socavación en la parte inferior del tajo si se realizarán voladuras en cráter (VCR). Por ello, se consideran las siguientes variantes:

- Barrenos en abanico.
- Barrenos paralelos:
  - Voladuras en banco.
  - Voladuras en cráter (VCR)

Las Transversales de carga se distribuyen cada 5 – 15 m, y esta red se puede complementar con un sistema de carga-evacuación mediante pozos tolva (como se

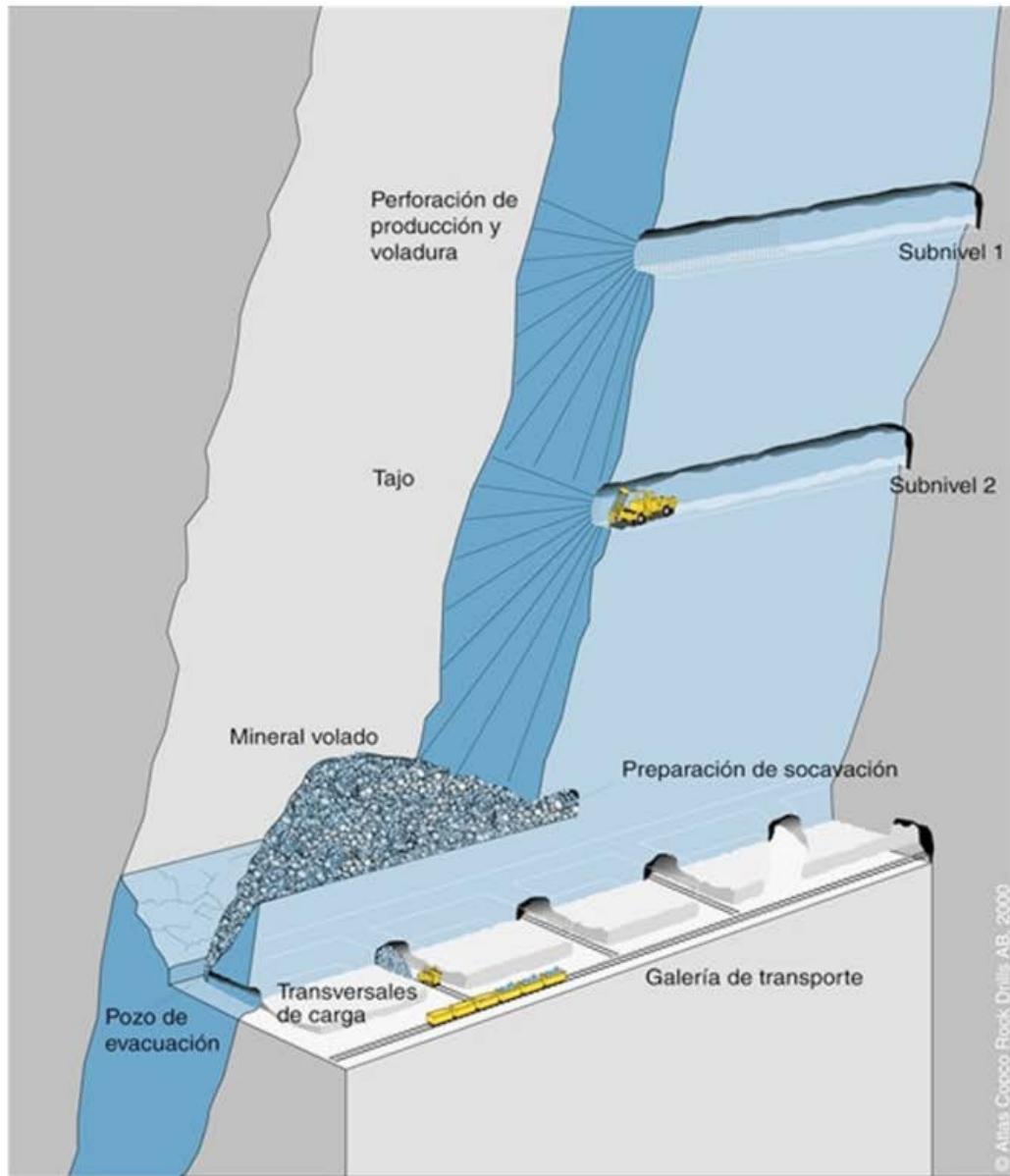
hacía antiguamente cuando la carga se hacía exclusivamente por gravedad) o pozo de evacuación corridos. Se procede también a la apertura de chimenea y roza entre niveles para apertura del tajo.

Las galerías de subnivel para la perforación de barrenos se excavan dentro del cuerpo mineral y entre los niveles principales. Estas galerías deben ubicarse estratégicamente ya que son los puntos desde los cuales se perforan los abanicos de barrenos largos según el patrón de voladura diseñado. El esquema de perforación especifica dónde se van a emboquillar los barrenos, la profundidad y el ángulo de cada uno, todo lo cual debe hacerse con gran precisión para lograr el éxito de la voladura en cuanto a fragmentación del material arrancado e inexistencia de bolos que pudieran hacer muy difícil o incluso imposible la carga posterior.

Los puntos de extracción se excavan por debajo del fondo de la cámara para una carga segura con LHD, que se pueden combinar con camiones o vagones si el transporte debe cubrir grandes distancias. Se utilizan diferentes diseños para estos puntos de extracción y carga y, por lo general, se dimensionan para que las unidades de carga puedan acceder directamente a la parte inferior de la cámara a intervalos regulares.

La construcción del conjunto de galerías y puntos de extracción por debajo de las cámaras es un procedimiento extenso y, a la vez, de alto coste, por lo que se acude a un diseño más sencillo en el que el nivel de carga está integrado con el fondo de la cámara. La carga de mineral se realiza directamente en el fondo de la cámara. La máquina LHD opera en éste caso entrando en la parte inferior de la cámara y, en este caso, por razones de seguridad es operada a distancia por radiocontrol por el operador, que permanece a resguardo en la galería de acceso y sin entrar a la cámara.

El método de cámaras por subniveles requiere que tanto los límites de la cámara como los límites del cuerpo mineralizado sean regulares dado que los esquemas de perforación consideran que toda la longitud del barreno se perfora en mineral (o es considerado como tal). En cuerpos mineralizados de mayores dimensiones, la zona entre techo y muro se divide en módulos a lo largo de la dirección del cuerpo mineral identificados como cámaras primarias y secundarias.



## Explotación por subniveles con barrenos en abanico (Sublevel stoping)

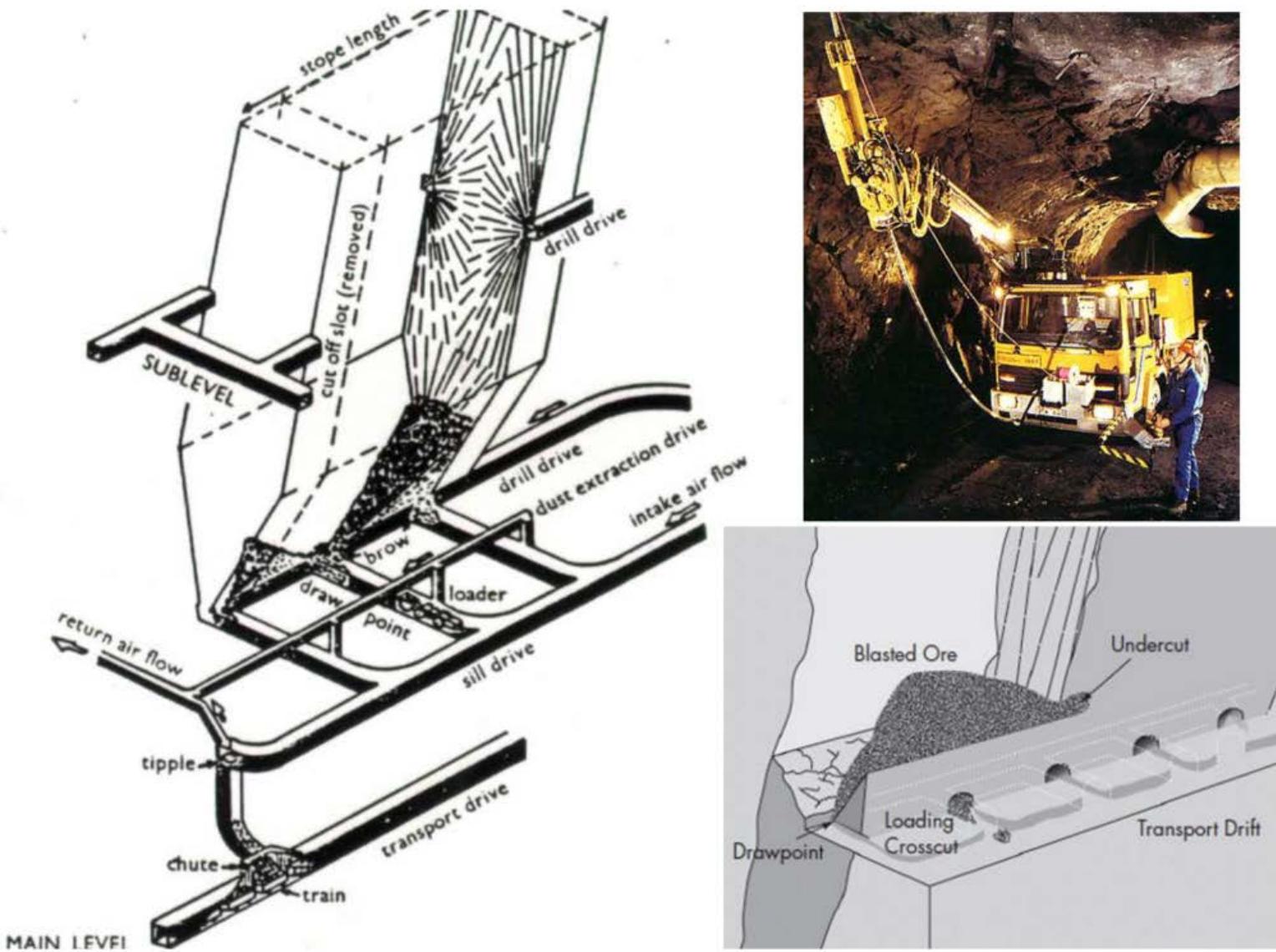
Barrenos de 51 - 102 mm de diámetro (2 - 4 pulg.) y de 10 – 30 m de longitud, perforados con martillo en cabeza.

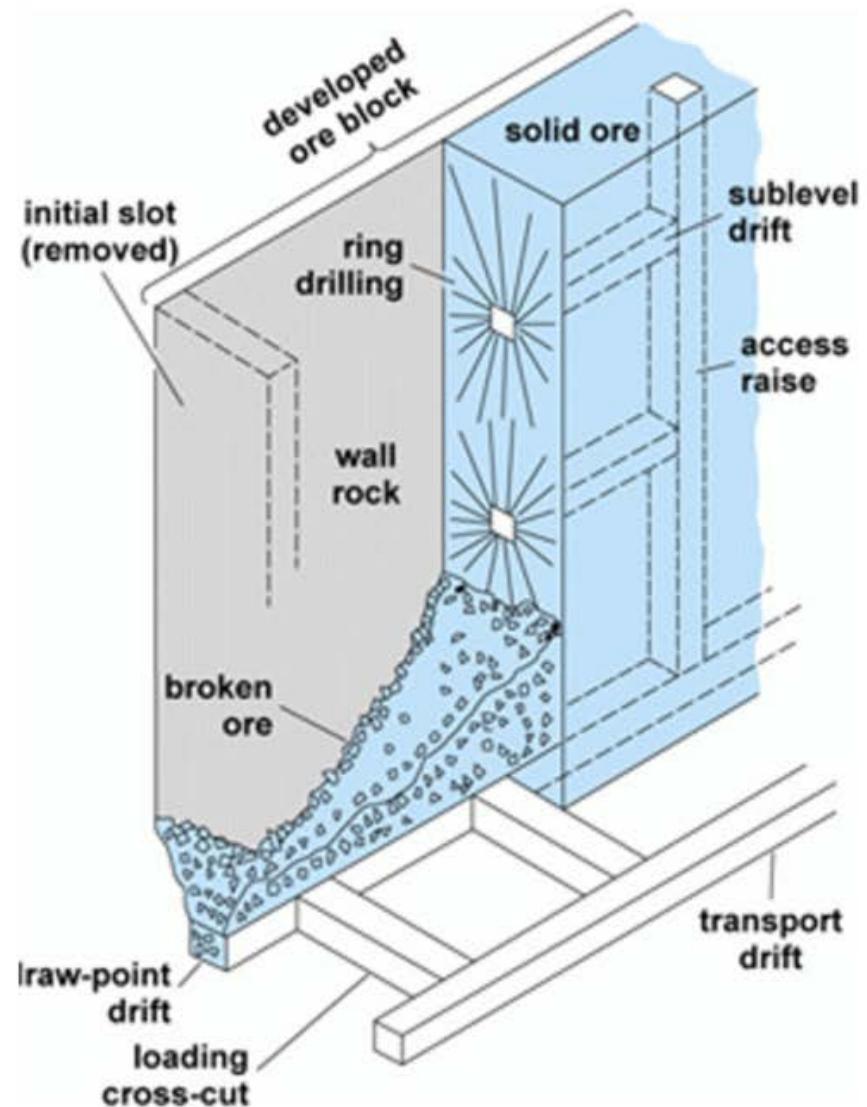
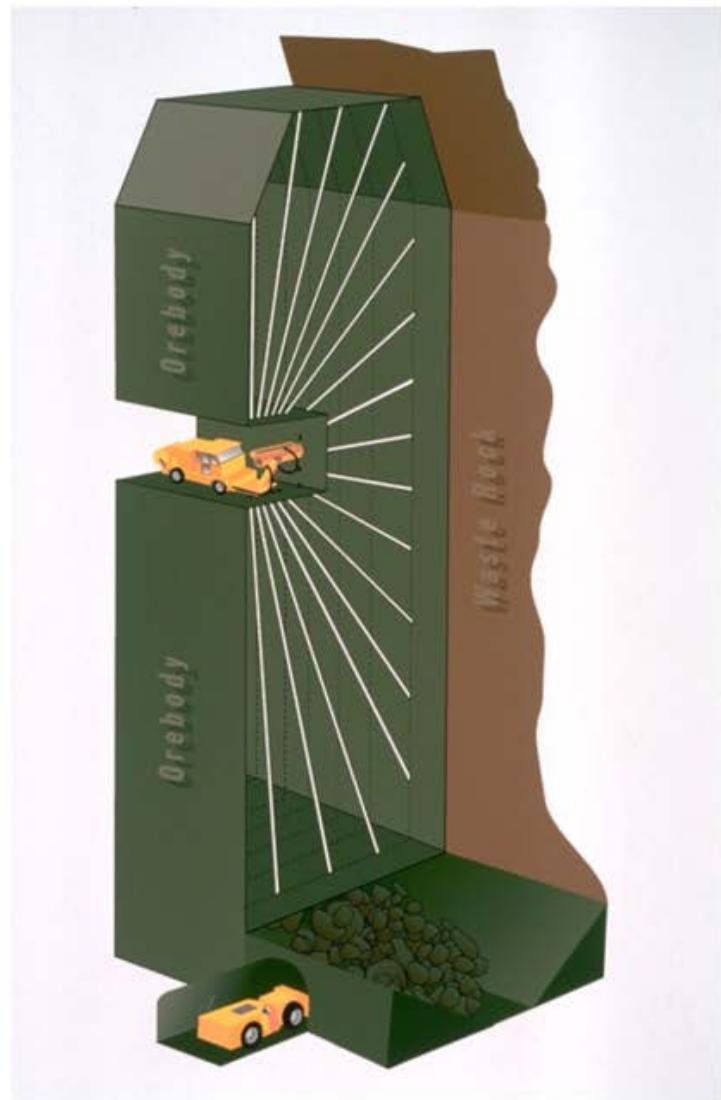
- Carga neumática mecanizada del explosivo.
- Voladuras de 1 a 3 abanicos



<b>Criterios de selección del método</b>		
	<b>Aceptable</b>	<b>Optimo</b>
<b>GEOMETRIA DEL YACIMIENTO</b>		
Forma	Cualquiera	Tabular
Potencia	> 5 m	> 10 m
Buzamiento	> 45°	> 65°
Tamaño	Cualquiera	> 10Mt
Regularidad	Media	Alta
<b>ASPECTOS GEOTÉCNICOS</b>		
Resistencia (techo)	Influye poco	> 500 k/cm <sup>2</sup>
Fracturación (techo)	Media	Baja
Campo tensional in-situ (Profundidad)	< 2000 m	< 1000 m
Comportamiento tenso-deformacional	Elástico	Elástico
<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>		
Valor unitario de la mena	Bajo	NA
Productividad y ritmo de explotación	Alto	NA

<b>Sistemas</b>	<b>Tecnologías más empleadas</b>
Sostenimiento de cámaras Rellenos Bulones Cables cementados	Recuperación de pilares En cabezas y bases de cámaras Estabilización del hueco
Perforación	Barrenos de 4" – 61/2" DTH para grandes cámaras Tiros largos de 2 ½" para abanicos ascendentes Raise-borer para pozos de cuele
Carga y transporte primario	LHD o Pala cargadora
Transporte secundario	LHD o camión
Servicios	Plantas de relleno hidráulico







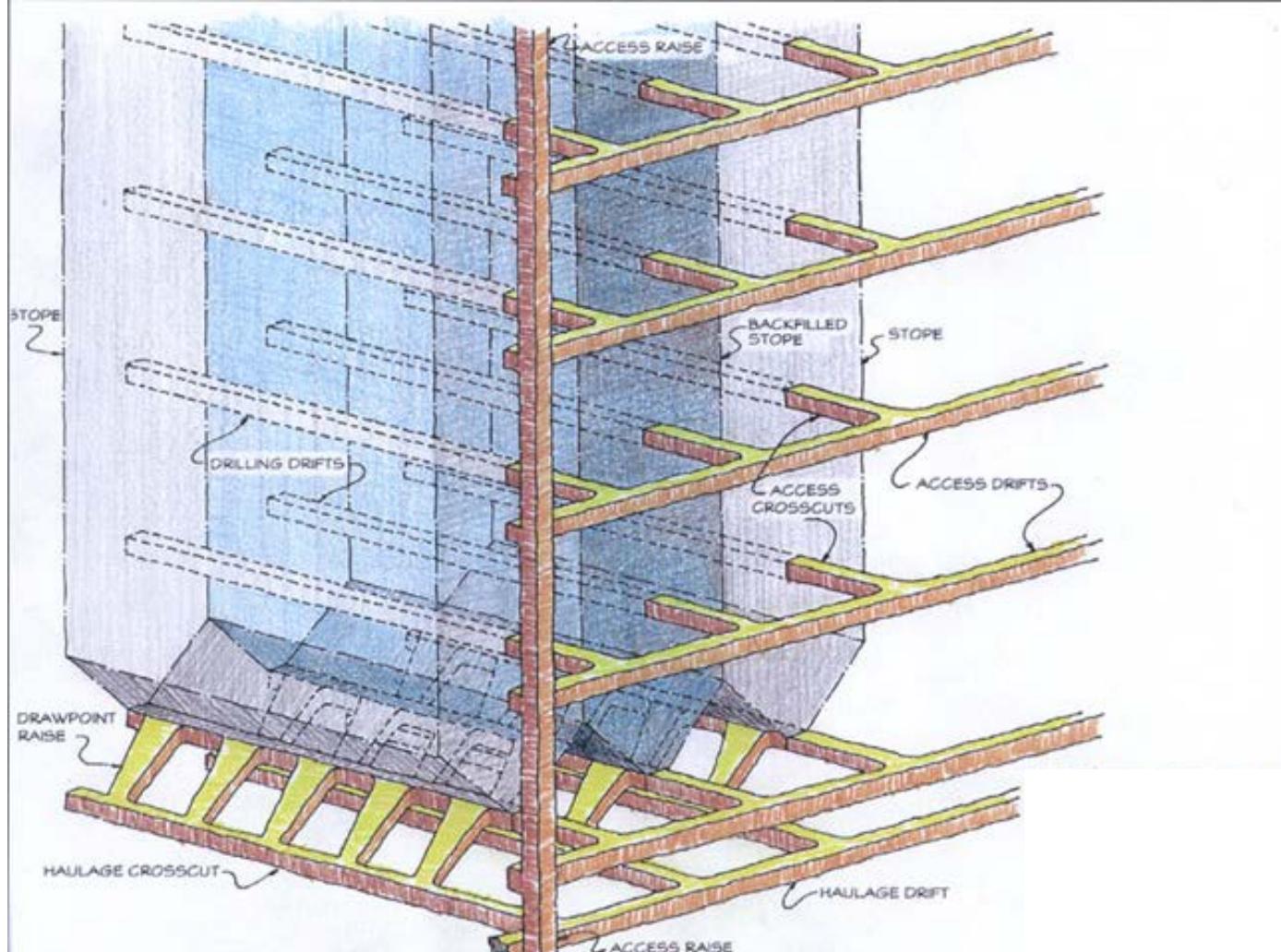










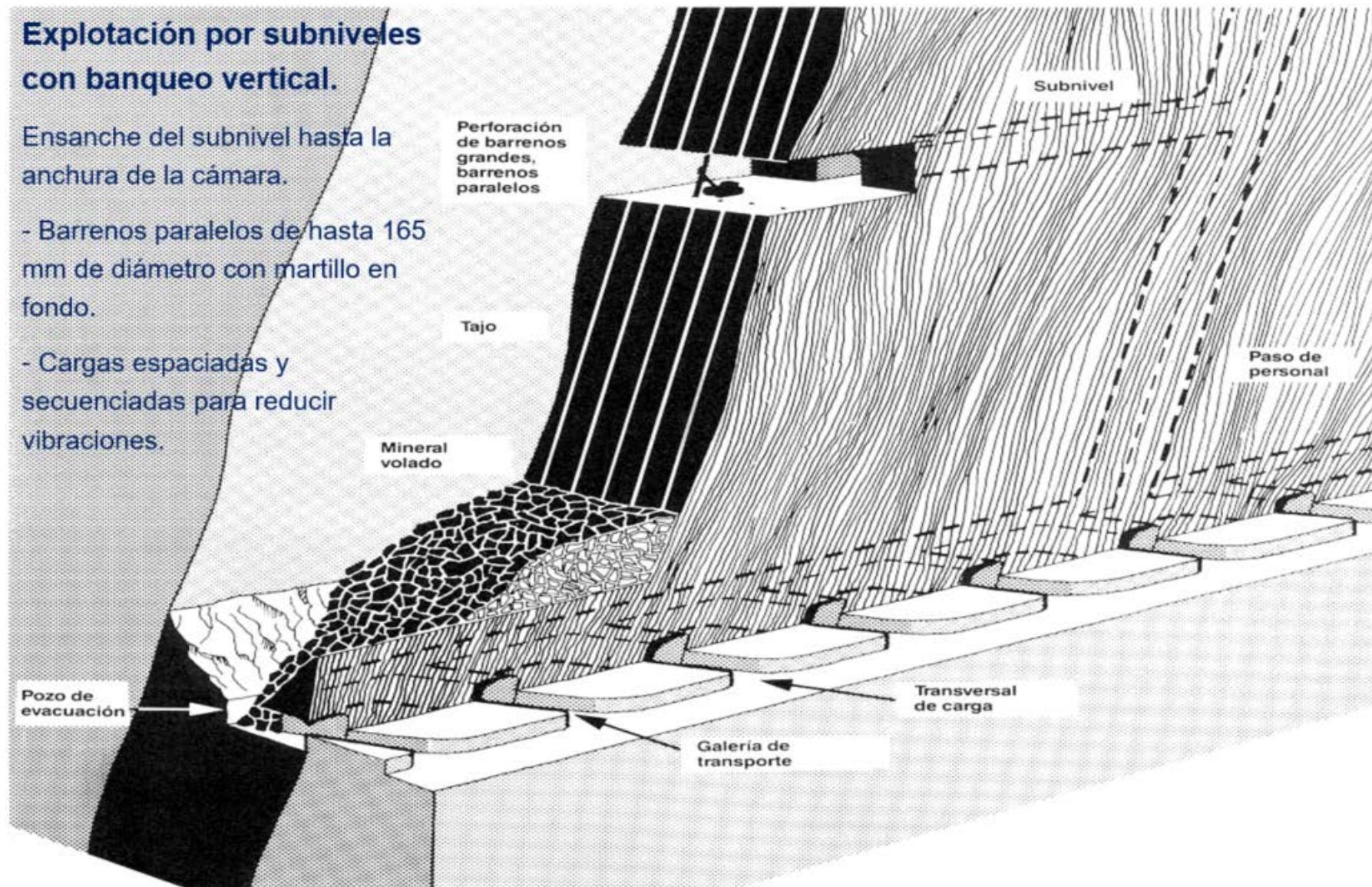


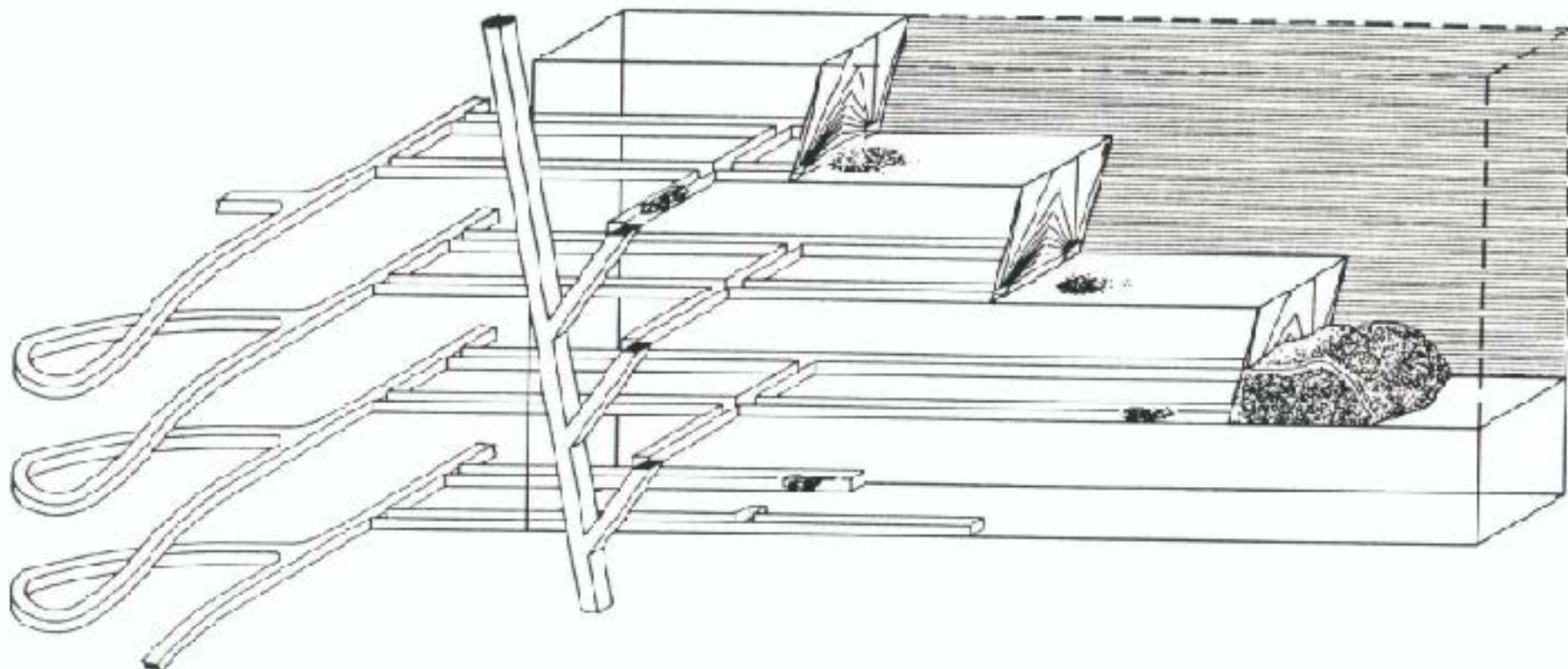


## Explotación por subniveles con banqueo vertical.

Ensanche del subnivel hasta la anchura de la cámara.

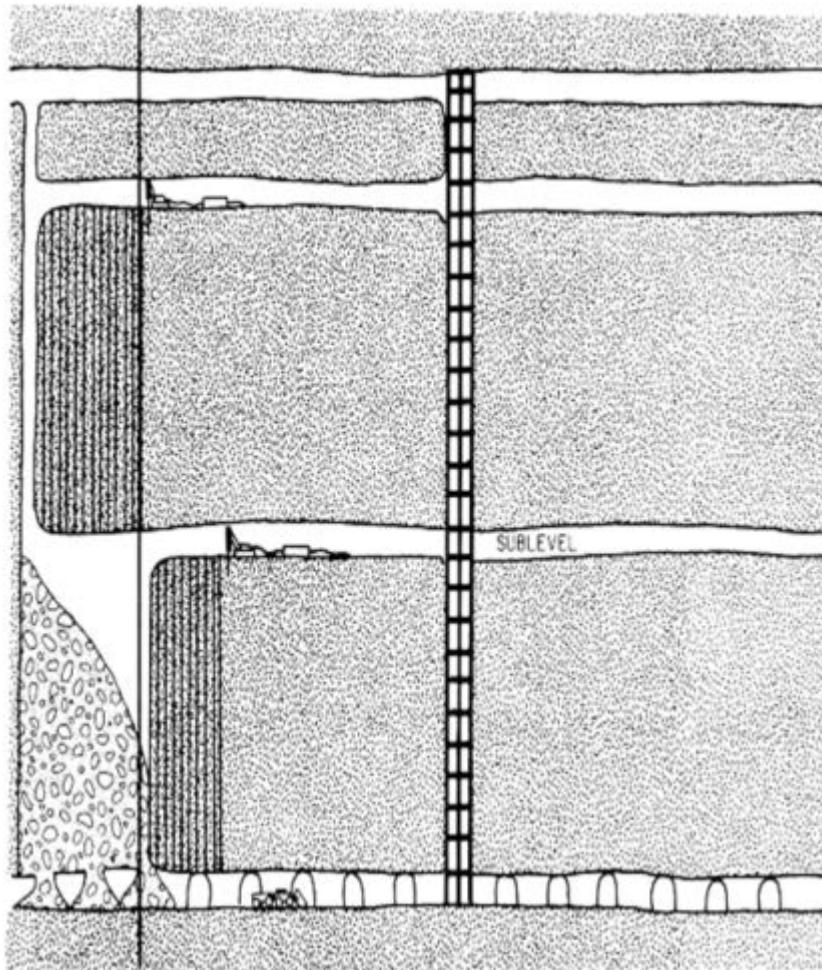
- Barrenos paralelos de hasta 165 mm de diámetro con martillo en fondo.
- Cargas espaciadas y secuenciadas para reducir vibraciones.







