

EXPLORACIÓN MINERA

Apuntes de Cátedra. Muestreo Exploratorio

INTRODUCCIÓN

Se acostumbra decir que LA MINERÍA ES LA MADRE DE TODAS LAS INDUSTRIAS, por ser ella quién aporta las materias primas que las demás actividades procesan para cubrir las necesidades planteadas por el desarrollo de la Humanidad. De esta Industria Madre, su primer paso lo constituye LA EXPLORACIÓN, esa parte del proceso cuyo objetivo es encontrar y evaluar los yacimientos de minerales útiles para satisfacer la demanda de la sociedad.

Existe cierta confusión con los términos “Prospección” y “Exploración”. La bibliografía de habla inglesa utiliza indistintamente los dos términos, denominando de una forma u otra a la secuencia de tareas que van desde el “reconocimiento” de una región a fin de detectar una “anomalía”, hasta la evaluación de reservas y su factibilidad de aprovechamiento económico en el depósito mineral descubierto. También se incluye como “exploración” a las tareas de ampliación de reservas en una mina en actividad.

La bibliografía rusa es algo más específica, llama “prospección” a la búsqueda de anomalías: se prospecta una región para encontrar yacimientos y se explora un yacimiento para definir su explotabilidad (Kreiter, 1968).

En Francia el significado es inverso, se explora una región para detectar anomalías y la prospección se encarga de evaluar sus reservas y factibilidad de rendimiento económico.

Según el 'Dictionary of Geological Terms', (BATES & JACKSON, 1984) “*Exploración comprende la búsqueda de depósitos de minerales útiles o de combustibles fósiles*”. En este diccionario no se distingue entre exploración y prospección. El término “*minerales útiles*” se refiere a minerales económicamente valiosos. Algunos autores como HARTMAN (1987) diferencian exploración y prospección en lo que concierne su objetivo y a partir de este el principio de trabajo aplicado: el objetivo de la prospección es el reconocimiento general de un yacimiento mineral, la exploración está enfocada en un reconocimiento detallado del depósito mineral.

Dejando de lado estos temas semánticos, el hecho importante es que los métodos exploratorios estuvieron durante muchos años atrasados con respecto a las demás etapas de la industria (Exploración y Mineralurgia), registrándose en estos últimos años avances significativos tanto en las Técnicas de Teledetección y Muestreo como en el Procesamiento Geomatemático de los Datos.

Haciendo algo de historia, Georg Bauer o Jorge Agrícola (*nombre latinizado para adecuarlo a la lengua con que escribió, el latín*) (1494-1555), médico, geólogo, minero, metalúrgico y político alemán renacentista, autor del más importante tratado tecnológico minero-metalúrgico de su época - *De Re Metallica*-, no hace mención a métodos exploratorios solo cita las épocas del año favorables para el éxito de las tareas.

Los sondeos a diamantina hicieron debut a fines del Siglo XIX, lo mismo que la Prospección Magnética, en el distrito ferrífero del Lago Superior (EEUU). La Geoelectrica se aplica por primera vez en Nevada y recién en 1973 se iniciaron algunos modestos Relevamientos Geoquímicos. Todo esto indica que las técnicas hoy conocidas apenas superan el siglo de antigüedad.

Menciona Peters que, al necesitar la industria mejorar su tecnología para detectar yacimientos, una vez superada la etapa del viejo prospector individual e intuitivo, fue en Europa donde se formaron los primeros graduados en Ingeniería de Minas con base Geológica, quienes vendrían a ser los primeros Ingenieros Geólogos o Geólogos de Minas de nivel universitario. Fue de Freiberg, Berlín, París y San Petersburgo de donde salieron los primeros graduados hacia todo el mundo. Freiberg fue el centro más importante, y hacia 1860, casi la mitad de su alumnado venía de América. Los textos de estudio y consulta siguieron llegando de Europa por lo menos hasta mediados del Siglo XX.

Un enorme paso adelante lo planteó la Escuela francesa con De Launay (1913), quien enfatizó la técnica del Mapeo Metalogénico, caracterizando regionalmente cada mineralización; así aparecieron los conceptos de “*provincia metalogénica*” y “*época metalogénica*”, primera etapa hoy de cualquier exploración. Como muy bien dice J. Guilbert (Arizona) “*...para encontrar elefantes, lo primero es ir a un territorio de elefantes...*”

CONCEPTOS GENERALES

Definición de yacimiento mineral

El término yacimiento mineral presenta diversas acepciones a través del tiempo: Bateman (1951) define yacimiento mineral como “*acumulaciones o concentraciones de elementos que están presentes en la corteza terrestre solo de forma diseminada*”, a esta definición muy geológica, se le ha incorporado últimamente el

concepto económico de “*explotación con beneficio económico*”. Así, Smirnov en 1976 establece que “*yacimiento mineral es un sector de la corteza terrestre en el que, a raíz de procesos geológicos, se produjo la acumulación de una sustancia mineral, que puede ser utilizada industrialmente, dadas su cantidad, calidad y condiciones del yacimiento, para su explotación comercial*”. En síntesis, un yacimiento mineral es “*un cuerpo geológico constituido por mineralización económicamente explotable*”.

