



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

# TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA



## TEMA 1: INTRODUCCIÓN



# 1

## INTRODUCCIÓN



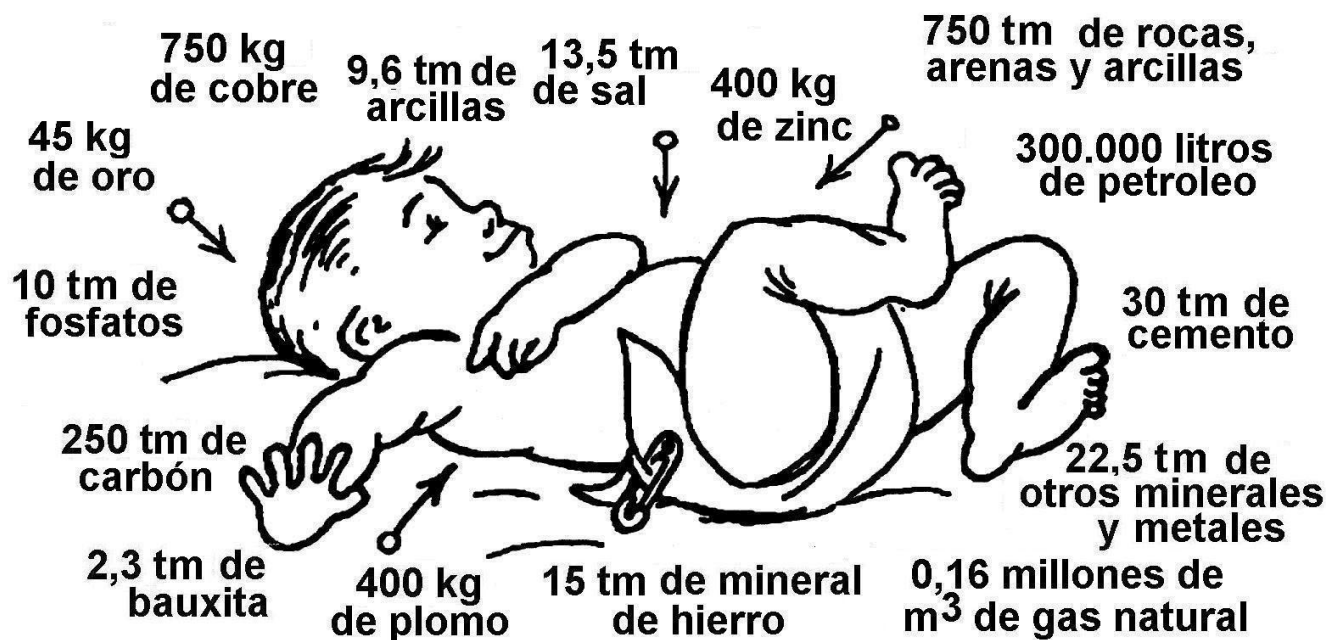
- 1.1. Sustancias Minerales
- 1.2. Menas Metálicas
- 1.3. Menas No-Metálica
- 1.4. Procesamiento de Minerales
- 1.5. Diagramas de Flujo
- 1.6. Liberación
- 1.7. Concentración.
- 1.8. Concepto de Recuperación y de Ley
- 1.9. Concepto de Eficiencia de la Recuperación
- 1.10. Casos prácticos. Ejercicios



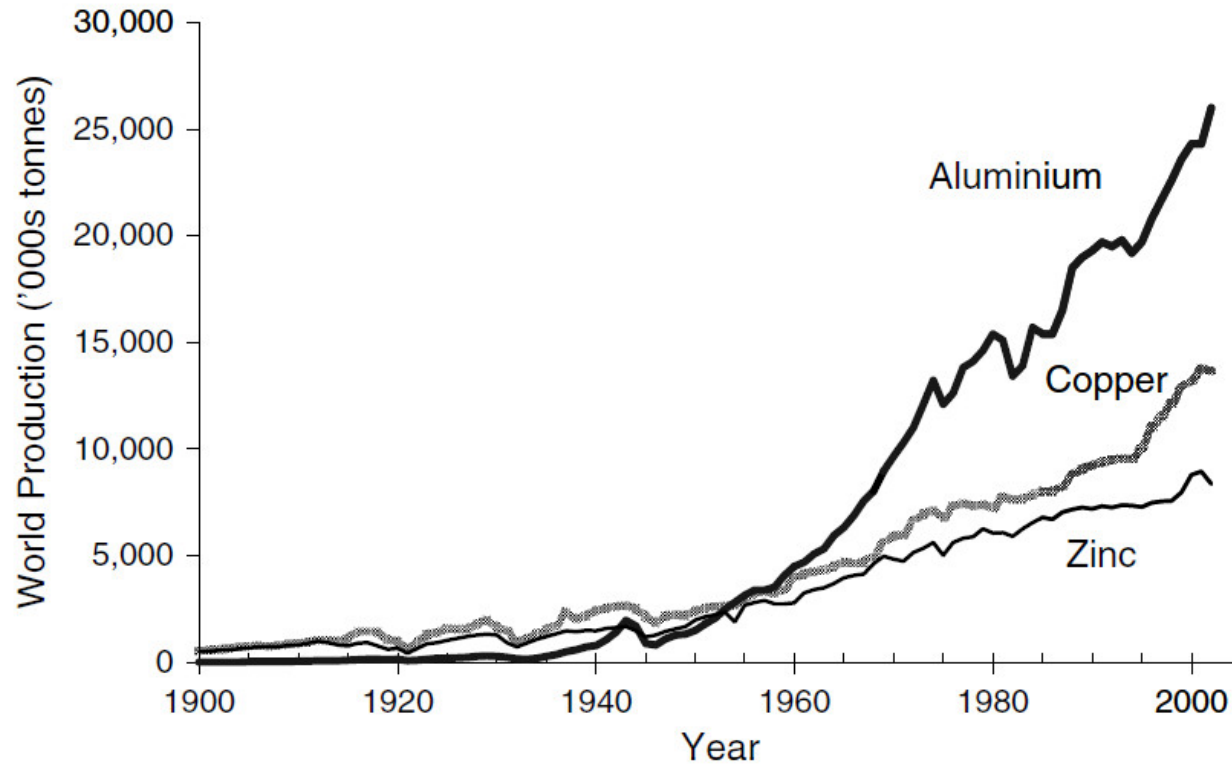
Los ***materiales inorgánicos*** que se emplean para cubrir las necesidades de nuestra actividad, proceden de alguna forma de la corteza terrestre: **explotaciones subterráneas o a cielo abierto, o extracción de minerales del fondo marino.**



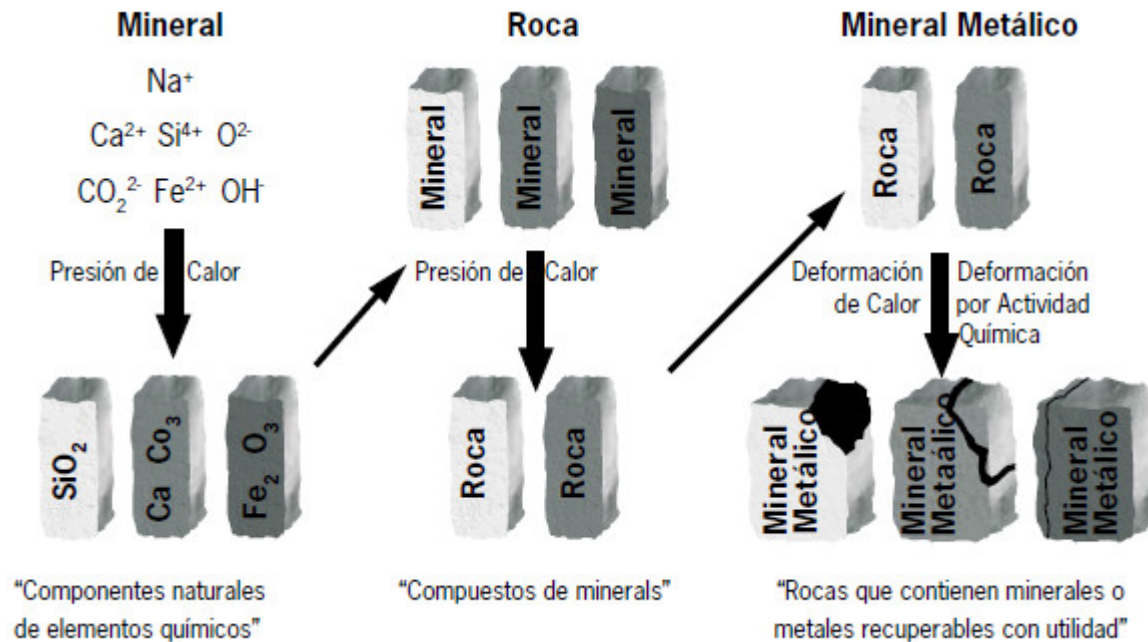
## TODO SER HUMANO NECESITARÁ



**1.600 tm de minerales, metales y combustibles durante su vida**



**Espectacular incremento en el consumo de los principales metales (Al, Cu, Zn) (datos hasta el año 2002).**



Los **metales** se pueden presentar asociados bajo diferentes formas dependiendo de su grado de reacción con el entorno, principalmente con el **oxígeno** (p.e.: **óxidos**), el **azufre** (p.e.: **sulfuros**) y **dióxido de carbono** (p.e.: **carbonatos**).



**Elementos nativos:** se presentan en estado puro sin reaccionar: oro (Au) y platinos.

**Nativos o en asociación:** La plata (Ag), el mercurio (Hg) y el cobre (Cu).

**Óxidos, sulfuros e hidróxidos:** Resto, muy reactivos al oxígeno, azufre o dióxido de carbono: oxido de hierro, sulfuros de hierro, silicatos de aluminio, óxidos de aluminio, etc.



Los diferentes elementos químicos se presentan formando **sustancias minerales**, las cuales poseen en su estructura atómica uno o varios elementos importantes para su comercialización (Al, Cu, Fe, Ti, Sn, etc.), es decir constituirían los minerales a explotar



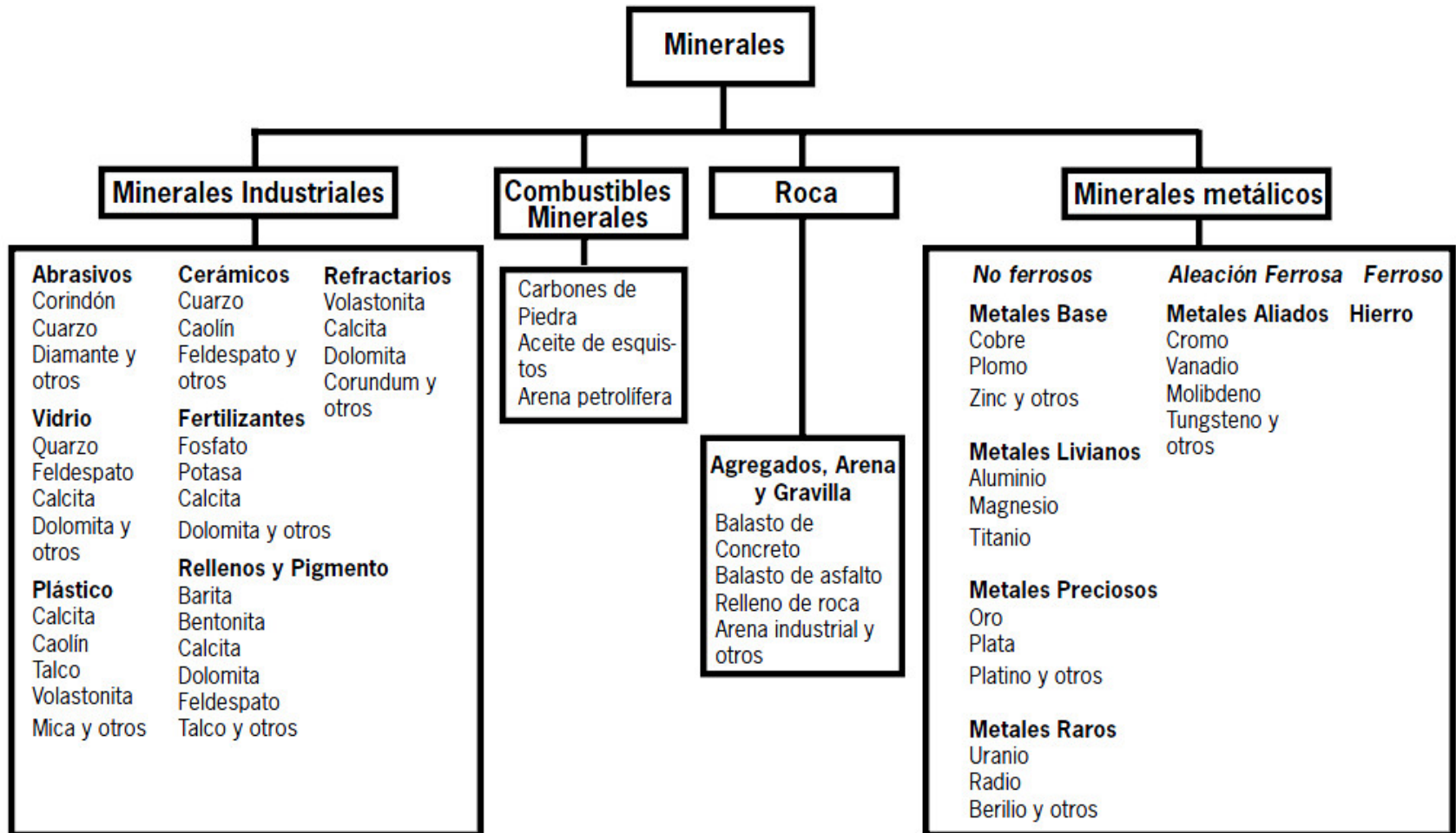


Mina de cobre de Chuquibambilla (Antofagasta, Chile)

**Los procesos geológicos y los agentes externos favorecerán la acumulación de los minerales en determinadas áreas, dando lugar a los *depósitos minerales*.**



# Clasificación de los minerales en base a su uso y beneficio industrial





## Menas Metálicas

### Situación actual:

#### Mina de Uranio (Rossing, Namibia)

- **Incremento en el consumo de los principales metales (cobre, zinc, aluminio y estaño): fuerte demanda de la economía emergentes (China, India, Brasil, etc.).**
- **La extracción de metales está sometida a una fuerte influencia del precio de los hidrocarburos (fuerte consumo energético para transformar los minerales en metal puro).**
- **Sus vaivenes afecta significativamente a las economías de países dependientes fuertemente en sus industrias mineras (Chile, Zambia, etc.).**



## Menas Metálicas

### Situación actual:

#### Mina de Diamantes (Jwaneng, Botswana)

- El precio de los metales viene gobernado por la leyes de oferta y demanda a nivel mundial.
- Hoy en día las fuentes principales de suministro de metales son el reciclado (producción de metales ya existentes) y el minado (producción de nuevos metales).
- El avance y el desarrollo tecnológico de los equipos y el aumento de su productividad incrementan la reservas minerales y por lo tanto permiten un mayor cantidad de metales disponibles.