### 5.1.1. VARIANTE DE TALUD INVERTIDO

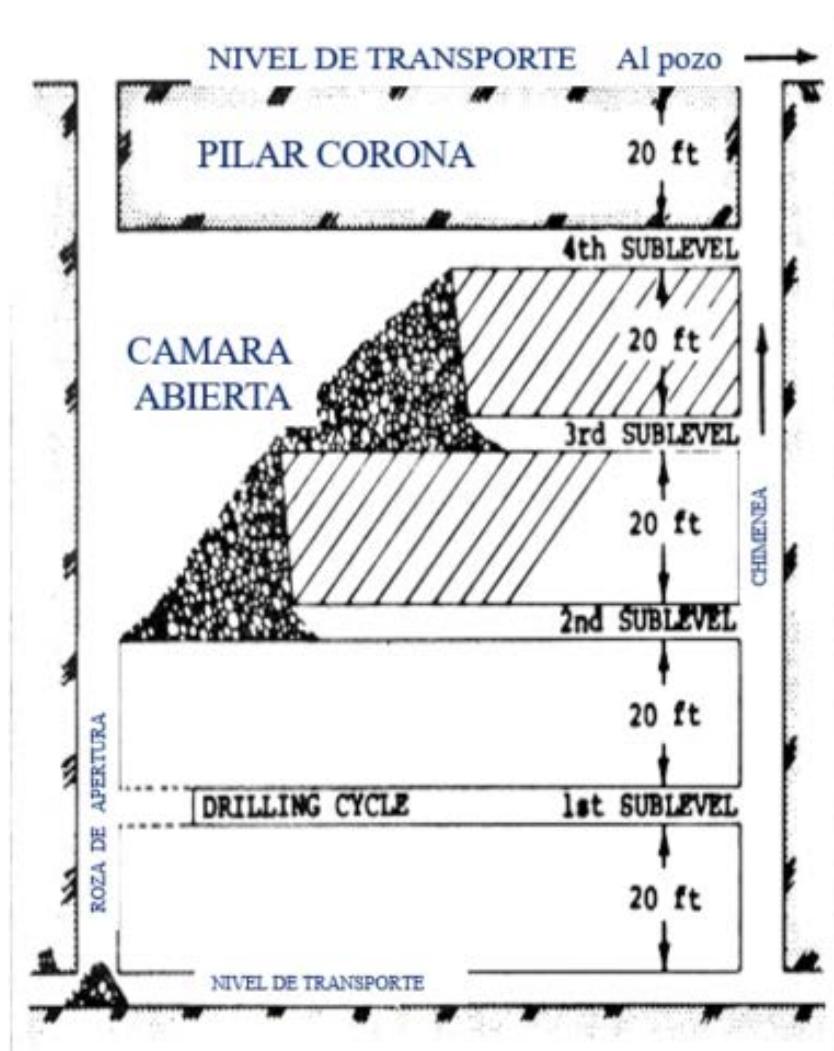


#### Talud invertido

Facilita la caída del escombro y la carga por gravedad en pozos tolva



## 5.1.2. VARIANTE DE TALUD NATURAL

**Talud natural**

No hay pozos tolva. Hay que cargar en los subniveles.

Mejora la estabilidad si el mineral no es demasiado competente.

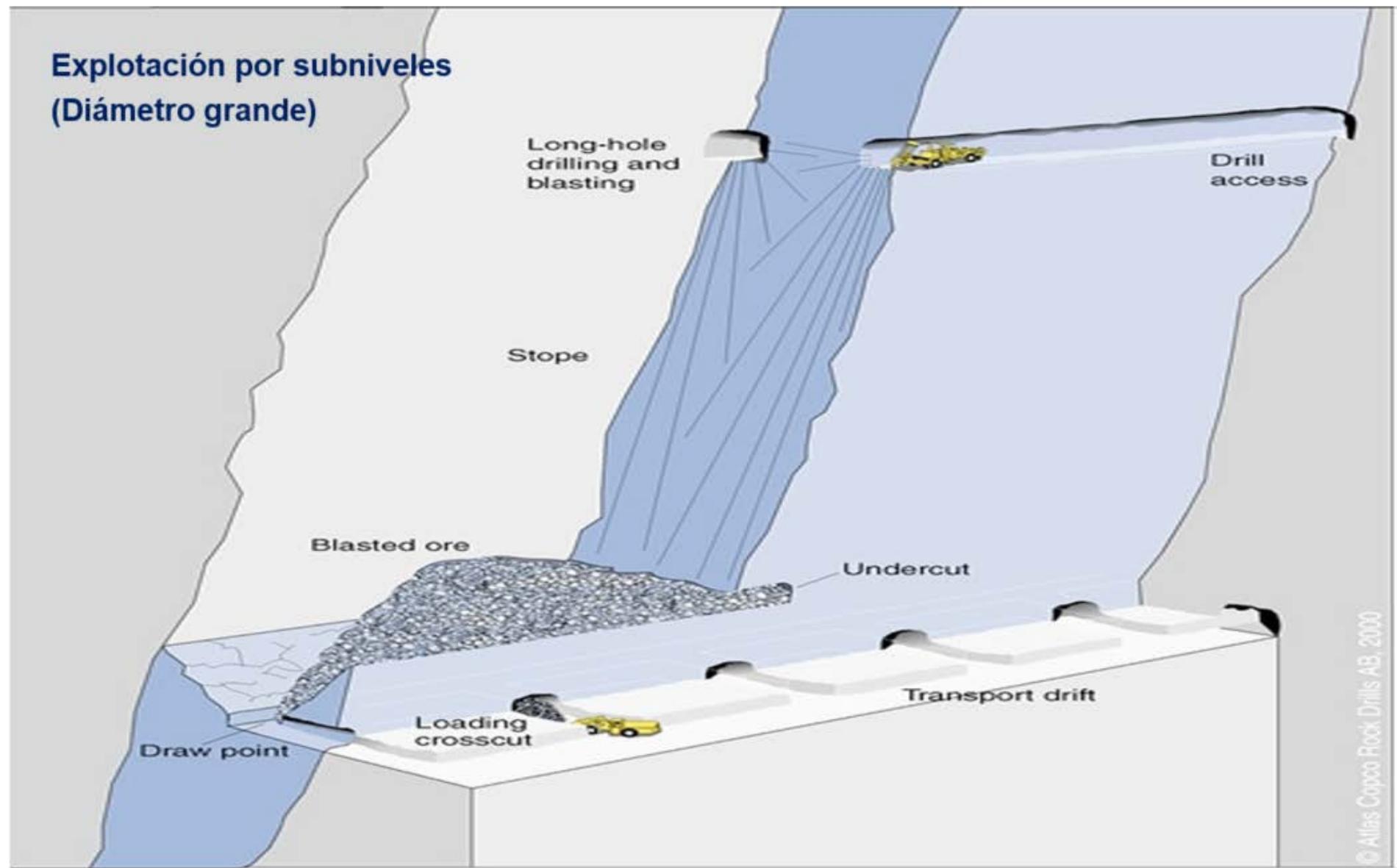


## 5.2. MÉTODO DE SUBNIVELES CON TIROS LARGOS (GRAN DIÁMETRO)

Existe una variante denominada Cámaras por Subniveles y Barrenos Largos donde se usan barrenos de mayor longitud y mayor diámetro (140 - 165 mm), perforados normalmente con máquinas de martillo en fondo DTH (Down-The-Hole). Las profundidades de barreno pueden alcanzar los 100 m y los esquemas de perforación son similares a los utilizados en la variante de subniveles y tiros cortos, con 4 m de piedra y 6 m de espaciamiento.

La ventaja del método de tiros largos en comparación con el método de tiros cortos es el factor de escala. Los barrenos perforados con ITH son rectos y se puede

aprovechar una mucha mayor precisión en la perforación, lo que permite pasar de una separación vertical entre galerías de subniveles de 40 m a una separación vertical de hasta 60 m. No obstante, deben valorarse en detalle los riesgos de daños a las estructuras rocosas de los macizos remanentes cuando se dimensiona una operación de tiros largos.

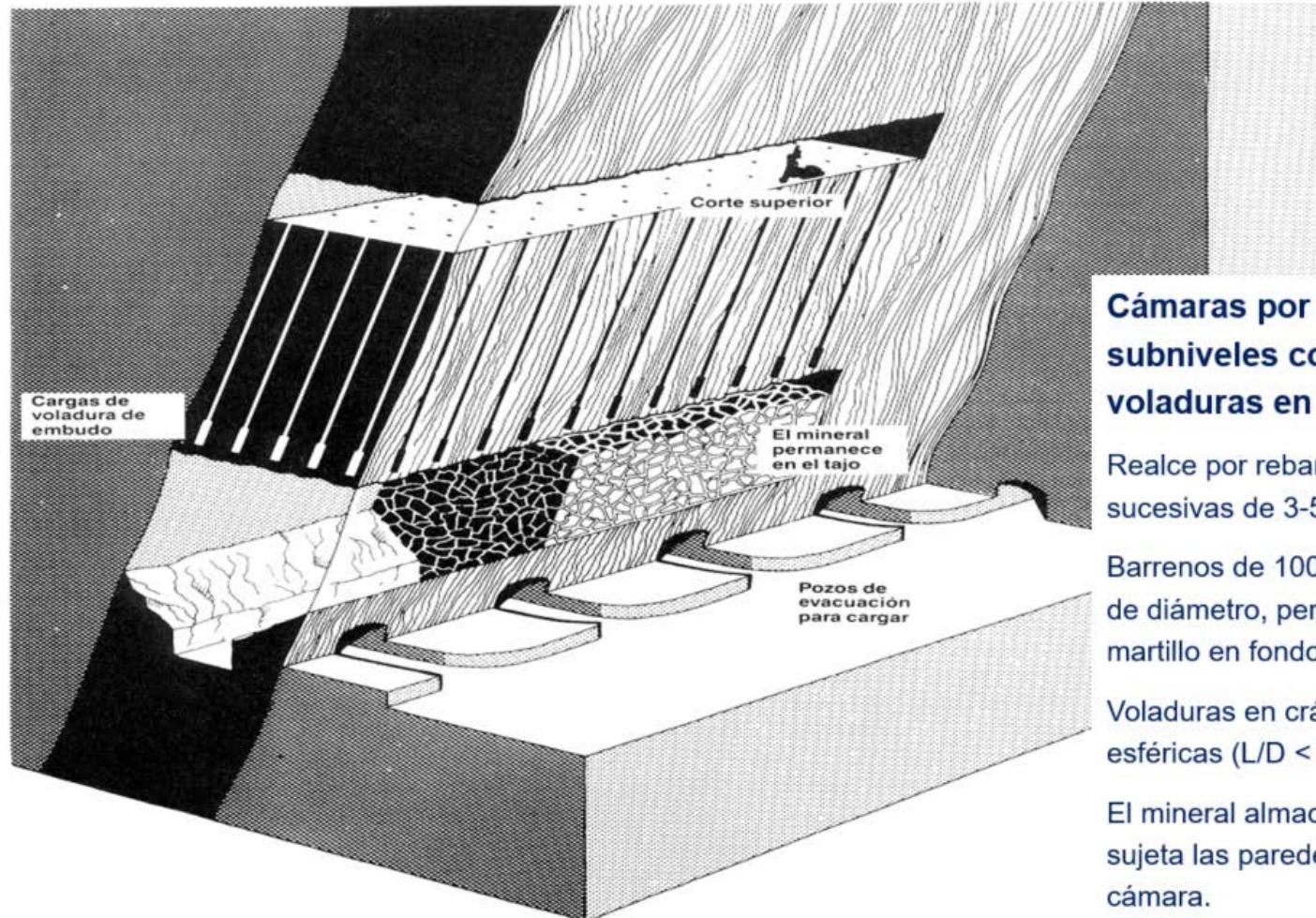




### **5.3. MÉTODO DE SUBNIVELES CON VOLADURAS EN CRÁTER (VCR - VERTICAL CRATER RETREATING)**

Vertical crater retreat (VCR) mining es un método desarrollado originalmente por la compañía canadiense INCO y que rápidamente se popularizó entre minas de todo el mundo con yacimientos de fuerte buzamiento y tanto mineral como roca encajante de buenas características geomecánicas y duros.

El método VCR se basa en la técnica de voladura en cráter en la que se colocan potentes cargas de explosivo en barrenos de gran diámetro, pero de tal manera que solo se utiliza la parte inferior del barreno. Tras el disparo de la voladura, la parte de la mena volada cae a la parte inferior de la cámara mientras que el resto del macizo por donde discurría el barreno, pero sin carga, permanece en su posición actuando como viga de soporte de las paredes de la cámara.



**Cámaras por subniveles con voladuras en cráter.**

Realce por rebanadas sucesivas de 3-5 m.

Barrenos de 100 – 165 mm de diámetro, perforados con martillo en fondo.

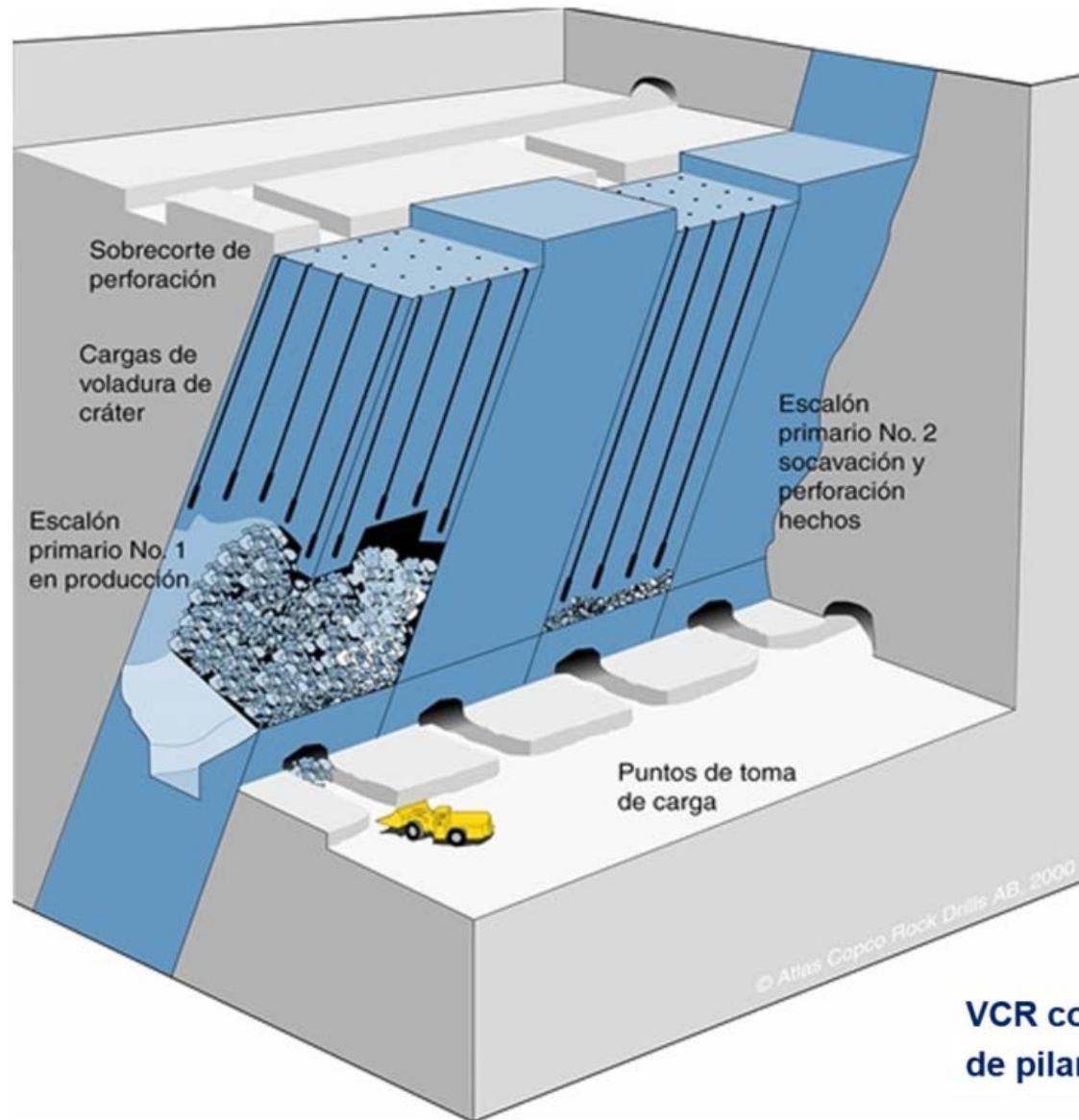
Voladuras en cráter. Cargas esféricas ( $L/D < 6$ ).

El mineral almacenado sujet a las paredes de la cámara.

La secuencia de desarrollo de las cámaras por VCR es:

- Excavación de una galería de transporte a todo lo largo y paralelamente al cuerpo mineralizado, a la cota del nivel de los puntos de extracción y carga.
- Construcción de los puntos de extracción por debajo de la cámara.
- Excavación de un corte que cubre toda la parte inferior de la cámara poniendo en comunicación todos los puntos de extracción.
- Excavación de un corte que a su vez cubra toda la parte superior de la cámara para permitir la perforación de los barrenos de producción.
- Perforación de los barrenos de producción.

El mineral existente en el bloque de producción se perfora con máquinas ITH de martillo en fondo desde el corte superior y siguiendo el esquema de perforación previamente definido. Los barrenos se perforan verticalmente o con un alto grado de inclinación y hasta que rompen el techo del corte inferior. Para esta técnica, son preferibles los barrenos totalmente verticales en la medida que ello sea posible, y se acude a diámetros de entre 140 y 165 mm, aunque hay referencias de haberse usado barrenos de 205 mm de diámetro en algunos casos. Para barrenos de 165 mm, es habitual un esquema de perforación de 4 x 4 m.



**VCR con recuperación de pilares**



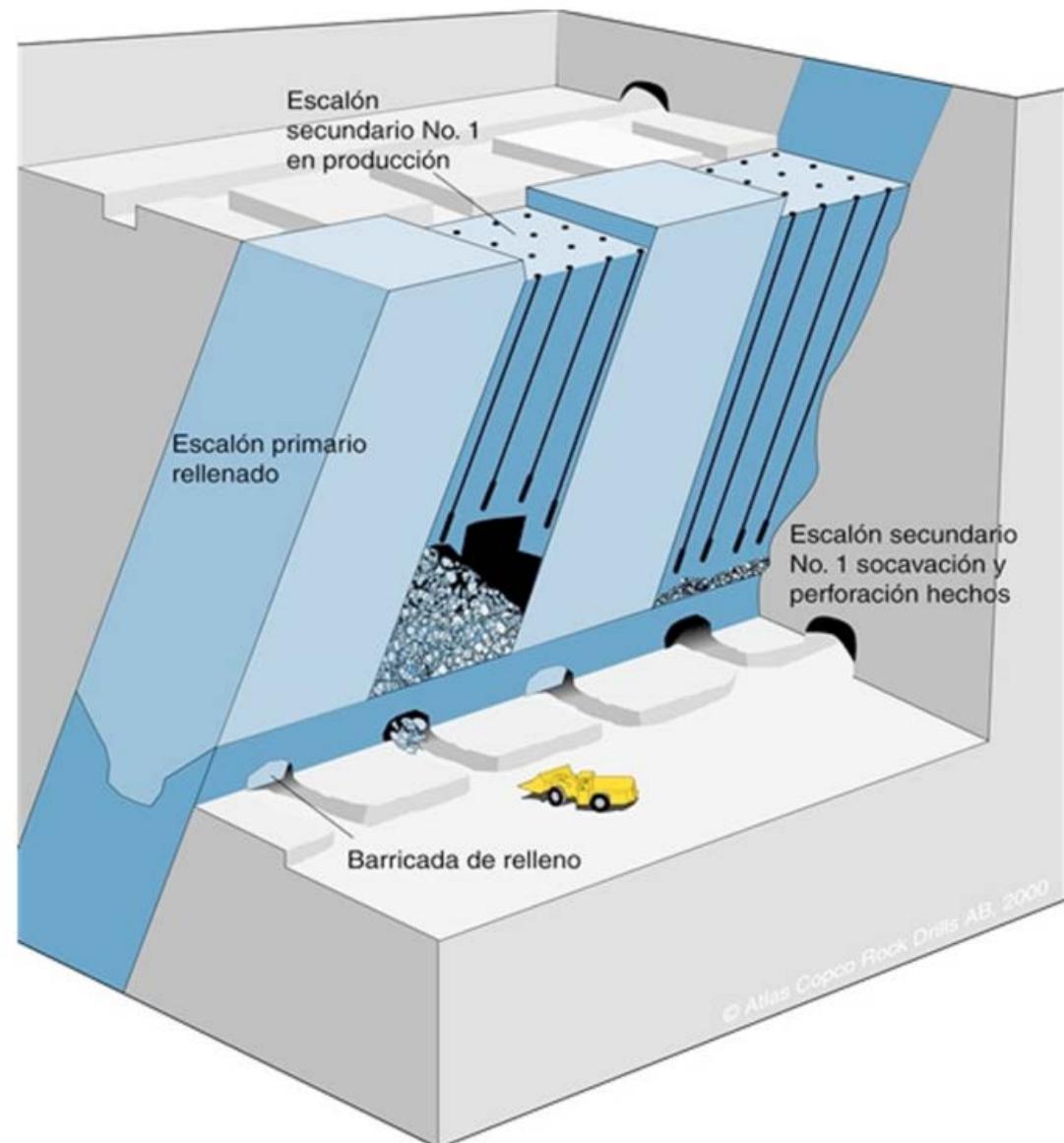
La carga de los barrenos también se hace de una forma muy específica para conseguir el efecto deseado. Los barrenos se cargan desde el corte superior con potentes cargas de explosivo que quedan confinadas en una sección muy corta del barreno y localizada a una distancia específica de la cara libre. Asimismo, se agrupan los barrenos de tal manera que las cargas queden todas a la misma elevación desde el corte inferior y a la misma profundidad desde el corte superior. Para ello, antes se habrá medido cuidadosamente la longitud del barreno y se tapona a la profundidad adecuada. Se introduce después la carga y se aplica el retacado del barreno con arena. En algunos casos, se ha llegado a complementar éste retacado con arcilla y se rellenaba el resto de la caña del barreno con agua.

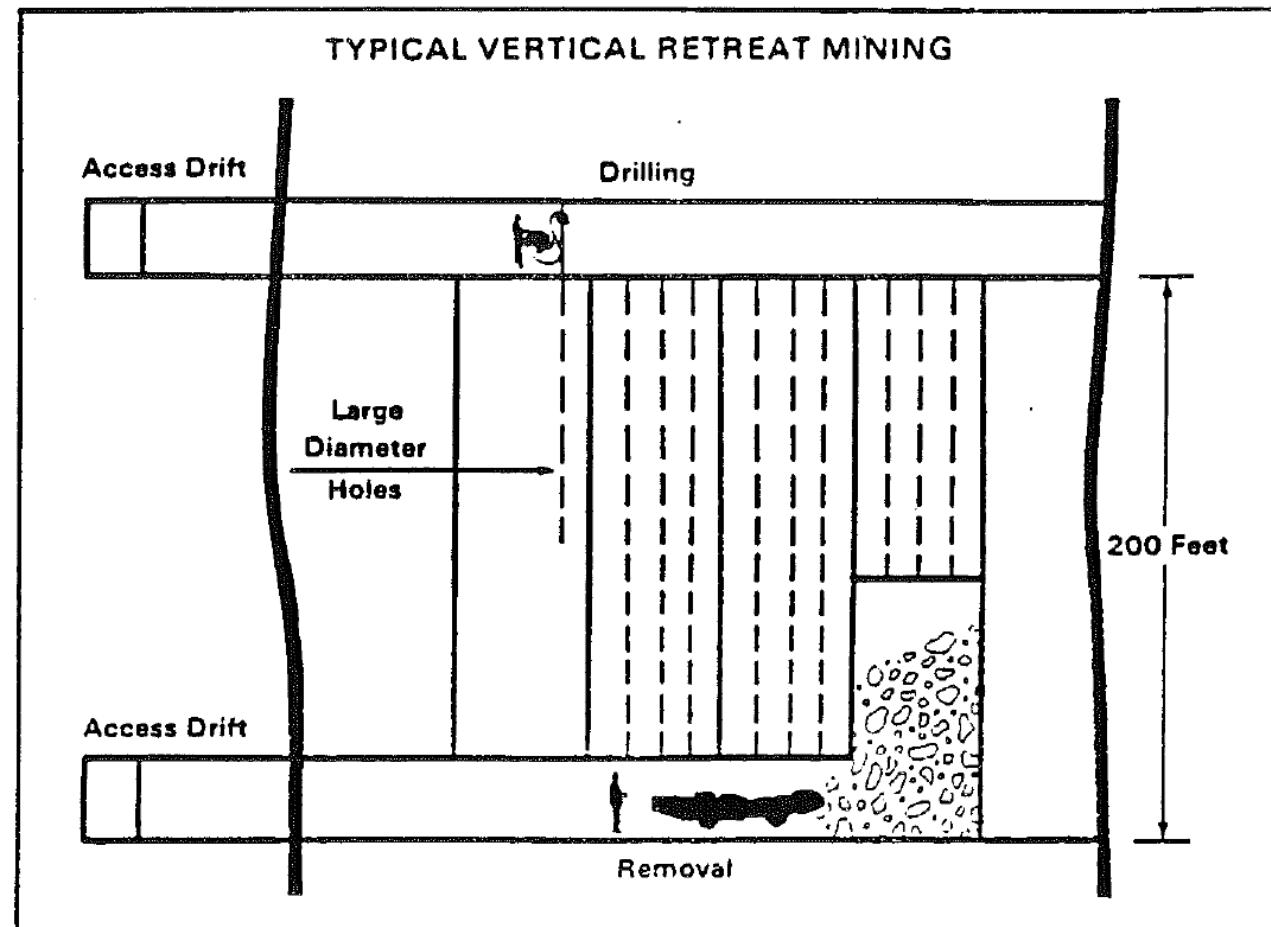
El efecto de la disposición de las cargas permitía que la voladura recortara secciones horizontales del bloque de aproximadamente 3 m de espesor, cayendo la roca volada a la parte inferior de la cámara. Para estas voladuras, se requiere un entrenamiento especial de los artilleros para asegurar el éxito de todas y cada una de las voladuras, además de unos registros muy precisos de todos y cada uno de los barrenos y de las operaciones de voladura.

Las operaciones de carga requieren la utilización de equipos LHD a control remoto, al menos en la parte en la que el equipo entra en la cámara para cargar, quedando el operador siempre a resguardo.

Dependiendo del proyecto, las cámaras pueden ser objeto de "backfilling" (relleno) o no. La utilización del backfilling abre en muchos casos la posibilidad de una recuperación posterior de los macizos dejados como pilares.

El método VCR es aplicable en condiciones similares a las existentes cuando se aplica el "sublevel open stoping". De hecho, el método VCR es más sencillo técnicamente y las posibilidades de la perforación son más amplias al permitir mucha menos desviación en los barrenos. Sin embargo, la carga de los barrenos sí es más compleja y delicada y es preciso tener en cuenta que la mayor potencia relativa de las voladuras VCR implica mayores riesgos de daños en los macizos remanentes en comparación con el sublevel open stoping.







Doyon Gold Mine. Sub-level stoping with paste backfill



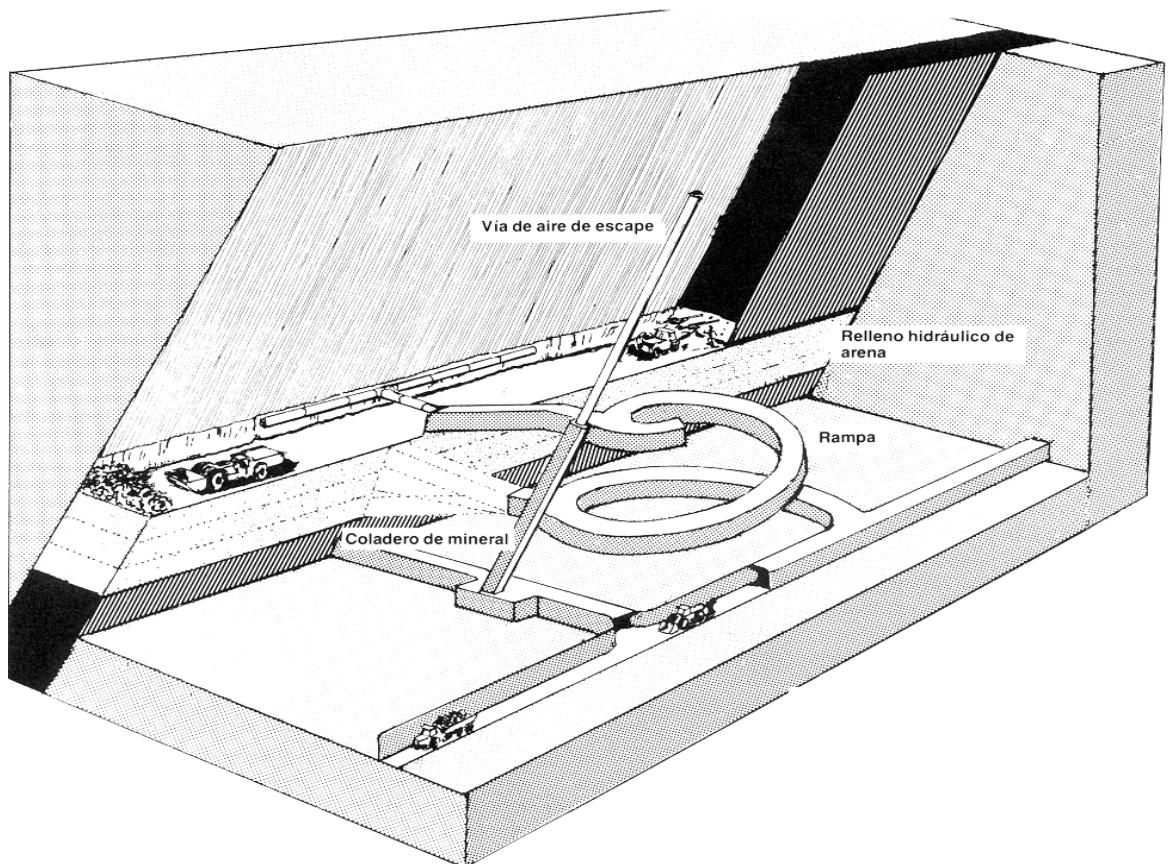
## 6. MÉTODOS POR CORTE Y RELLENO (CUT AND FILL STOPING)

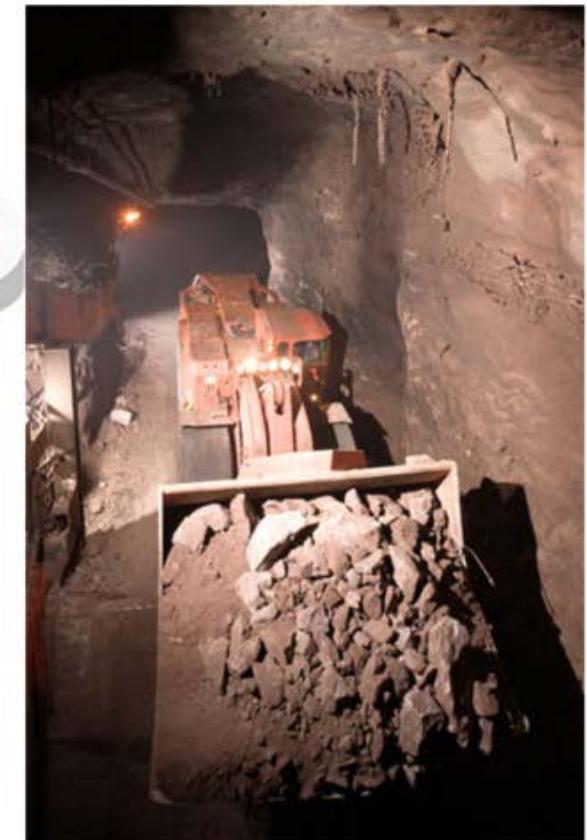
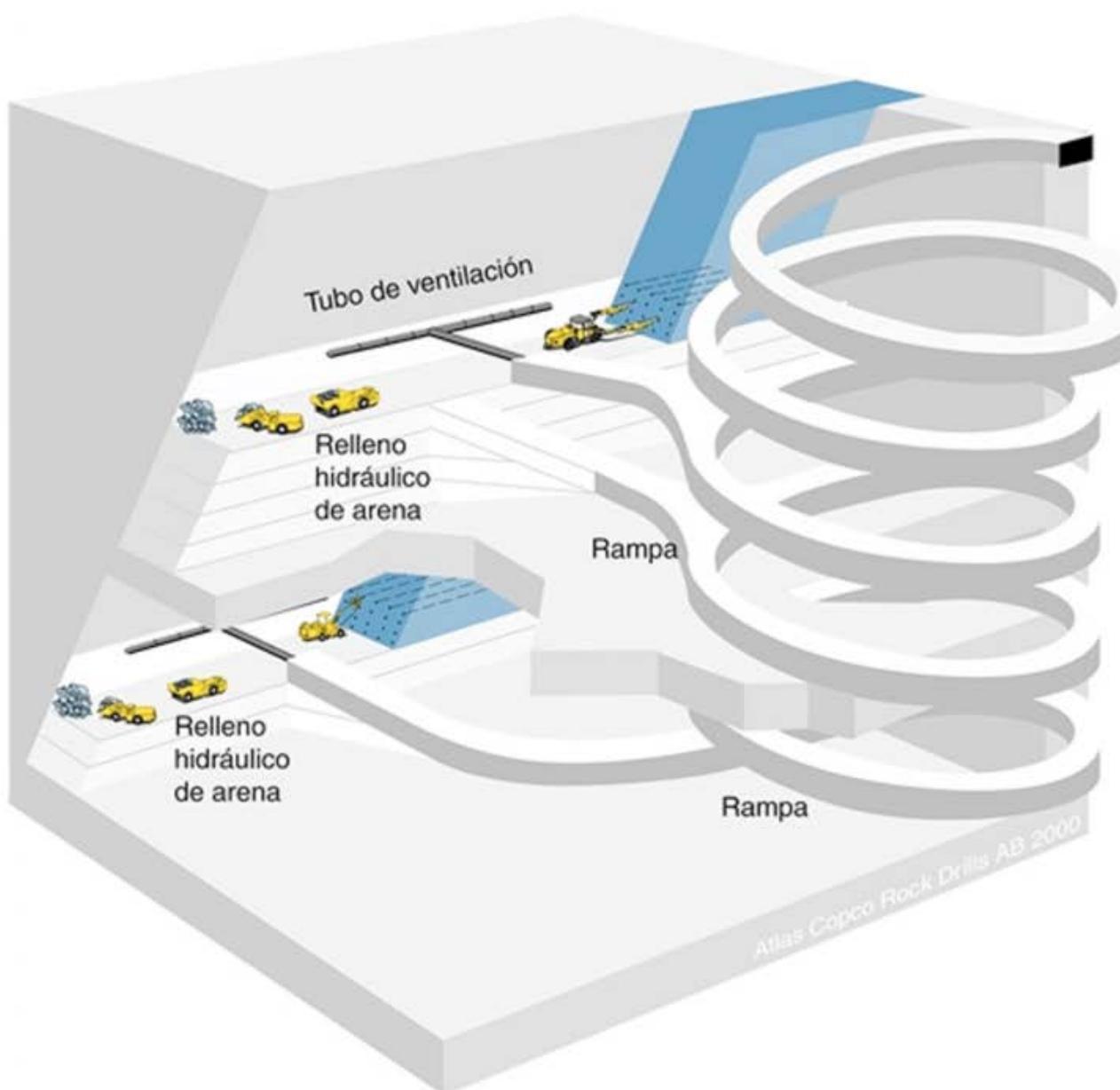
La minería por corte y relleno (Cut-and-fill mining) extrae la mena por medio de recortes horizontales, iniciados en un rebaje inferior en la cámara en la que posteriormente progresará la explotación. Es un método similar al de "cámaras almacén", pero las cámaras se llenan con material suelto o cementado procedente de fuera de la propia mina porque la roca encajante requiere elementos de soporte para mantenerse estable o que las cámaras se llenen. El mineral es arrancado en franjas horizontales y/o verticales empezando por la parte inferior de un tajo y avanzando verticalmente. A diferencia del método de cámaras almacén, en éste caso las dimensiones de las cámaras pueden ser mucho más largas (entre 60 y 600 m aproximadamente).

