

1.1. Introducción

Con la denominación de Mineralurgia o Tecnología Mineralúrgica se define el conjunto de actividades industriales (mineras) que persiguen adaptar el todo-uno procedente de las operaciones de extracción (métodos de minería extractiva: minas, canteras, pozos, etc.), para los procesos siguientes a los que se destina, sin alterar la composición química de las distintas sustancias que lo integran.

Estos procesos pueden ser:

- *De uso directo*: El grado de preparación permite su venta sin mayor elaboración (productos de cantera, carbones).
- *Proceso siguiente de elaboración*: Estos procesos varían según el tipo de mena.

Referencias: Menas metálicas: normalmente se envían a un proceso de metalurgia para extracción del metal. Carbones y derivados: se envían a producción de energía. Rocas: a construcción y ornamental; Áridos: a construcción. Menas de bauxita (óxido de aluminio): para la fabricación de ladrillos.

En todo caso, el fin perseguido u objetivo es ser económicamente rentable como operación industrial o dentro del conjunto minero.

La alimentación del todo-uno procedente de la mina se modifica, normalmente la ley y las características físicas (tamaño y forma) para dar un concentrado, que es el resultado del proceso mineralúrgico. Permanecen inalteradas, en el sentido de que no se pretende modificar, las características químicas o físico-químicas de los diferentes minerales que integran los productos obtenidos, con relación a su composición en el todo-uno.

El proceso consiste en separar la mena de los productos que carecen de valor y modificar su aspecto exterior, tamaño y forma principalmente, para obtener ventajas económicas (beneficios) en si mismo o permitir optimizar los procesos a los que se destina (metalurgia, generación de energía, construcción, otros procesos industriales, relleno, etc.).

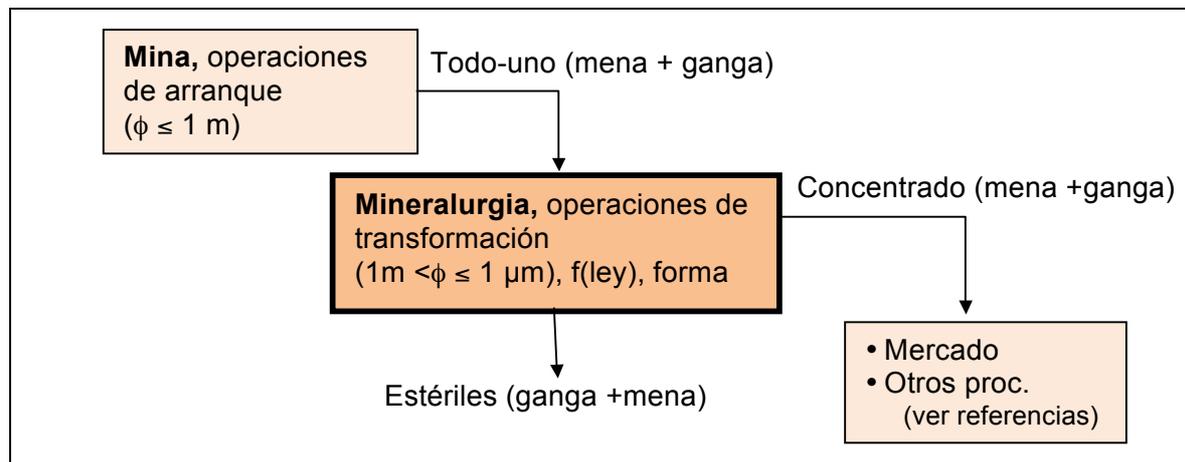


Figura 1.1. Esquema de situación.

Se diferencia de los procesos metalúrgicos en que no se destruyen ni modifican las estructuras moleculares, ni química ni físicamente, y en los procesos metalúrgicos, por el contrario, constituyen el fundamento de la tecnología.