Recursos minerales. Tipos de recursos

Según la Economía, cualquier bien capaz de proporcionar alguna utilidad o beneficio constituye un *recurso*. Cualquier de vida recurso que se puede renovar en un período de tiempo adecuado a nuestra expectativa recibe el nombre de *recurso renovable*, mientras que los que son un legado de la historia de la Tierra y no se pueden regenerar en ciclos acordes a nuestras expectativas de vida son los *recursos no renovables*. Los recursos minerales son no renovables porque los ciclos geológicos que los forman se expresan en millones de años.

Los recursos minerales presentan características que los hacen claramente diferenciables, a saber:

Recursos minerales metálicos: Se utilizan para extraer metales, son mucho más escasos e irregularmente distribuidos que las rocas y minerales industriales, requieren un proceso de extracción del metal.

Las Rocas y minerales industriales: son más abundantes, se utilizan, generalmente, tal como se encuentran en la naturaleza, se producen y consumen en grandes cantidades.

Dentro de este último grupo se encuentran las *rocas y materiales para la construcción* que se caracterizan por tener precios por unidad más bajos, la extracción y procesado es barato, las reservas pueden considerarse infinitas e incluso un tipo puede ser sustituido por otro.

ETAPAS DE UNA EXPLORACIÓN

Objetivos de Prospección y Exploración

El primero objetivo de la prospección es la localización de una anomalía geológica con propiedades de un depósito mineral, un objetivo común de la prospección y de la exploración es la reducción del área de investigación. Comúnmente las áreas en consideración se disminuyen de 2.500 - 250.000 km² en la primera fase a 2,5 - 125 km² en la segunda fase y la tercera fase a 0,25 - 50 km² en la última fase (BAILLY, 1966). Otro objetivo común consta en aumentar las ventajas del área prometedoras con respecto a su explotación rentable, como por ejemplo ocuparse de un camino de acceso transitado y de un peritaje del medio ambiente. La exploración se finaliza con el estudio de factibilidad.

La norma elemental en todo proceso de exploración minera consiste en aplicar métodos capaces de abarcar grandes zonas, descartando áreas no favorables con métodos rápidos y muy económicos, para llegar gradualmente a sitios concretos con métodos más caros y precisos. “*Un programa de exploración puede ser muy exitoso cuando logra un claro aumento de las perspectivas de un sitio estudiado, anticipando la decisión final en una o dos etapas, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.*” (P. A. Bailly).

Consideraciones generales

Dentro del estudio de yacimientos se pueden distinguir dos etapas diferenciadas. Una primera es la búsqueda, que tiene como meta la localización de anomalías causadas por depósitos minerales. Una segunda etapa es la valuación, cuyo fin es definir y evaluar la anomalía. Dentro de la valuación se determina la geometría, extensión y riqueza del yacimiento utilizando muchas técnicas similares a las de la primera etapa, pero más precisas, sobre todo realizando el muestreo con mallas más cerradas.

Las principales diferencias entre la búsqueda y la valuación del yacimiento son:

- *La extensión*: En la valuación las áreas estudiadas son menores que en la búsqueda. La Geofísica Aerotransportada da paso al predominio de la Geofísica Terrestre. Y la Geología se orienta más a preparar el reconocimiento del yacimiento en profundidad. También se utilizan técnicas de valuación subterráneas.
- *Las muestras*: Para la valuación se obtienen principalmente muestras mediante sondeos. mientras que en la búsqueda muchos datos se consiguen por métodos indirectos (imágenes satelitales, fotointerpretación, geofísica aerotransportada).
- *Los datos*: En la etapa de valuación deben ser mucho más abundantes que en la etapa de búsqueda.

Después de que en una zona se han identificado indicios o anomalías mediante técnicas de exploración se determina la masa mineralizada por diferentes métodos de valuación. A continuación, una vez identificado el mineral se muestrea para estimar la ley y el tonelaje que alberga el depósito.