Cuando se ha extraído la franja completa, se rellena el volumen correspondiente con material estéril, que sirve de piso de trabajo para proceder a la extracción de la siguiente franja, al tiempo que permite sostener las paredes y, en algunos casos especiales, el techo.

El método puede utilizarse en yacimientos que presenten las siguientes características:

- Buzamiento superior a los 50°, en roca incompetente (hastiales débiles) o de calidad geotécnica pobre, con un cuerpo mineralizado de potencia moderada y de límites regulares. Mineral moderadamente firme a débil.
- Yacimiento de grandes longitudes (irregularidades y discontinuidades son admisibles).







- De pequeña potencia (< 30m), gran extensión y, comparativamente, con mineral de alta ley y valor (uniforme o variable, lo que puede dar lugar a una explotación más selectiva).
- Buzamientos algo más horizontales, podrían ser admisibles si los coladeros son de una pendiente superior al ángulo de reposo (más labores en estéril).
- Profundidad: hasta 2000 m.

Sus principales ventajas son que la recuperación es cercana al 100%, siendo mucho más selectivo que el método de cámaras por subniveles o por VCR, lo que significa que se pueden trabajar secciones de alta ley y dejar aquellas zonas de baja ley sin explotar. Es una opción interesante cuando se tiene una forma irregular y mineralización dispersa. Es un método seguro que puede alcanzar un alto grado de mecanización.

Los trabajos de desarrollo consistirán en la preparación de los pilares laterales, de base y corona si se requieren. La construcción de los niveles de transporte con galerías en mineral o en estéril si aquél fuera poco consistente, los hastiales fueran irregulares o la ley poco uniforme. Se requieren rampas en espiral construidas a muro del cuerpo mineralizado para acceso a la zona de trabajo de los equipos de mina (jumbos, LHD, etc.), y un inicio del corte con galería en dirección, con entre 6 – 8 m por encima de la de transporte (pilar de base) si ésta fuese en mineral. Todo ello se complementaría con chimeneas y pozos piquera para mineral, relleno, ventilación o acceso entre niveles. Especialmente en éste caso, es importante dejar construido correctamente todo el sistema de drenaje de la cámara.

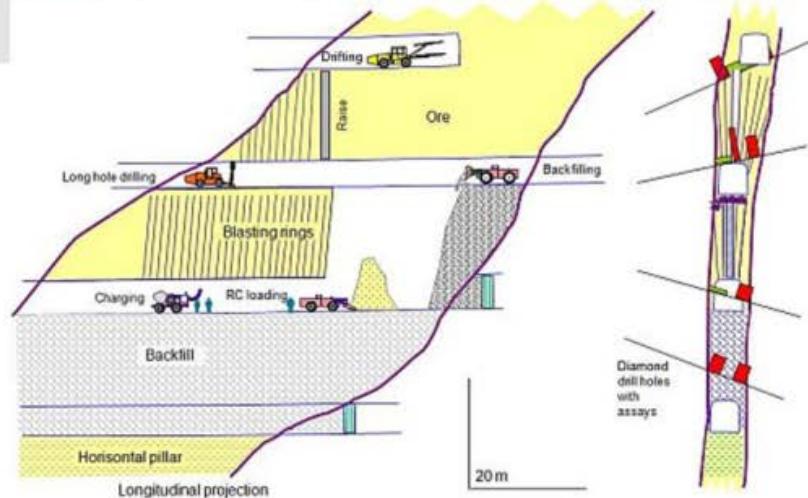
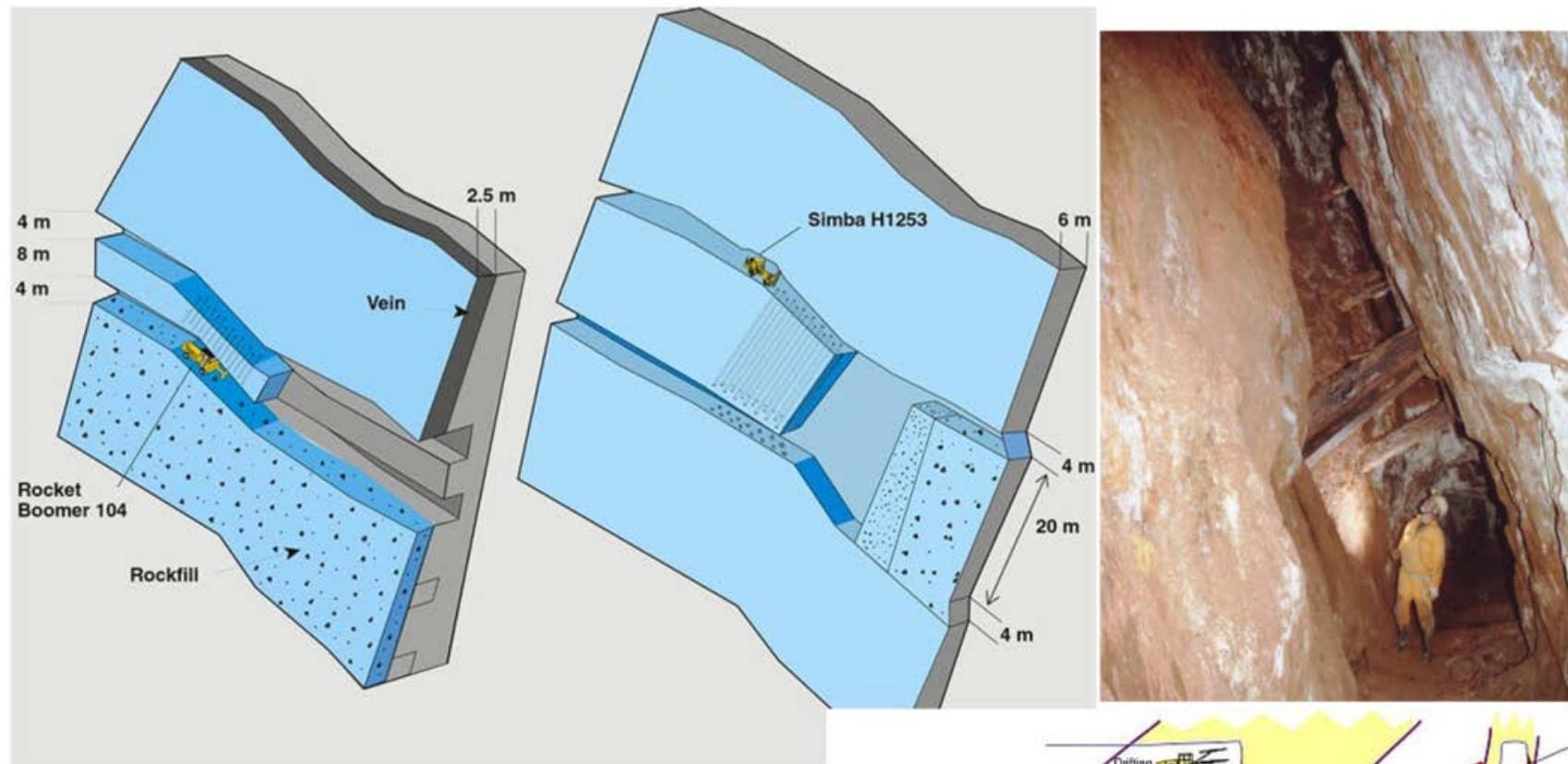
La mena se arranca por perforación y voladura, para ser cargada y retirada de la cámara. La perforación de los barrenos de producción se realiza con jumbos y, donde procede, con perforadoras de martillo en cabeza o martillo en fondo. El transporte se realiza fundamentalmente por camión, aunque hay explotaciones que utilizan pequeños trenes mineros.

Los esquemas de diseño de las voladuras pueden ser modificados en función de las necesidades de cada una y adaptarlos en todo momento a la sinuosidad de la roca encajante y las paredes de la cámara. Asimismo, la flexibilidad permite que zonas de baja ley sean dejadas sin volar si hay espacio suficiente para maniobrar o bien abandonadas para que formen parte del relleno si han tenido que ser arrancadas. La misma flexibilidad permite modificar puntualmente los límites de la cámara para explotar engrosamientos de mineral en la roca encajante que con otro método sería indetectadas o simplemente abandonadas.

Cuando se ha vaciado la cámara, se procede al relleno hidráulico de huecos con estériles de planta arenosos y deslamados o bien con estériles de mina. El relleno sirve tanto para el soporte de los hastiales de la cámara como para proporcionar la plataforma de apoyo para los equipos mineros cuando se proceda a explotar la siguiente franja. El rellenado habitualmente se hace por gravedad con apoyo de máquinas LHD.

Es frecuente acudir a relleno hidráulico con arenas procedentes de la planta de concentración. Estas requieren un deslamado de las mismas y su preparación en una planta de preparación construida al efecto donde el estéril se acondiciona para que tenga entre un 60 % y un 70 % de sólidos antes de ser inyectado al interior de la mina y llevado a las cámaras por medio de una red de tuberías. Antes de proceder al llenado, debe hacerse una cuidadosa comprobación de la correcta implementación y funcionamiento del sistema de drenaje y recuperación de las aguas aportadas con el backfilling, así como las medidas de barrera y contención para mantener el relleno en la zona prevista. Con el fin de conseguir plataformas de trabajo y apoyo de maquinaria adecuadas para las siguientes etapas, se añade cemento a la mezcla de los volúmenes que quedarán depositados en la parte superior del relleno. Una vez drenada el agua, y fraguada la mezcla se consigue una superficie uniforme que es muy adecuada para la circulación y maniobra de la maquinaria y equipos.

En los casos en los que se utiliza estéril de espesado o estériles de mina, se utilizan transporte por camión, por banda transportadora y apoyo de empujadores y LHD.





Criterios de selección del método		
	Aceptable	Optimo
GEOMETRIA DEL YACIMIENTO		
Forma	Cualquiera	Tabular
Potencia	Cualquiera	> 3 m
Buzamiento	> 30°	> 60°
Tamaño	Cualquiera	Cualquiera
Regularidad	Cualquiera	Irregular
ASPECTOS GEOTÉCNICOS		
Resistencia (techo)	> 30 MPa	> 50 MPa
Resistencia (mena)	s/profundidad	> 50 MPa
Fracturación (techo)	Alta - Media	Media - Baja
Fracturación (mena)	Media - Baja	Baja
Campo tensional in-situ (Profundidad)	Cualquiera	< 1000 m
Comportamiento tenso-deformacional	Elástico	Elástico
ASPECTOS ECONÓMICOS		
Valor unitario de la mena	Medio - Alto	Alto
Productividad y ritmo de explotación	Media - Baja	NA

Variantes del método

#### Corte y Relleno Ascendente (CRA):

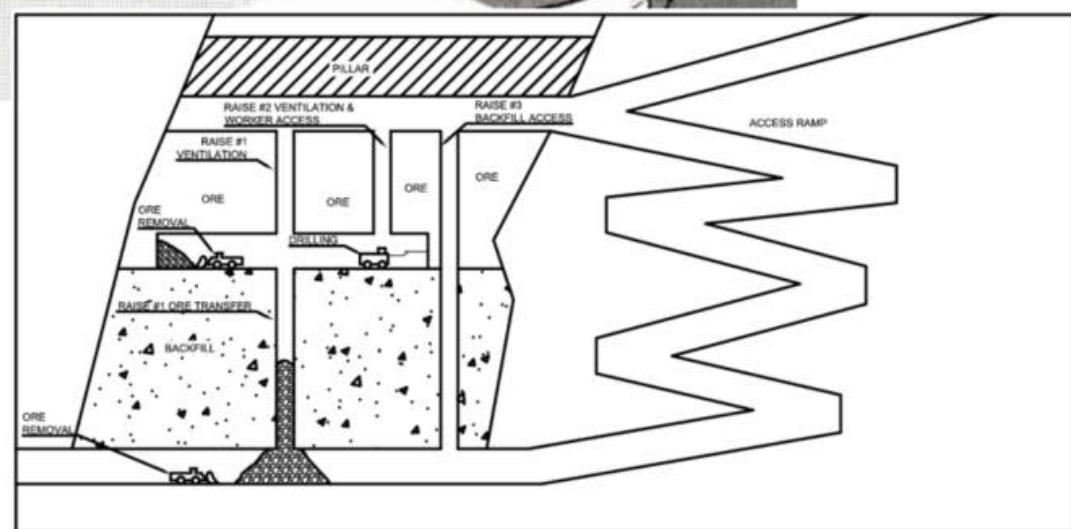
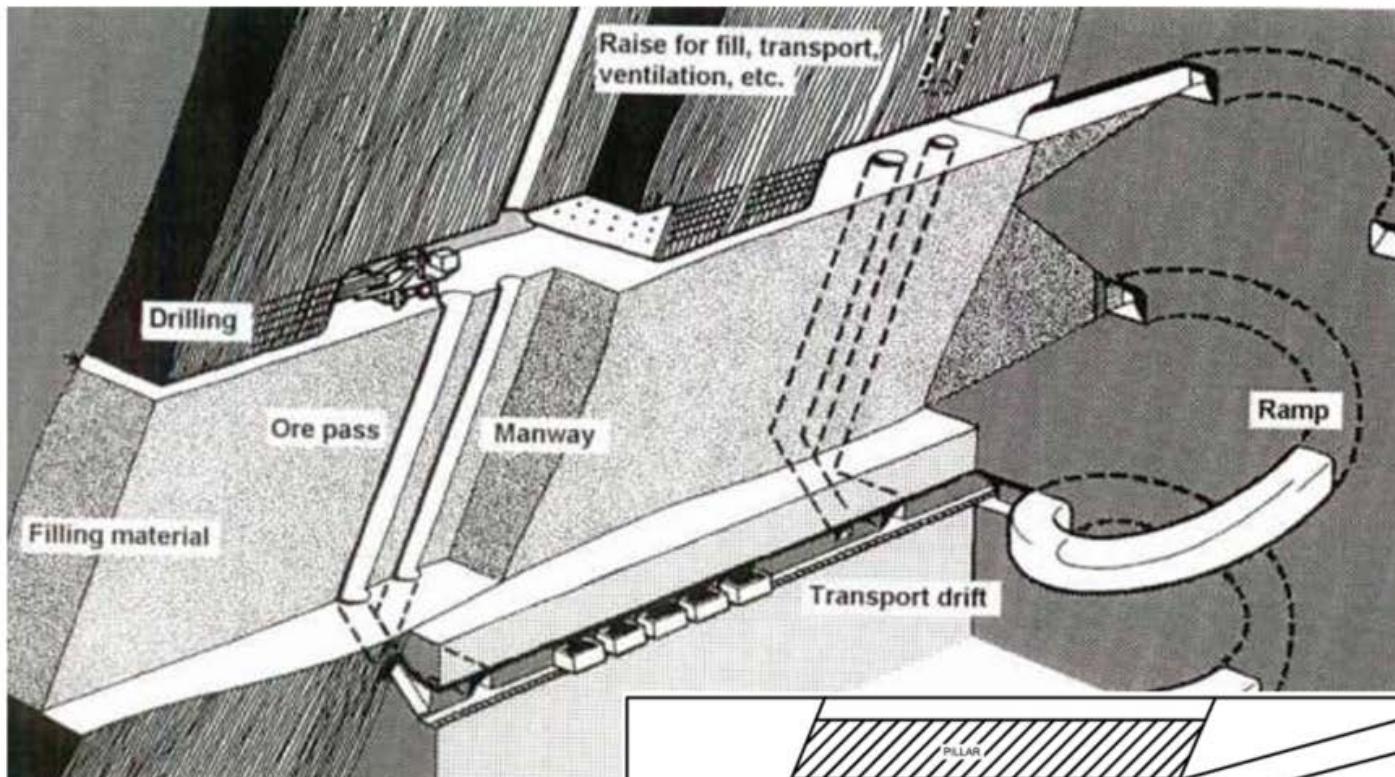
- Se trabaja sobre piso de relleno mientras que el cielo de la zona de trabajo en la cámara es en mineral.
- El arranque avanza de base a cabeza de cámara.
- La mena debe ser competente.
- El relleno siempre queda al piso:
- Corte en realce con barrenos horizontales y verticales.
- Cabe la posibilidad de dejar pilares en los casos de grandes potencias.
- También en los casos de yacimientos de gran potencia, cabe acudir a relleno cementado lateral.
- En muchos casos, posibilidad de avance por calles y, en este caso, los barrenos siempre serían en vertical.

#### Corte y Relleno Descendente (CRD):

- En este caso, se trabaja sobre piso de roca (mineral), quedando el cielo de la cámara en relleno resistente.
- El arranque avanza de cabeza a base de cámara.
- Es apto para prácticamente cualquier geotecnia, pero lógicamente es un método mucho más caro.
- Se requieren rellenos resistentes y rígidos.
- Coste unitario de elevado a muy elevado, lo que hace que solo sea aplicable en muy contados casos.
- Relleno cementado a techo de cámara.
- Corte con barrenos en horizontal.

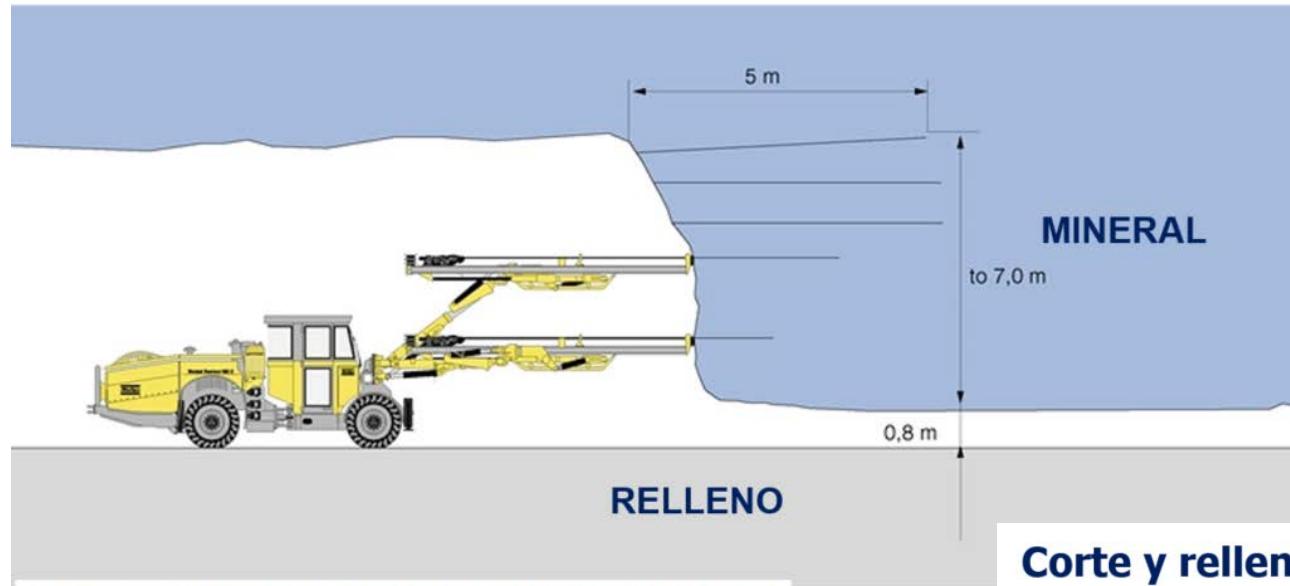
#### Otras Variantes (Aplicables a CRA):

- Drift & Fill (Corte y relleno por galerías)
- Variantes según mecanización y tipos de perforación



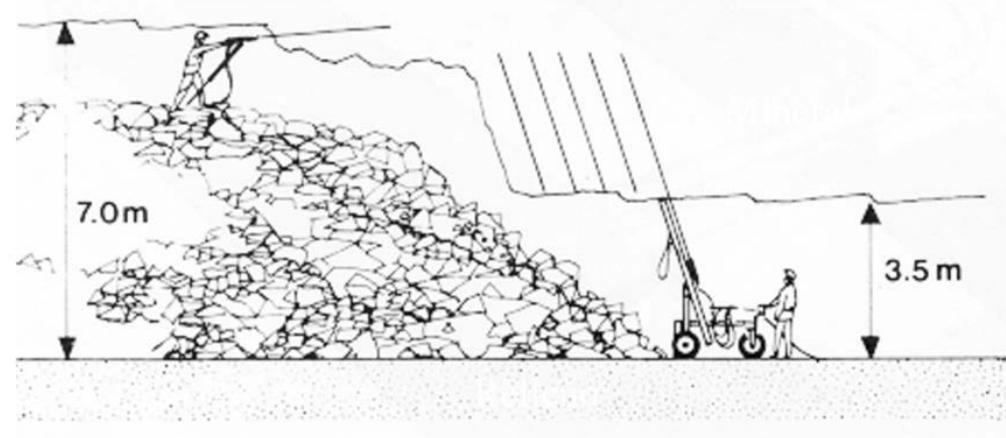


## Corte y relleno ascendente (Barrenos horizontales)



- Techo de la excavación menos afectado por la voladura.
- Perforación no independizada de la carga.
- Mejor sujeción de los hastiales.

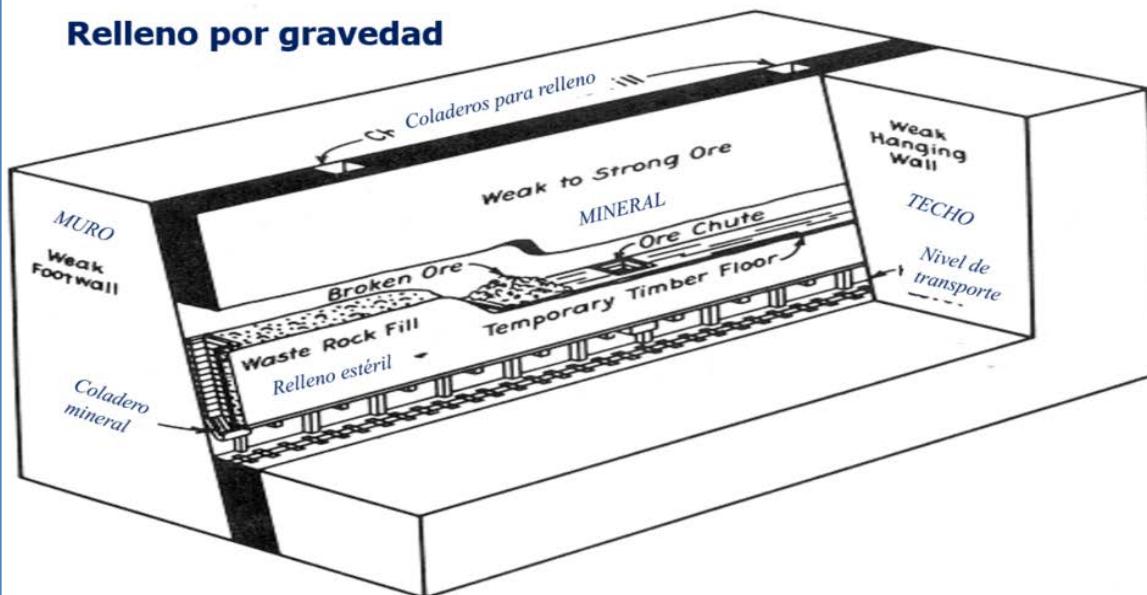
## Corte y relleno ascendente (Barrenos verticales)



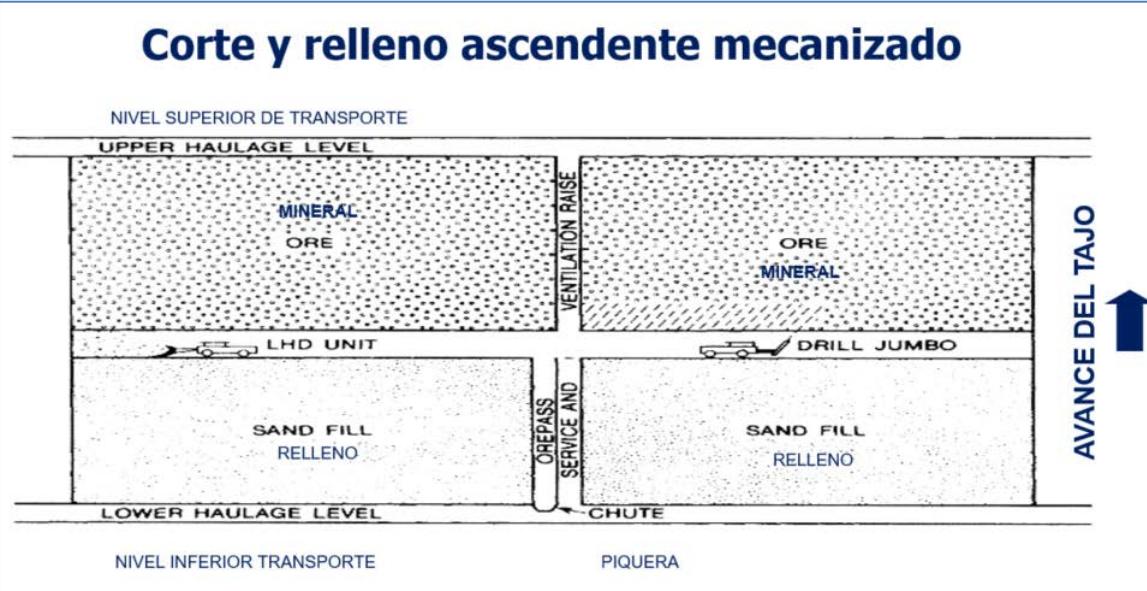
- Techo de la excavación más afectado por las voladuras → saneo.
- Peor sujeción de los hastiales → más dilución.
- Perforación independiente de la carga.



### Relleno por gravedad

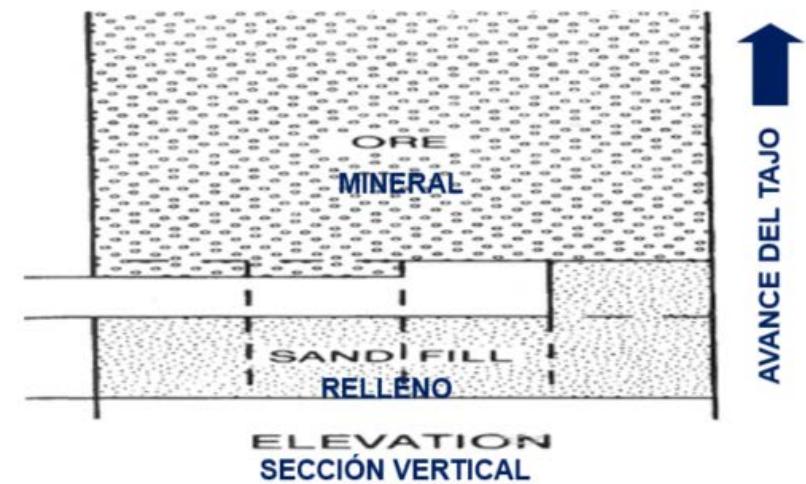
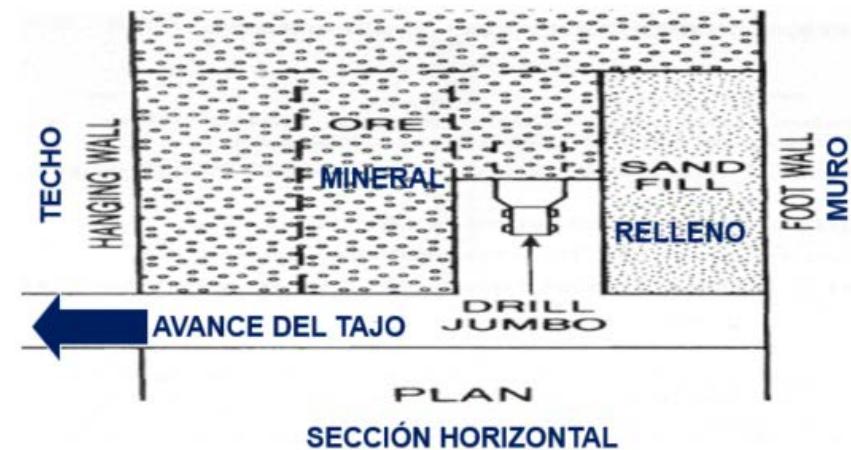


### Corte y relleno ascendente mecanizado



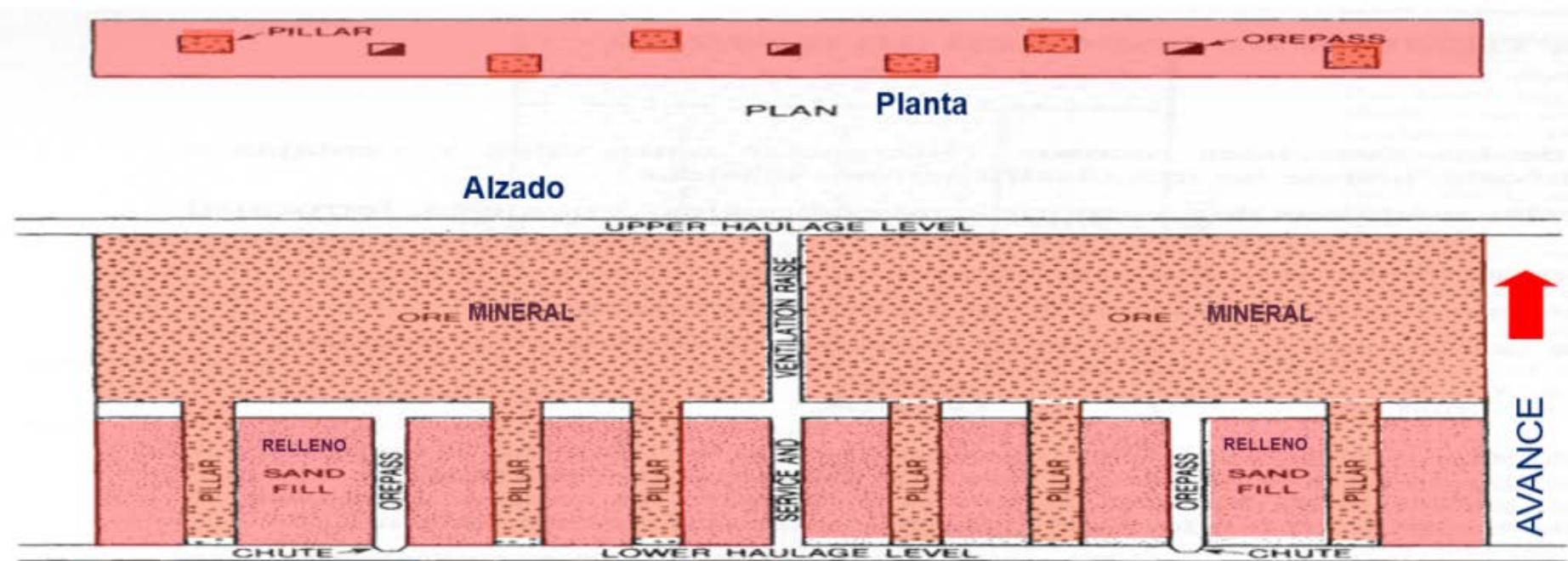
### Corte y relleno por calles

- Potencias > 6 m.
- Mineral poco competente.