La mineralurgia ha recibido y recibe diferentes denominaciones dependiendo de la época, el lugar o incluso la tecnología aplicada, y a modo de ejemplo podemos citar:

- **Mineralurgia¹**, en el sentido de procesado de minerales.
- **Concentración de menas**: Es uno de los fines buscados, aumentar la concentración (ley) del producto en algunos de los minerales que componen el todo-uno.
- **Preparación (mecánica) de minerales**: Dado que la tecnología empleada utiliza (utilizaba) maquinaria de tipo mecánica casi exclusivamente.
- **Preparación de menas**: Un objetivo básico en las menas de tipo metálico, de alto interés económico y estratégico en siglos pasados, era la “*preparación*” de las menas para su posterior tratamiento (metalurgia) y obtener metales.
- **Beneficio de minerales**: En el sentido de obtención de rendimiento económico por el proceso realizado.
- **Lavadero de carbón**: Ejemplo de denominación ligada a una tecnología específica.
- **Mineralotecnía**: Tecnología de tratamiento de minerales.
- **Proceso de minerales**: Actuaciones sobre los minerales.
- **Mineralurgia (4743), Tecnología Mineralúrgica (4674)**: Definidas en el BOE como asignatura y con contenido.

1.2. Definiciones (resumen) de aspectos relacionados con la tecnología mineralúrgica

Mina²: **1)** Criadero de minerales de útil explotación. **2)** Excavación que se hace para extraer un mineral. **3)** Figurativo: “*Oficio, empleo o negocio del que con poco trabajo se obtiene mucho interés y ganancia*”.

Indicio minero: También denominado protomena, corresponde a un yacimiento cuya explotación no es rentable con la tecnología disponible. Esto no quiere decir que en un futuro no pueda ser explotable.

Yacimiento o criadero³ (de minerales): Acumulación de una o más sustancias útiles (metálicas y no metálicas), del tipo minerales, rocas y sus derivados por actuación de los diferentes procesos geológicos (arenas, salinas, etc.), que acumulados en determinados lugares de la corteza terrestre, pueden ser extraídos.

Para que un yacimiento sea explotable, se convierta en una mina, es necesario que la ley media del yacimiento sea mayor que la “*ley límite económica*”, y mayor que el Clarke.

Ley: También se encuentra en la literatura con la denominación de *grado, contenido, título, ensaye*; y representa la mayor o menor calidad de un producto indicando la proporción en el elemento valioso. Es normal su indicación en %.

Ley límite económica: Corresponde a la ley o conjunto de leyes de los diferentes elementos que componen el yacimiento, que hace que su explotación, con la tecnología conocida y disponible, sea económicamente explotable (beneficio económico). Ley por encima de la cual el yacimiento es económicamente explotable.

Algunas referencias:

Au → 5 ppm;	Diamante → 0,03 – 1,5 ppm;	WO ₃ (Tungsteno) → 0,5 – 1,5%
Menas de Fe → > 20%;	Menas de Sn → 0,3 – 1,5%;	Menas de Cu → 2 – 3%

¹ Arte de laborear las minas (DRAE). Tecnología para la obtención de minerales.

² Del francés *mine*.

³ También se utiliza la denominación de “depósito mineral”.

La ley límite económico depende de múltiples factores entre los que podemos citar:

a) Intrínsecos (propios del yacimiento):

- Mena principal → mineral.
- Ley del yacimiento > ley límite económica.
- Estructura cristalina, grado de interpenetración de las diferentes especies mineralógicas.
- Minerales asociados, subproductos (otras menas de menor importancia económica presentes en el yacimiento) y venenos (especies minerales que interfieren en el proceso de concentración o incluso llegan a hacer inviable el proceso técnico).
- Profundidad del yacimiento (existe un límite por el aumento de los costes de extracción).
- Situación, distancia a los núcleos comerciales.
- Ganga, tipo y cantidad; capacidad de contaminación (legislación medioambiental).

b) Extrínsecos, (propios del mercado):

- Situación económico-política del mercado; nivel de abastecimiento y previsiones de evolución. Como ejemplo de evolución del mercado se puede citar que el cinc cerro el año 2004 entre 800 y 900 \$/t y a los dos años cotizaba a 3.500 / 4.000 \$/t de Zn.
- Tecnologías disponibles. La evolución de la tecnología ha permitido explotar, como yacimiento minero rentable, antiguas escombreras.
- Capacidad económica; las inversiones iniciales son muy elevadas normalmente (grandes grupos financieros).

Ley teórica máxima. Corresponde al máximo contenido posible de un elemento dentro de un compuesto químico. Se calcula recurriendo a la fórmula química y evaluando el porcentaje que representa el elemento en gramos, frente al total del compuesto.