## Estimaciones Mundiales:

- Estimación de la abundancia de los principales metales en la corteza (hasta 3.5 km de profundidad).

Abundance of metal in the oceans

<i>Element</i>	<i>Abundance (%)</i>	<i>Amount in 3.5 km of crust (tonnes)</i>	<i>Element</i>	<i>Abundance (%)</i>	<i>Amount in 3.5 km of crust (tonnes)</i>	
(Oxygen)	46.4		Vanadium	0.014	$10^{14}-10^{15}$	
Silicon	28.2	$10^{16}-10^{18}$	Chromium	0.010	$10^{13}-10^{14}$	
Aluminium	8.2		Nickel	0.0075		
Iron	5.6		Zinc	0.0070		
Calcium	4.1		Copper	0.0055		
Sodium	2.4		Cobalt	0.0025		
Magnesium	2.3	$10^{16}-10^{18}$	Lead	0.0013		
Potassium	2.1		Uranium	0.00027		$10^{11}-10^{13}$
Titanium	0.57	$10^{15}-10^{16}$	Tin	0.00020		
Manganese	0.095		Tungsten	0.00015		
Barium	0.043		Mercury	$8 \times 10^{-6}$		
Strontium	0.038		Silver	$7 \times 10^{-6}$		
Rare earths	0.023	$10^{14}-10^{16}$	Gold	$<5 \times 10^{-6}$	$<10^{11}$	
Zirconium	0.017		Platinum metals	$<5 \times 10^{-6}$		



## Estimaciones Mundiales:

- Estimación de la abundancia de los principales metales en el fondo marino

Abundance of metal in the oceans

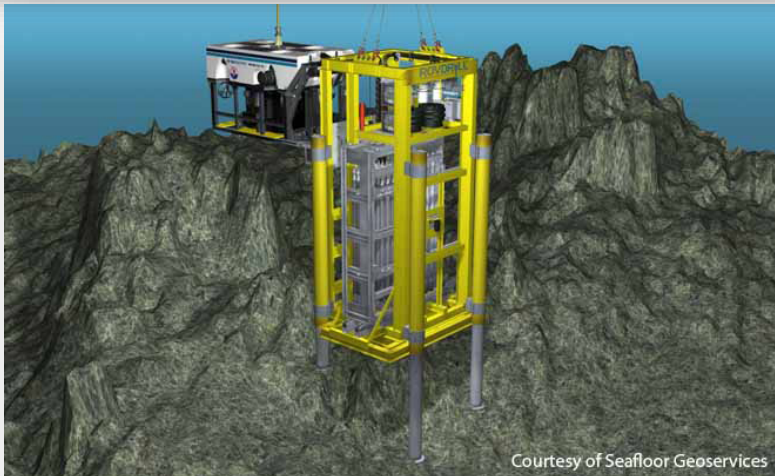
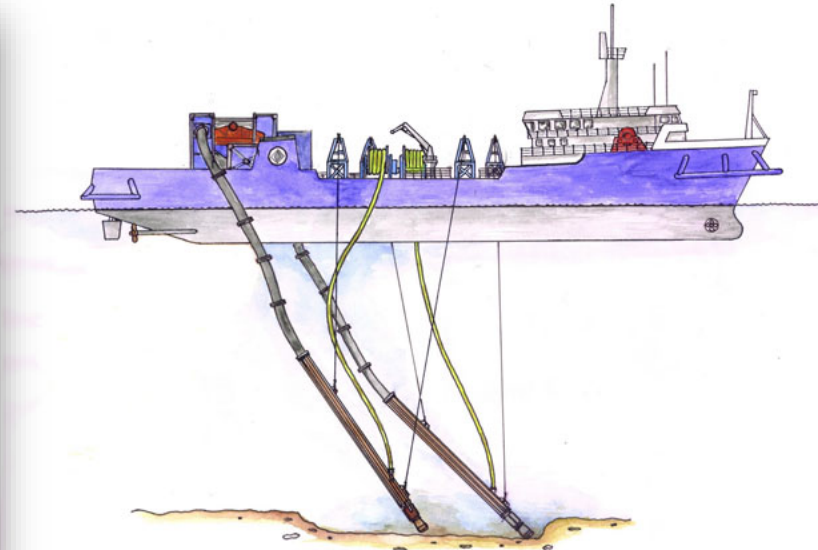
<i>Element</i>	<i>Abundance in sea-water (tonnes)</i>	<i>Element</i>	<i>Abundance in sea-water (tonnes)</i>
Magnesium	$10^{15}-10^{16}$	Vanadium	$10^9-10^{10}$
Silicon	$10^{12}-10^{13}$	Titanium	
Aluminium		$10^{10}-10^{11}$	Cobalt
Iron	$10^9-10^{10}$		Silver
Molybdenum		$10^9-10^{10}$	Tungsten
Zinc	$10^9-10^{10}$		Chromium
Tin		$10^9-10^{10}$	Gold
Uranium	$10^9-10^{10}$		Zirconium
Copper		$10^9-10^{10}$	Platinum
Nickel			



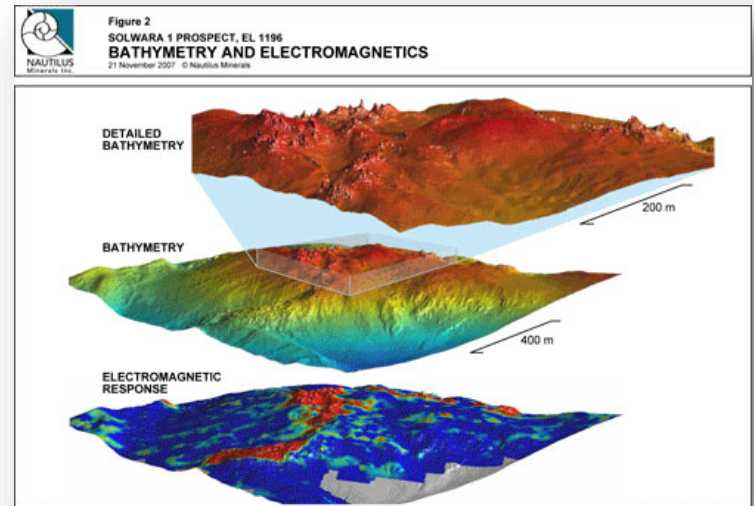
# Explotación minera del fondo marino:

INTRODUCCIÓN: Menas Metálicas

- Extracción de nódulos de manganeso, explotación de filones hidrotermales ricos en minerales.



Courtesy of Seafloor Geoservices





## Conclusiones a partir de las tablas anteriores:



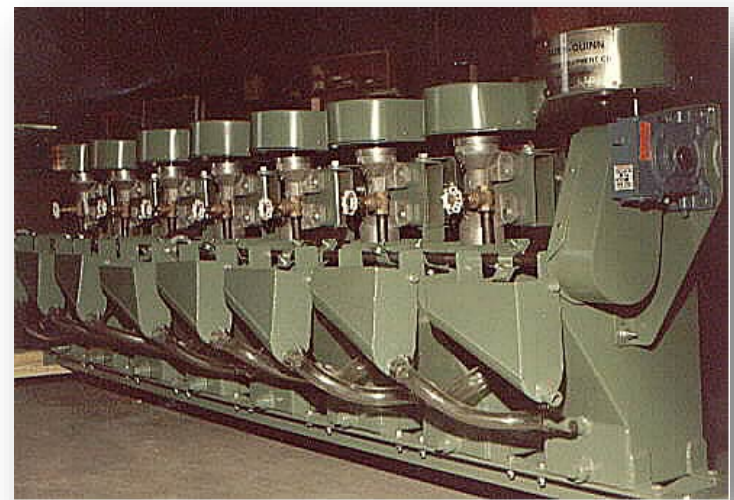
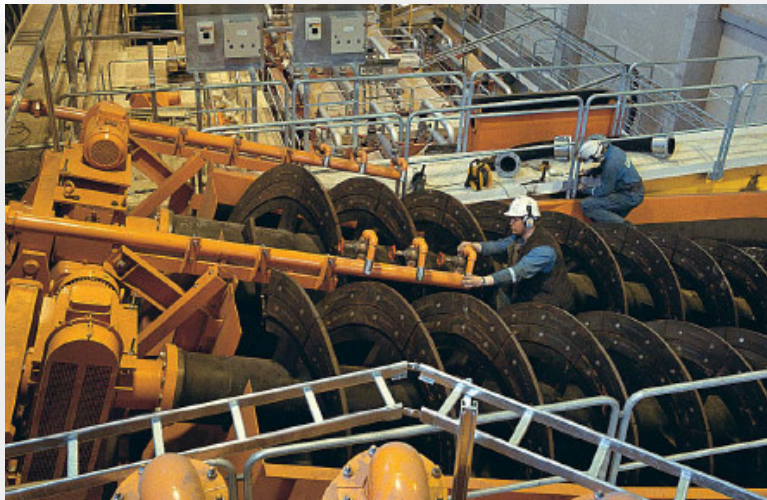
- Si los minerales estuvieran uniformemente distribuidos en la corteza terrestre, su dispersión sería tal que su recuperación económica sería impensable.
- La ocurrencia de depósitos minerales dependerá de las condiciones geológicas a las que se ha visto sometido un mineral (transformación físico-química, erosión, transporte, clasificación, deposición, compactación, etc.).
- Estas acciones permitirán que dichas concentraciones de mineral permita su explotación tanto técnica como económica.





## Término minero de “mena” y “ganga”

- Los minerales generalmente se encuentran asociados a algún tipo de roca (la casiterita (mineral de estaño) al granito (roca ígnea) y a las rocas sedimentarias, con estas últimas formando depósitos aluviales).
- Se define **mena** como aquel mineral que se encuentra concentrado en cantidades significativas como para permitir su explotación con beneficio económico.
- Formando parte de la mena se encuentra material rocoso u otras especies minerales indeseables que hay que eliminar en un proceso mineralúrgico posterior. A esta parte de material se la denomina **ganga** o **estéril**.





## Tipos de mena

- Si se conocen atendiéndose al mineral principal podemos tener: menas nativas, menas de sulfuros, menas de óxidos (silicatos, óxidos, hidróxidos, carbonatos), también se pueden presentar una combinación de varios minerales valiosos definiendo lo que se conoce por menas complejas.
- Si se clasifican según la ganga entonces tenemos: menas calcáreas o básicas, o bien, menas silíceas o ácidas (ricas en sílice).





## Concepto de “ley”

- La mínima cantidad de metal contenida (en % o en ppm) en un depósito define su “ley”, y ésta clasifica la idoneidad de un depósito a ser explotado o no.
- La ley mínima para un depósito variará de un metal a otro, y depende entre otros factores del valor del metal en el mercado de valores.
- Como ejemplo, algunos depósitos no-ferrosos su explotación es económica para contenidos del 1% del metal durante la extracción del mineral.
- En el caso del oro, su explotación puede ser económica para depósitos auríferos conteniendo 1 parte por millón (ppm o g/t) de oro.
- Por otro lado, los depósitos de hierro con contenidos inferiores al 45% de Fe se considerarán depósitos de baja ley.
- Hay que hacer notar, que cambios en ciertas variables que influyen en el precio del metal o en el coste de extracción pueden hacer variar los límites anteriores (mercados, demandas, mejoras tecnológicas, situación geográfica del depósito, presión medioambiental, etc.).



## Concepto de “valor contenido” del depósito

- Cada tonelada de material que se extrae del depósito posee un “valor contenido”.
- Este valor depende del metal contenido en el depósito (ley) y del precio actualizado del metal en el mercado.





## Concepto de “valor contenido” del depósito

- Para que un depósito sea explotable se debe cumplir:

Valor contenido por tonelada  $\gg$  (costes totales de procesamiento + pérdidas + otros costes) por tonelada

### Ejercicio 1



Calcular el valor contenido por tonelada de un depósito que contiene un 1% de cobre y un 0.015% de molibdeno, conociendo que el valor del metal en el mercado es de 1800 €/t para el cobre y 20 €/kg para el molibdeno.



## Solución ejercicio 1

Solución:

Vamos a suponer 1 tonelada de todo-uno (mineral valioso + ganga), para este caso se tendría las siguientes partidas de mineral según leyes:

Mineral de cobre:

$1000 \text{ Kg (1 tonelada de todo-uno)} \times 0.01 \text{ (ley de cobre)} = 10 \text{ Kg por cada tonelada de todo-uno.}$

Mineral de molibdeno:

$1000 \text{ Kg} \times 0.00015 = 0.15 \text{ Kg por cada tonelada de todo-uno.}$

Ahora, habría que saber el dinero que se obtendría para dichas cantidades con los precios del mercado de metales que se facilitan en el enunciado:

## Solución ejercicio 1

Para el mineral de cobre:

$10 \text{ kg} \times 18 \text{ €/kg} = 18 \text{ €}$  por tonelada de todo-uno extraído.

Para el mineral de molibdeno:

$0.15 \text{ kg} \times 20 \text{ €/kg} = 3 \text{ €}$  por tonelada de todo-uno extraído.

Luego el valor contenido por tonelada extraída será de  $18 \text{ €} + 3 \text{ €} = 21 \text{ €}$





- Los costos de extracción son muy variables ya que pueden ir desde unos pocos **céntimos de euro** por tonelada hasta **60 €** la tonelada extraída.
- Las operaciones de extracción de gran escala (grandes tonelajes en movimiento) reducen los costes de operación pero obligan a elevadas inversiones iniciales.
- Lo anterior se justifica cuando se explotan depósitos de grandes dimensiones que amorticen la gran inversión inicial (varios años de producción).
- La minería de depósitos aluviales se caracteriza por emplear los métodos más baratos, así, ante grandes depósitos aluviales, pueden ser explotados económicamente aunque su ley sea muy baja.
- Por ejemplo, depósitos de estaño (Sn) con un valor contenido de 1.5 €/t y una ley del 0.01% en Sn han sido explotados con beneficio económico.