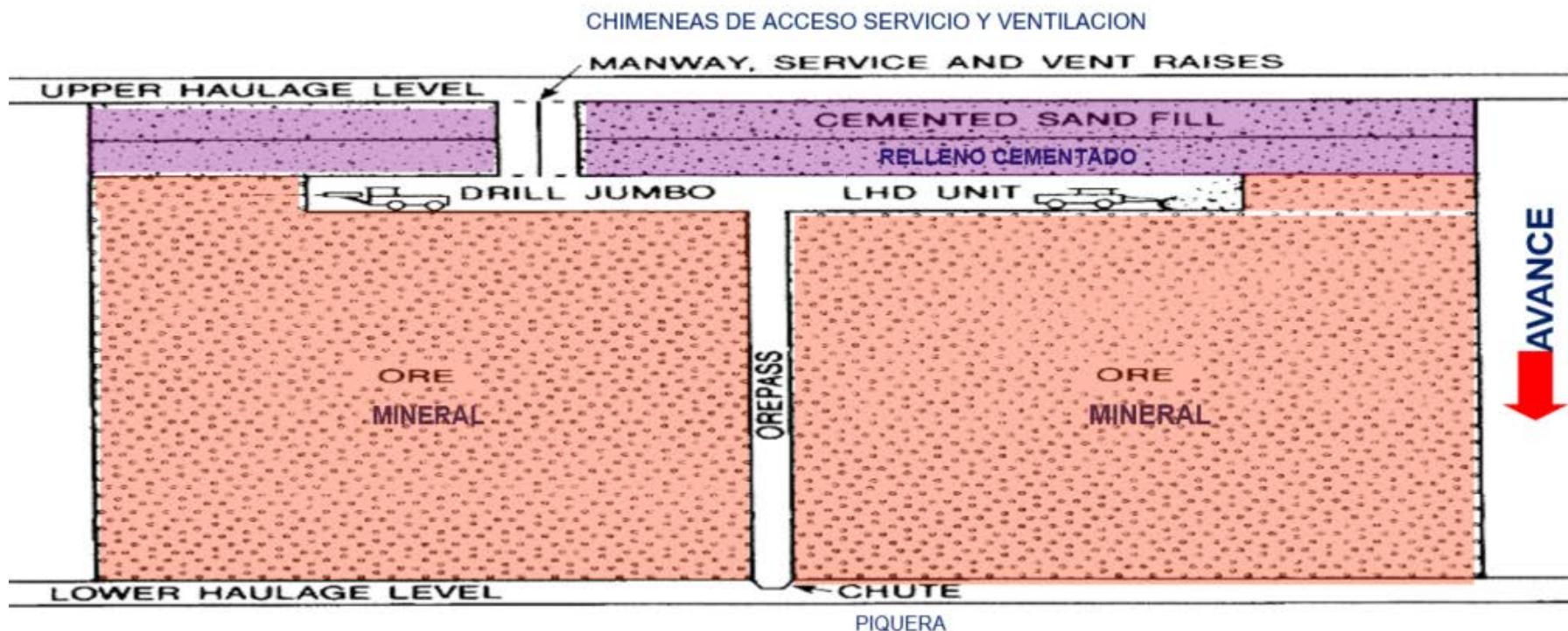


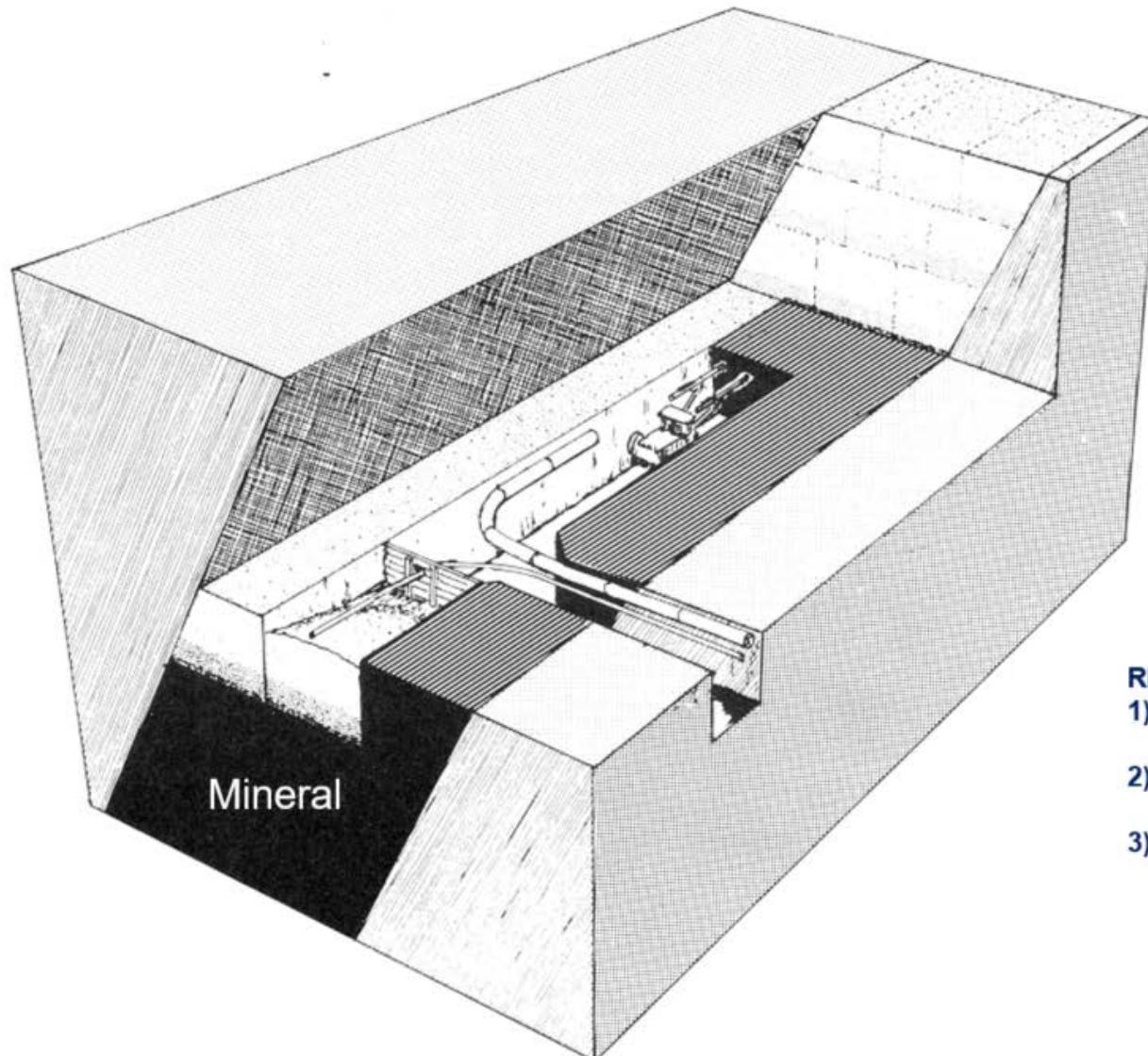
## Corte y relleno ascendente con pilares





## Corte y relleno descendente





## Corte y relleno hidráulico descendente

### RELENO:

- 1) Tela metálica y cubierta de plástico
- 2) Capa de 2m. de cemento y arena (1:4)
- 3) Capa de cemento y arena (1:10)



# 7. MÉTODO DE HUNDIMIENTO POR SUBNIVELES (SUBLEVEL CAVING)

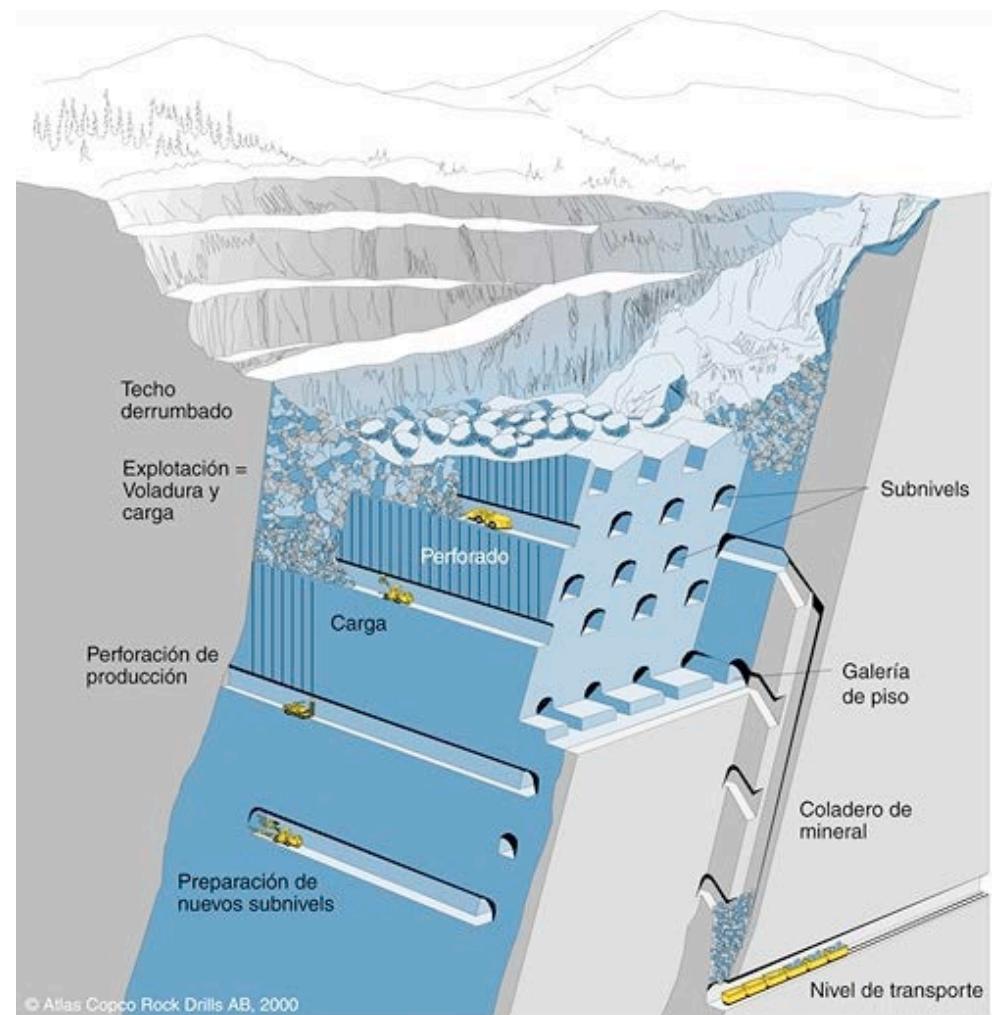
## 7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

En el método de cámaras por subniveles (sublevel caving), el mineral se extrae vía subniveles excavados a intervalos regulares en el cuerpo mineralizado. Cada subnivel presenta un diseño sistemático con galerías paralelas excavadas bien a lo largo o bien a transversalmente al cuerpo mineralizado.

En éste método, la explotación progresó en sentido descendente. Desde las galerías transversales se perforan barrenos en abanico hacia arriba en ángulos entre 60 y 120°, en un plano a 70 - 90° con respecto a la horizontal. Se vuela una fila de abanicos, o como máximo dos. La carga se hace de forma controlada hasta detectar la aparición del estéril hundido. Permite ritmos de producción altos, con un grado de recuperación del yacimiento alto (80 – 90 %) en muchos casos. Es un método seguro y moderadamente flexible y suficientemente selectivo por la proximidad entre subniveles.

Este método se utiliza en yacimientos grandes y con fuertes buzamientos. A modo de resumen, éste método se aplica en los siguientes casos:

- Yacimientos verticales/semiverticales (buzamiento > 60°) u horizontales si son de gran potencia.
- De media/gran potencia (> 6m). Hastiales moderadamente irregulares
- Mineral medianamente competente.
- Estéril fracturado que colapse sin finos (permite reducir dilución).
- Dilución inevitable (20 - 30%). Estéril fácil de separar del mineral (por ejemplo, el caso del hierro -separación magnética- o del carbón).
- Profundidad: < 1.200 m.



© Atlas Copco Rock Drills AB, 2000



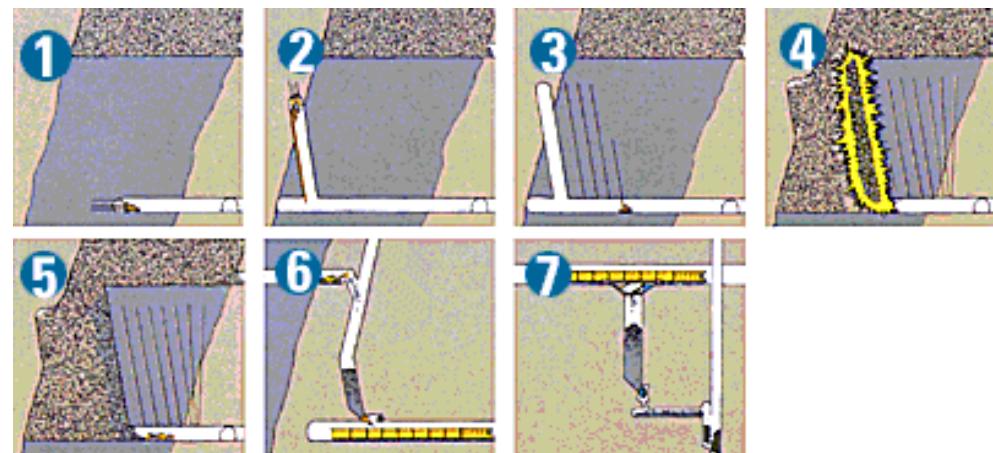
La masa de roca del yacimiento debe ser lo suficientemente estable como para permitir que las galerías de subnivel permanezcan abiertas con tan solo pernos ocasionales. Por su parte, la roca a techo del yacimiento debe fracturarse y colapsar siguiendo en el hundimiento al mineral y todo el terreno por encima del mineral debe poder ser objeto de subsidencia. El hundimiento debe poder producirse de tal forma que la roca tanto del depósito mineral como la encajante fracturen en condiciones controladas. A medida que la extracción minera va extrayendo mineral y los huecos no se rellenan, la roca a techo comienza a hundirse para ocupar el hueco. La extracción continua da como resultado un hundimiento y una subsidencia que puede propagarse con toda seguridad hasta la superficie. Es importante que el hundimiento se realice de una manera progresiva y continua para evitar la creación de cavidades dentro de la roca donde un colapso repentino podría ser perjudicial para las instalaciones mineras. Por su parte, a muro del yacimiento la roca debe ser lo suficientemente estable para mantener resguardada toda la infraestructura de mina.

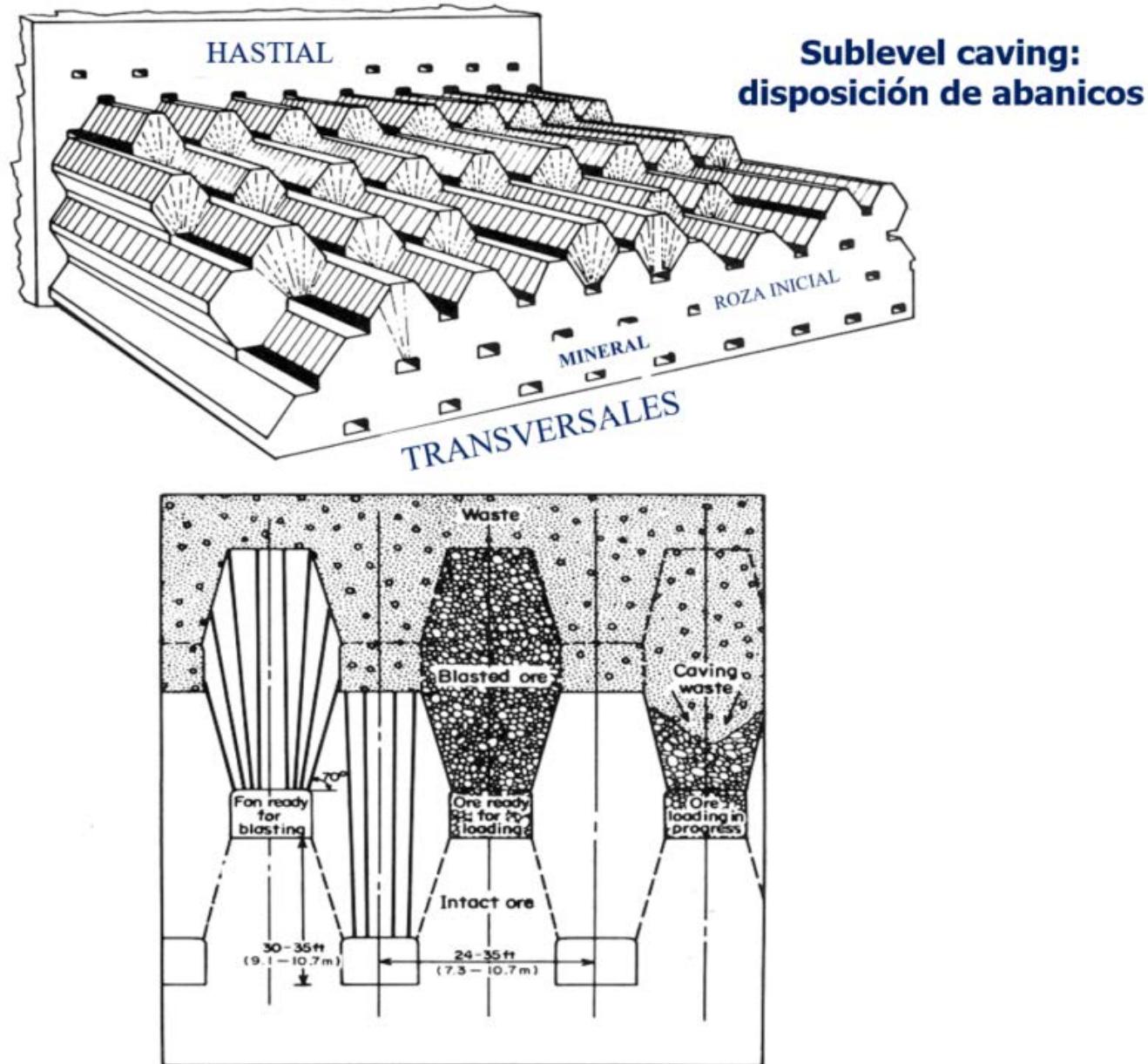


En un cuerpo mineralizado ancho, las galerías del subnivel arrancan desde la galería general del hastial de muro y se prolongan hasta que llegan al techo del yacimiento. Esto se conoce como excavación de la transversal de subnivel. En cuerpos mineralizados de menor anchura, se lleva a cabo la excavación de galerías de subnivel longitudinalmente y a lo largo del cuerpo (denominadas "en dirección") y, en esta variante, las galerías se ramifican en ambas direcciones desde un corte transversal central. Estas galerías se distribuirán al tresbolillo en subniveles separados verticalmente 8 – 15 m. Existirá una similar distancia horizontal entre centros, según características mecánicas de la zafra.

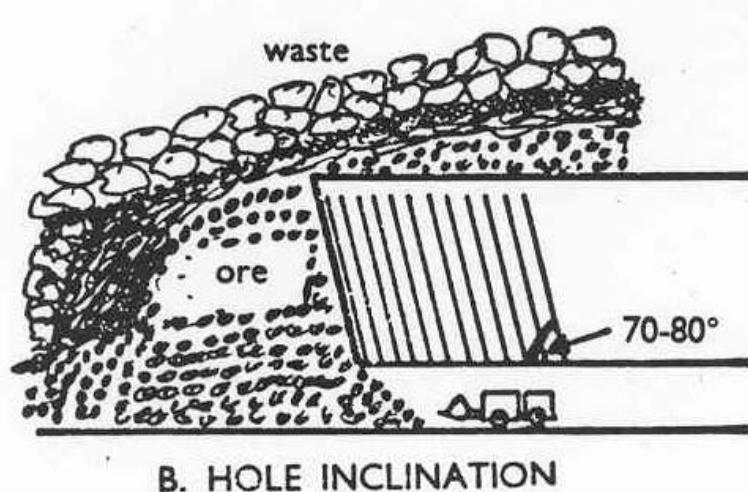
Se incluye en las labores de desarrollo la excavación de la necesaria chimenea y roza entre niveles para la apertura del tajo.

La cantidad de labores de desarrollo que se necesitan en éste método de explotación es realmente extensa en comparación con otros métodos de minería subterránea. Sin embargo, el desarrollo implica principalmente excavar galerías de preparación de subniveles que se excavan en mineral aquí ya de una manera regular y rutinaria con mayor grado de eficiencia. De hecho, se estima que las labores de preparación pueden llegar a dar hasta un 20 – 30 % de la producción.





Se necesita una rampa para conectar los diferentes subniveles entre sí y estos con las galerías principales de transporte excavadas a muro y la infraestructura de mina, que se acompañan con pozos piquera y coladeros de mineral repartidos estratégicamente entre los distintos subniveles para permitir que los equipos LHD descarguen y viertan el mineral hacia los niveles de transporte. Las galerías de subnivel y las transversales se distribuyen regularmente dentro de cada subnivel y entre subniveles a distintas cotas de acuerdo al diseño con el que se regulará el hundimiento de las masas de roca. Todo ello, se complementará, además, con las correspondientes necesidades del sistema de ventilación y las labores para el sistema de drenaje.

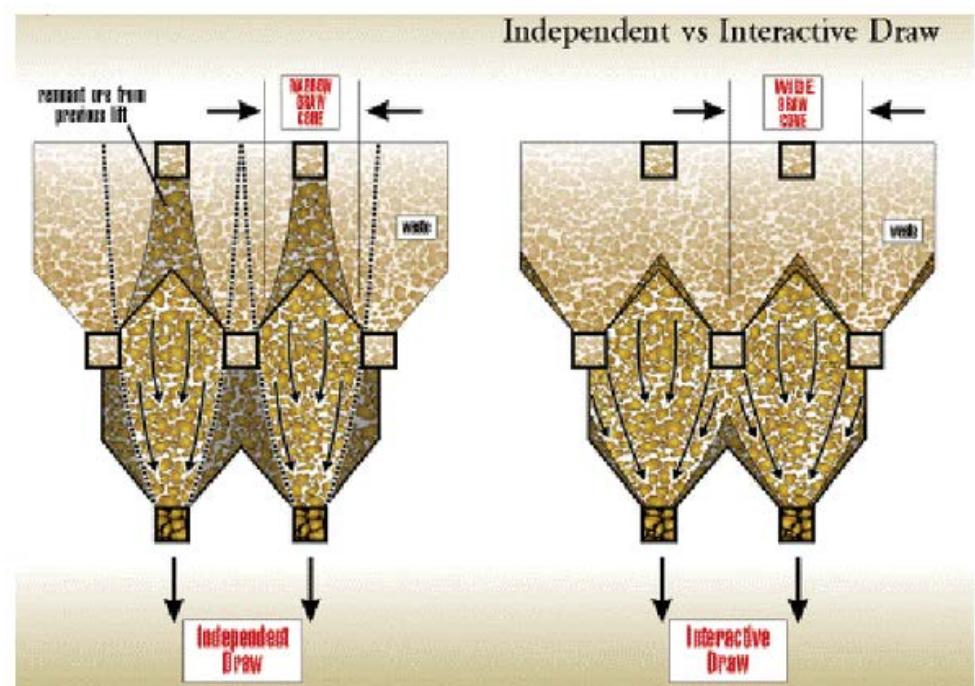


La sección de mineral sobre la transversal o longitudinal de subnivel se perfora conforme a un esquema en forma de abanico con barrenos largos ascendentes de diámetro > 51 mm. En éste método, la perforación de estos abanicos se puede realizar independientemente de otras operaciones, por lo que es muy frecuente que estos trabajos de perforación se lleven a cabo mucho antes de que se vayan a cargar para dar la voladura.

De esta manera, las operaciones de perforación, carga y disparo de las voladuras pueden planificarse para adaptarse a los ritmos de producción de la mina. La

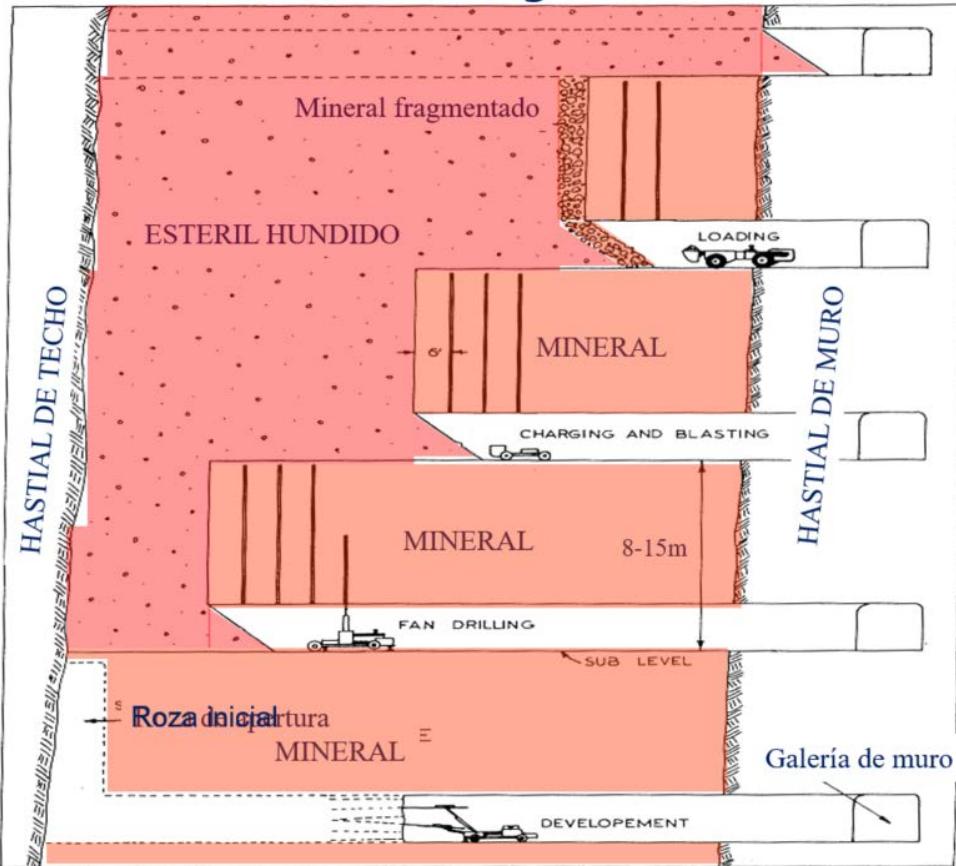
voladura en cada subnivel comienza en el hastial de techo y se procede en retirada minera hacia el hastial de muro. La línea de hundimiento debe seguir un frente aproximadamente recto y, por tanto, las galerías adyacentes deben extraerse a un ritmo similar. Si se visualizara un corte transversal de toda la operación de hundimiento, se podría ver como los subniveles superiores van adelantados con respecto a los que se encuentran por debajo.

El disparo de cada abanico de barrenos permite el arranque del mineral franja por franja. Mientras que la mayor parte del mineral volado permanece in situ, una parte cae al interior de la galería. La progresiva extracción del mismo con equipos LHD crea un patrón de hundimiento de mineral y de estéril que progresa poco a poco. La carga continuará hasta que se observa que la dilución es ya excesiva, con lo que se interrumpe en ese punto y la LHD se desplaza a otro punto de carga en una galería paralela. Al quedar desocupada la galería anterior, queda libre para poder dispararse la voladura de la siguiente sección de abanico de barrenos.



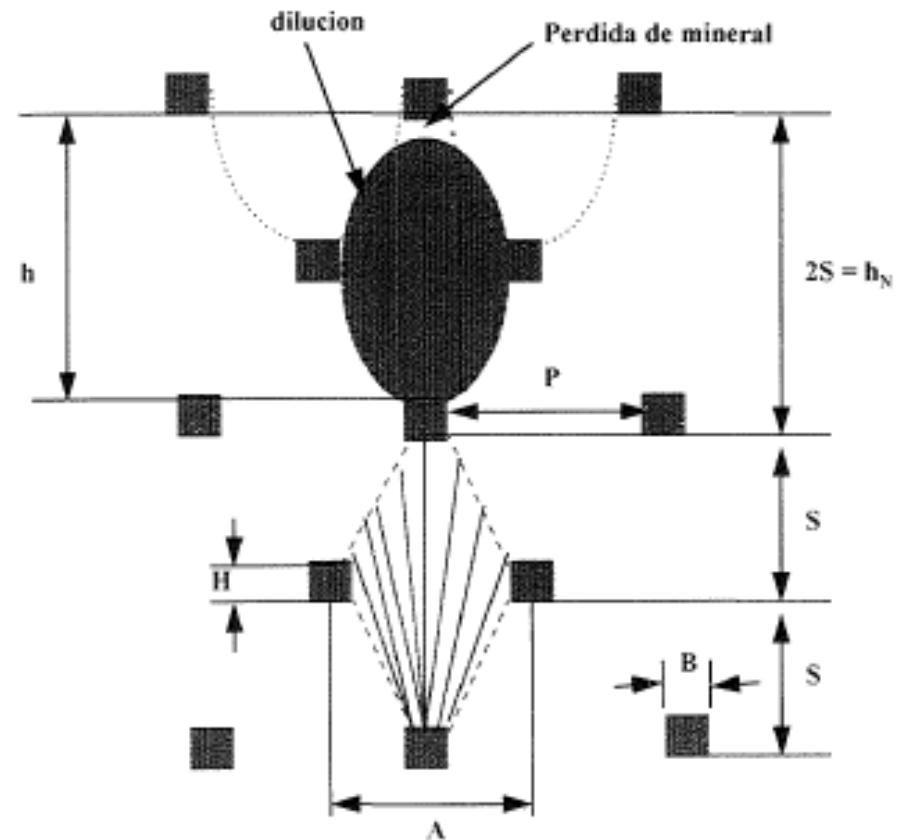


## Sublevel caving transversal



El proceso de extracción minera implica la extracción en los puntos o frentes de carga, su transporte por la transversal y galería de subnivel y su vertido a los pozos piquera. Estas serían las condiciones ideales para los equipos LHD, ya que se encontrarían en continuo funcionamiento y sin interrupciones. Cuando se considera que un punto de carga ha sido terminado, el equipo se desplaza a otro en una galería próxima y continúa la labor de desescombro del mineral arrancado. Por ello, los subniveles deben diseñarse con distancias de desplazamiento adaptadas a tamaños particulares de los LHD.