Ejemplo: Para un compuesto como la calcopirita (FeCuS_2 , una de las principales menas de Cu), con pesos moleculares de: $\text{Pm}(\text{S}) = 32$; $\text{Pm}(\text{Fe}) = 55,8$; $\text{Pm}(\text{Cu}) = 63,5$; $\text{Pm}(\text{FeCuS}_2) = 183,3$
 La "Ley teórica máxima" = $100 \cdot (63,5 / 183,3) = 34,6 \%$

La ley, normalmente, se expresa en función del elemento que interesa recuperar, pero existen tecnologías que tienen su propia expresión. Para evitar situaciones de error se pueden indicar las referencias.

Elemento	Denominación	Límite %	Observaciones
General	Elemento / mena	100	xx,x% < ley teórica máxima
Miner. nativo	Hg	100	80%
Óxidos	U_3O_8	100	Porcentaje de U_3O_8 (uranio)
No metálicos	Fluorita (CaF_2)	100	Porcentaje de fluorita
Carbón	C + cenizas	35 - 40	Función de las cenizas
Oro	Au	24	Quilates (24 q = 100%)
Diamante	C – cristalizado	Peso	Quilate (1 q = 205 mg)

Tabla 1.1. Ley del mineral: Referencias de formas de expresión.

La ley de los yacimientos varía con la explotación, no es la misma para un mineral dado en diferentes yacimientos, ni es constante dentro de un mismo yacimiento, varía al avanzar la explotación o modificarse las condiciones del frente de explotación.

Los métodos o técnicas de tratamiento deben adaptarse a estas variaciones, de ahí la necesidad de que las técnicas y equipos mineros admitan, dentro de su robustez, posibilidades de regulación para el cambio de las características del producto, (leyes, impurezas, etc.), o modificaciones en el tonelaje tratado (cambios en las condiciones de mercado).

U.C.	E.U.I.T. De Minas		Concentración de Menas	
Mina:	Almadén -	(España - Ciudad Real)	(árabe: al-ma'den = la mina)	
Está en explotación: de 2000 - 4000 años según referencias				
Mineral:	Mercurio nativo (Hg)		Producción total	
	Cinabrio (HgS)		Toneladas:	4,39 Mt todo-uno
			Volumen:	1,435 Mm3
			Densidad:	3,06 t/m3
			Ley media:	6,05 %
			Reservas:	7,7 M-frascos
				265,65 kt de Hg metal
				d _{Hg} = 13,6
				d _{HgS} = 8,1
				1 fr = 2,5 l
Epoca	Ley	fr/año		
Romana	20	100		
Visigoda	20	100		
Arabe	20	100		
Reconquista	16	100		
Fúcares-1525	16	2500		
1646-1699	14	2500		
S-XVIII	14	12500		
S-XIX	9	27000		
S-XX	4	37000		

Epoca	frascos / año	ley media (%)
Romana	100	20
Visigoda	100	20
Arabe	100	20
Reconquista	1000	16
Fúcares-1525	2500	16
1646-1699	2500	14
S-XVIII	12500	14
S-XIX	27000	9
S-XX	37000	4

Figura 1.2. Evolución de la ley media en la mina de Almadén.

Índice de Clarke: Es la ley media de un elemento cualquiera en la corteza terrestre. La corteza terrestre, desde un concepto geológico tiene una profundidad variable y comprendida entre 20 y 50 Km. Desde un punto de vista minero se consideran profundidades de 3,5 a 4 Km para los valores medios que se dan en la bibliografía con respecto a las leyes.

Nº Orden	Elemento	Símbolo	Abundancia %	Acumulado %
1	Oxígeno	O ₂	46,4	46,4
2	Silicio	Si	28,2	74,6
3	Aluminio	Al	8,2	82,8
4	Hierro	Fe	5,6	88,4
5	Calcio	Ca	4,1	92,5
6	Sodio	Na	2,4	94,8
7	Magnesio	Mg	2,3	97,2
8	Potasio	K	2,1	99,3
9	Titanio	Ti	0,57	99,87
10	Manganeso	Mn	0,095	99,97

Tabla 1.2. Índice de Clark para los 10 elementos más abundantes.

Nota: Valores del índice de Clark calculados hasta una profundidad en la corteza terrestre de 3,5 Km. Se puede observar que $\frac{3}{4}$ partes de la corteza lo forman el oxígeno y el silicio, y que el 99,97% está representado por 10 elementos.