Minería aluvial de depósitos de diamantes (De Beers)



- Los métodos mineros a cielo abierto de grandes cortas y los métodos subterráneos de cámaras y pilares, por ejemplo, son apropiados para **depósitos de baja ley** como ocurre con algunos de cobre.
- Por otro lado, aquellos depósitos minerales que se deben explotar de forma selectiva, como el caso de los depósitos en forma de filón que deben ser explotados subterráneamente, los costes de extracción se disparan (30 €/t).
- Obviamente, un explotación selectiva de un depósito aluvial será antieconómico, pero un depósito formado por una roca dura y que contenga un 1.5 % en estaño, le daría un valor contenido de 63 €/t, haciéndolo económicamente explotable.



# Menas Metálicas

INTRODUCCIÓN: Menas Metálicas





- Para la obtención final de los metales a partir de la mena, estos deben ser separados a través de calor (**pirometalurgia**), a través de solventes (**hidrometalurgia**) o con electricidad (**electrometalurgia**), o una combinación de las anteriores.
- Estos procesos consumen enormes cantidades de energía, por ejemplo una tonelada de mineral de cobre consumirá de 1500-2000 kW·h de energía eléctrica lo que significa alrededor de 106 €/t.
- Las fundiciones generalmente se encuentran alejadas de los puntos de explotación, donde la energía se encuentra más barata, por lo que el mineral se debe transportar desde la mina hacia allí por ferrocarril o a través de buques.
- Para ello, con el fin de que el valor contenido merezca los costes de transporte y fundición, es necesario procesar el mineral previamente a pie de mina eliminando el estéril, a estas plantas de procesamiento se les conoce como molinos o concentradores y forman parte del procesamiento mineralúrgico del mineral.

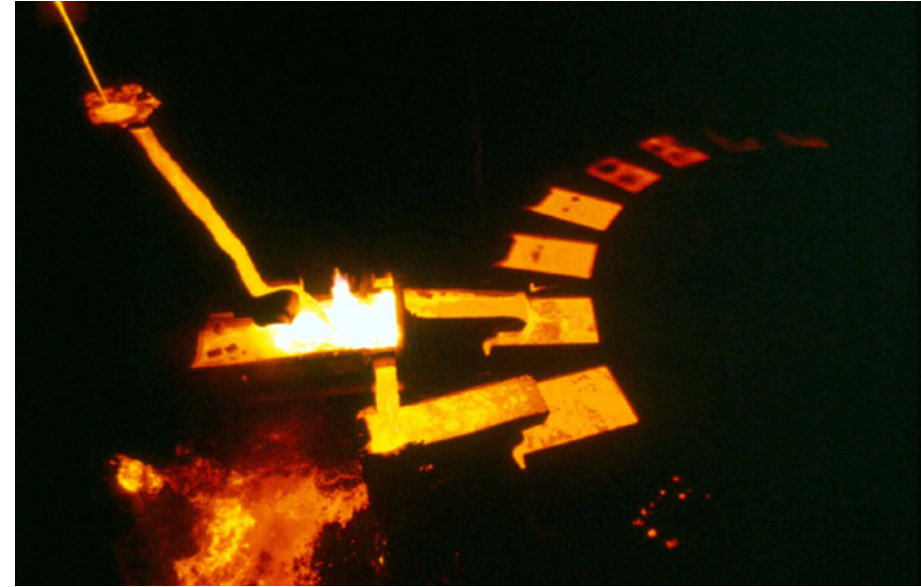


Plantas de procesamiento de minerales (De Beers)



# Menas Metálicas

INTRODUCCIÓN: Menas Metálicas



Hornos de fundición para la obtención del cobre, proceso pirometalúrgico (Codelco, Chile)



- Comparado con los métodos químicos, los métodos físicos consumen relativamente poca energía. Por ejemplo para incrementar la ley de cobre de un mineral desde un 1% hasta un 25% por medios físicos, el coste rondaría los 20-50 kWh<sup>t</sup><sup>-1</sup>.
- El procesamiento de minerales ayuda a reducir los costes de transporte al evitar transportar los estériles
- El procesamiento de minerales no sólo reducirá los costos de energía en la fundición sino también las pérdidas de metal, debido a la producción de una menor cantidad de escorias con contenido metal.
- Las fundiciones penalizan a los mineros cuando el concentrado que envían posee trazas o cantidades apreciables de elementos que perjudican el desarrollo de los procesos metalúrgicos o la pérdida de calidad de metal. Por ejemplo, es necesario eliminar la arsenopirita del concentrado de estaño ya que en la fundición es difícil eliminar el arsénico y daría lugar a un estaño de baja calidad.





- En el procesamiento de minerales, se deben tener en cuenta de los costes debidos a la molienda y las pérdidas que se producen en ella.
- Así, a medida que la capacidad de la planta se incrementa, esto significa un mayor coste de energía por tonelada tratada, llegando a constituir el coste de la molienda el 25% del coste total de un concentrador de 10000 t/día de capacidad.
- Otro factor, que puede afectar a la viabilidad de una explotación minera, son las pérdidas de mineral que se van a los estériles. Estas pérdidas dependerán de la mineralogía y de la dispersión de las especies minerales, así como de la tecnología disponible para alcanzar una eficiente concentración.
- Hay que decir, que el desarrollo de la flotación por espuma, permitió la explotación de grandes cantidades de mineral de cobre de baja ley que previamente se habían descartado por ser antieconómico.
- Otro ejemplo fue el uso de la extracción por solventes para tratar grandes cantidades de estériles de flotación (9 Mt/año) para obtener 80000 t de cobre (Nchanga Consolidated Copper Mines en Zambia).

# Menas Metálicas

INTRODUCCIÓN: Menas Metálicas





- El procesamiento de minerales no solo es la separación del estéril de la especie beneficiable sino también la separación entre otras especies beneficiables, por ejemplo los depósitos de pórfidos de cobre que son también importantes fuentes de molibdeno.
- En concentración es necesario prestar atención a los metales que van de un concentrador a otro (concentración selectiva), ya que si un metal va al concentrador equivocado su eliminación será difícil en el concentrado final y supondrá una penalización por parte de los fundidores.
- Las operaciones de procesado mineral son a menudo un compromiso entre las mejoras de la eficiencia metalúrgica y los costes de molienda, sobre todo con menas de bajo valor contenido, donde interesan bajos costes de molienda y unidades de proceso baratas, particularmente en las etapas finales.
- Con minerales de alto valor contenido, se buscará sin embargo la eficiencia metalúrgica con el fin de conseguir la máxima recuperación, empleado métodos mineralúrgicos más caros.

- Otros costes a tener en cuenta son los costes por suministro de energía, aire comprimido, agua, mantenimiento de carreteras o pistas, vertidos a depósitos de estériles, impuestos, inversiones en investigación y desarrollo, seguridad y salud, etc.





# Menas No-Metálicas

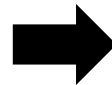
INTRODUCCIÓN: Menas No-Metálicas

- Las menas con valor económico se pueden clasificar como metálicas o no-metálicas, según el uso final que se le dará al mineral.
- Algunos minerales podrían ser extraídos y procesados para más de una finalidad.
- Así por ejemplo, la bauxita (óxido hidratado de aluminio) se considera mena metálica cuando se procesa para obtener el aluminio, sin embargo, cuando la bauxita se emplea como componente para la fabricación de ladrillos refractarios o abrasivos, en este caso la mena es no-metálica.
- Muchos minerales no-metálicos van asociados con minerales metálicos, por lo que son explotados y procesados de forma diferencial para su aprovechamiento económico, por ejemplo, la galena asociada con la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y la barita ( $\text{BaSO}_4$ ), ambos son minerales no-metálicos muy importantes.
- Las menas de diamantes tienen las leyes más bajas de todas las menas explotadas. Así, la mina más rica en términos de contenido en diamantes (Argyle en el oeste de Australia) presentaba leyes que llegaban hasta los 2 ppm en su última etapa de explotación. Los depósitos africanos de diamantes han sido explotados con leyes tan bajas como 0.01 ppm.



Clasificación manual de diamantes (De Beers)

Exploración mediante gravimetría en el Congo





# Depósitos de estériles

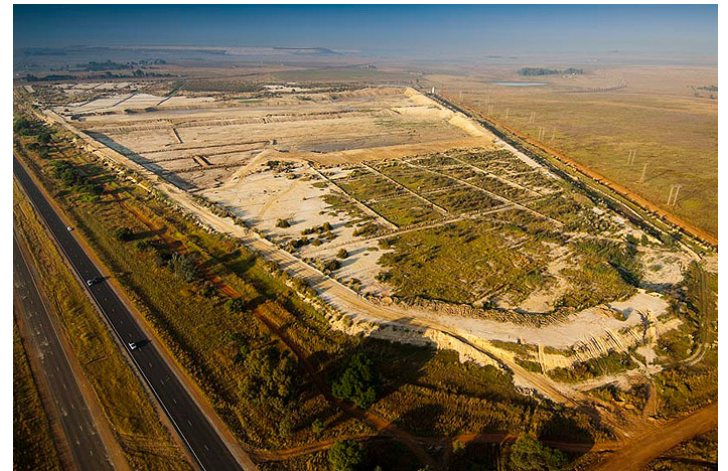
INTRODUCCIÓN: Depósitos de estériles

- Actualmente, depósitos de estériles procedentes de las etapas de molienda todavía contienen componentes de valor económico, constituyendo su explotación un fuente potencial de recursos minerales.
- La mejora tecnológica o la aparición de nuevas técnicas de procesado físico-químico permiten la recuperación de minerales que fueron vertidos a los depósitos de estériles en épocas que no se podían recuperar.
- Este retratamiento de los depósitos de estériles favorece la reducción de su impacto medioambiental en el entorno ya que reduce la cantidad acumulada, además de permitir un más adecuado reacondicionamiento del nuevo emplazamiento.
- El costo del retratamiento es inferior al coste del procesado original ya que el coste de extracción, trituración y molienda ya fue realizado en su momento original.
- Actualmente es larga la lista de empresas (India, Sudáfrica, Australia, Zambia, etc.) que se han especializado en el retratamiento de antiguos depósitos de estériles para aprovechar el contenido de metales como: oro, uranio, cobre, cobalto, grupo de los platinos.



# Depósitos de estériles

INTRODUCCIÓN: Depósitos de estériles



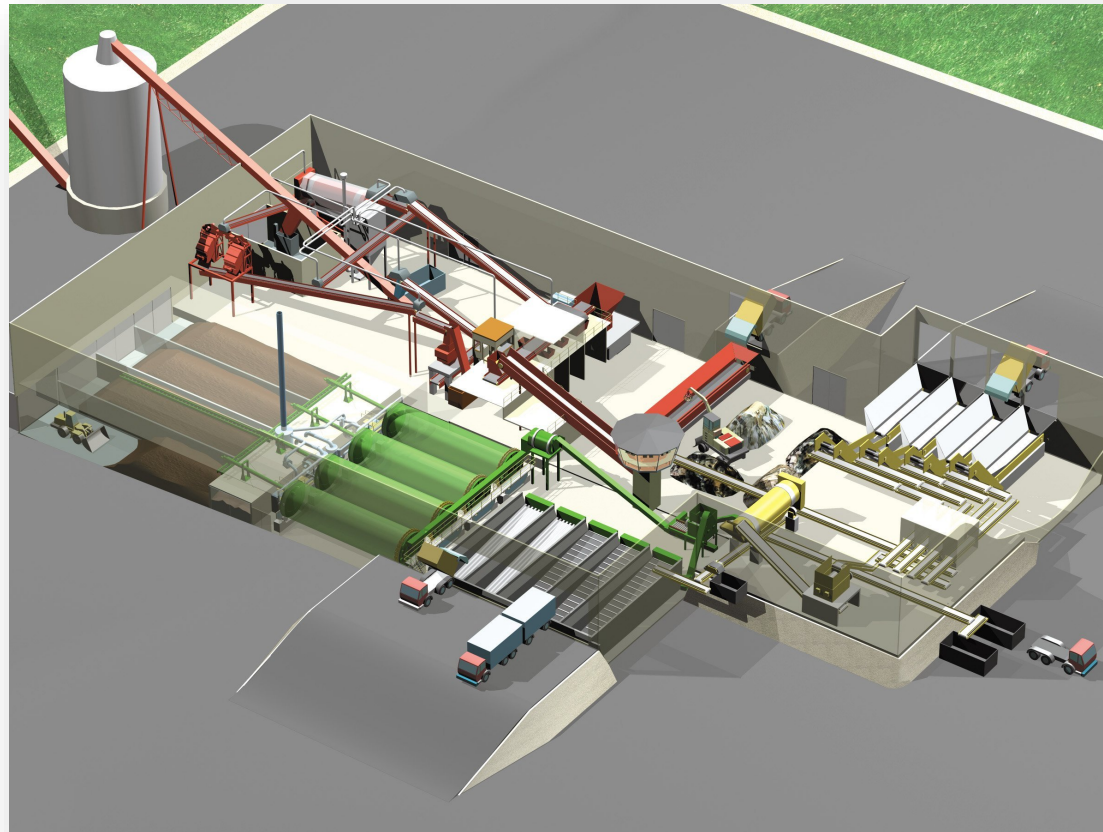
DRDGold-ERGOS retratando depósitos de estériles en Sudáfrica para la obtención oro y uranio



# Tratamiento de residuos

INTRODUCCIÓN: Tratamiento de RSU

- Hay que mencionar también que el tratamiento y reciclado de los desechos industriales y las basuras domésticas es una actividad económica en auge y en crecimiento.
- Esta actividad también es una rama del procesamiento de minerales con una diferente fuente de material y donde las operaciones se realizarán principalmente por vía seca.





## INTRODUCCIÓN: Tratamiento de RSU

---



jhp1830 www.fotosearch.com



u10034908 fotosearch.com



# Métodos de procesamiento de minerales

---

- En minería metálica, el **Todo-Uno** es el mineral que proviene del frente de mina, y lo constituye tanto el mineral beneficiable como el estéril.
- A continuación vendrán las etapas de procesamiento de minerales para preparar la mena con el fin de extraer el metal o las sustancias de valor económico de la ganga.
- Hoy en día, el procesamiento de minerales ha alcanzado un significativo desarrollo (técnicas, equipos, conocimiento de los fenómenos físico-químicos que intervienen, sistemas de control, simulación, etc.).
- Sin embargo, hace únicamente un siglo, el procesamiento era un proceso muy simple y artesanal, constituido por una separación gravimétrica muy rudimentaria y una posterior clasificación manual de los fragmentos minerales.
- Sin el extraordinario desarrollo que se ha experimentado en el procesamiento sería impensable la explotación y aprovechamiento de numerosas explotaciones metálicas.