El transporte por galerías generales se realiza por camión. En el caso de minas importantes, es posible la utilización de ferrocarril.



La dilución y las pérdidas de mineral son parte de los inconvenientes del método de hundimiento por subniveles. Los estudios indican que, a pesar de implementar medidas para reducir las pérdidas en lo posible y reducir la dilución, esta varía de media entre un 15 % y un 40%, mientras que las pérdidas de mineral pueden ser del orden de entre un 15 % y un 25%, dependiendo de las condiciones geológicas y de diseño de la mina, ya que pueden reducirse con un diseño de transversales al tresbolillo. La dilución tiene menos influencia para los cuerpos mineralizados con límites difusos donde la roca encajante tiene minerales de baja ley o para el caso

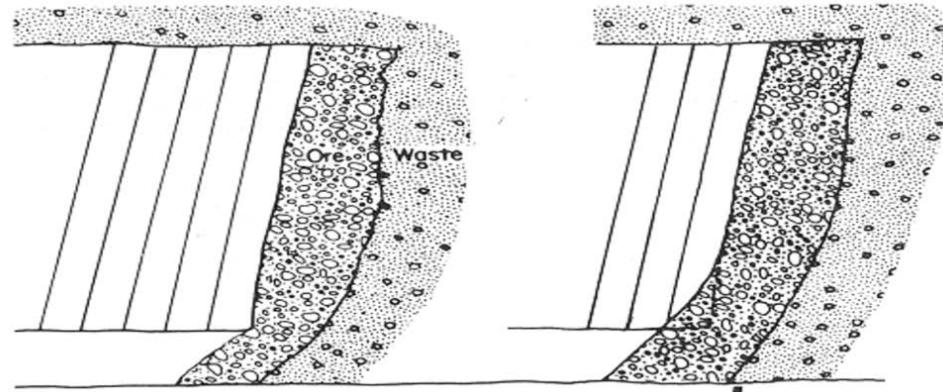
de minerales como la magnetita, que pueden ser concentrados con simples separadores magnéticos. Los sulfuros, sin embargo, requerirán procesos de concentración en planta mucho más caros.

Criterios de selección del método		
	Aceptable	Optimo
GEOMETRIA DEL YACIMIENTO		
Forma	Tabular	Tabular
Potencia	Media	Grande
Buzamiento	Cualquiera	Vertical
Tamaño	Medio	Grande
Regularidad	Media	Alta
ASPECTOS GEOTÉCNICOS		
Resistencia (techo)	< 100 MPa	< 50 MPa
Resistencia (mena)	> 50 MPa	> 50 MPa
Fracturación (techo)	Media - Alta	Alta
Fracturación (mena)	Media	Baja
Campo tensional in-situ (Profundidad)	< 1000 m	< 500 m
Comportamiento tenso-deformacional	Elástico	Elástico
ASPECTOS ECONÓMICOS		
Valor unitario de la mena	Bajo	NA
Productividad y ritmo de explotación	Alto	NA

El método de hundimiento por subniveles es muy repetitivo tanto en lo que se refiere al diseño como a los procedimientos de trabajo. Los desarrollos en galería, la perforación de la producción, la carga de los barrenos, las voladuras y las labores de desescombro y carga del mineral se llevan siempre a cabo por separado y en diferentes niveles, lo que permite que cada procedimiento se lleve a cabo de manera continuada sin entorpecer los trabajos en otros puntos ni obligar a que haya paradas en el funcionamiento de los equipos mineros.

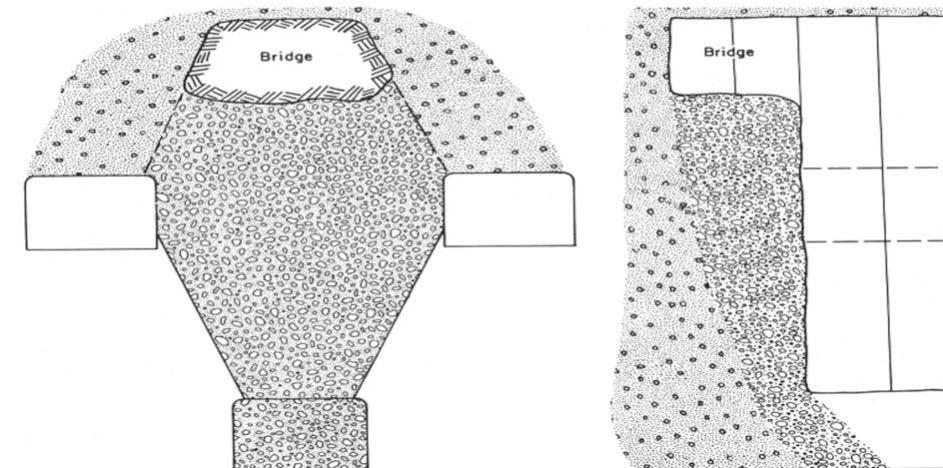
#### SOBREEXCAVACIÓN:

Afecta a la carga de los barrenos de la primera fila. Talud algo invertido ( $70-80^\circ$ ), lo que reduce la fragilidad del techo.



#### EXCAVACIÓN INCOMPLETA:

Menor recuperación. Mala fragmentación, lo que implica mayor dilución. Deficiente salida de la voladura, lo que significa acometer una nueva roza de inicio





## 7.2. SUTIRAJE POR SUBNIVELES PARA MINERÍA DE CARBÓN

El método de explotación por sutiraje en subniveles horizontales, es un método de explotación de carbón por medio de hundimiento por subniveles. Se aplica a las capas de carbón inclinadas y con irregularidades.

El nombre procede de la palabra francesa “soutirage”, una de cuyas acepciones es la de sacar con maña y habilidad por debajo, con destreza, artificio o astucia. El método de soutirage se castellanizó por la palabra sutiraje, que consistiría en sacar el carbón con habilidad y astucia cuando la capa presentaba unas potencias tales que el hueco que se producía al arrancarla en su totalidad no podía sostenerse con los medios disponibles, o cuando su irregularidad en potencia, pendiente o rumbo, hacía inviable aplicar otros métodos convencionales. Así, el método de sutiraje, practicado con diversos nombres en diferentes cuencas, es de aplicación en los casos en los que se presentan:

- Capas de gran potencia, cualquiera que sea su pendiente y regularidad.
- Capas de media potencia, con fuertes pendientes sean o no regulares.

En estos casos, no es posible un arranque integral con equipos altamente mecanizados que introducen rigideces en su aplicación, y que dejan de ser eficaces cuando el yacimiento no reúne las condiciones para los que han sido diseñados. No obstante, el sutiraje también se ha servido de la mecanización, tecnificándose cada vez más su práctica con el fin de incrementar eficacia y seguridad, y reduciendo la intensidad en mano de obra. Es por ello que son muchísimas las variantes conocidas como

métodos de sutiraje que se han utilizado en las distintas cuencas y para las diferentes capas, por lo que es prácticamente imposible describirlos todos cuando, además, son en su mayoría sistemas particulares de difícil extrapolación.

El método ha demostrado claras ventajas frente a los métodos de explotación alternativos como el de testeros o el de rampones, de muchísima mayor peligrosidad.

Cuando la regularidad de la capa, tanto en potencia como en buzamiento y rumbo se ajusta a las necesidades del método, se obtienen muy buenos rendimientos, a la vez que se permite la mecanización de buena parte de los trabajos, lo que redunda en una disminución apreciable de los costes de explotación. Otra ventaja



**Equipo de mineros preparados para iniciar una operación de deshullamiento ayudando a conducir el carbón hacia los panzer.**

adicional, sobre todo frente al método de testeros en las capas potentes con problemas de derrabes o con hastiales falsos, es la mejora de la seguridad y de las condiciones de trabajo en los frentes, eliminando el problema de los derrabes al realizar las labores en capa prácticamente en horizontal.

El método se aplica fundamentalmente en la minería del carbón a capas de potencia media de más 2,5 m y hasta unos 8 m, y verticales ( $> 60^\circ$ ), con hastiales no competentes. En esencia, el método consiste en dividir la corrida de carbón a



explotar en paneles definidos geométricamente por la longitud de los subniveles en fondo de saco, la altura total y la altura entre niveles. Esto se consigue mediante el trazado de galerías o niveles en carbón prácticamente horizontales, con separación variable según las características de la capa, y sutirando en retirada, es decir, hacia el contrataque de acceso.

El sutiraje se realiza normalmente con explosivos y puede efectuarse en uno o más niveles, dependiendo de la línea de hundimiento deseada y de otros factores influyentes en la marcha normal según las características del yacimiento.

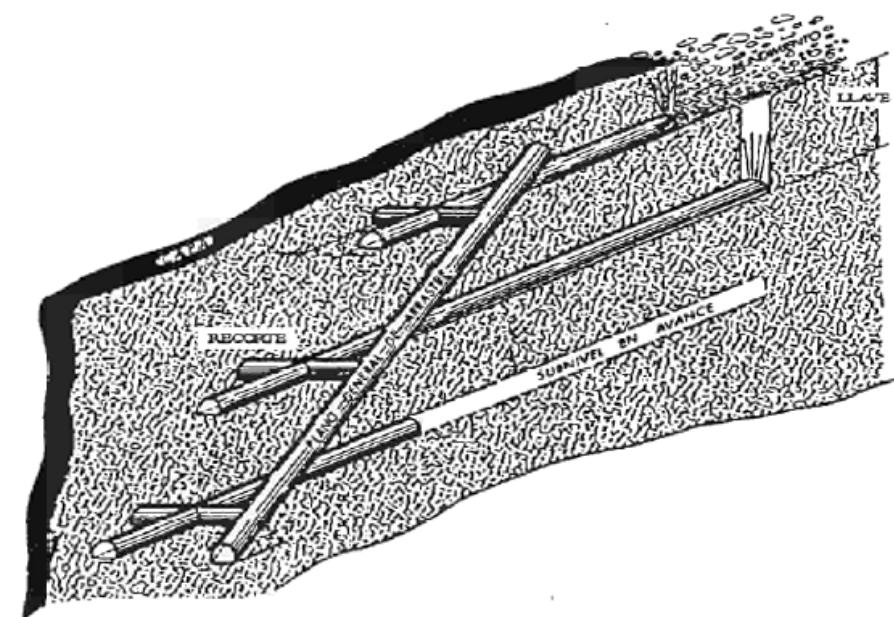
Para el acceso a los niveles se parte de contraataques o recortes, dados desde un plano inclinado en roca, trazado normalmente al muro, aunque también puede resultar favorable llevar por el techo de la capa esta estructura de acceso. En algunos casos se traza el plano sobre capa y los niveles parten, entonces, directamente del mismo.

Una vez concluida la apertura del subnivel, se procede a la explotación en retirada, sutirando el carbón de la llave (altura de carbón entre dos subniveles consecutivos).

El método de explotación por subniveles, tiene rasgos distintivos que lo diferencian de los antiguamente empleados (testeros, rozadora, etc.), resultando necesario hacer una serie de consideraciones en lo que se refiere a:

- Posibles fuegos endógenos.
- Desprendimientos de grisú-
- La aplicación del sutiraje, es decir, de los medios de trabajo disponibles para el avance de galerías, arranque, evacuación, sostenimiento, ventilación, etc., y por otra, de la fijación de las variables que afectan directamente al diseño del macizo, a la práctica de la recuperación del carbón hundido, a las longitudes de avance, y al diseño de los elementos de mecanización empleados.
- El control ambiental. Este último aspecto merece especial atención, porque de él depende la viabilidad del método. Sin un estricto control de la atmósfera, la Reglamentación vigente no permite la aplicación del arranque por subniveles.

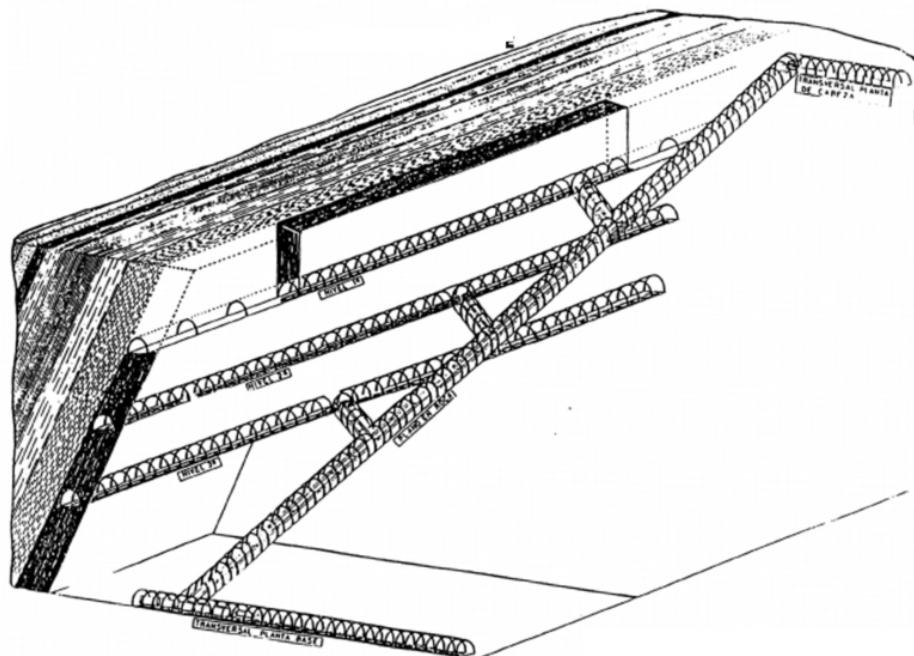
El método en si mismo, así como los trazados en roca y carbón correspondiente, están estrechamente condicionados por las características concretas de la capa a explotar y por la geometría general del panel.



Se divide el macizo en dos paneles, a los que se accede mediante sendos pozos en roca, inclinados a 37° y situados a unos 15 m de distancia por el lado del muro. Desde estos pozos primarios se corta la capa mediante contrataques igualmente inclinados o recortes horizontales, a partir de los cuales se inicia el trazado de niveles horizontales.

En primer lugar, se explotará el panel correspondiente al pozo primario situado más a la derecha, aunque la secuencia normal de explotación comienza con el avance a ambos lados del pozo en dos niveles sucesivos partiendo de la parte superior del panel. Concluidos éstos trabajos empiezan las labores de avance de un tercer nivel y, al mismo tiempo, las de deshullado o sutiraje del primer nivel.

Tanto el avance como el sutiraje se realizan a la vez en los dos frentes del nivel correspondiente. El sutiraje se efectúa en retroceso hacia el contrataque, de acceso y, una vez terminado, se tabicará, este para evitar posibles circulaciones de aire, así como también posibles incendios. A continuación, da comienzo un nuevo ciclo, y se reitera el proceso en sentido descendente hasta conseguir el completo deshullado del macizo.



En otra forma de organización no resulta necesario mantener un nivel de espera intermedio como en el caso anterior. Para ello una vez avanzados los dos primeros subniveles, se sutirará en ambos simultáneamente con los frentes convenientemente distanciados (unos 30 m), a fin de evitar el efecto de

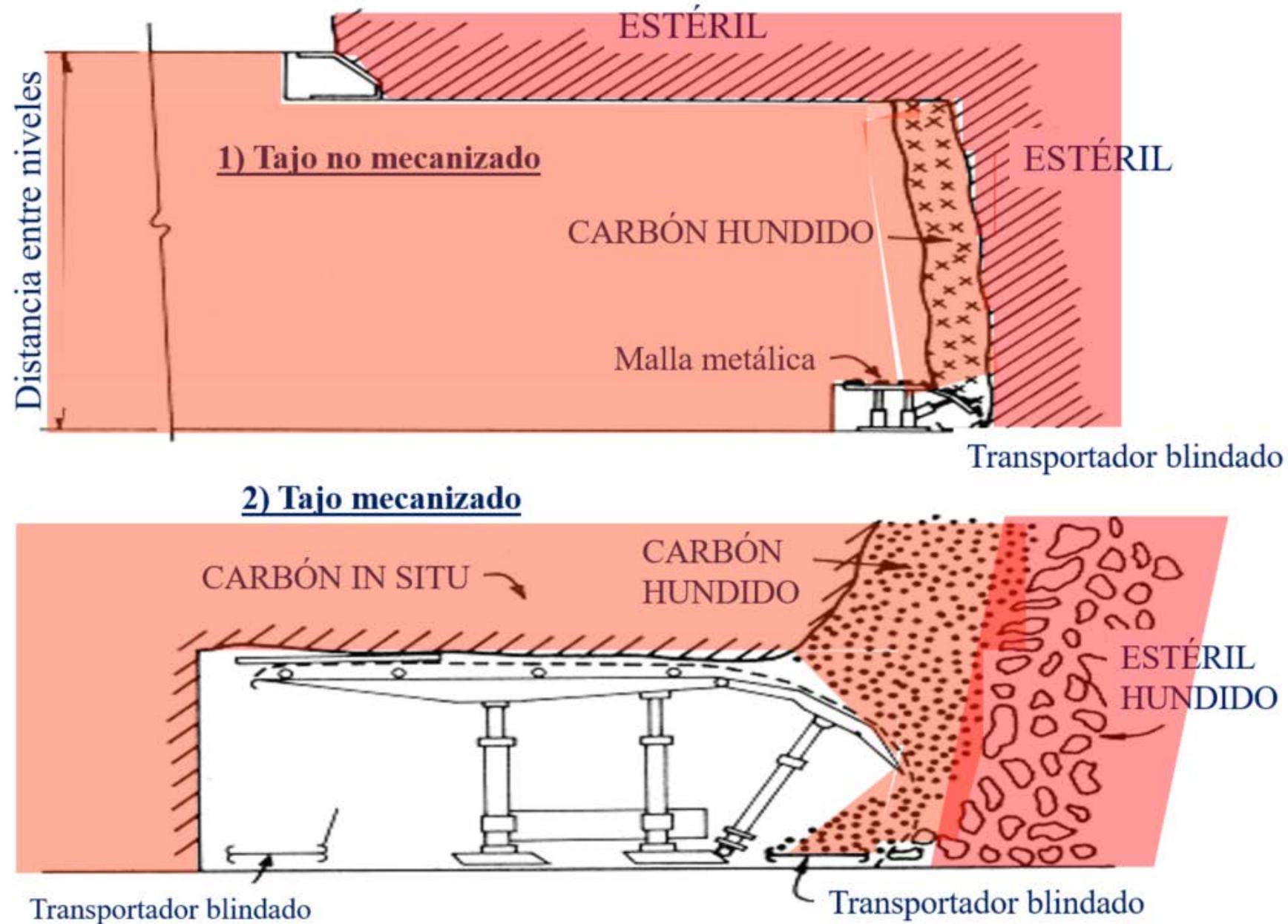
hundimiento. Mientras tanto se avanzará en la otra dirección en dos frentes, distanciados también entre sí por motivos de seguridad.

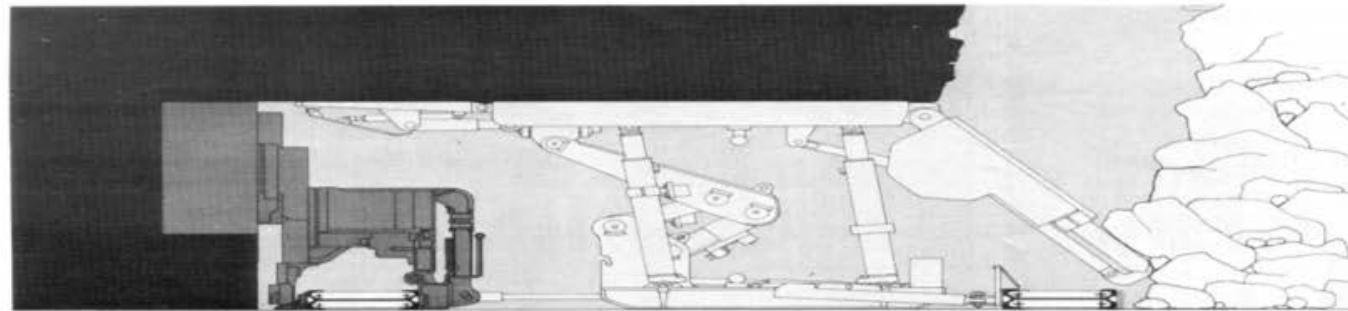
El transporte de carbón todo-uno procedente tanto de la preparación de los niveles como de los frentes en sutiraje, se realiza con la ayuda de transportadores blindados ligeros de 350 mm de ancho y cadena central. Estos elementos vierten el todo-uno al chapeo de los contraataques, o a los transportadores colocados en los recortes, alimentando el chapeo general del pozo primario en roca. El carbón es conducido así hasta la planta de base de la explotación donde, por el sistema de transporte general de que se disponga, se evacua la producción.

Las peculiaridades del sistema de explotación con hundimiento, los altos avances y producciones que se consiguen y la profundidad creciente de las explotaciones (que origina unas concentraciones de metano en capa cada vez mayores), hacen que en este método concurren a la vez los siguientes factores:

- a) Las explotaciones están con frecuencia en fondo de saco y por tanto han de ser equipados con sistemas de ventilación secundaria.
- b) Los caudales de grisú producidos pueden llegar a ser altos, especialmente en relación con lo que es habitual en fondos de saco.
- c) El régimen de desprendimiento del grisú es más irregular que con los métodos de arranque tradicionales, sin hundimiento de carbón.

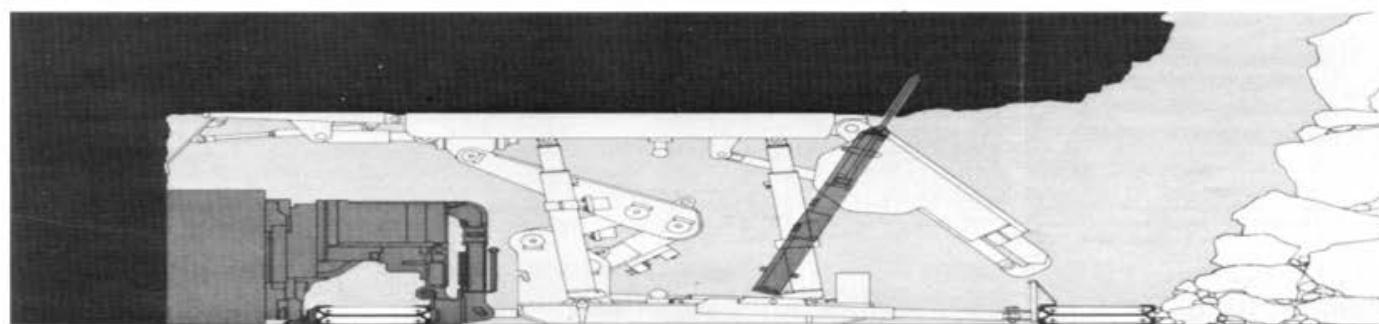
Por todo ello, la ventilación adecuada y el control del grisú son aspectos prioritarios en la planificación y explotación de talleres por sutiraje debiendo ser ambos detenidamente considerados.



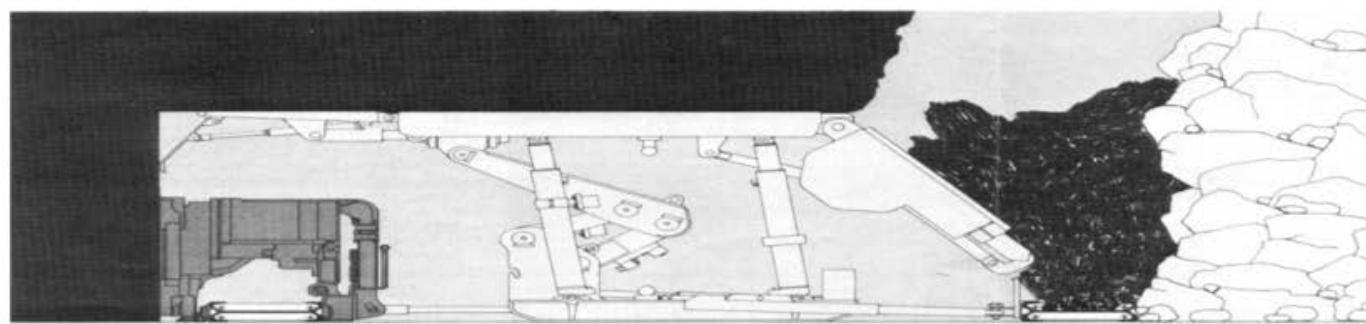


**1) Rozado**

**TAJO  
MECANIZADO  
DE SUTIRAJE**



**2) Avance de la entibación y hundimiento**



**3) Avance de la rozadora y sutiraje**



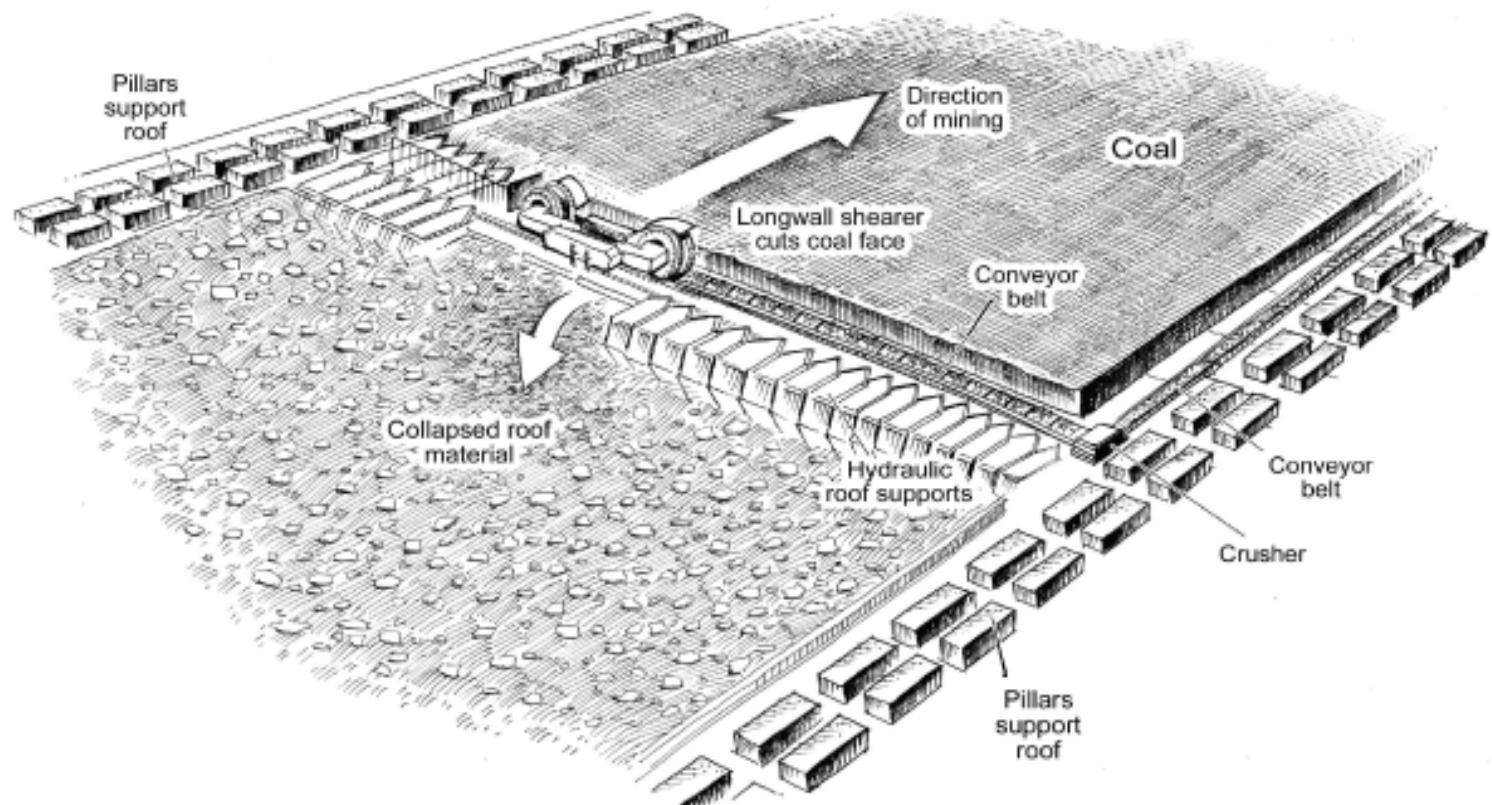
## 8. METODO DE Tajo Largo (LONGWALL MINING)

### 8.1. CARÁCTERISTICAS GENERALES

El método de explotación por Tajo Largo se utiliza en el caso de depósitos minerales de capas delgadas, espesor uniforme y gran extensión horizontal. Es aplicable tanto para roca dura como para roca blanda ya que el área de trabajo a lo largo de la superficie de extracción se puede soportar artificialmente mientras las formaciones situadas a techo tienden a colapsar por hundimiento. Los más conocidos son los de carbón, pero éste método también se aplica a capas de potasas y a conglomerados auríferos extraídos por las compañías mineras sudafricanas en el reef.

Aplicaciones:

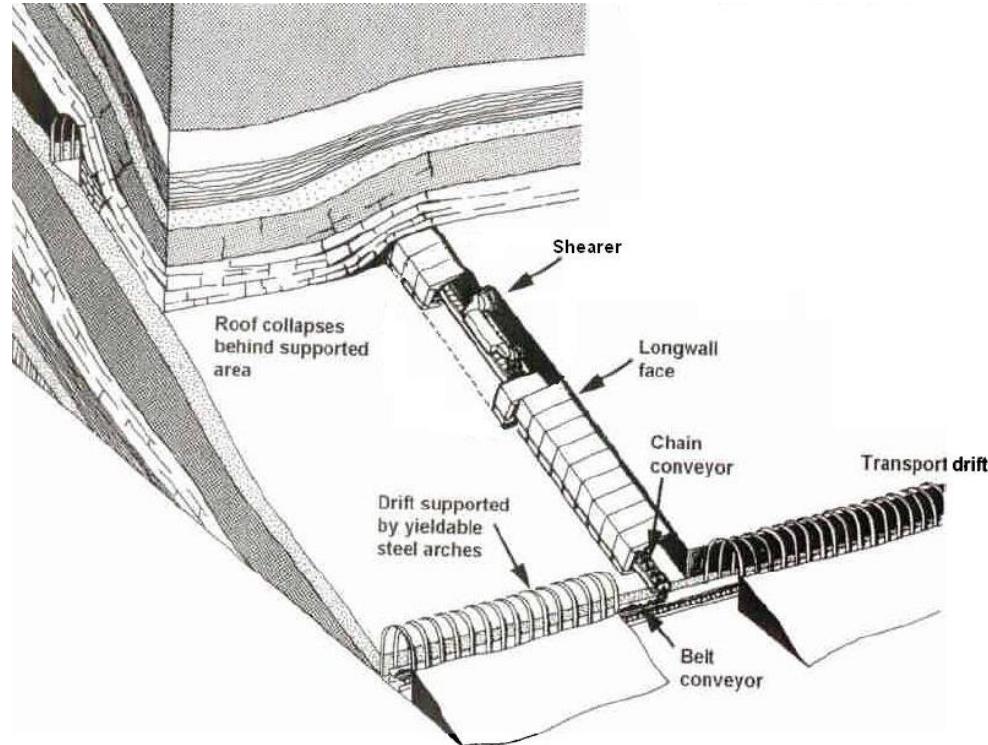
- Yacimientos horizontales/inclinados ( $<45^\circ$ ) de minerales blandos (mayores buzamientos: con relleno en lugar de hundimiento)
- Yacimientos horizontales/semithorizontales ( $<30^\circ$ ) de minerales duros.
- Techo inmediato de dureza baja/moderada que rompa y hunda. Muro firme (para soporte de



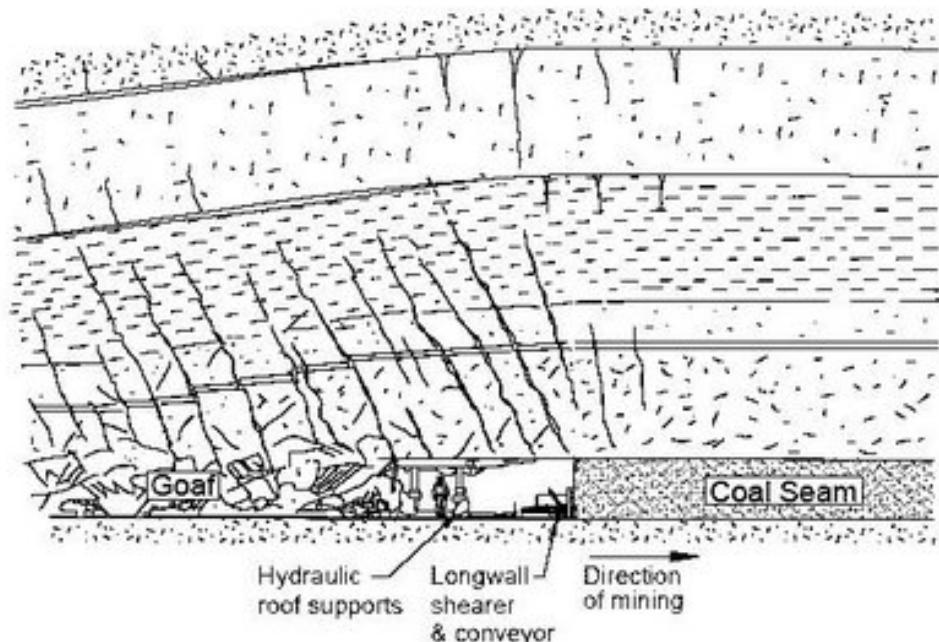


pilas).