Técnicas de valuación

Cuando incursionamos en la etapa de **Valuación de Reservas** hacemos uso de técnicas, algunas de las cuales han sido usadas en la etapa de exploración regional, solo difieren en la escala. Entre ellas se distinguen: técnicas geológicas, técnicas geofísicas, técnicas geoquímicas y toma de muestras mediante sondeos, calicatas o excavaciones.

Técnicas geológicas

La principal técnica geológica que se emplea en la valuación minera es la **cartografía geológica**. Esta cartografía se realiza a diferentes escalas, en esta etapa las más empleadas 1:10.000, 1:5.000 y 1:2.000 (de menor a mayor detalle). Es esencial la utilización de cortes geológicos, que se basan en los datos de superficie y se extrapolan en profundidad.

Técnicas geofísicas

Dentro de la valuación minera, al emplear las **Técnicas Geofísicas** se debe elegir de entre ellas aquellas que tiene mejores posibilidades para resolver un problema concreto, estableciendo, en función de los conocimientos geológico-mineros que se tienen, que tipo de geofísica se aplica, si la correspondiente a una etapa de exploración, o bien a una de valuación.

En la etapa de exploración los fines de los métodos geofísicos son descubrir y cartografiar estructuras o unidades litológicas no aflorantes, confirmar extrapolaciones y precisar la geometría de los objetivos.

En la etapa de valuación, la geofísica estudia bien la situación y características geométricas del metalotecto litológico o estructural (aplicación indirecta), o bien determina la posición y geometría del propio yacimiento (aplicación directa). Esta última fase, deseable en toda valuación, no es siempre posible. La Tabla 1 muestra los métodos de uso más frecuente en cada caso.

TABLA 1: Etapas de aplicación de los métodos geofísicos

Etapa	Aplicación	Objetivos	Métodos	
			Aéreos	Terrestres
Búsqueda	Indirecta	Cartografía de zonas cubiertas Determinar estructuras	Magnético, Radiométrico Electromagnéticos Gravimétrico	Magnético, Gravimétrico, Eléctricos, Sísmicos
Valuación	Indirecta	Metalotectos	Magnético Electromagnéticos	Magnético, Gravimétrico Eléctricos, Sísmicos
	Directa	Situación y geometría del cuerpo mineralizado	Magnético Electromagnéticos	Magnético, Gravimétrico Electromagnéticos Polarización inducida, Eléctricos

Fuente: F. FERNÁNDEZ ALONSO (1984)

Para decidir cual es la sistemática aplicable en una Valuación ha de tenerse en cuenta que tanto la mena como las restantes rocas del entorno donde se halla el yacimiento son cuerpos de morfología definida y con determinadas propiedades físicas que dependen de su naturaleza litológica, textura, contenido de agua, etc. La condición necesaria para que un método pueda aplicarse con éxito en la localización de un yacimiento (o en la cartografía de un horizonte litológico) es que el parámetro físico que caracteriza a dicho método presente suficiente contraste entre la mineralización (u horizonte) y las rocas encajantes. Estos factores definen en conjunto las posibilidades del método.

Las condiciones de suficiencia son más complejas y vienen controladas por la topografía de la zona; geometría, estructura, profundidad y buzamiento del objeto, clima de la región, naturaleza del recubrimiento, etc. Representan las limitaciones del método.

Cuando en el medio geológico donde ocurre la mineralización no hay otro cuerpo con propiedades físicas análogas a las de aquella, ni estructura de respuesta comparable a la del yacimiento, la correspondencia entre la mineralización y anomalía es biunívoca. En este caso la anomalía es producida por, y solo por, la mineralización (anomalía “con mineral” o “metálica” si la mena lo es). Si por el contrario, existe algún cuerpo con geometría y propiedades físicas tales que originen respuestas comparables en forma y magnitud a las de la mineralización, las anomalías serán indistintamente “metálicas” y “litológicas” y/o “estructurales”. En este caso para diferenciar unas de otras se aplican metodologías que utilizan alguna propiedad física no común. Si no existe tal propiedad y morfológicamente las anomalías son semejantes, no es posible decidir la naturaleza del cuerpo anómalo sólo con sistemas geofísicos.

El reto que la Geofísica tiene constantemente planteado es, por un lado, identificar claramente los yacimientos dentro del medio geológico donde se encuentran, delimitando la geometría, y por otro explorar cada vez a mayor profundidad como consecuencia del continuo agotamiento de los depósitos superficiales.