1.3. Elementos principales que forman un yacimiento

Los elementos principales que forman un yacimiento, desde el punto de vista del ingeniero mineralúrgico, son:

Mena: **Especie mineral** (o conjunto de minerales) que se encuentra **en un yacimiento** y que tiene **aplicación industrial y económica**. Para que un mineral se clasifique como mena, la ley del yacimiento debe ser mayor que la ley límite económica, y su explotación debe producir beneficios técnicos y económicos.

[Mena (definición de manuales no mineralúrgicos): Es un depósito mineral cuya concentración es adecuada para extraer un metal específico].

Mineral (def. química): **1)** Sustancias inorgánicas naturales que poseen estructuras atómicas definidas y composición definida (no única ya que existen variedades de un mismo mineral). **2)** Sustancia natural con una composición química característica que varía sólo dentro de ciertos límites (C = grafito; C = diamante).

Mineral (def. minera): Cualquier sustancias ¿sólida? con valor económico, del tipo minerales, rocas y sus derivados por procesos geológicos, que se extraiga de la corteza terrestre. Los minerales se encuentran en la naturaleza en forma nativa (Au, Pt, Hg) o en combinaciones químicas que es la forma más general.

De una manera general el término mineral se usa en un sentido extenso para incluir “cualquier cosa” de “valor económico” que se extraiga de la corteza terrestre.

Ganga: Resto de elementos del yacimiento que carecen de valor y que es necesario separar de la mena. No tienen valor comercial.

Todo-uno: Formado por la mezcla de mena y ganga que, procedente de la mina, alimenta los talleres de concentración. Se caracteriza por el tonelaje por unidad de tiempo y las diferentes leyes de los elementos que lo forman. En ocasiones, según los tratamientos, es relevante otras características como puede ser la densidad media, fragilidad, etc.

Subproducto: Sustancia que por su ley, valor o dificultad de explotación puede no ser mena en si misma (explotar el yacimiento por su sola existencia) pero facilita la rentabilidad de la explotación en su conjunto. De hecho, la existencia de subproductos en multitud de yacimientos hace viable la explotación minera.

Venenos: Elementos que incluso con leyes muy bajas, en pequeños porcentajes, pueden ser perjudiciales para la explotación, bien por que interfieren en el proceso o dificultan la tecnología de explotación.

1.4. Proceso mineralúrgico, concentración de menas

En un proceso mineralúrgico se trata el todo-uno procedente de la mina y se obtienen, fundamentalmente, dos o tres productos:

- a) **Concentrado:** Caracterizado principalmente por un aumento de la ley del mineral, además de modificaciones, en el sentido de regularizar, el tamaño y la forma en que se presenta dicho concentrado.
- b) **Estéril:** Residuos procedentes del proceso que es necesario evacuar y recolocar.
- c) **Mixtos:** Son compuestos con leyes intermedias entre el todo-uno y el concentrado, normalmente no adecuados para su expedición y que es necesario volver a tratar en fases intermedias del proceso. La producción de mixtos y su control, en las etapas intermedias del proceso mineralúrgico, permite regular los procesos y contener los costes de producción. Los mixtos pueden ser de mezcla o de constitución.

La operación mineralúrgica se caracteriza por el rendimiento, expresado mediante la relación entre el tonelaje de concentrado con relación al todo-uno.

$$\{Rend.(%) = 100 \cdot T_{concentrado} / T_{todo-uno}\}, \text{ y por la selectividad o pureza obtenida en el concentrado } \{ley \text{ del metal}\}.$$

Lo ideal es la coincidencia en las relaciones:

Mena	→	Concentrado.
Ganga	→	Estéril.

Las imperfecciones del proceso, lo ideal no es posible en la industria, hace necesario contemplar rendimientos, leyes reales, etc. Para un tratamiento de concentrado mediante flotación de un mineral de Cu, y para una alimentación entre 3 y 7% de ley en el todo-uno, es normal obtener concentrados con leyes medias del 65 al 85 % en cobre, y estériles en el entorno del 0,1 – 0,3%.

1.5. Concepto de liberación

La mineralurgia como tratamiento de menas complejas y ganga, íntimamente ligadas formando compuestos y rocas y en sus diferentes procesos, modifica el tamaño y la forma de los granos que integran el todo-uno.