- Depósitos tabulares de gran extensión y potencia pequeña (0'8 - 5m) y uniforme.
- Profundidad: < 1000 m (carbón)



En éste método, la extracción de mineral se hace a lo largo de un frente recto que tiene una gran extensión longitudinal. La zona excavada cerca del frente de extracción se mantiene abierta para proporcionar espacio para el personal y el equipo de extracción. Se puede permitir que el techo se hunda a cierta distancia por detrás del frente de trabajo. Los talleres en explotación se dividen en paneles de entre 500 y 3000 m de longitud y de entre 100 y 300 m de anchura. Los tajos se entibian con pilas y escudos hidráulicos automarchantes en una longitud igual a la anchura del panel, e altura igual a la potencia y con un fondo de entre 2'5 y 4 m. Estos tajos desembocan en las galerías generales de transporte.



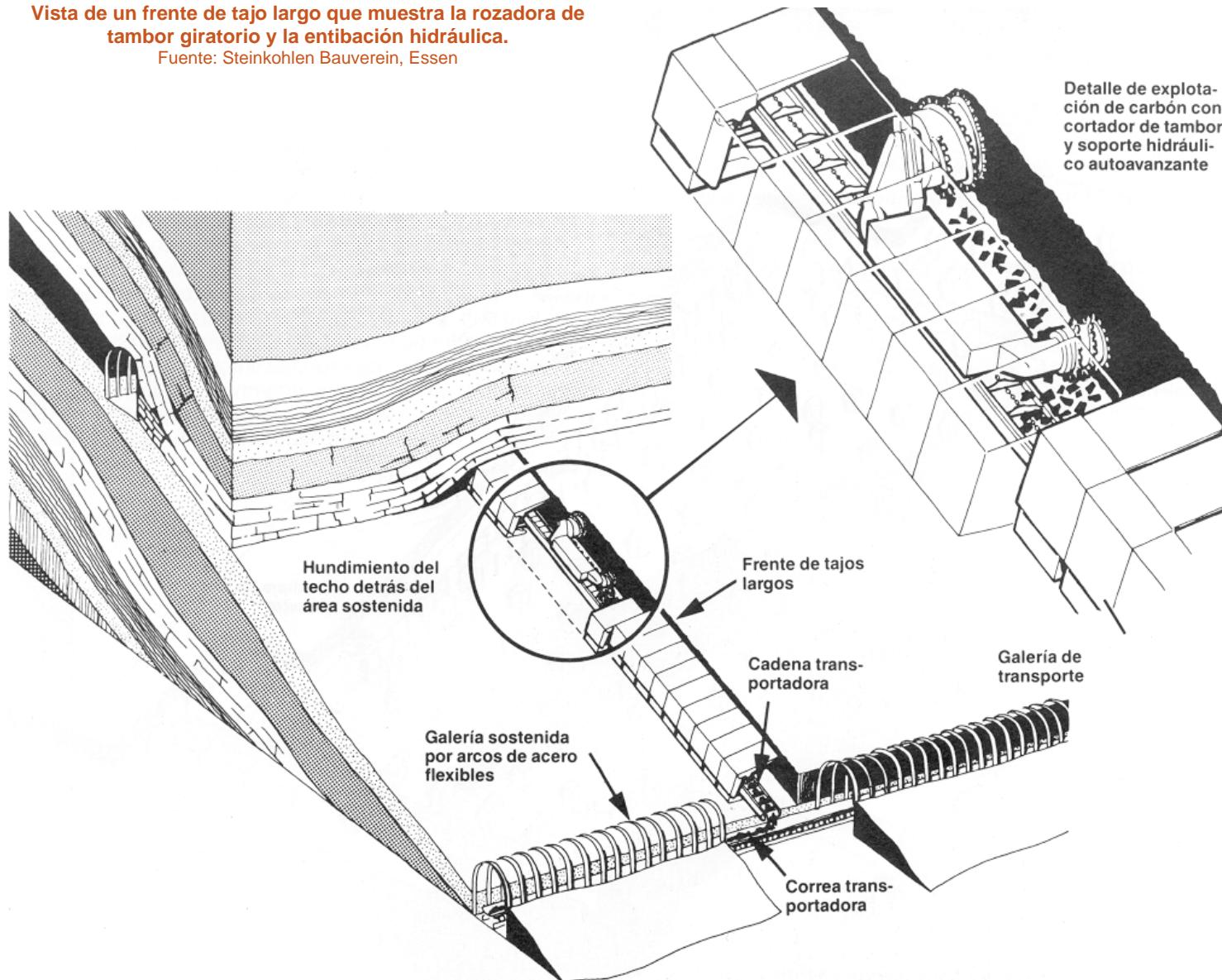
Según dureza del mineral el arranque es mecánico, con rozadora (750 mm/pasada) o cepillo (75 mm/pasada), o con explosivo. A medida que avanza el tajo se avanza la entibación y se deja hundir el techo por detrás. Si no hunde de forma natural se puede ayudar con agua a presión, aire comprimido o explosivo.

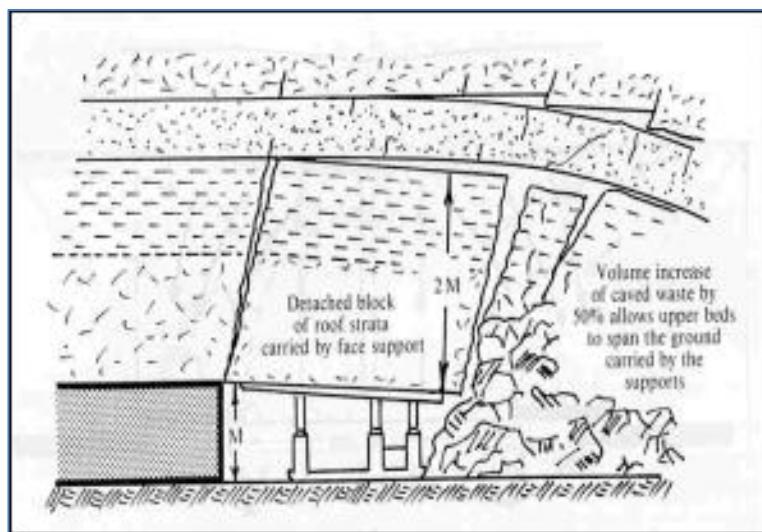
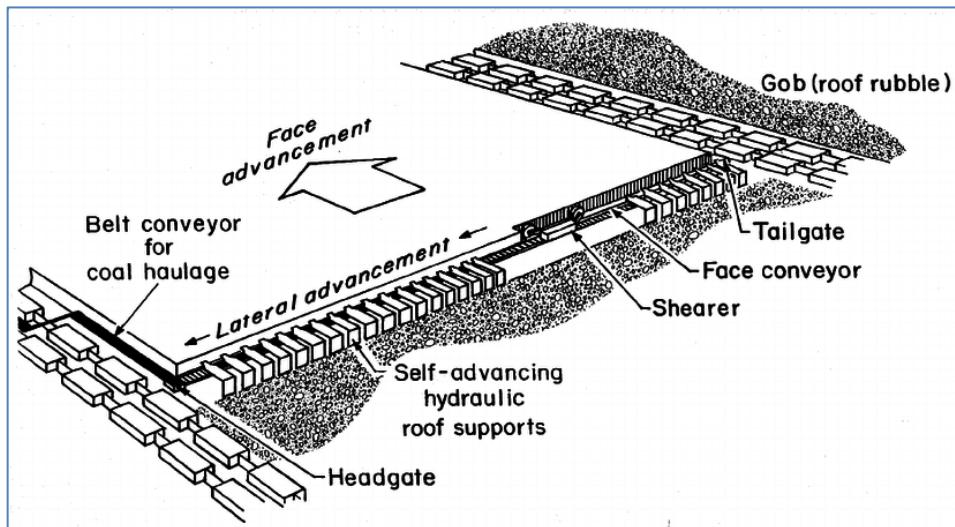
El desarrollo y preparación de este tipo de explotaciones implica la excavación de una red de galerías generales de transporte para el acceso a las áreas de producción y el transporte de mineral a las estaciones de embarque del pozo de extracción. En la medida en que el yacimiento se extiende ocupando un área grande, las galerías de transporte se acompañan con excavaciones paralelas para ventilar las zonas de trabajo de la mina. Las galerías de transporte generalmente se organizan en esquemas regulares y se excavan en el propio depósito mineral. La distancia entre dos galerías de transporte adyacentes determina la longitud de la cara activa del tajo largo. Todas las galerías longitudinales de acceso y transporte son excavadas en mineral.

Vista de un frente de tajo largo que muestra la rozadora de tambor giratorio y la entibación hidráulica.

Fuente: Steinkohlen Bauverein, Essen

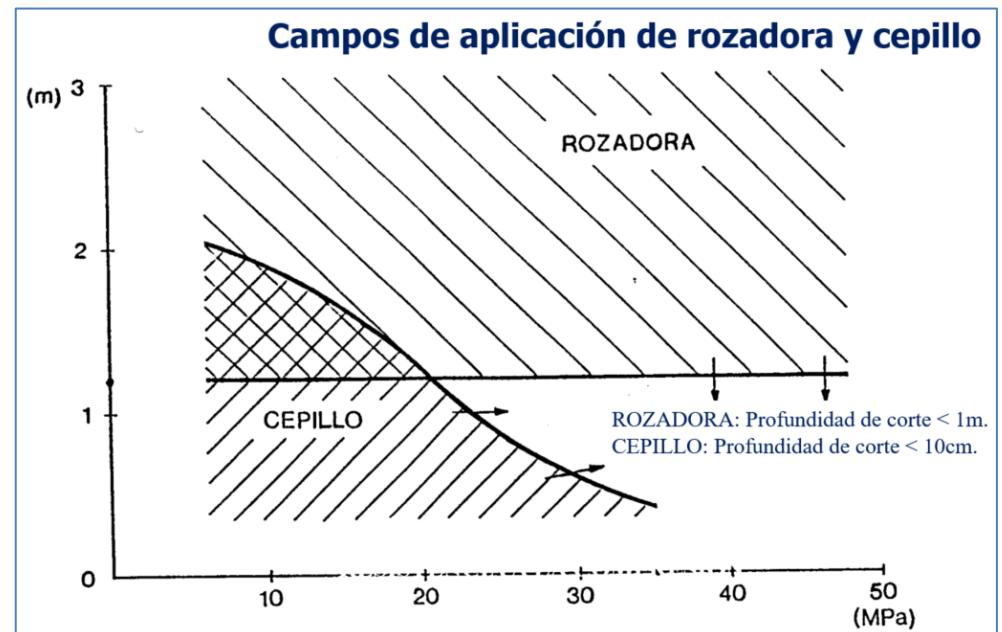
Detalle de explota-  
ción de carbón con  
cortador de tambor  
y soporte hidráuli-  
co autoavanzante





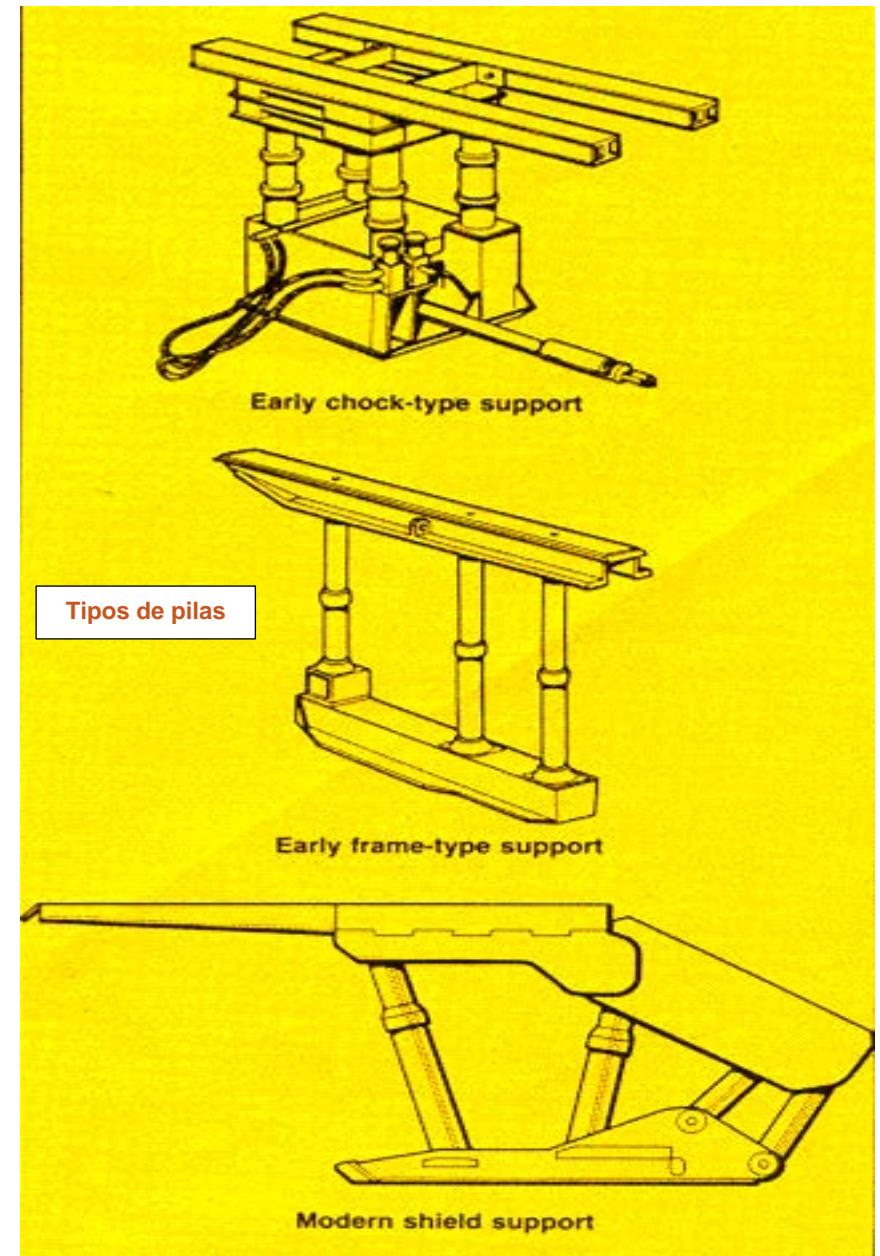
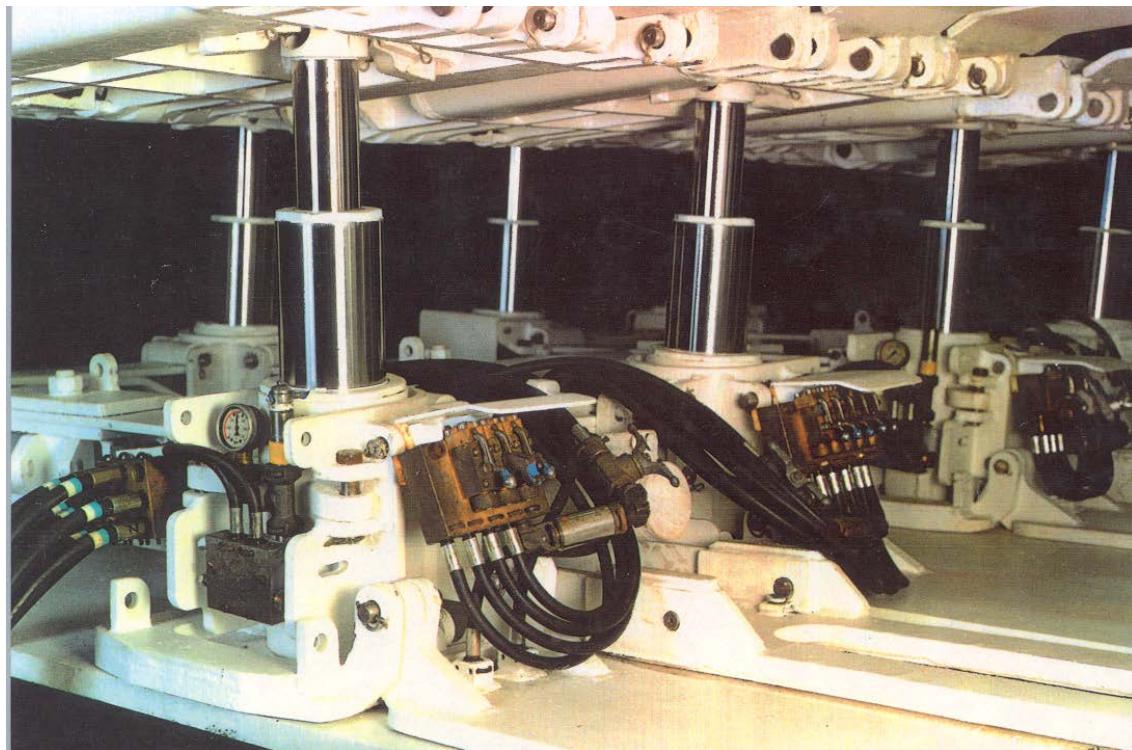
El método de tajo largo es muy común en la minería del carbón, la trona (carbonato de sodio) y la potasa, siendo un método casi totalmente mecanizable. Al tratarse de minerales blandos, no requieren perforación y voladura y pueden arrancarse mecánicamente mediante cepillos o rozadoras. El mineral arrancado cae sobre un transportador blindado de cadenas que lo lleva hasta la galería general de transporte donde se vierte a una banda transportadora que discurre a lo largo de la misma y que lo lleva hasta el sistema de extracción de la mina.

Las cintas transportadoras son la base del sistema de transporte de material por su capacidad de absorber el flujo casi continuo de mineral arrancado desde las áreas de producción. El techo a lo largo de la cara del muro largo está soportado y el área de trabajo completamente protegida por un sistema de escudos operados hidráulicamente y que van avanzando a medida que avanza la extracción.





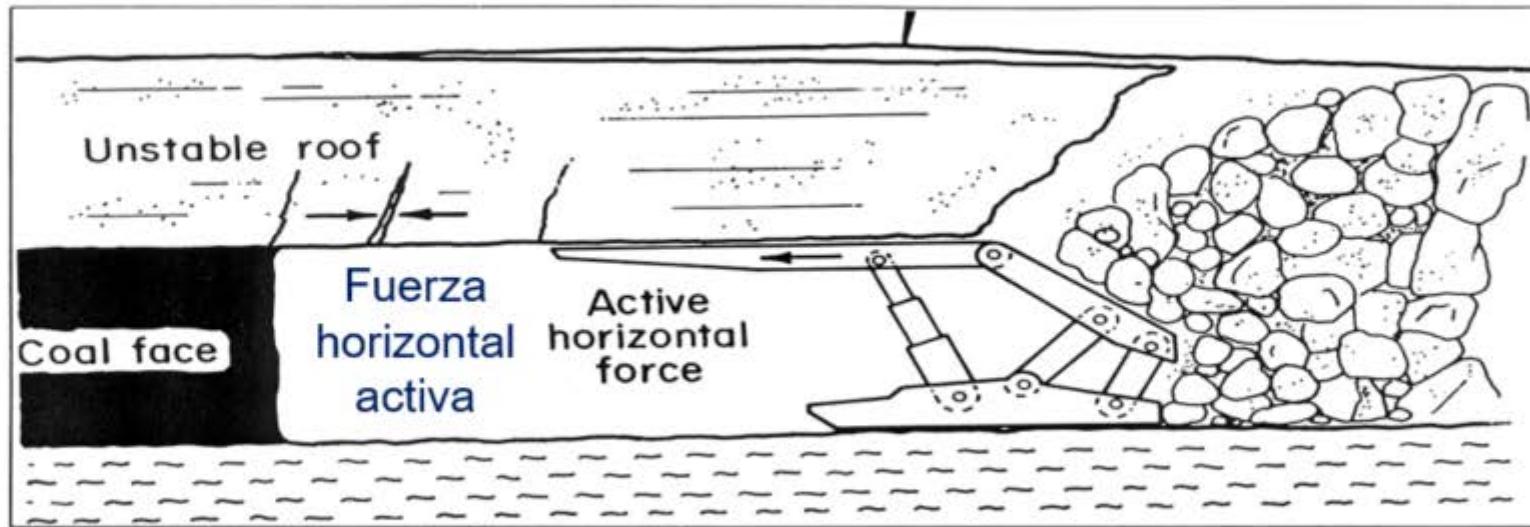
### 8.1.1. TIPOS DE PILAS Y ESCUDOS





## ESCUDO DE 2 CILINDROS

Techo  
inestable  
  
CARBÓN

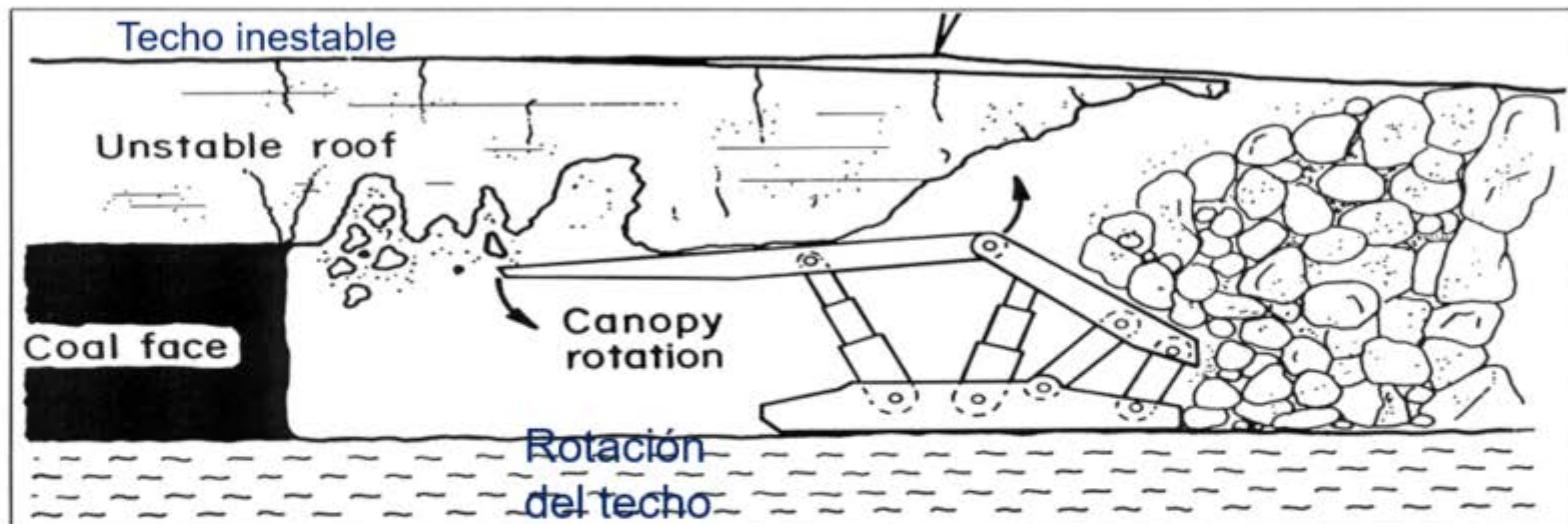


- Genera una fuerza horizontal que ayuda a la estabilidad del frente

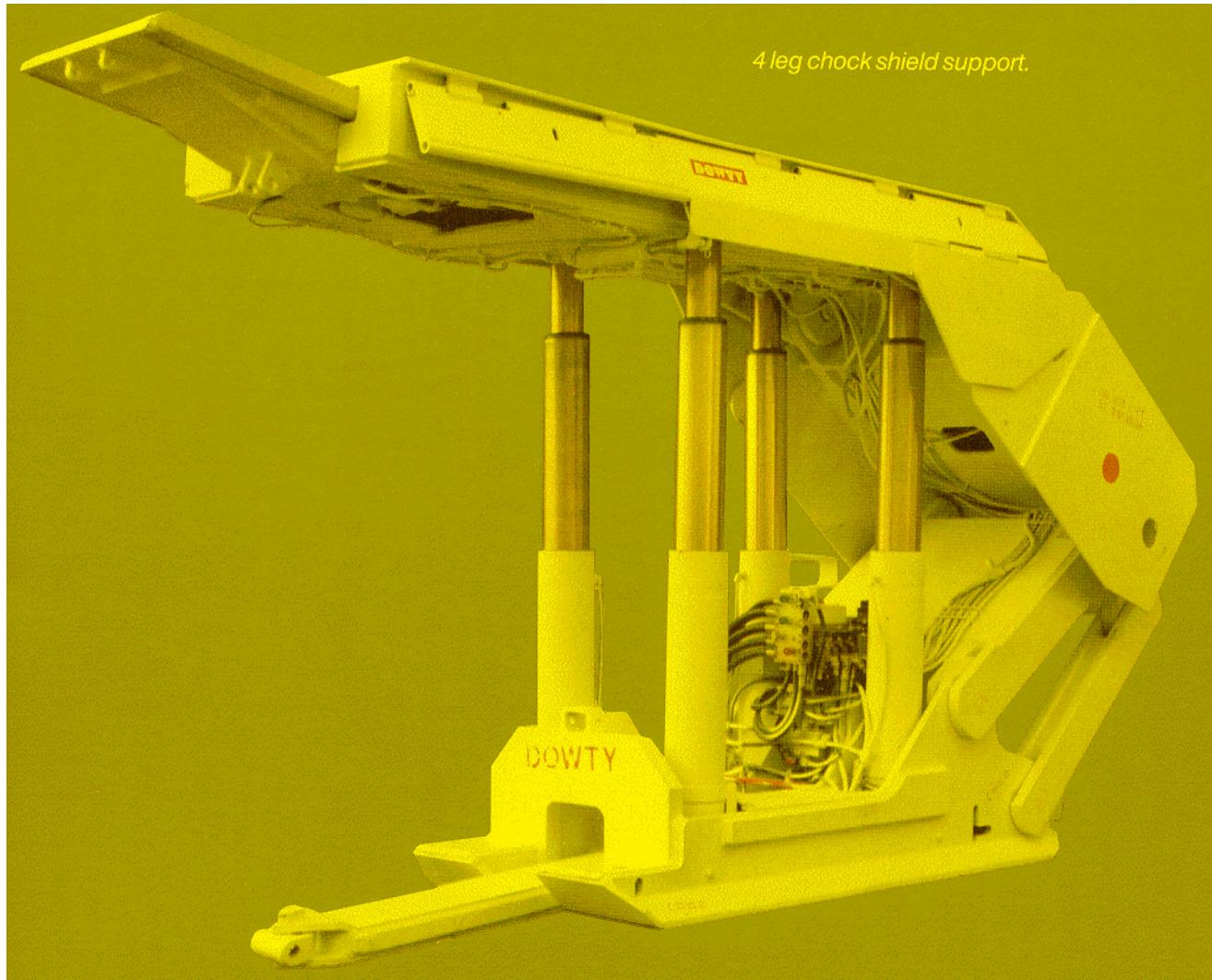


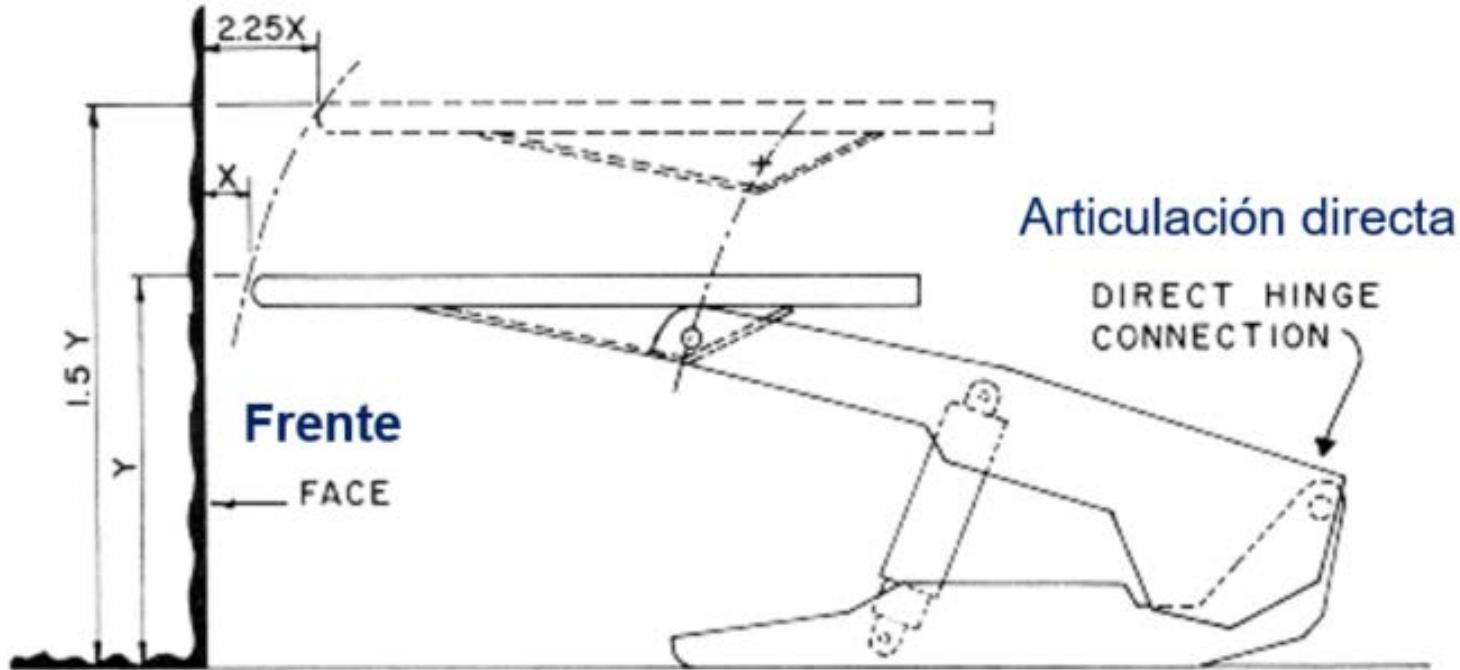
## ESCUDO DE 4 CILINDROS

CARBÓN



- El efecto de sostenimiento por su parte posterior llega hasta una zona más alejada del frente → techos que hunden con dificultad y quedan en voladizo.
- Tendencia a girar si el techo es irregular → inestabilidad de la pila.
- Reparto más uniforme de la presión sobre techo y suelo → facilita el desplazamiento de la pila en suelos blandos.