**La gran mayoría de los minerales o sustancias minerales que se extraen de la mina o cantera no son aptos como producto final**



**Estas sustancias minerales requerirán una serie de etapas de preparación mineralúrgica.**



# Métodos de procesamiento de minerales

- Se puede decir que hay **dos operaciones principales** que tienen lugar a lo largo de la etapas del procesamiento de minerales: **liberación y concentración**.
- Se entiende como **liberación** la acción de romper los enlaces entre las especies beneficiables de aquellas otras indeseables o ganga. Esta acción será alcanzada principalmente por la conminución.
- Se entiende como **concentración** toda aquella acción, física o química, que favorece la separación de las especies beneficiables de las indeseables.





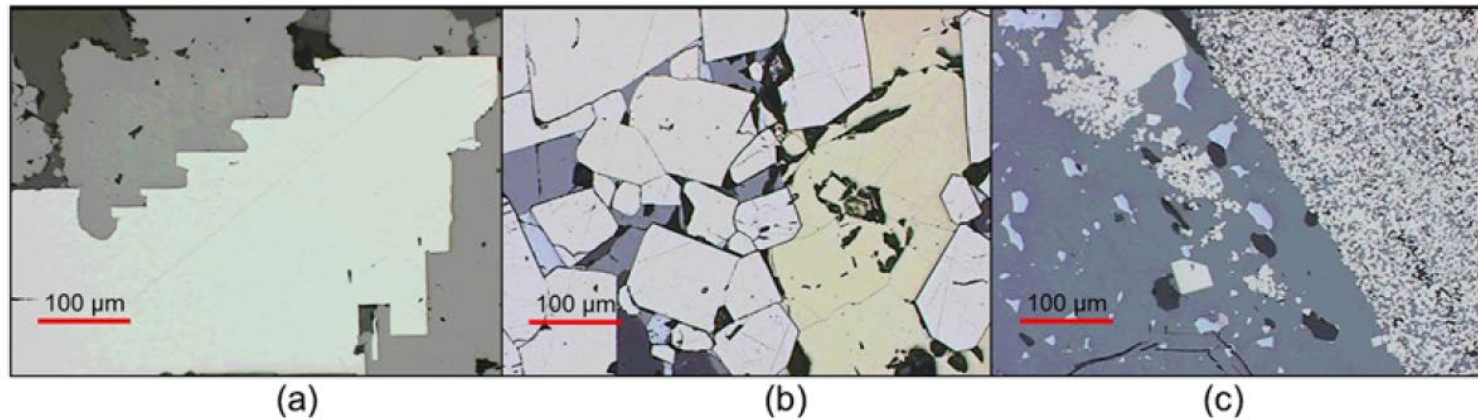
# Métodos de procesamiento de minerales

---

- Se requiere un conocimiento de la **textura** de las diferentes especies puestas en juego.
- La **textura** se refiere al **tamaño**, a la **diseminación**, al **tipo de asociación** y a la **forma** de los minerales dentro de la mena.
- Los aspectos mineralógicos de la mena son claves para predecir los requerimientos que exigirán las etapas de molienda y de concentración, las leyes viables de los concentradores o posibles dificultades de separación de las diferentes especies.
- **Análisis microscópicos** de los productos obtenidos en los concentrados y en los estériles también proporciona información importante que facilita información acerca del grado de eficiencia de los procesos de liberación y concentración (ver las siguientes figuras).

# Métodos de procesamiento de minerales

- Lo anterior es especialmente cierto, para averiguar la solución de problemas que surgen cuando se tiene una inadecuada liberación:



Micrographs showing range in ore texture: (a) galena/sphalerite (Pine Point, Canada), (b) sphalerite/chalcopyrite (Geco, Canada), and (c) galena/sphalerite/pyrite (Mt Isa, Australia) (Courtesy Giovanni Di Prisco).





# Métodos de procesamiento de minerales

Los métodos físicos de concentración más importantes son:

- Separación basada en propiedades ópticas (en inglés, “*sorting*”). Inicialmente se llevaba a cabo de forma manual, pero hoy en día se lleva a cabo con máquinas especializadas.
- Separación basada en las diferencias de densidad existentes entre las diferentes especies minerales. **Concentración gravimétrica.**
- Separación aprovechando las diferentes propiedades superficiales de los minerales frente al agua (hidrofobia, hidrofilia) o al aire (aerofobia, aerofilia). **Flotación.**
- Separación aprovechando las propiedades magnéticas de algunos minerales (magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), minerales de hierro, wolframita ((Fe, Mn)  $\text{WO}_4$ ), hematites ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), etc.). **Concentración magnética.**
- Separación aprovechando las características de conductividad eléctrica de los minerales. **Concentración electrostática.**



# Diagramas de flujo

---

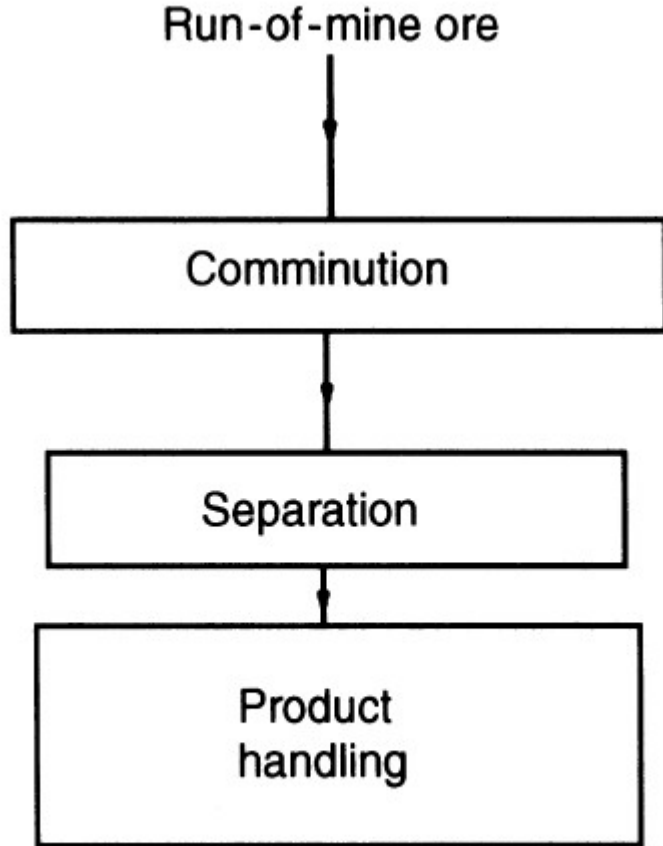
**La utilidad de los diagramas de flujo es:**

- **Presentar de forma rápida las diferentes unidades de proceso de la planta.**
- **Facilitar de forma esquemática y simplificada datos sobre capacidades, balances de materia, leyes, recuperaciones, etc.**
- **Indicar los diferentes flujos o caminos que toma el mineral y el estéril a partir de cada unidad de proceso.**
- **No obstante, los diagramas de flujos pueden llegar a hacerse muy elaborados indicando cualquier pequeño detalle de la planta.**

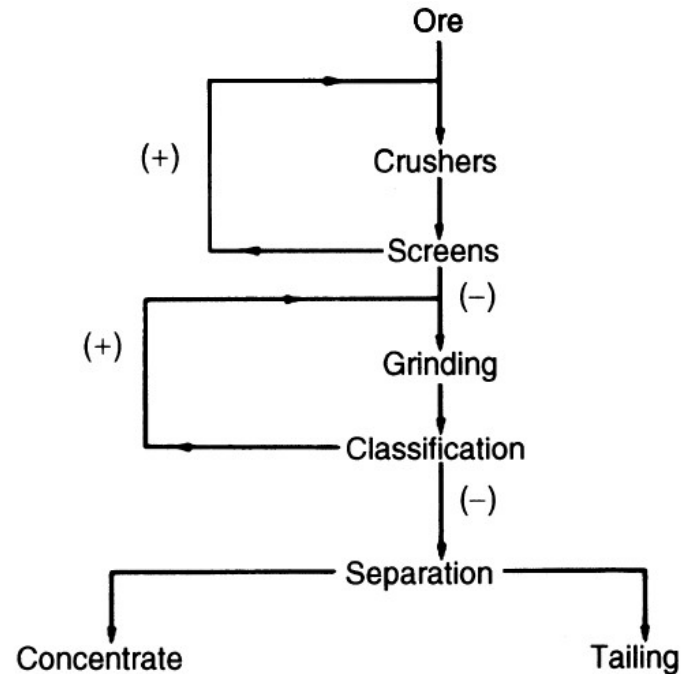


# Diagramas de flujo

## Ejemplos de diagramas simples:



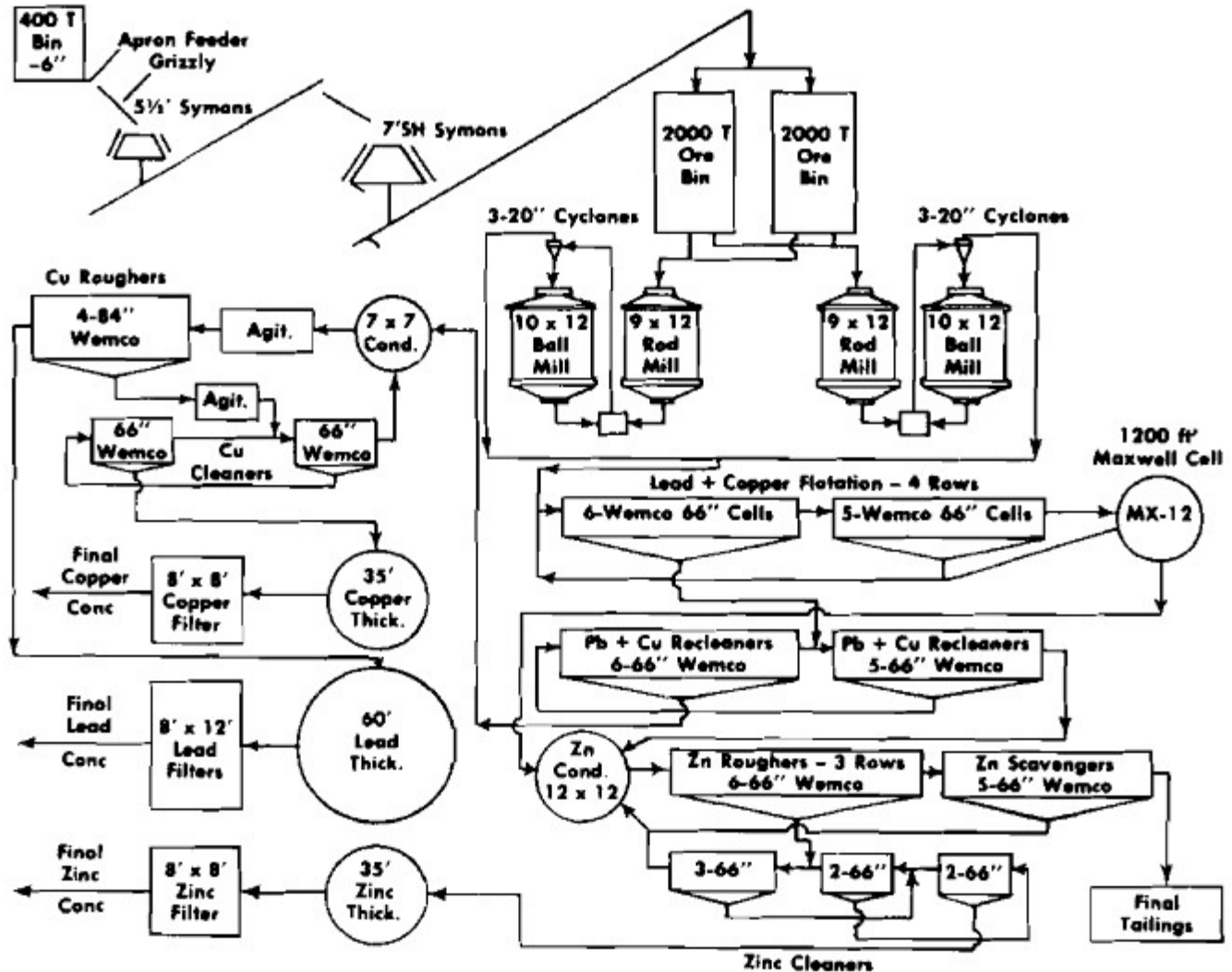
Simple block flowsheet



Line flowsheet. (+) indicates oversized material returned for further treatment and (-) undersized material

# Diagramas de flujo

## Ejemplo de diagrama algo más detallado:



Lead-zinc-copper separation, Magmont mill flowsheet.<sup>317</sup>



# Costes del procesamiento mineralúrgico

---

- El equilibrio entre el coste del procesamiento y las pérdidas en el estéril de parte del mineral vendible es crucial para la rentabilidad económica de la explotación minera, sobre todo con depósitos de baja ley.
- Para ello, se llevará una detallada contabilidad de los costes de operación y mantenimiento divididos en sub-áreas (operadores, suministros, energía, etc.) para las diferentes unidades de proceso.
- Se identificarán aquellas áreas de alto coste para intentar mejorar la productividad del proceso o reducir los costes.
- Los costes para cada unidad son muy variables de una mina a otra y están sujetos a diversos factores como: coste y cualificación del personal, disponibilidad de agua, energía, infraestructuras auxiliares, etc.