Se entiende por **liberación** la separación física, separación en partículas diferentes, de la especie mineralógica de interés, de las partículas de la ganga. Es razonable pensar que solo se puede asegurar esta separación si llegamos a un tamaño en el entorno del diámetro molecular para cada especie, y esto es inviable desde un punto de vista tecnológico, luego por necesidad técnica llegamos al concepto de **grado de liberación** como aquel tamaño característico de la muestra en el que un porcentaje del mineral está libre, y su separación del resto tiene una composición característica (ley).

Tamaño de liberación: Es el tamaño al que es necesario llegar para que todo el mineral esté libre, que los granos de mena contengan exclusivamente mena (no, que los granos de ganga contengan sólo ganga).

Grado de liberación: Corresponde al mayor tamaño comercial posible que permite separar los diferentes componentes minerales que forman el yacimiento. Normalmente se refiere al tamaño correspondiente para la liberación de la mena principal y en su caso de los sub-productos.

Este grado de liberación se puede medir por un parámetro que indica el porcentaje de la muestra que se encuentra o tiene con una ley determinada.

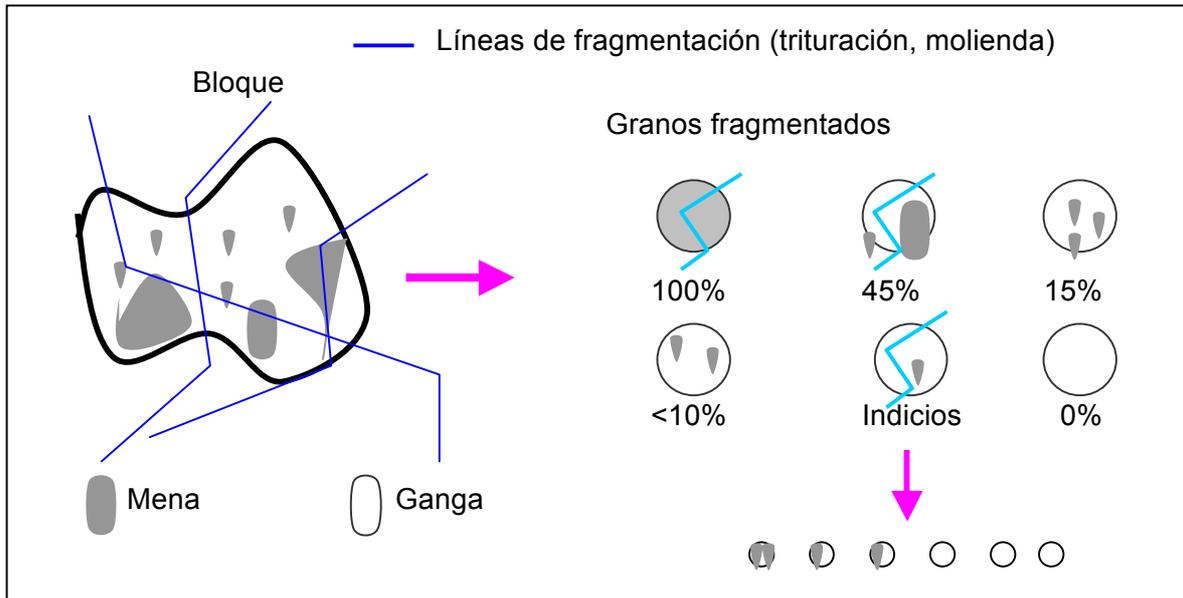


Figura 1.3. Fragmentación de un bloque – grado de liberación.

Del diagrama se deduce:

1º fragmentación		2º fragmentación	
Ley de corte	Grado de liberación	Ley de corte	Grado de liberación
100	$1/6 = 17\%$	100	$1/6 = 17\%$
≥ 45	$2/6 = 33\%$	≥ 45	$3/6 = 50\%$
≥ 15	$3/6 = 50\%$	≥ 15	s.d.

1.6. Esquema general de un proceso de concentración

Se adjunta un esquema indicativo de las fases principales de un proceso mineralúrgico para una concentración mediante flotación y el resultado de la distribución energética entre los diferentes procesos de una instalación mineralúrgica.