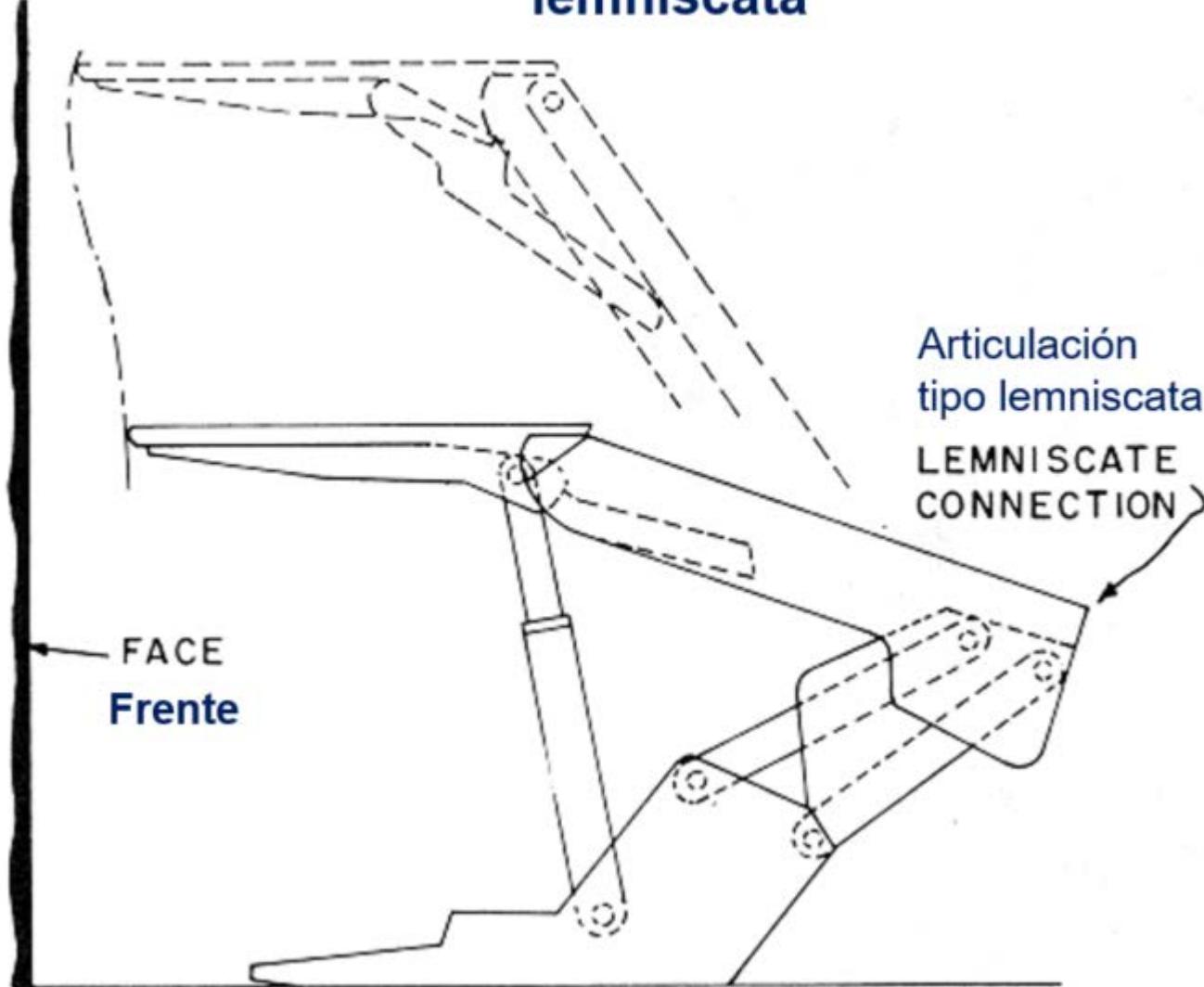


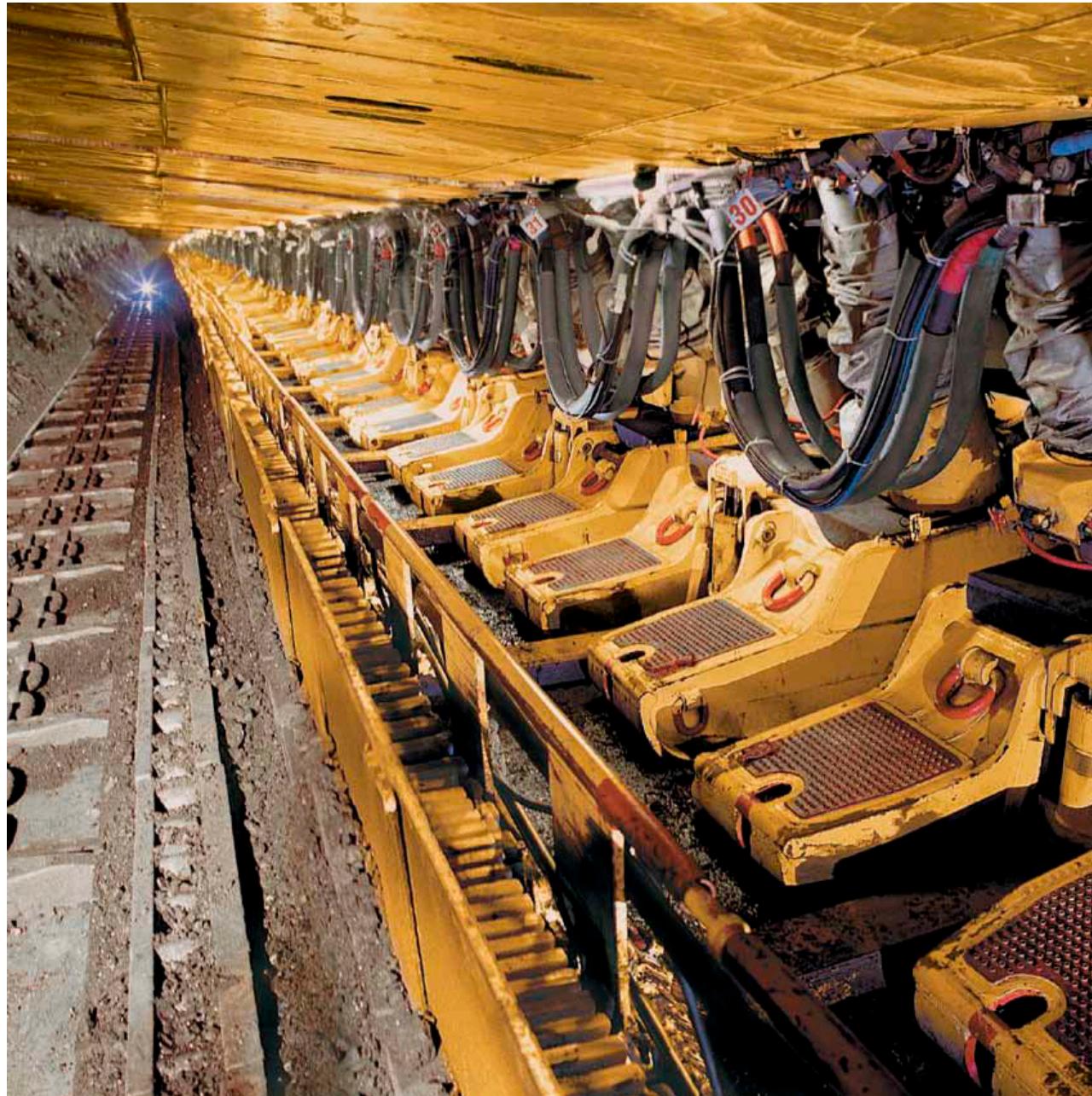


## Pila escudo de articulación directa



## Pila escudo de articulación tipo lemniscata



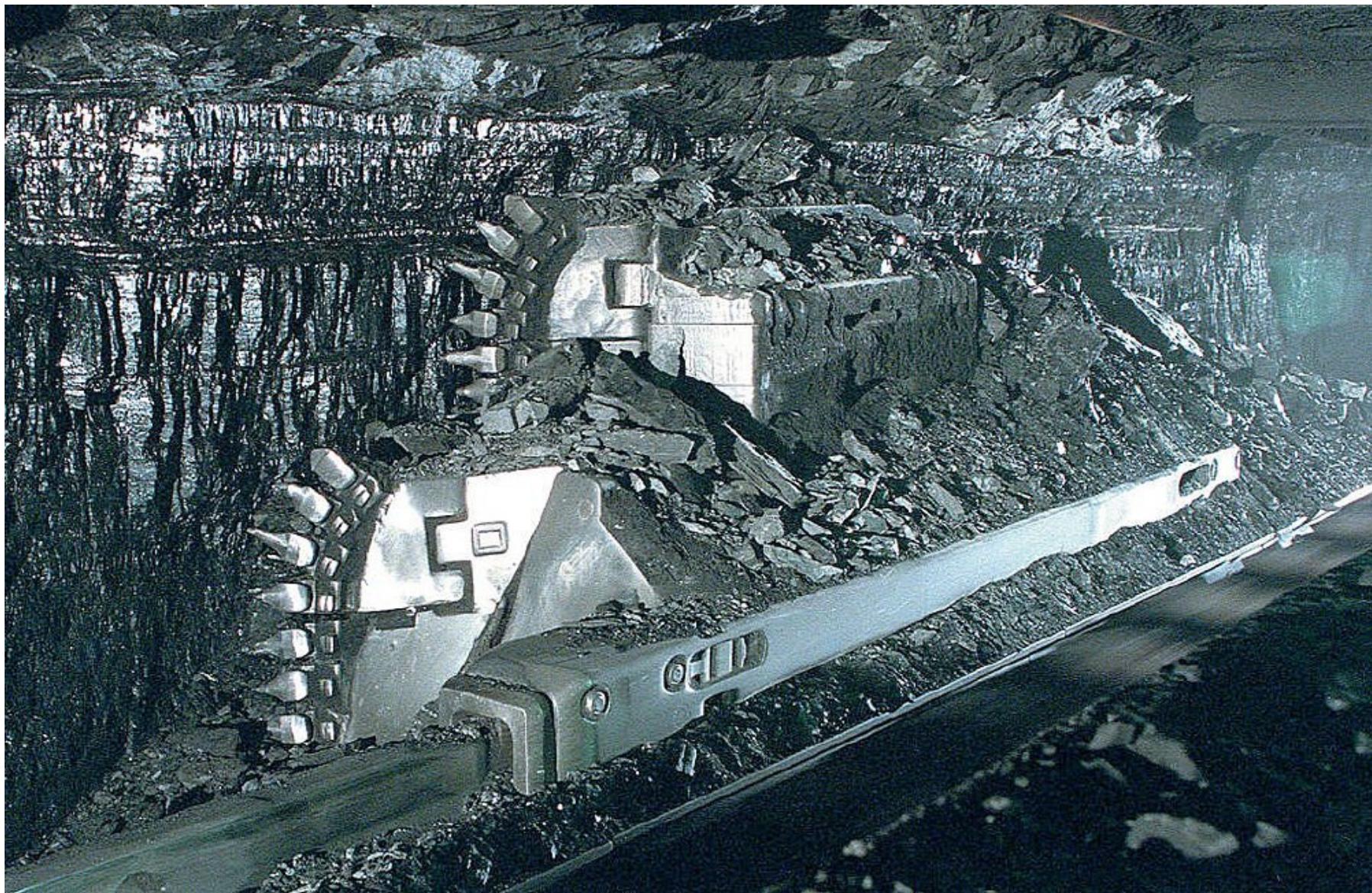




### 8.1.2. CEPILLO







### 8.2.1. ROZADORA





## Rozadora de tajo largo



- Un tambor.
- Dos tambores de altura regulable para distintas potencias de capa
- Desplazamiento por piñón y cadena o piñón y cremallera







### **8.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE Tajo Largo a Minerales Duros**

El método de tajo largo también se utiliza para explotar las cuarcitas auríferas del reef, que son duros y difíciles de extraer. Las minas de oro sudafricanas desarrollaron sus propias técnicas basadas en uso intensivo de mano de obra y el uso de perforadoras neumáticas manuales para facilitar con voladuras el arranque con tajo largo.

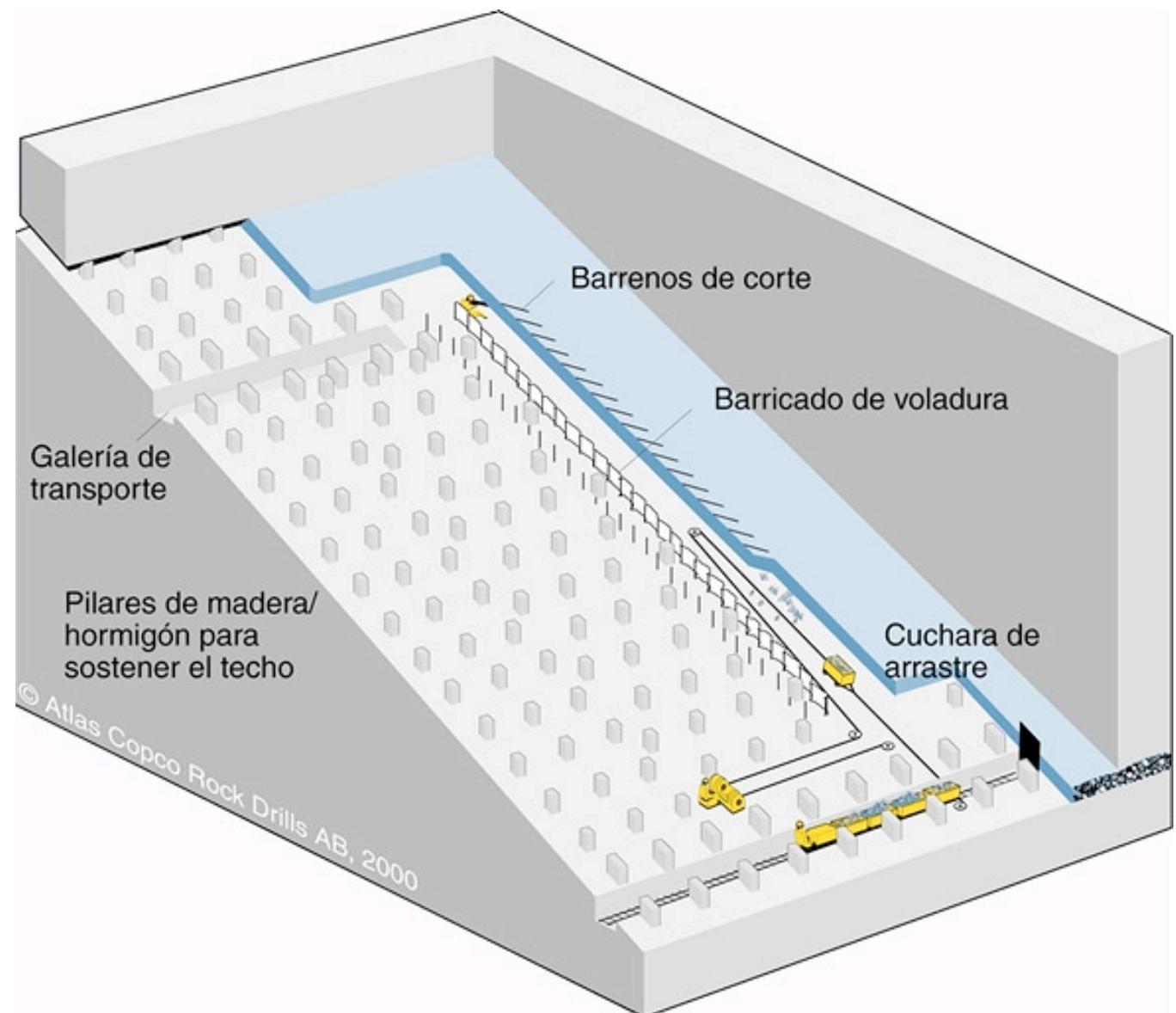
En estos casos, lejos de ser un método continuo, la carga se hacía con scraper o con LHD, mientras que el transporte a lo largo de las galerías generales, se hacía con ferrocarril, tal y como se representa en la figura.

En estas explotaciones, situadas a gran profundidad, la potencia de la capa podías ser de tan solo 1 m y a veces la anchura no llegaba a eso, pero debe haber espacio para que los mineros puedan arrastrarse hasta los frentes de trabajo. A diferencia del caso del carbón, para el sostenimiento del techo se utilizan pilares de madera o de hormigón.

Modernamente se han desarrollado rozadoras para roca dura como las que se muestran en la página siguiente. El sistema Cat Rock Straight System es un sistema de tajo largo totalmente mecanizado diseñado para la extracción continua de depósitos planos y tabulares y formaciones tipo reef de minerales de roca dura. El sistema combina el uso de un minador de roca dura de tecnología Caterpillar, que está específicamente diseñada para la extracción de depósitos de roca dura en capa.

Un transportador de cadena de roca dura y de bajo perfil y un soporte hidráulico de techo de roca dura completan el sistema, que ofrece corte, carga y acarreo de forma simultánea, controlados de forma automatizada y a control remoto desde una cabina de control.

El sistema de minería está diseñado para reemplazar eficientemente las operaciones convencionales de perforación y voladura en capas de bajo espesor (desde



1,3 a 2,0 metros) y en posición tumbada, como es el caso de algunos tipos de depósitos de platino, cobre y oro. El sistema puede seguir la capa y maximizar el mineral extraído mientras se mantiene la dilución al mínimo. No requiere la

utilización de explosivos como sucede en el sistema convencional y las necesidades de personal son muy inferiores.







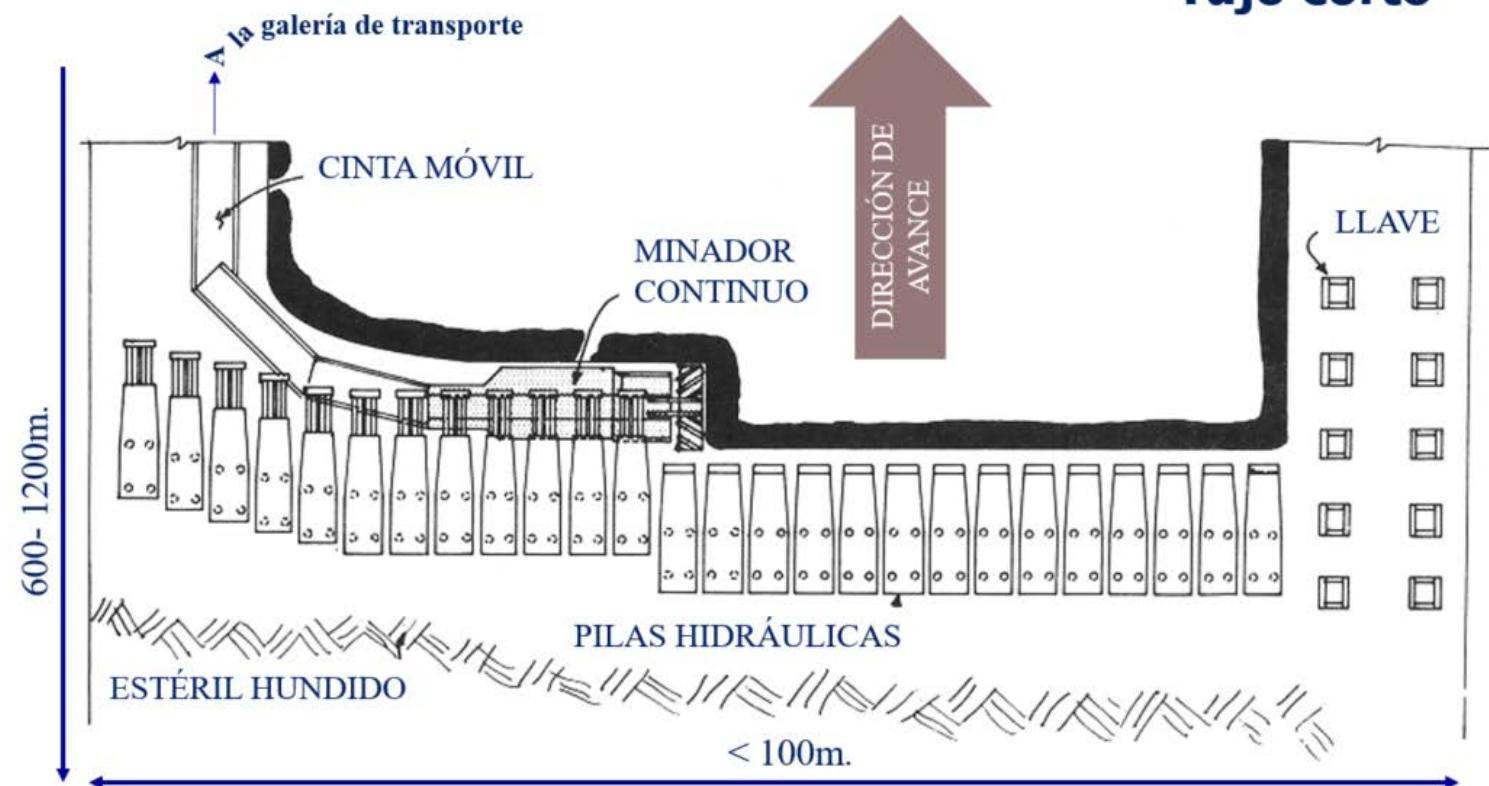
## 8.4. MÉTODO DE Tajo Corto (Shortwall Mining)

Es una variante del método de tajo largo en la que se sustituye la rozadura y/o el cepillo por un minador y, consecuentemente, también se sustituye el transportador blindado de cadenas por tren de cintas transportadoras móviles que siguen al minador o, en su caso por un shuttle-car (camión lanzadera).

Esta variante se utiliza en tajos mucho más pequeños (Tajo < 100 m) y, consecuentemente, solo requiere entre un tercio y una cuarta parte de la inversión en el "Tajo largo".

Presenta la ventaja de tener un mucho mejor sistema de ventilación y control de polvo.

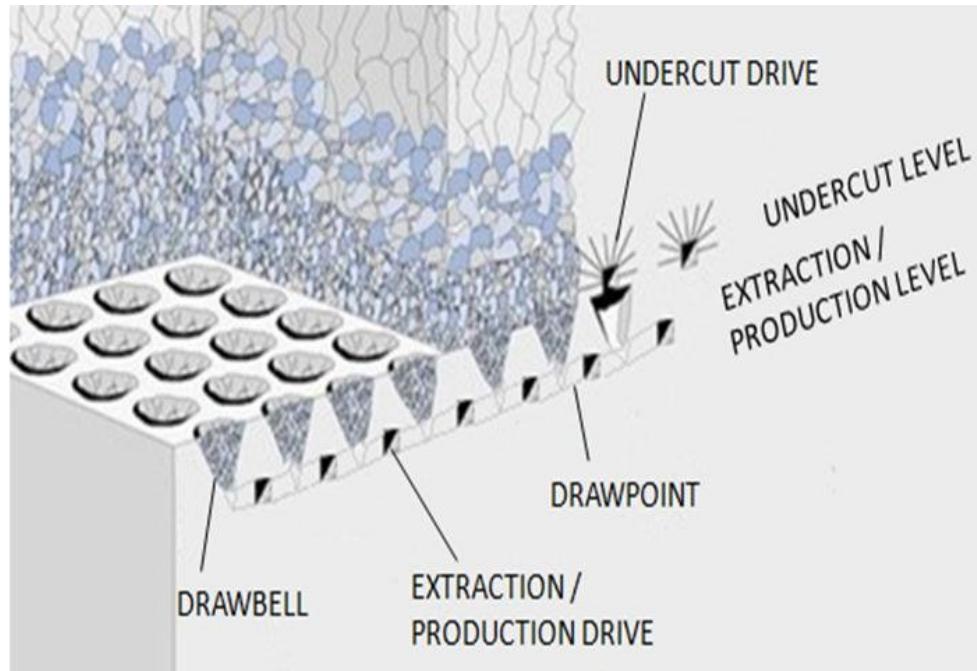
### Tajo corto





## 9. MÉTODO DE HUNDIMIENTO POR BLOQUES (BLOCK CAVING)

El hundimiento por bloques es una técnica de producción a gran escala en la que la gravedad se usa junto con las tensiones internas de la roca para fracturar y romper la masa de roca en fragmentos manejables por la maquinaria. El término "Bloque" se refiere al diseño minero en el que el cuerpo mineral se divide en grandes secciones de varios miles de metros cuadrados. Es una técnica de producción a gran escala que es aplicable a yacimientos masivos de baja ley con las siguientes características:



- Yacimientos masivos o tabulares verticales o semiverticales ( $> 60^\circ$ ).
- Grandes dimensiones tanto en vertical como en horizontal (potencia) con longitudes superiores a 100 m, que asegure el hundimiento.
- Mineral débil, fracturado, no muy competente, colapsable. Debe ser homogéneo y diseminado.
- Mineral no combustible ni oxidable. Posible baja ley, pero uniforme (método no selectivo).
- Estéril fracturado que colapse sin finos y diferenciado del mineral, lo que implica menor dilución (10 - 25 % inevitable).
- Profundidad: 600 – 1.200 m.
- Que la superficie sea un terreno de nulo valor que pueda ser sometida a subsidencia.

Estas condiciones, bastante únicas por otro lado, limitan el hundimiento por bloques a tipos muy particulares de yacimientos. Al observar los casos en el mundo en los que se ha aplicado ésta técnica, se encuentra que ha sido utilizada para extraer mineral de hierro, cobre de baja ley, depósitos de molibdeno y chimeneas de kimberlita con diamante, etc.

Existen dos variantes:

**Block caving:** Método de explotación masivo en el que un bloque de mineral del cuerpo mineralizado se corta por su base y, a partir de la extracción, se produce la propagación del hundimiento.

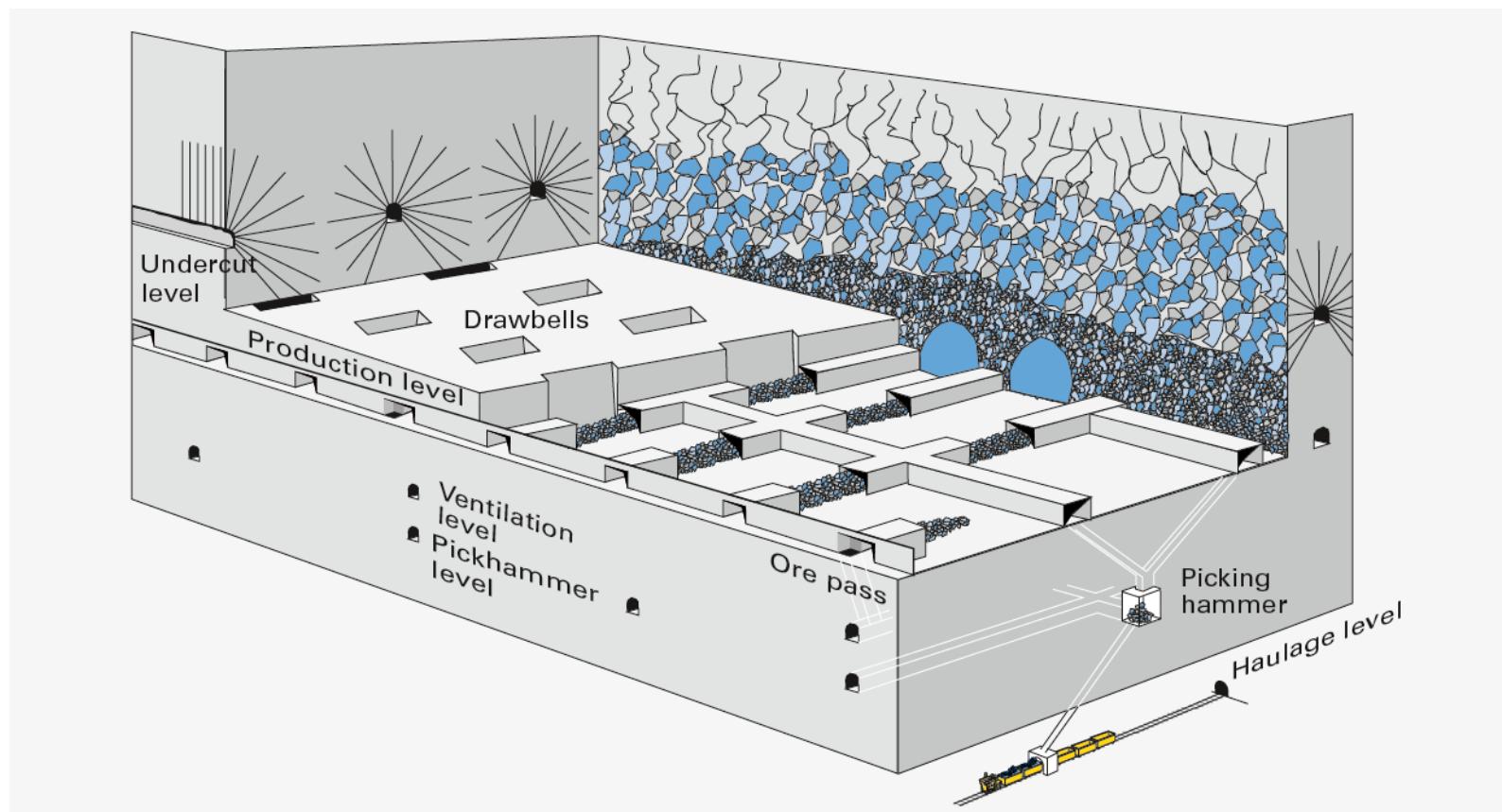
**Panel caving:** Es una variante en la que bloques consecutivos se hunden de forma continua para evitar la dilución lateral y los esfuerzos de relajación

producidos en el método convencional de block caving.

El hundimiento de la masa rocosa se induce al socavar el bloque por debajo. Este corte de roca inmediatamente subyacente al bloque se consigue por voladura, de tal manera que se consigue que pierda su capacidad de soportar la roca que hay inmediatamente por encima y que ésta empiece a ser objeto de subsidencia, de fracturación y de propagación de dicha fracturación como consecuencia de las fuerzas del peso, que son del orden de millones de toneladas, y que actúan sobre el bloque. La presión continua rompe la roca en pedazos cada vez más pequeños que pasan a través de los puntos de extracción donde el mineral es recogido por medio de equipos LHD.

Las características generales de éste método incluyen:

- Altos ritmos y capacidades de producción: 12.000 – 48.000 t/día
- Bajos costes de operación.
- Alta recuperación (90 - 100 %).
- Actualmente en proceso de total automatización.
- Mucha preparación y costosa. Requiere continuo mantenimiento
- Método poco flexible y aplicable a recursos de baja ley.
- Bajo grado de selectividad.
- La explotación progresiva en sentido descendente.
- Bloques de 50 – 250 m. de altura, que se hunden al abrir un corte inferior.
- Para reducir la dilución, la carga se hace de forma progresiva y controlada hasta detectar la aparición del estéril hundido.





- Riesgos de atranques en parrillas y coladeros.
- Riesgo de estallidos de roca.
- Subsidencia

Las aberturas debajo del bloque están sujetas a altas tensiones internas. Las galerías y otras aperturas excavadas en una mina de hundimiento por bloques se excavan con secciones transversales mínimas. Se requieren revestimientos pesados de hormigón y una alta densidad de bulonado para asegurar la integridad de la mina y de los puntos de extracción de mineral.

Después de completar el corte inferior, la masa de roca suprayacente comienza a fracturarse. Los bloques fracturados son captados por los encauzadores y dirigidos hacia los pozos de extracción. El objetivo del diseño es mantener un flujo constante de material desde cada bloque. Se mantiene un registro del volumen extraído de cada punto de extracción individual. Teóricamente, no se requieren perforaciones ni voladuras para la producción de mineral, pero en la práctica, a menudo es necesario ayudar a la fractura de la masa de roca mediante barrenos largos (Diámetro > 51mm) con esquemas de perforación ampliamente espaciados. Los bolos y bloques grandes, que deben romperse por taqueo, muy frecuentemente interrumpen el flujo y provocan atascos que son difíciles y peligrosos de abordar.

Las labores de preparación que se requieren para éste método son muy costosas y requieren una intensa labor de excavación de galerías por debajo del bloque. La única ventaja es que toda esta labor debajo del bloque se hace prácticamente en su totalidad en mineral.