# Costes del proceso mineralúrgico

Coste parciales del procesado de una tonelada de mineral de cobre para un concentrador con una capacidad de 100000 t/d

<i>Item</i>	<i>Cost – US\$ per tonne</i>	<i>Percent cost</i>
Crushing	0.088	2.8
Grinding	1.482	47.0
Flotation	0.510	16.2
Thickening	0.111	3.5
Filtration	0.089	2.8
Tailings	0.161	5.1
Reagents	0.016	0.5
Pipeline	0.045	1.4
Water	0.252	8.0
Laboratory	0.048	1.5
Maintenance support	0.026	0.8
Management support	0.052	1.6
Administration	0.020	0.6
Other expenses	0.254	8.1
Total	3.154	100



# Liberación

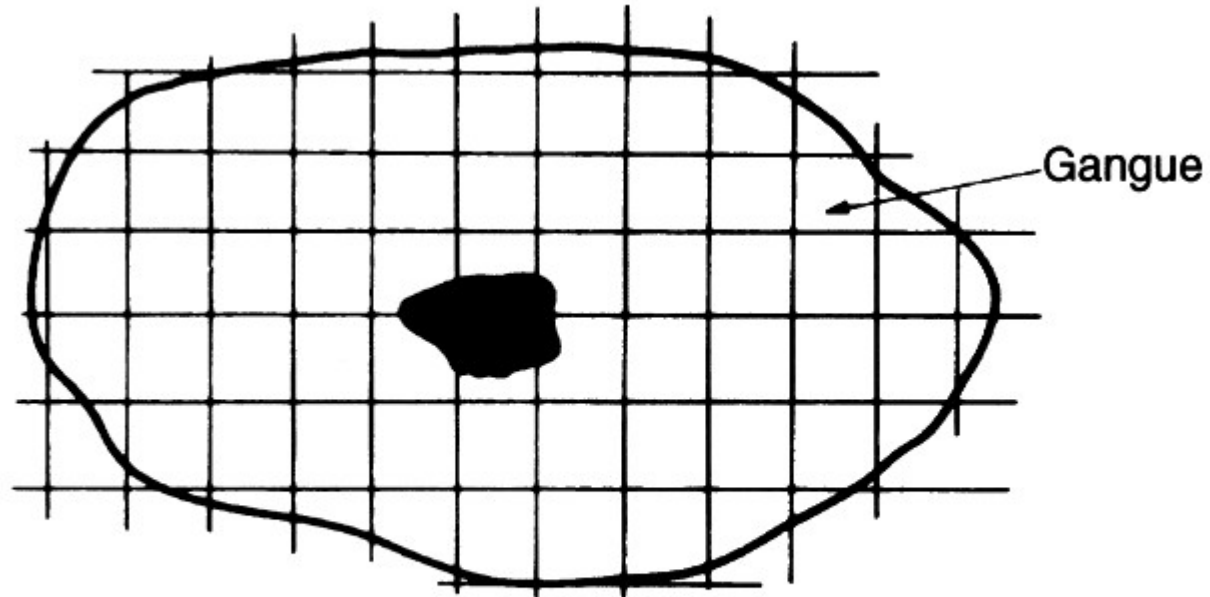
---

## Eficiencia de las operaciones de procesamiento de minerales

- **Uno de los principales objetivos de la conminución es la liberación de las especies minerales de valor de su unión con la ganga, intentándolo conseguir al máximo tamaño de partícula posible.**
- **La consecución del párrafo anterior significará ahorro de energía, y etapas posteriores donde el proceso de concentración será más fácil y barato.**
- **Cuando se necesitan concentrados de alta ley, es fundamental una buena liberación. Por otro lado, cuando el concentrado se va a llevar a etapas hidrometalúrgicas, la liberación no es tan importante como exponer la superficie del mineral para la reacción química.**
- **Hay que tener en cuenta que una liberación total se alcanza muy raramente incluso si la molienda llega hasta el tamaño de partícula deseado.**

# Liberación

Eficiencia de las operaciones de procesamiento de minerales



“Locking” of mineral and gangue

Siempre habrá partículas que contengan mineral beneficiable y ganga, conocidas como *medios* (en inglés, “*middlings*”).





# Liberación

---

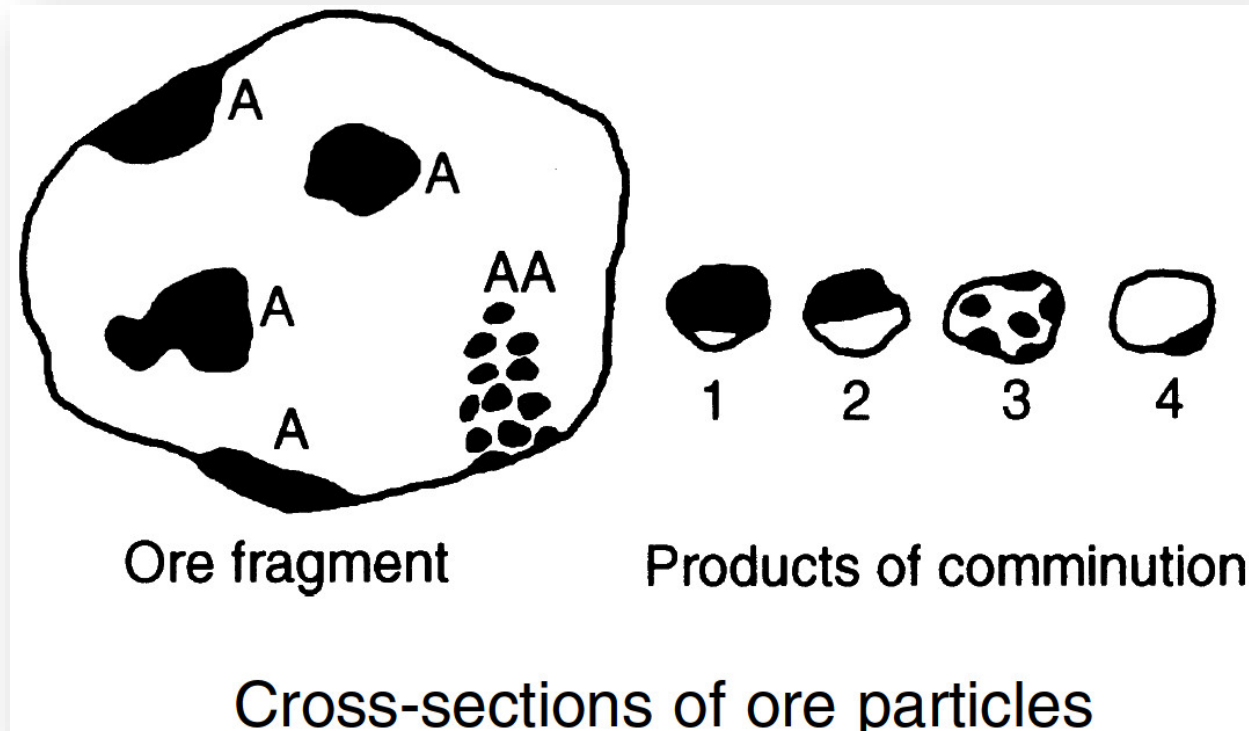
En mineralúrgica aparece el concepto de “grado de liberación”

- Se refiere al porcentaje de mineral valioso que se alcanzaría como partículas limpias de ganga en relación al contenido total en la mena.
- Un alto grado de liberación no siempre es necesario, dependiendo de los procesos a los que se someterá la mena. Por ejemplo, empleando separación gravimétrica o magnética, aunque no pasará lo mismo para el proceso de flotación, donde se requiere una molienda fina para exponer la superficie del mineral a los reactivos químicos.
- El grado de molienda óptimo que será necesario alcanzar se obtiene a través de plantas piloto y ensayos de laboratorio, a partir de ahí se decidirá la malla óptima de molienda que producirá la liberación al menor coste posible.
- Con los medios, se podría requerir nuevas remoliendas con el fin de que con los estériles vaya la mínima cantidad posible de mineral valioso.



# Liberación

Diferentes productos en base a la liberación del mineral valioso

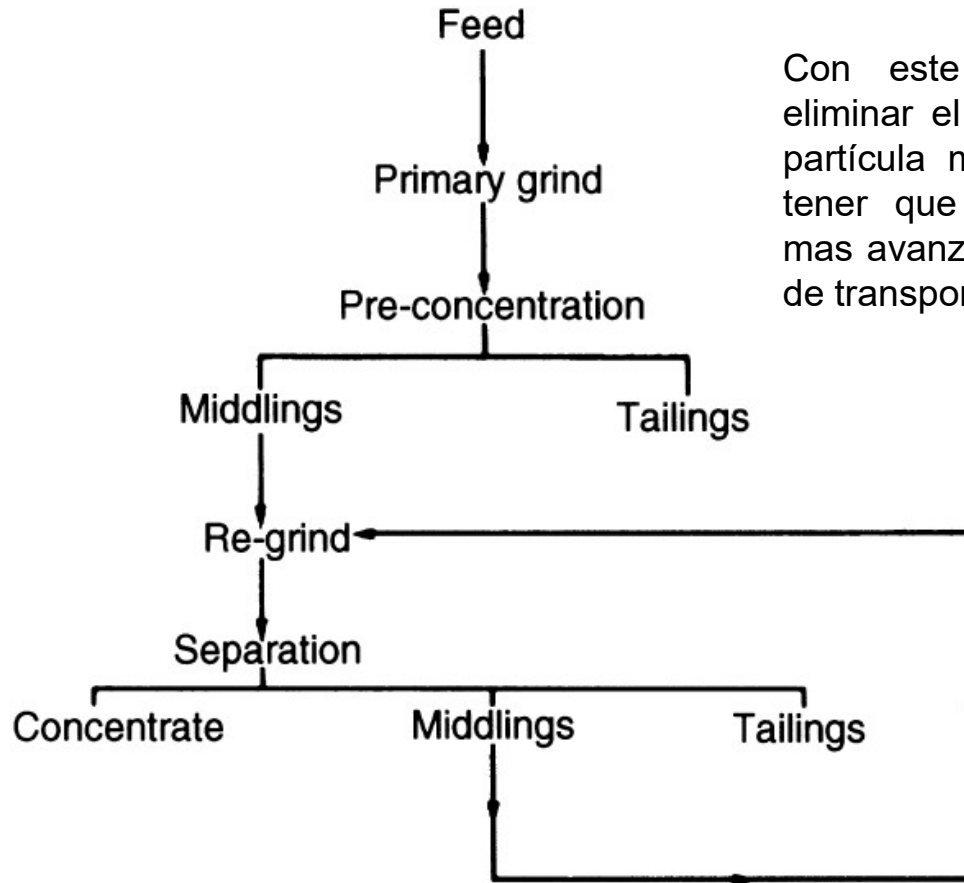


1.- concentrado; 2.- 3.- medios; 4.- estéril.



# Liberación

## Diagrama de flujo típico para cuando se producen medios



Con este circuito se consigue eliminar el estéril a un tamaño de partícula más grueso y así evitar tener que transportarlo a etapas más avanzadas = ahorro en costes de transporte, energía, etc.

Flowsheet for process utilising two-stage separation



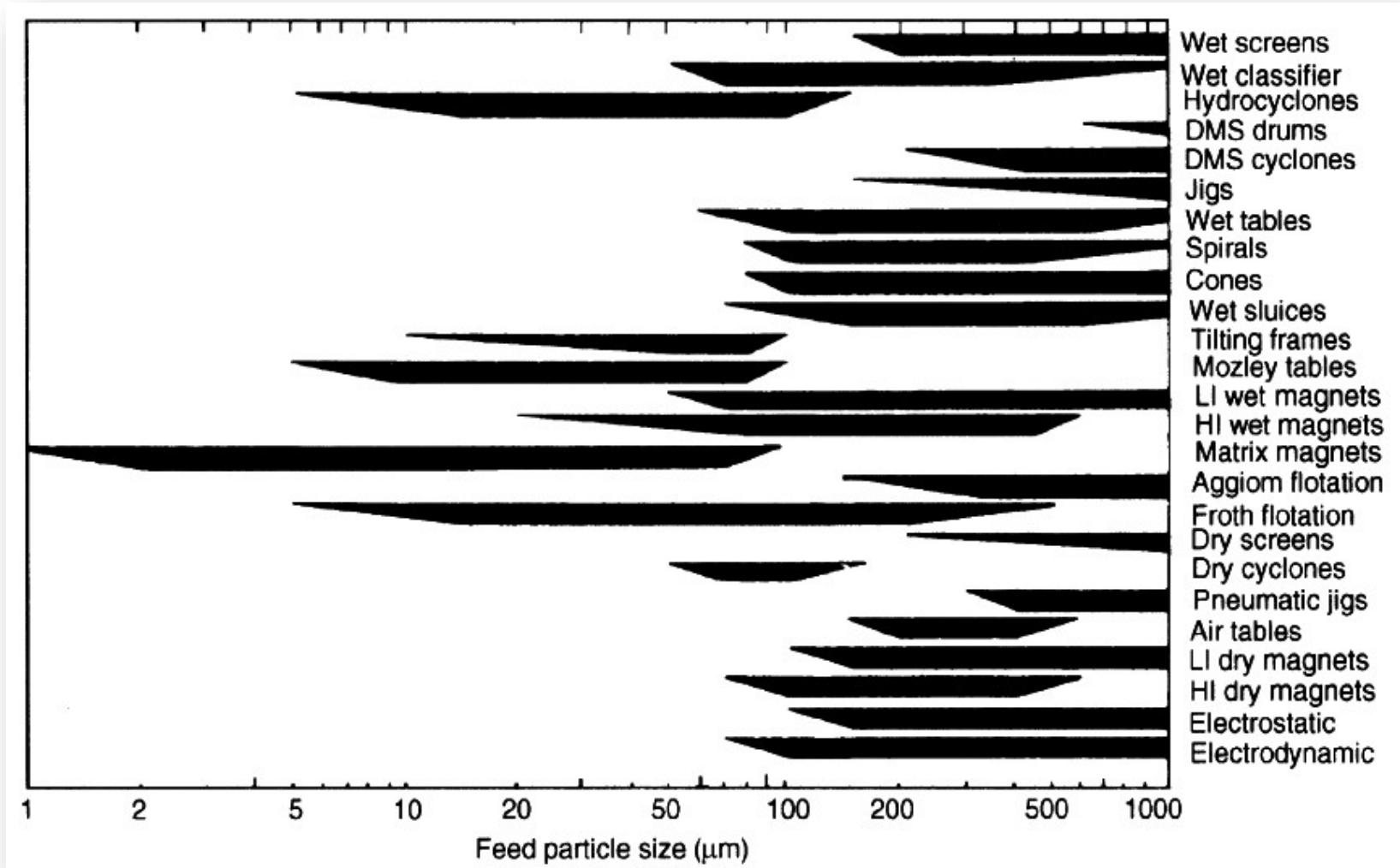
# Concentración

- El objetivo del procesamiento de minerales, independientemente del método empleado, siempre será el mismo: separar la mena en dos o más productos, exigiéndole que el **mineral valioso** vaya en el circuito de concentrados, la **ganga** en el de estériles y las diferentes partículas (**medios**) que aún van unidas que vayan por el circuito de medios.
- Lo anterior que puede parecer lógico y sencillo, no llega nunca a darse al 100 %, encontrando ganga o mineral valioso ya liberado en el circuito de medios, o en el circuito de estériles. Esto es especialmente cierto cuando se manejan partículas muy finas, donde la eficiencia en la concentración de algunos equipos disminuye.
- Debido a las dificultades de concentrar partículas muy finas, se ha establecido que partículas por debajo de las 10 micras para ciertos minerales se manden directamente a los estériles, así a finales de la década de los 70, el 50% del estaño producido en Bolivia, el 30% de los fosfatos producidos en Florida, y el 20% del tungsteno producido en el mundo fueron perdidos como finos.
- Se tienen datos que significativas cantidades de cobre, uranio, bauxita, zinc y hierro fueron también enviadas a estériles en similares circunstancias.