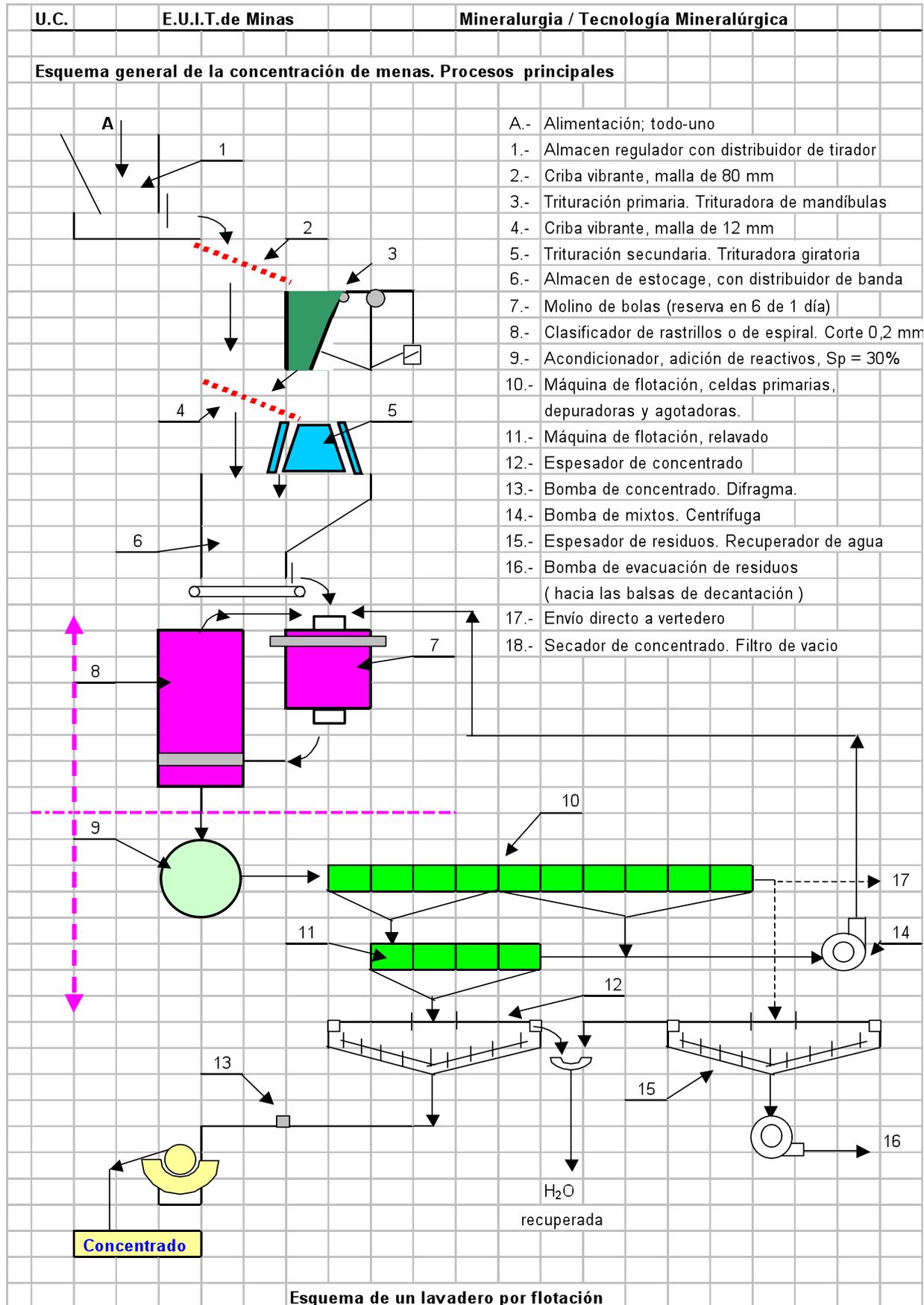


Figura 1.4. Esquema general de un proceso de mineralurgia.

Distribución del consumo de energía entre los diferentes procesos en una instalación típica de tratamiento por flotación. (Canteras y explotaciones - nov-88)

Area proceso	Referencia Ref.	Consumo energético Energía (%)	Taller de
Trituración	Tri	8,8	Trituración
Molienda	Mol	30,2	Concentración
Bombeo y transporte en molienda	Mol-bom	5,8	
Flotación	Flo	23,2	
Escombrera y transporte de estériles	Esc	2,1	
Espesado y filtrado	Esp-fil	6,4	
Secado	Sec	15,2	Servicios
Calentamiento ambiental y agua	Cal-amb	2,5	
Gasto agua	Agua	2,4	
Elevación	Elev	3,4	
Total	Tot	100,0	100