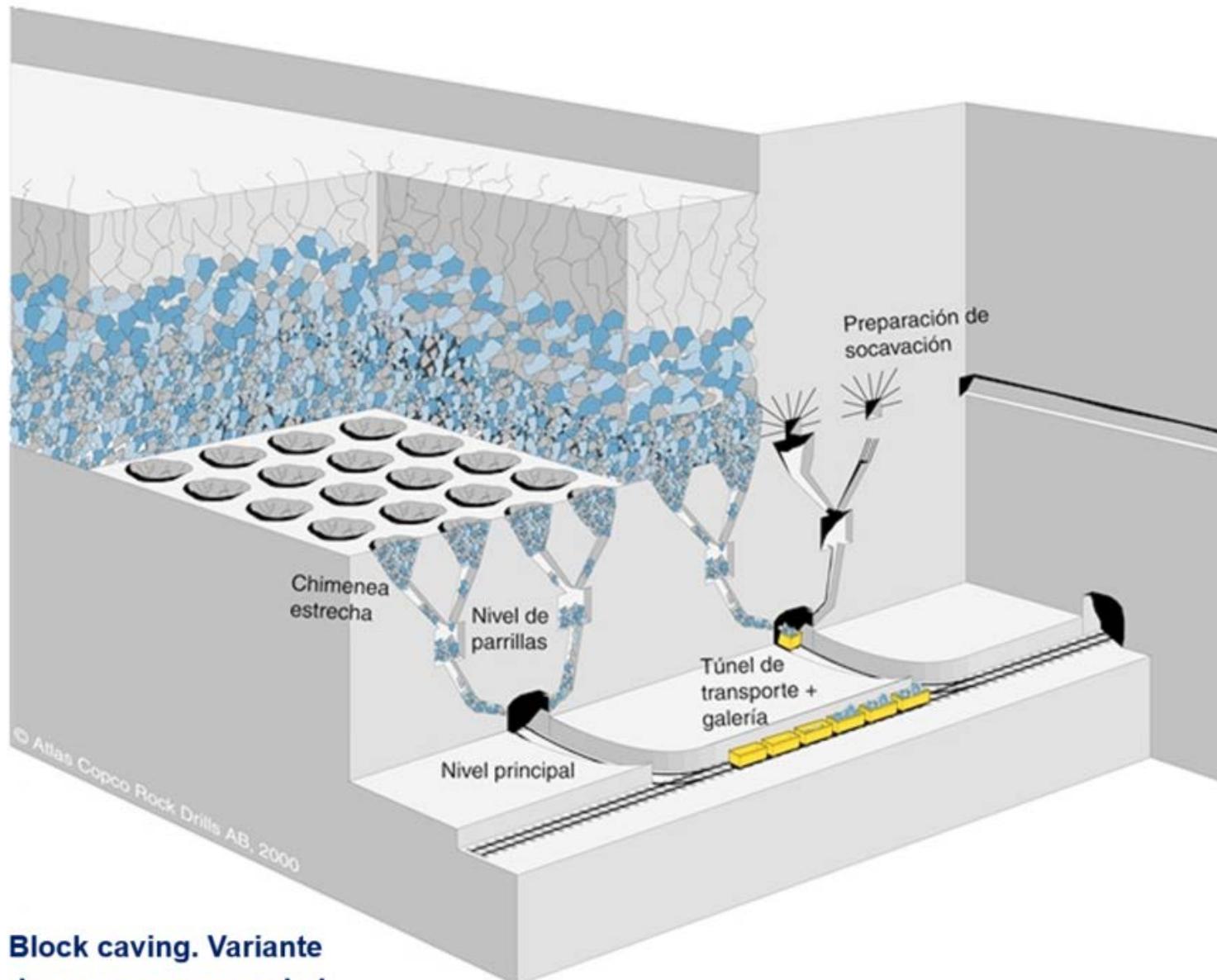
- **En el nivel de hundimiento:** Galerías para apertura de un corte inferior de 3-15 m. de altura mediante tiros en abanico en retirada.
- **En el nivel de producción:** Galerías comunicadas con las anteriores por pozos tolva o coladeros. Control de fragmentación y creación del sistema y puntos de carga según reducción del tamaño de fragmentos. El diseño dependerá del sistema de extracción y transporte:
  - Gravedad (sistema de parrillas)
  - Scraper
  - LHD
- **En el nivel de transporte:** Galerías perpendiculares a las anteriores a una cota inferior que permite acopiar mineral en los coladeros de transferencia.

A veces se requieren chimeneas o rozas perimetrales de debilitamiento. Dependiendo de la mina, el transporte se hace por camión, tren o banda transportadora.

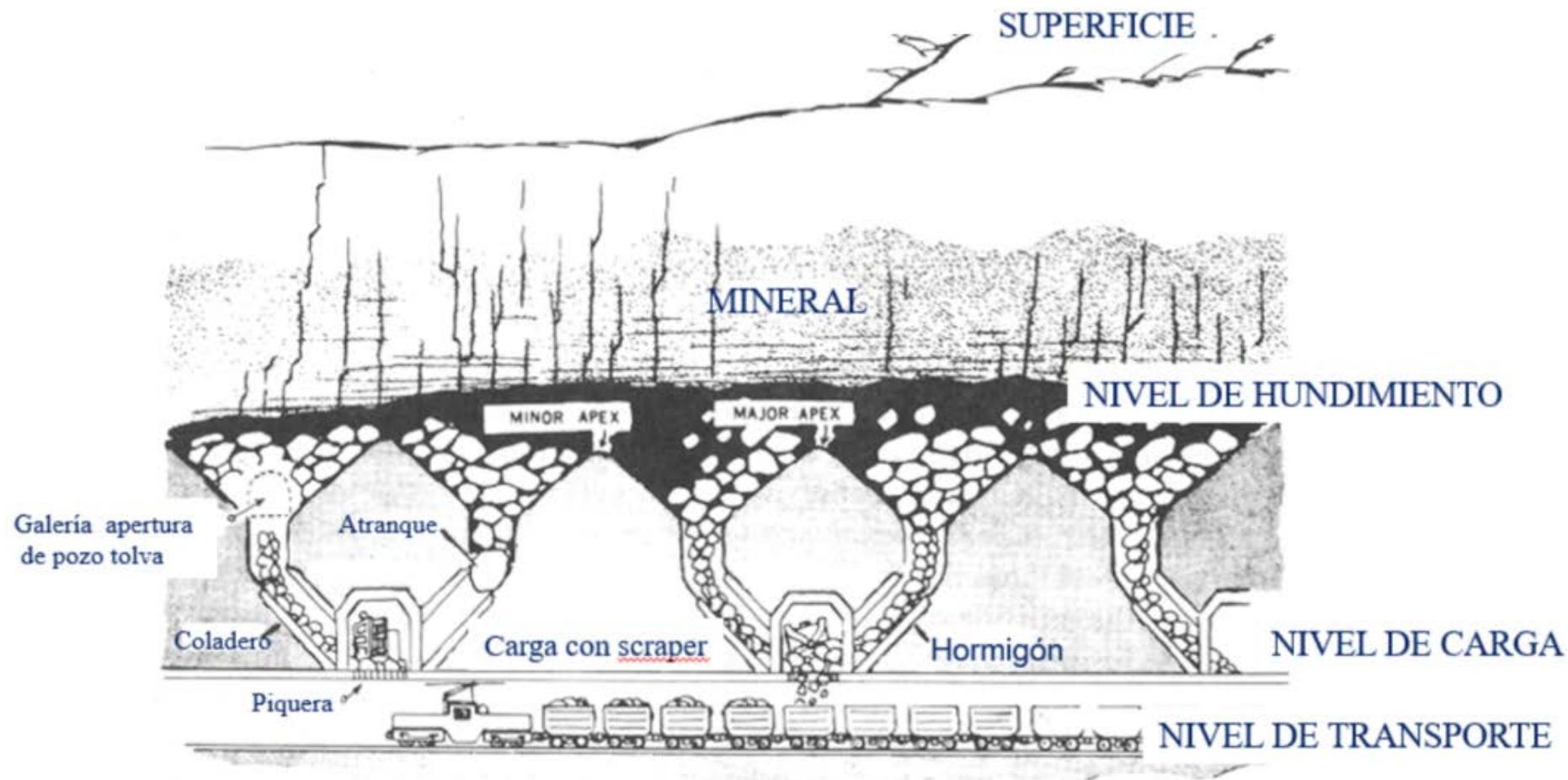
El gran tonelaje producido individualmente por las minas que utilizan el hundimiento por bloques, las convierte en pesos pesados de la minería mundial en términos comparativos.

Los diseños de estas minas han sufrido una importante evolución. Antiguamente todo el sistema de extracción se basaba exclusivamente en el uso del flujo por gravedad para llevar el mineral desde la excavación (ver figura). Al igual que ahora, se conseguía la socavación del bloque de roca por su parte inferior mediante voladuras con barrenos largos. El diseño de conos de encauzamiento inmediatamente por debajo del nivel de socavamiento permitía encauzar la roca fracturada hacia los pozos de cuello, que dirigían el flujo de roca fracturada a un nivel de parrillas ubicado inmediatamente por debajo y en el que los bolos de mayor tamaño quedaban retenidos para su taqueo y fragmentación. Todo el mineral pasante de estas parrillas bajaba por otro conjunto de pozos piquera ramificados ubicados inmediatamente por debajo y que enlazaba con los sistemas de carga de trenes para su extracción de la mina.





**Block caving. Variante de carga por gravedad**

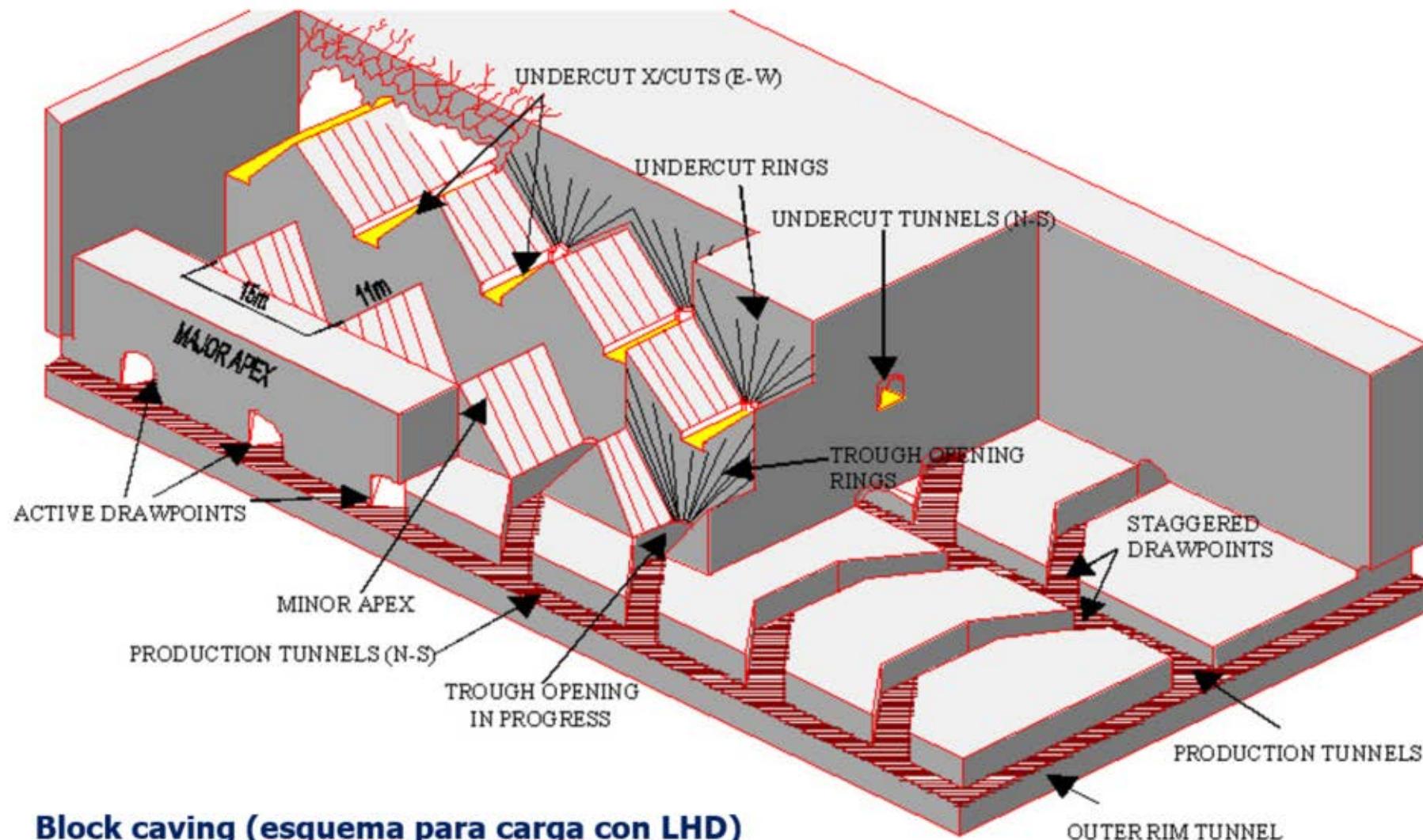




Hoy en día, las explotaciones han ido adoptando la utilización de equipos LHD para realizar la carga en los puntos de extracción. Como consecuencia, se debe agregar un complejo sistema de ventilación al trazado de galerías de desarrollo para eliminar los gases de escape de los motores diésel. Los LHD son capaces de manipular rocas grandes mientras que los bolos de gran tamaño son taqueados en los puntos de extracción o fragmentados con martillos hidráulicos.

<b>Criterios de selección del método</b>		
	<b>Aceptable</b>	<b>Optimo</b>
<b>GEOMETRIA DEL YACIMIENTO</b>		
Forma	Cualquiera	Tabular
Potencia	Grande	Grande
Buzamiento	Cualquiera	Vertical
Tamaño	Grande	Muy grande
Regularidad	Media	Alta
<b>ASPECTOS GEOTÉCNICOS</b>		
Resistencia (techo)	< 100 MPa	< 50 MPa
Resistencia (mena)	< 100 MPa	< 50 MPa
Fracturación (techo)	Media - Alta	Alta
Fracturación (mena)	Media - Alta	Alta
Campo tensional in-situ (Profundidad)	< 1000 m	< 500 m
Comportamiento tenso-deformacional	Elástico	Elástico
<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>		
Valor unitario de la mena	Bajo – Muy Bajo	NA
Productividad y ritmo de explotación	Muy Alto	NA

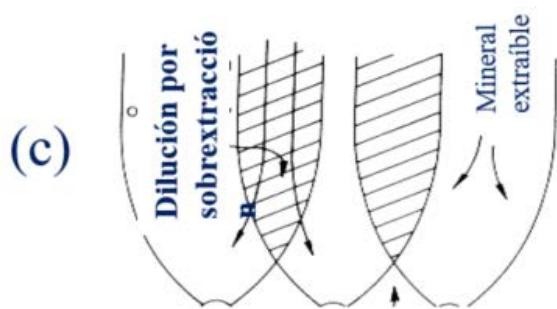
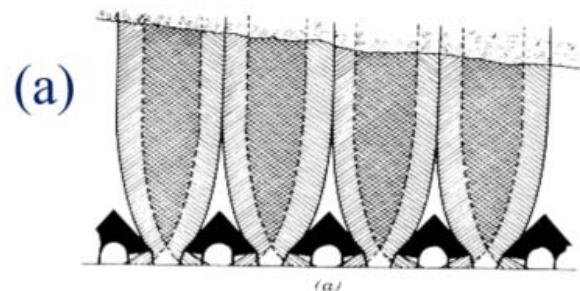
El hundimiento por bloques es un método de extracción en masa económico y eficiente cuando las condiciones de la roca son favorables. La cantidad de perforación y voladura requerida para la producción de mineral es mínima, mientras que el volumen de desarrollo es inmenso. El comportamiento de la masa rocosa y las condiciones para el hundimiento son difíciles de predecir cuándo se realiza el diseño y planificación de la mina. El extenso desarrollo requerido y el retraso en tiempo antes de que comience la producción también son factores a considerar cuando se compara éste con otros métodos.





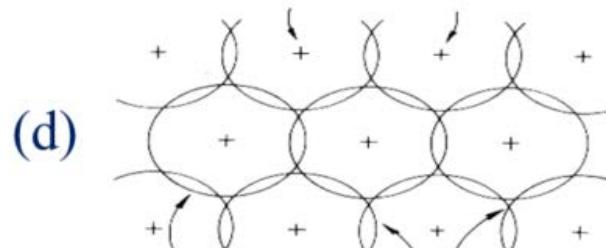


## BLOCK CAVING (Disposición de pozos tolva)

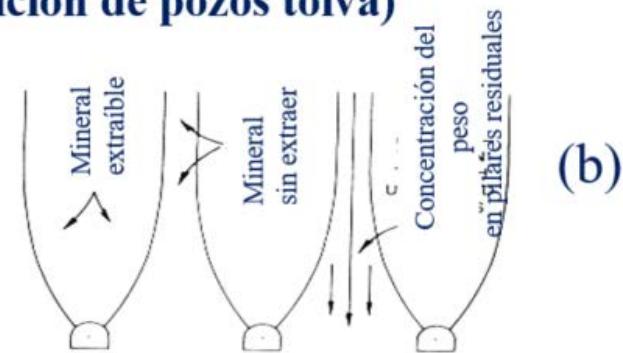


PILAR REDUCIDO (Problemas sostenimiento y dilución por sobreextracción)

CENTROS POZOS TOLVA



$$S = xy = 150\Phi + 10 \quad (\Phi: \text{Tamaño medio de fragmento en metros})$$

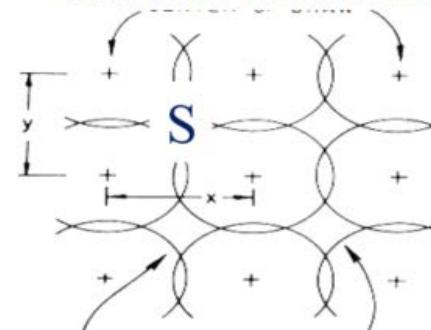


PILAR INTERMEDIO SIN HUNDIR

(Menor recuperación y riesgo de estallido de roca)

- (a): Separación correcta.**
- (b): Separación excesiva.**
- (c): Separación insuficiente.**
- (d): Disposición al tresbolillo.**
- (e): Disposición en línea.**

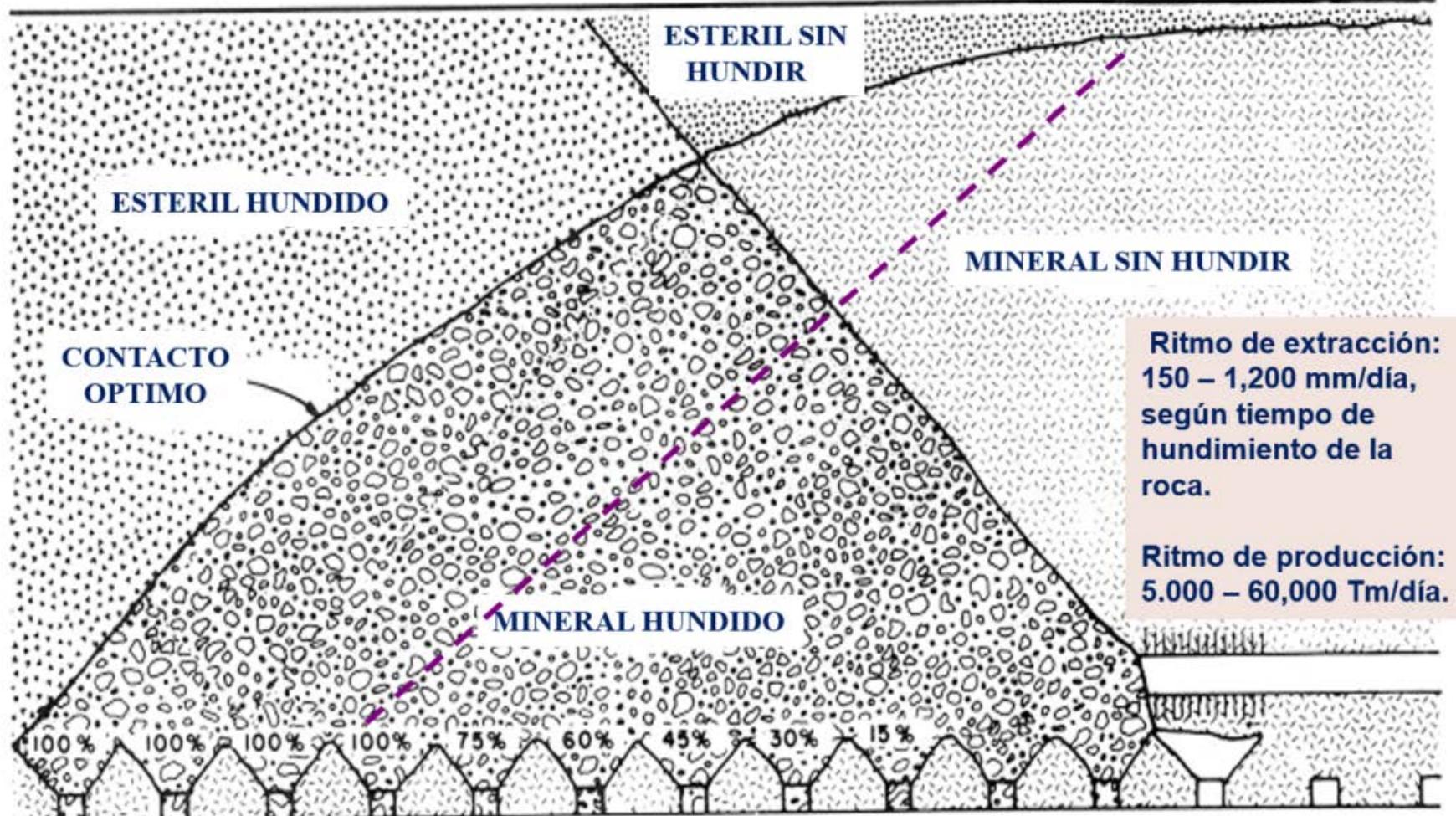
CENTROS POZOS TOLVA

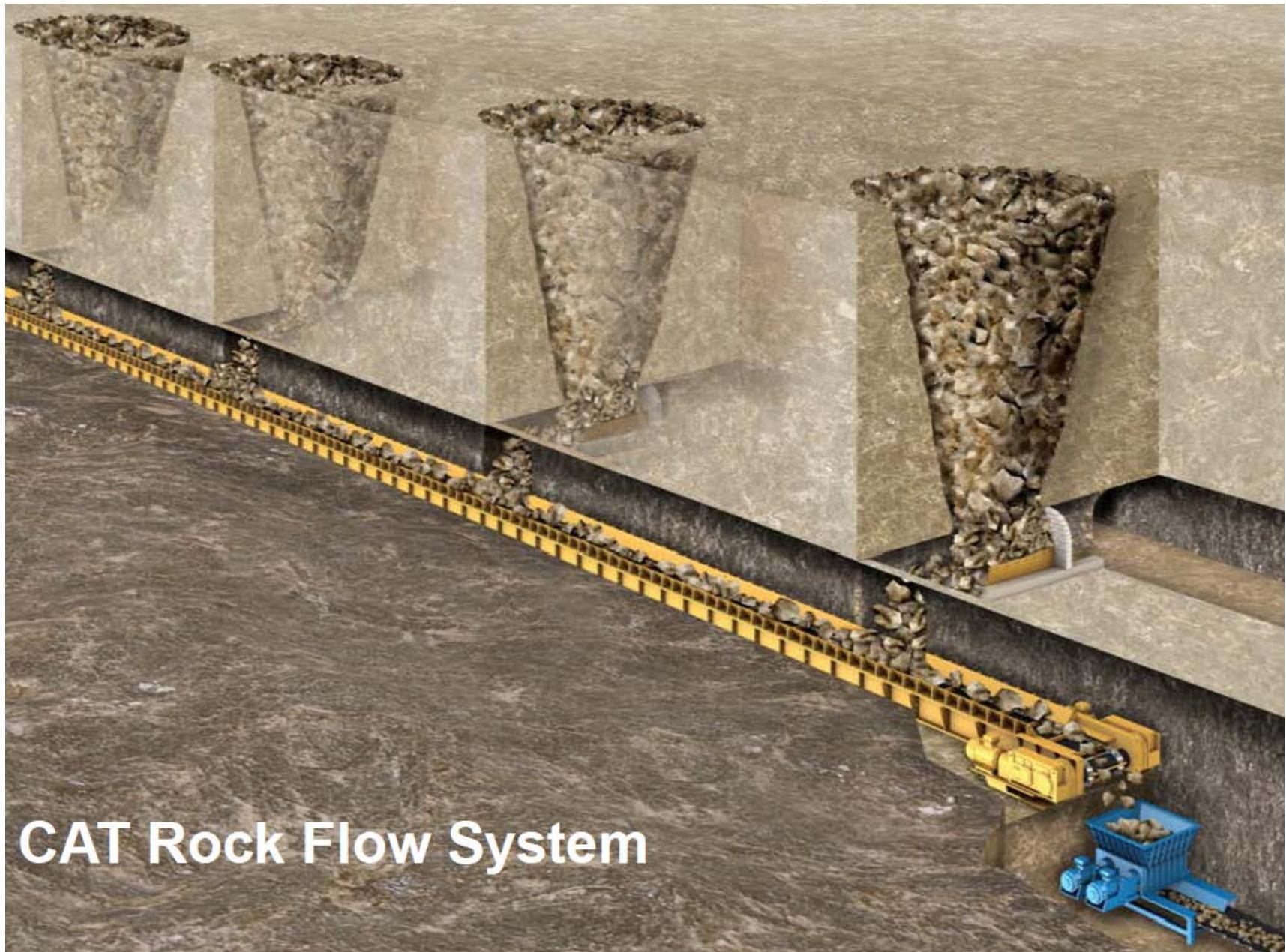


(e)

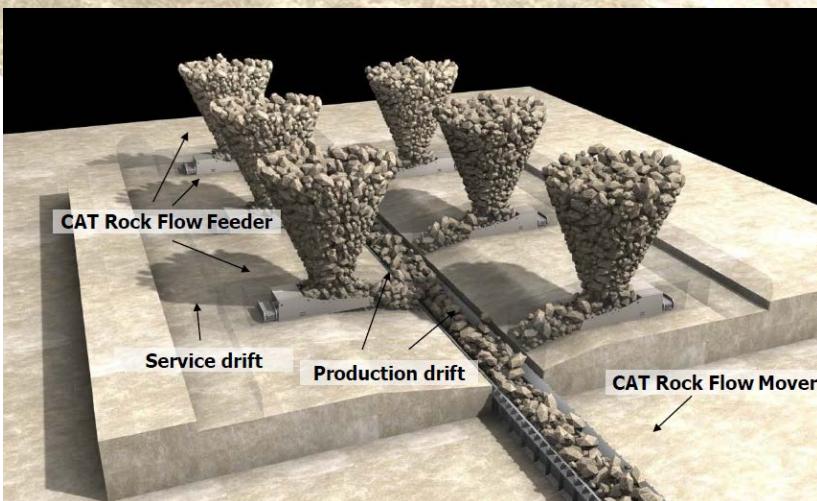
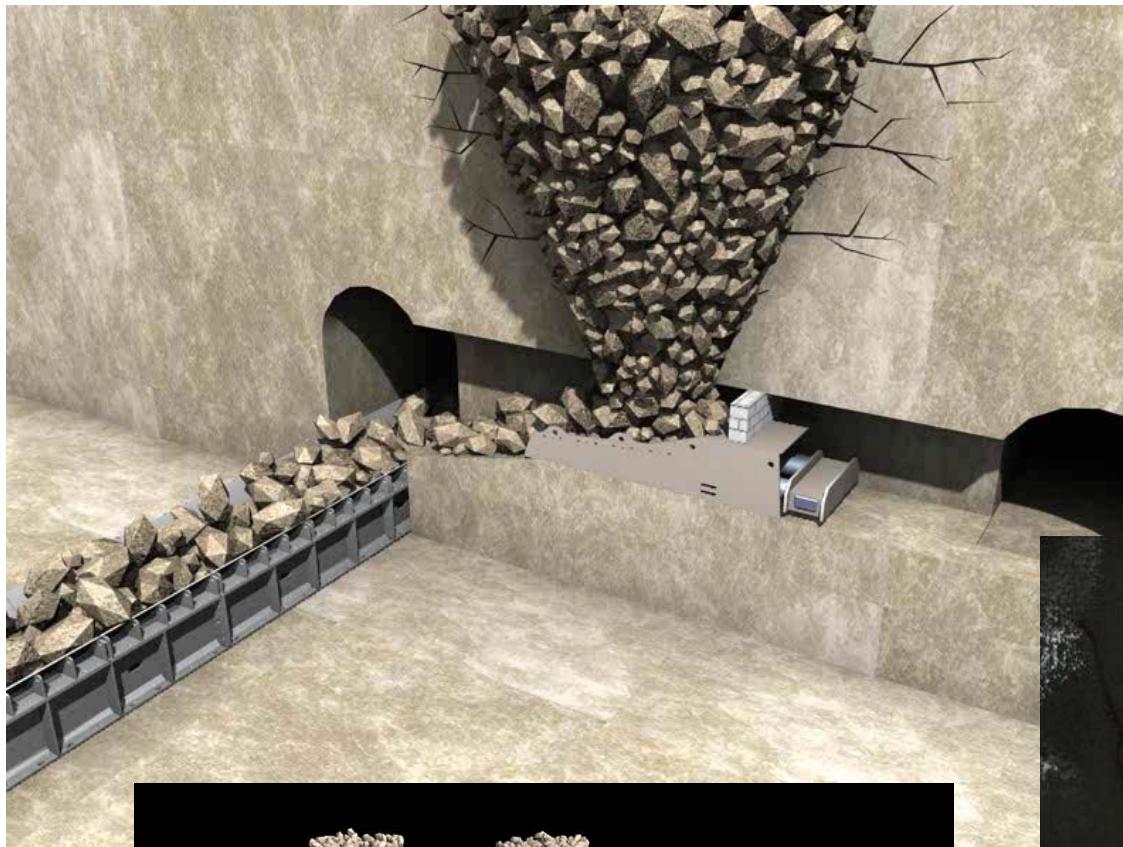


## Hundimiento por bloques (extracción controlada)





## CAT Rock Flow System



## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Copco Rock Drills AB (2007). "Mining Methods in Underground Mining". [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)
- Bernaola Alonso, José; (2006). "Métodos de Explotación en Minería Subterránea". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid.
- Boughton, P. (2014). "A supporting role in long wall mining". Engineer Live. <https://www.engineerlive.com/>
- Embil Martínez, Enrique; Llera López, José Luis; Saez García, Eugenio (s/f). "Métodos de Explotación para Capas de Carbón Inclinadas y Verticales". Instituto Geológico y Minero de España.
- Gómez, R.; Labbé, E. (2019). "Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del 'block caving'". Boletín Geológico y Minero, 130 (1): 181-198. ISSN: 0366-0176. DOI: 10.21701/bolgeomin.130.1.011
- Herrera Herbert, Juan; (2016). "Métodos de Explotación en Minería de Interior". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid.
- Hartman H.L. ed.(1992). Mining Engineering Handbook, 2nd Ed. 2170 pp., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (Littleton, USA).
- Hartman H.L. (1987). Introductory Mining Engineering, 633 pp., John Wiley & Sons, Inc. (New York, USA).
- Hustrulid W.A. ed. (1982). Underground Mining Methods Handbook, 1754 pp., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (Littleton, USA).
- IMC- Ingenieros de Minas Consultores (s/f). "Proyecto de derrabes de carbón. Análisis previo de los métodos de explotación aplicables a las capas de carbón inclinadas y verticales con pendientes superiores a 35°". Gobierno de España. Ministerio de Industria y Energía.
- Lawson, J. (2016). "Mining hard rock with longwall efficiency". Engineer Live. <https://www.engineerlive.com/>
- Peng S.S. (1978). Coal Mine Ground Control, 450 pp., John Wiley & Sons, Inc. (New York, USA).
- Stack B. (1980). Handbook of Mining and Tunnelling Machinery, 742 pp., John Wiley & Sons, Inc. (New York, USA).
- Stout K.S. ed. (1980). Mining Methods & Equipment, 217 pp., McGraw-Hill, Inc. (New York, USA).]





**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGIA  
LABORATORIO DE INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS MINERAS

**TECHNICAL UNIVERSITY OF MADRID**  
HIGHER TECHNICAL SCHOOL OF MINES AND ENERGY  
**MINING TECHNOLOGIES INNOVATION LABORATORY**