# Liberación

## Rangos de trabajo para los principales métodos de concentración



# Concentración



- Hay que señalar que el proceso de concentración está limitado por la naturaleza mineralógica del mineral valioso (pirita, ilmenita, casiterita, calcopirita, bauxita, magnetita, pirolusita, etc.).
- Así un concentrado de cobre nativo puede llegar al 100% de ley, pero un mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la mejor ley de cobre que se podría conseguir en el concentrado sería del 34%.
- Lo anterior se puede calcular fácilmente como sigue:
  - Peso atómico del cobre = 63.41
  - Peso atómico del hierro = 55.93
  - Peso atómico de dos átomos de azufre = 64.13
  - Peso atómico total de la molécula de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) = 183.47
- Luego si en el concentrado todo fuera calcopirita (algo irreal, pero válido para nuestro supuesto), por cada 183.47 t de concentrado se tendrían 63.41 t de cobre, o lo que es lo mismo un 34 % en peso de cobre (ley)!!!.



Cálculo de la ley en el mineral de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



# Concepto de recuperación

- La recuperación, para el caso de la concentración de una mena metálica, significará el porcentaje del metal que es recuperado en el concentrado en relación a la cantidad total del metal en la mena.
- Así una recuperación del 90% significará que el 90% del metal de la mena se recuperará en los concentrados y un 10% de ese metal será perdido en los estériles.
- En relación a las menas no-metálicas, la recuperación se refiere al porcentaje de mineral que es recuperado en el concentrado en relación a la cantidad total de mineral en la mena.
- También hay que subrayar el concepto de recuperación para una determinada unidad de proceso, que se referiría a la cantidad de mineral valioso (o metal) que se obtendría a la salida de concentrados en relación a la cantidad del mismo mineral (o metal) a la entrada de dicha unidad (alimentación):

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{peso total del compuesto beneficiable a la salida}}{\text{peso total del compuesto beneficiable a la entrada}} \times 100$$



# Concepto de ley

- La ley (en inglés, “*grade*” o “*assay*”) se refiere al contenido de mineral valioso (o metal) en un punto de la corriente en relación al contenido total de especies minerales (mineral o metal, más estéril) en ese mismo punto del circuito:

$$\text{Ley} = \frac{\text{peso del compuesto beneficiable en la corriente}}{\text{peso del compuesto beneficiable y del estéril en la corriente}} \times 100$$



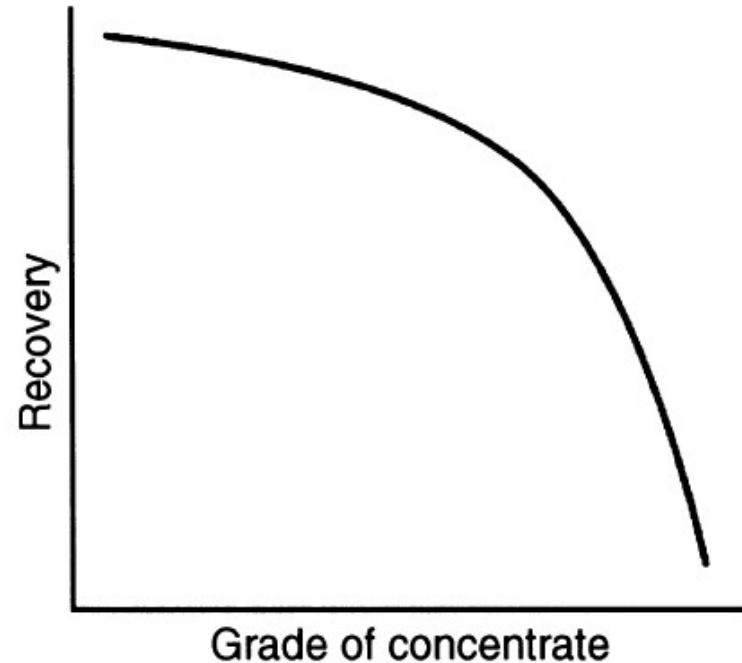




# Curva recuperación-ley

- Es importante subrayar que existe una relación inversa entre el valor de la recuperación y la ley para cada unidad de procesamiento, es decir, si una unidad de concentración persigue altas leyes en el concentrado, esto se conseguirá a expensas de recuperaciones inferiores, por el contrario, muy altas recuperaciones supondrá menores leyes en el concentrado como consecuencia de una mayor entrada de estériles.

Ley?, Recuperación?, Umm...!!!



Typical recovery-grade curve

# Concepto de Eficiencia de la separación

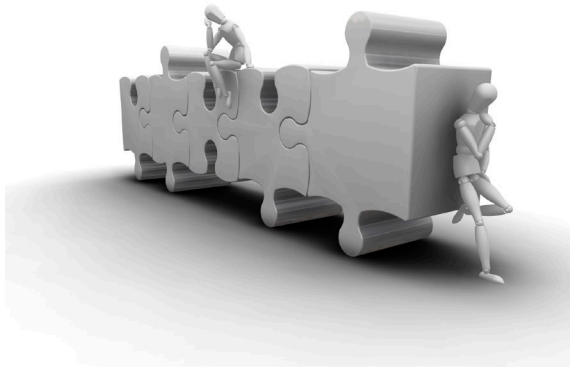
- Cuando se quiere analizar el desarrollo de una unidad de concentración, los dos parámetros que se utilizan es la ley y la recuperación, pero, sin embargo, cuando esa unidad puede presentar diferentes valores de recuperación y de ley según la configuración seleccionada para sus variables de operación, entonces se emplea el concepto de *eficiencia de la separación* (E.S.):

$$E.S. (\%) = R_m (\%) - R_g (\%)$$

$R_m$  = Recuperación del metal o mineral valioso

$R_g$  = Recuperación de la ganga

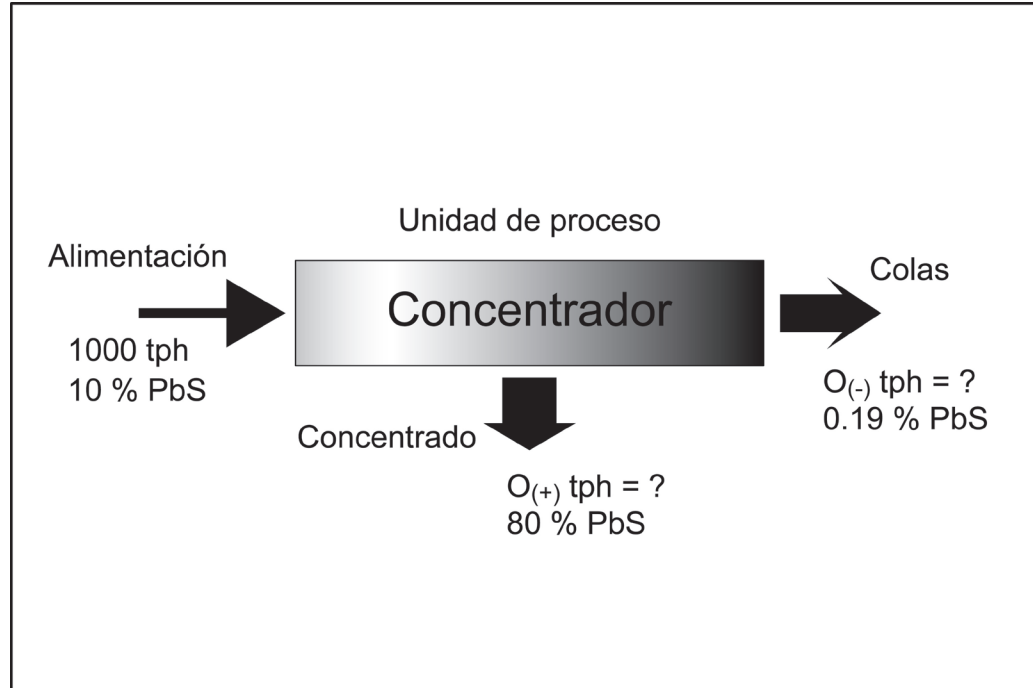
- Hay que hacer notar que la eficiencia de la separación cuantifica “técnicamente” la eficiencia del proceso para llevar a cabo la concentración, pero no tiene en cuenta otros factores importantes como los económicos.



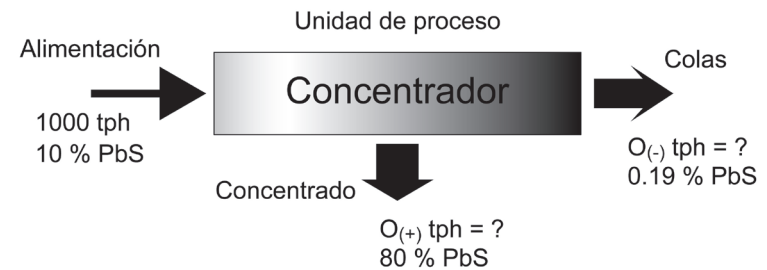
# Recuperación y ley. Casos prácticos

## Ejercicio 2

Un concentrador de plomo recibe una alimentación cuyo análisis da una ley del 10% en PbS (Galena), a un ritmo de procesamiento de 1000 tph. El concentrador produce un concentrado con una ley del 80% en galena y unas colas con una ley del 0.19%. Utilizando las expresiones facilitadas anteriormente para la recuperación y la ley, intenta calcular las cantidades de galena en las diferentes salidas del concentrador. Nota.  $O(+)$  y  $O(-)$  se refieren a cantidades totales de mineral valioso más estéril, a la salida del concentrador y de las colas, respectivamente.



## Solución Ejercicio 2



Solución:

Este tipo de problemas se denominan “de balance de materia” ya que la cantidad de material que entra debe ser igual a la suma de las cantidades parciales que salen por las diferentes salidas (concentrado, medios y estériles). Puesto que la unidad proceso actúa (química o físicamente) sobre las diferentes sustancias pero sin eliminar ni producir nuevo material.

Basándonos en el principio anterior tenemos que buscar las ecuaciones que nos proporcionen las cantidades de galena (PbS) en las diferentes salidas (incógnitas):

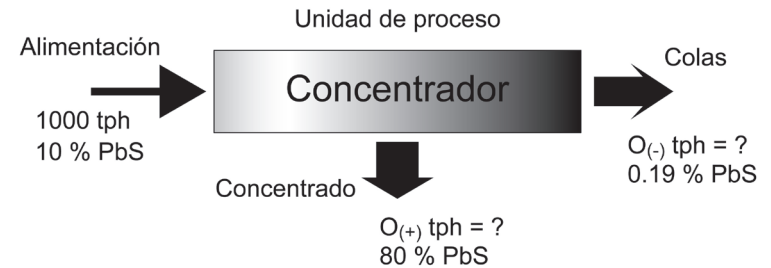
1ª ecuación utilizando la expresión de la ley a la salida de las colas, B:

Se debe cumplir la siguiente igualdad:

$$0.19 = x \text{ tph (PbS)} / (x \text{ tph (PbS)} + y \text{ tph (ganga)}) \times 100;$$

Donde, x e y son incógnitas a resolver.

## Solución Ejercicio 2



2ª ecuación utilizando la expresión de la ley a la salida de los concentrados, C:

Se debe cumplir la siguiente igualdad:

$$80 = z \text{ tph (PbS)} / (z \text{ tph (PbS)} + w \text{ tph (ganga)}) \times 100;$$

Donde, z e w son las otras incógnitas a resolver.

3ª ecuación:

Según la ley de galena a la entrada, A, se tiene:

$$1000 \text{ tph} \times 0.1 \text{ (PbS)} = 100 \text{ tph de galena están entrando por A, luego:}$$

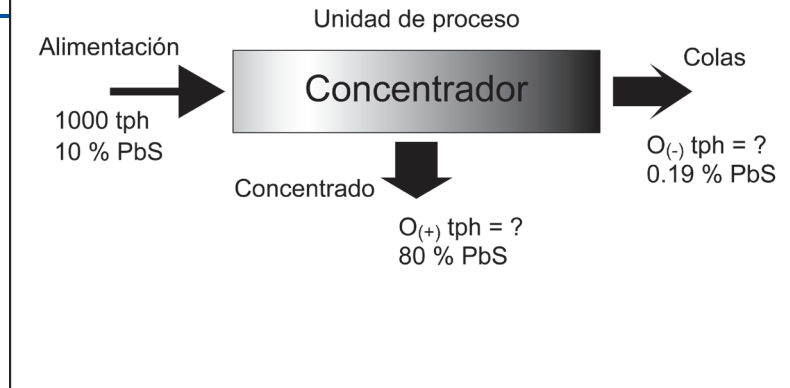
$$100 \text{ (tph)} = x \text{ (tph)} + z \text{ (tph);}$$

4ª ecuación:

A la entrada A se cumple que la cantidad de colas cumplirá la igualdad:

$$900 \text{ (tph)} = y \text{ (tph)} + w \text{ (tph);}$$

## Solución Ejercicio 2



Por consiguiente, ya tenemos cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas que se resuelven haciendo cambios de variables y sustituyéndolas en las igualdades correspondientes.

Al final de este proceso se tiene que obtener los siguientes valores:

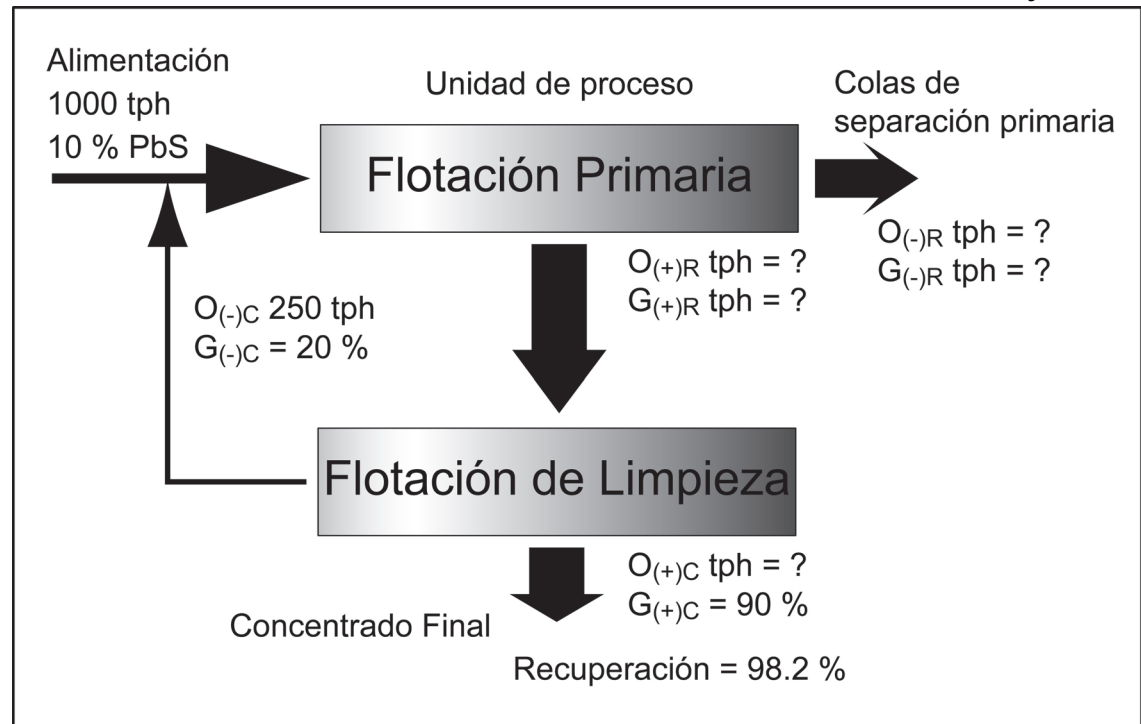
$$x = 1.66 \text{ tph de PbS} \quad ; \quad z = 98.34 \text{ tph de PbS}$$

$$y = 875.42 \text{ tph de colas} \quad ; \quad w = 24.58 \text{ tph de colas}$$

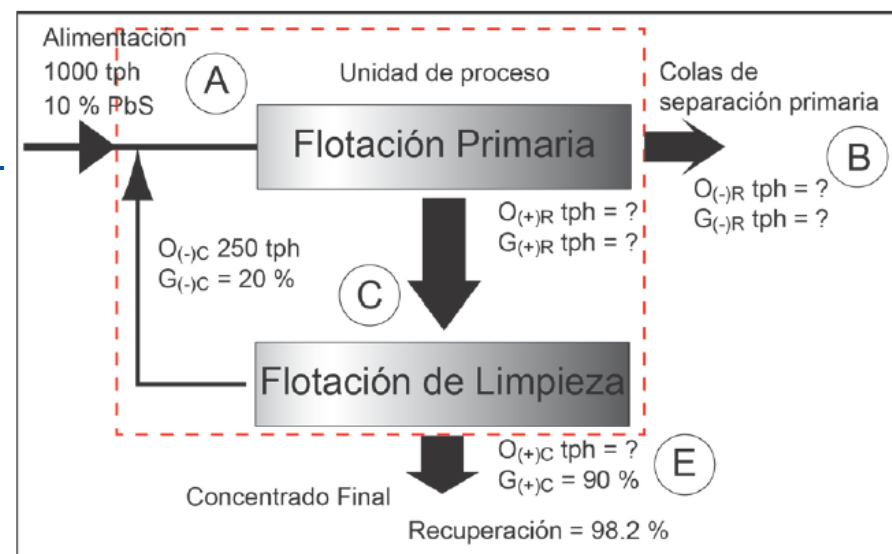


## Ejercicio 3

Un circuito de flotación con dos unidades (primaria-limpiadora) da un concentrado de PbS. La colas de la unidad limpiadora presentan una ley del 20%, las cuales se devuelven en circuito cerrado a la unidad primaria, cuya carga circulante es de 250 t/h (0.25). La alimentación tiene una ley del 10% y entra a un ritmo de 1000 tph. La recuperación y la ley del concentrado son del 98.2% y 90%, respectivamente. Calcular las cantidades y las leyes de las salidas restantes. Nota. O(+) y O(-) se refieren a cantidades totales de mineral valioso más estéril, a la salida del concentrador y de las colas, respectivamente.



# Solución Ejercicio 3



Solución:

Vamos a aprovecharnos primeramente del dato de la recuperación (98.2%), pero antes de seguir, consideraremos el balance de material que ocurre en los límites del cuadrado, delimitado por la línea roja a trazos, el cual engloba a las dos unidades de proceso considerándolas como una sola unidad.

Por ello, podremos escribir lo siguiente, según la expresión de la recuperación:

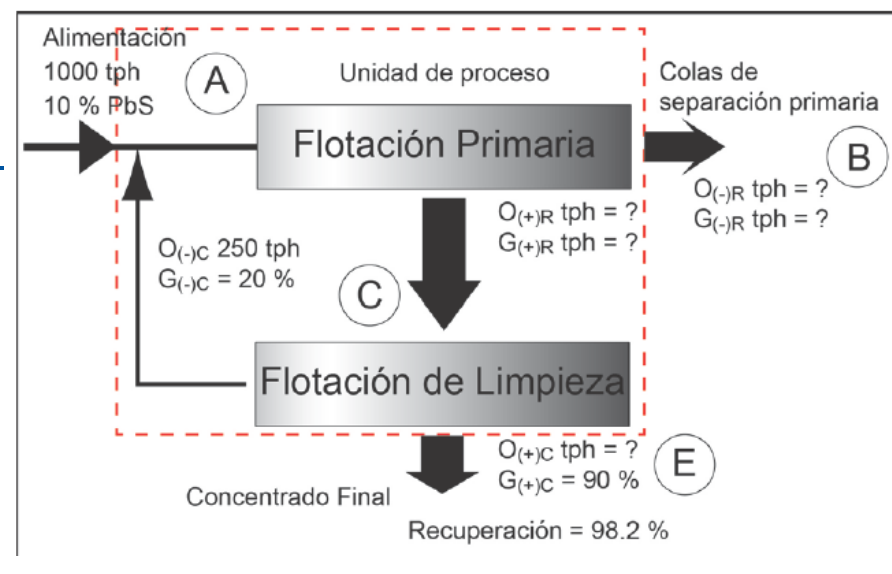
$$98.2 = x (\text{tph de PbS}) / (1000 \times 0.1 (\text{tph de PbS a la entrada})) \times 100;$$

$$x = \underline{98.2 \text{ tph de PbS a la salida en E}} (G_{(+ )C})$$

Ahora sabiendo que a dicha cantidad le corresponde una ley del 90%, el total que sale por E será por tanto:



# Solución Ejercicio 3



$$O_{(+),c} = (98.2 \text{ (tph)} \times 100\%) / 90\% = \underline{109.11 \text{ tph}} \text{ de material total } \epsilon$$

En C se debe cumplir:

$$O_{(+),R} = 250 \text{ (tph)} + 109.11 \text{ (tph)} = \underline{359 \text{ tph}} \text{ de material total}$$

$$G_{(+),R} = 98.2 \text{ (tph)} + 50 \text{ (tph)} = \underline{148.2 \text{ tph}} \text{ de PbS}$$

Y en B:

$$O_{(-),R} = 1000 \text{ (tph)} + 250 \text{ (tph)} - 359 \text{ (tph)} = \underline{890.89 \text{ tph}} \text{ de material total}$$

$$G_{(-),R} = 100 \text{ (tph)} + 50 \text{ (tph)} - 148.2 \text{ (tph)} = \underline{18 \text{ tph}} \text{ de PbS}$$



# Eficiencia de la separación. Casos prácticos

## Ejercicio 4

Un concentrador de mineral de estaño, procesa una alimentación con una ley en estaño del 1% a un ritmo de 1000 t/h. Según la configuración de las variables que modifican las condiciones de trabajo de la unidad, se pueden presentar tres tipos de concentrado en base a sus valores de ley y recuperación.

Concentrado de alta ley = 63% de ley con una recuperación del 62%

Concentrado de media ley = 42% de ley con una recuperación del 72%

Concentrado de baja ley = 21% de ley con una recuperación del 78%

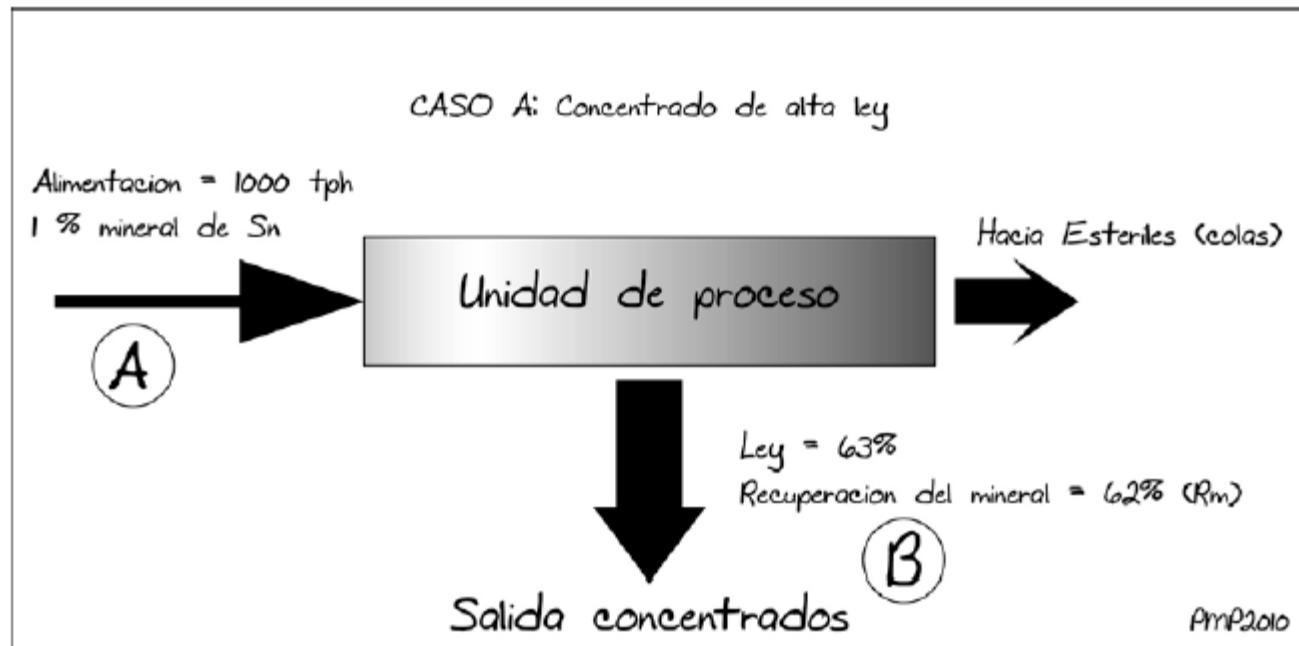
Determina cual de estas combinaciones de ley y recuperación produce la mayor eficiencia de separación (E.S.) de la unidad.

# Solución Ejercicio 4

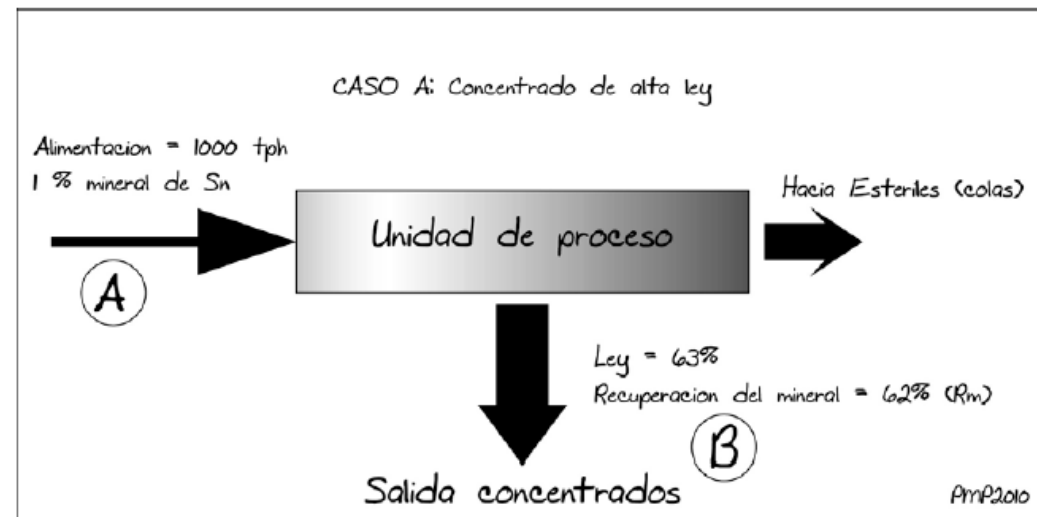
Solución:

Se recomienda hacer esquemas simples de flujo para entender lo que ocurre en la unidad de proceso (sus entradas y salidas) y no cometer errores fáciles de exceso o defecto de material en los cálculos.

Así por ejemplo para el primer supuesto de concentrado de alta ley se tiene lo siguiente:



# Solución Ejercicio 4



## Datos de partida:

La cantidad de mineral de estaño que entra en la alimentación será:

$$1000 \text{ tph} \times 0.01 \text{ (ley en Sn)} = 10 \text{ tph de mineral de estaño}$$

La cantidad de ganga que entra en la alimentación será por consiguiente:

$$1000 \text{ tph} - 10 \text{ tph} = 990 \text{ tph de ganga}$$

Los anteriores valores serán válidos para los tres supuestos planteados.

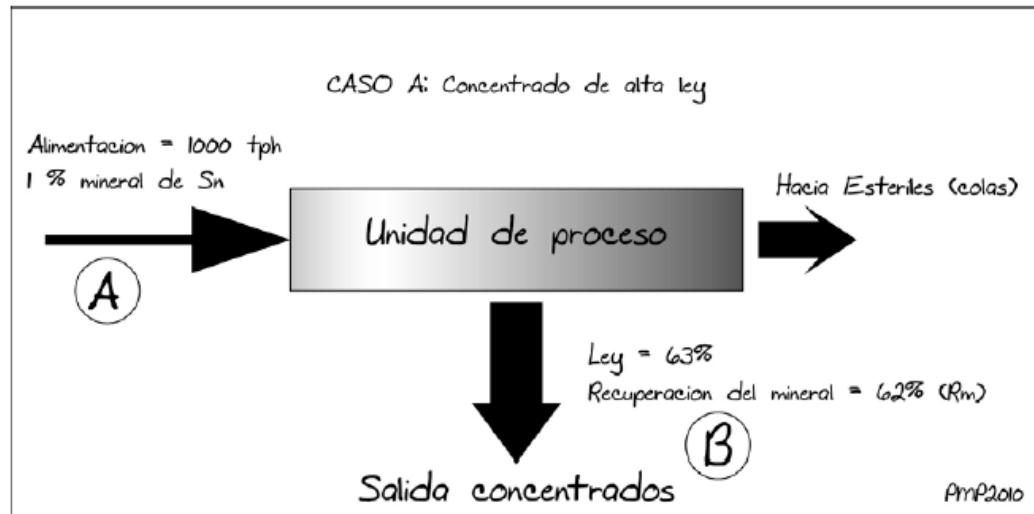
## CASO A: Concentrado de alta ley

Calculamos, empleando la expresión de la recuperación del mineral, la cantidad total de material, T, (mineral + ganga) que se obtiene por B.

$$62\% = (T \times 0.63 \text{ (tph mineral de estaño)} / 10 \text{ (mineral de estaño a la entrada)}) \times 100$$



# Solución Ejercicio 4



Siendo  $T = 9.84$  tph el total de material

Ahora calculamos la cantidad de mineral de estaño que sale por B

9,84 tph total ..... 100%

Y tph de Sn ..... 63%

Obteniendo un valor de  $Y = 6.20$  tph de mineral de estaño. Donde, por lo tanto,

$9.84$  tph -  $6.20$  tph =  $3.64$  tph de ganga saliendo por B.

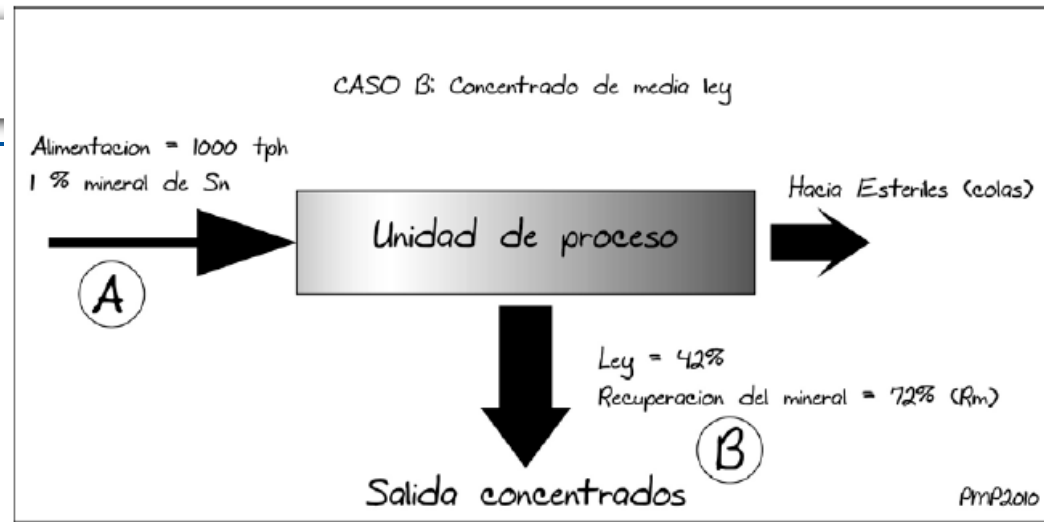
A continuación, calculamos la recuperación para la ganga:

$$R_m = (3.64 \text{ tph} / 990 \text{ tph}) \times 100 = 0.37\%$$

Así, la eficiencia de la separación (E.S.) para este caso valdrá:

$$\text{Eficiencia de la separación} = 62\% - 0.37\% = 61.63\%$$

# Solución Ejercicio 4



## CASO B: Concentrado de media ley

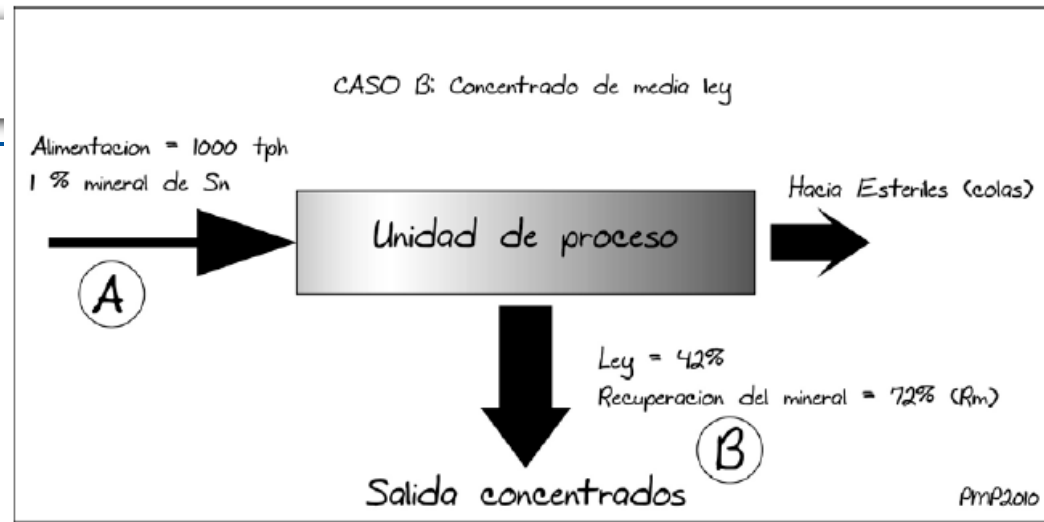
Calculamos, empleando la expresión de la recuperación del mineral, la cantidad total de material, T, (mineral + ganga) que se obtiene por B.

$$72\% = (T \times 0.42 \text{ (tph mineral de estaño)} / 10 \text{ tph (mineral de estaño a la entrada)}) \times 100$$

Siendo T = 17.14 tph el total de material

Ahora calculamos la cantidad de mineral de estaño que sale por B

# Solución Ejercicio 4



17,14 tph total ..... 100%

Y tph de Sn ..... 42%

Obteniendo un valor de  $Y = 7.20$  tph de mineral de estaño. Donde, por lo tanto,  
 $17.14 \text{ tph} - 7.20 \text{ tph} = 9.94 \text{ tph}$  de ganga saliendo por B.

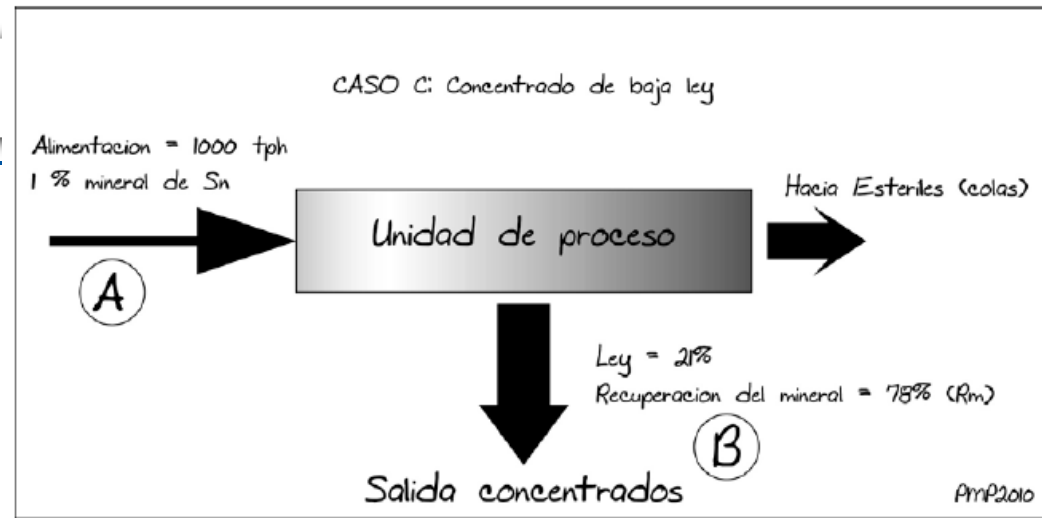
A continuación, calculamos la recuperación para la ganga:

$$R_m = (9.94 \text{ tph} / 990 \text{ tph}) \times 100 = \underline{1.00\%}$$

Así, la eficiencia de la separación (E.S.) para este caso valdrá:

$$\text{Eficiencia de la separación} = 72\% - 1.00\% = \underline{71.00\%}$$

# Solución Ejercicio 4



CASO C: Concentrado de baja ley

Calculamos, empleando la expresión de la recuperación del mineral, la cantidad total de material,  $T$ , (mineral + ganga) que se obtiene por B.

$$78\% = (T \times 0.21 \text{ (tph mineral de estaño)} / 10 \text{ tph (mineral de estaño a la entrada)}) \times 100$$

Siendo  $T = 37.14 \text{ tph}$  el total de material

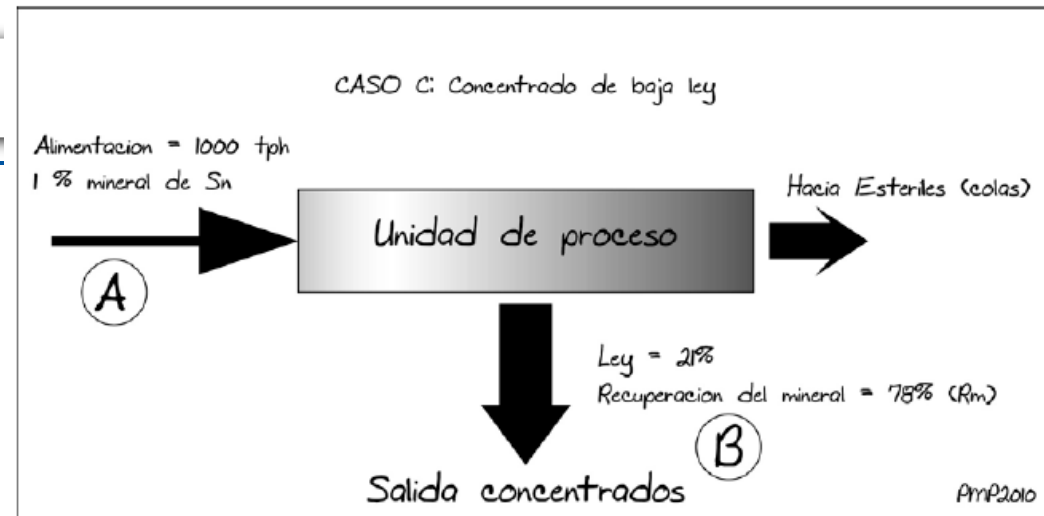
Ahora calculamos la cantidad de mineral de estaño que sale por B

37,14 tph total ..... 100%

$Y$  tph de Sn ..... 21%



## Solución Ejercicio 4



Obteniendo un valor de  $Y = 7.80$  tph de mineral de estaño. Donde, por lo tanto,  
 $37.14$  tph -  $7.80$  tph =  $29.34$  tph de ganga saliendo por B.

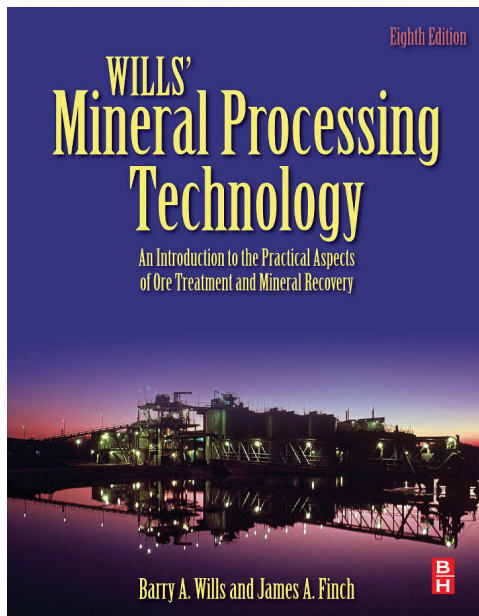
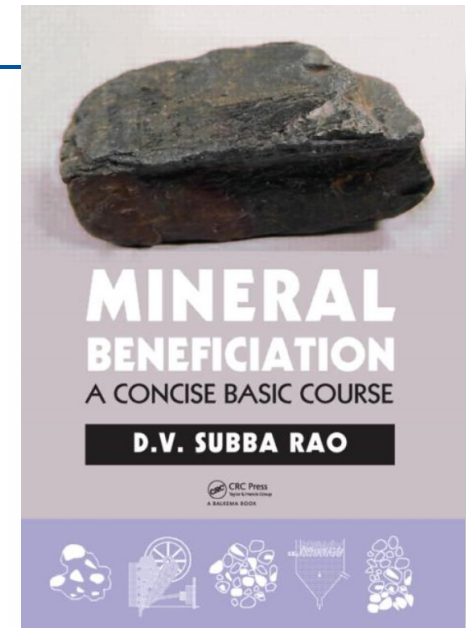
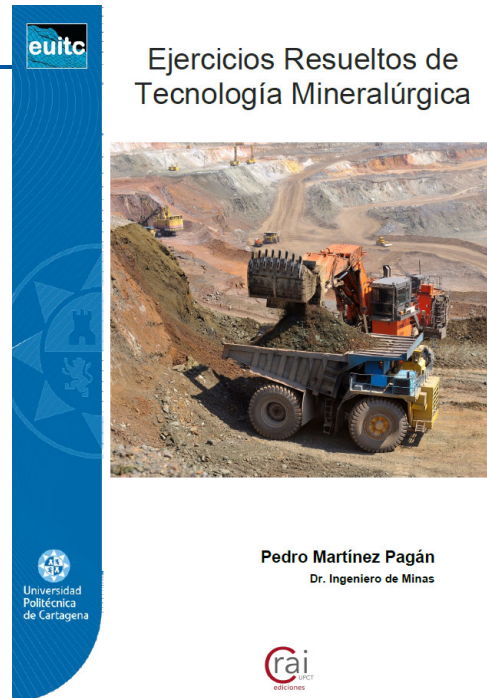
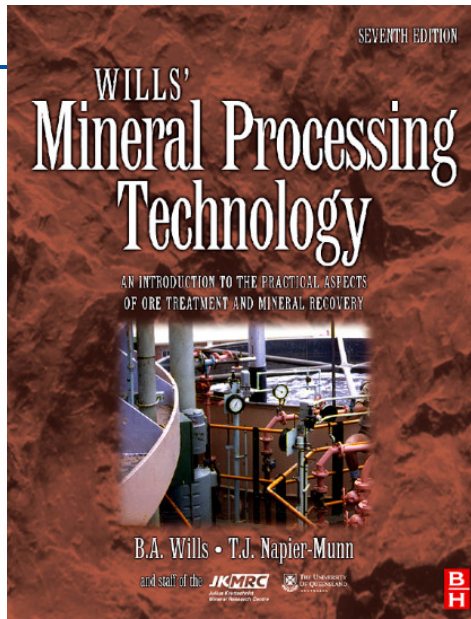
A continuación, calculamos la recuperación para la ganga:

$$R_m = (29.34 \text{ tph} / 990 \text{ tph}) \times 100 = 2.96\%$$

Así, la eficiencia de la separación (E.S.) para este caso valdrá:

$$\text{Eficiencia de la separación} = 78\% - 2.96\% = 75.04\%$$

# Referencias:



Libros para consulta...