Los métodos que se usan con más frecuencia en la valuación de yacimientos metálicos son: a) Método magnético; b) Método gravimétrico; c) Métodos electromagnéticos; d) Método de polarización inducida; e) Métodos eléctricos, f) Métodos sísmicos

Técnicas geoquímicas

La utilización de la **Exploración Geoquímica** en la búsqueda de yacimientos se basa en la premisa fundamental de que la composición de los materiales próximos a un yacimiento es diferente de cuando el yacimiento no existe. Las acciones físicas y químicas, externas y posteriores a la formación del yacimiento originan removilizaciones de los elementos que componen el yacimiento. La fijación posterior de éstos da lugar a contenidos anómalos, cuya detección puede contribuir a localizar su origen, es decir, el propio yacimiento.

La exploración geoquímica está relacionada con la detección de halos primarios asociados a yacimientos minerales (halo primario es el término usado para describir la distribución de los elementos en una roca que alberga el yacimiento).

Normalmente se emplea la detección directa del elemento deseado, pero también se analizan otros elementos acompañantes, es decir, los denominados paragenéticos, que proporcionan halos más extensos.

La exploración geoquímica se divide en dos ramas: exploración a escala regional y exploración a escala local. En la primera se trata de discriminar entre zonas mineralizadas y zonas estériles. En la segunda se pretende estudiar los halos alrededor de determinados yacimientos.

Los principales tipos de exploración geoquímica son:

- a. Muestreo en rocas: Este tipo de muestreo incluye las rocas superficiales, materiales de filones y capas y trabajos subterráneos.
- b. Muestreo en redes de drenaje: Incluye muestreos de sedimentos de corrientes de agua, lagos y aguas subterráneas.
- c. Muestreo de suelos: En este tipo de investigaciones se incluyen el muestreo superficial y profundo de suelos, de suelos transportados y de suelos residuales.
- d. Muestreos biogeoquímicos: Incluyen el muestreo de hojas y tallos de la vegetación.
- e. Muestreos geobotánicas: Consiste en la interpretación de la relación entre la litología y los diferentes tipos de vegetación.

Con los resultados obtenidos mediante estas técnicas se confeccionan mapas de isovalores (isoconcentraciones), que permiten discriminar entre zonas de anomalías geoquímicas y zonas de "background" (valores de fondo regional).

Otras técnicas de valuación

Otras técnicas de valuación de yacimientos son los sondeos, las calicatas y las labores mineras.

Las calicatas se emplean cuando el yacimiento está cerca de la superficie y cubierto con otros materiales que lo ocultan. Las calicatas son trincheras que se abren con una excavadora o pala mecánica hasta llegar a la roca mineralizada.

Cuando el yacimiento está a profundidades mayores de 3 m se realizan sondeos, pozos o túneles. En este tipo de excavaciones se necesita maquinaria de tipo minero.

Un sondeo es un taladro de sección circular que se realiza desde la superficie hasta el yacimiento. Existen tres métodos fundamentales de perforación de sondeos. Un primer método consiste en la perforación mediante corona de diamantes. En este sistema se recupera el núcleo del sondeo (testigo) casi intacto. La perforación se realiza girando la corona cilíndrica de acero con trozos de diamante o pastillas de carburo con la roca.

El segundo método es el de perforación ciega con triconos. Se basa en hacer girar una pieza especial con dientes o botones que arrancan y trituran la roca. En este método no se obtiene un testigo continuo, sino ripios o detritus. Los detritus se recuperan a partir de la circulación del lodo o aire que se emplea en el sondeo.

El tercer método de perforación es el de percusión, que se aplica en rocas duras. La penetración en la roca se realiza golpeando la misma con un cuerpo de acero con botones de carburo de tungsteno, mediante un martillo hidráulico o neumático que genera los golpes o impactos. Al igual que en el caso anterior, con este método no se recupera un testigo continuo sino el detritus que se produce durante el avance.

Las labores mineras de valuación (galerías, piques) pueden ser muy interesantes cuando se quiere conocer con bastante precisión las características de la mineralización "in situ", y permiten extraer muestras para su procesamiento en el laboratorio y en planta piloto.

MUESTREO

En la evaluación de un depósito o mina es necesario conocer la cantidad y calidad del mineral valioso

- El precio de compra o derechos de la propiedad
- La exploración, preparación y desarrollo del yacimiento
- Los determinados en el proceso de exploración. Para que el negocio minero sea atractivo, el mineral medido deberá pagar: gastos de organización
- Las instalaciones y equipos
- Los costos de explotación y tratamiento
- Los gastos generales de administración
- Los gastos de comercialización
- La devolución del capital
- La ganancia de la empresa

Por lo tanto, en base a los datos obtenidos en el proceso exploratorio debemos determinar la cantidad y calidad del mineral para establecer la factibilidad del proyecto. Los datos de la exploración se necesitan para decidir inversiones, para definir un proyecto de desarrollo futuro, para establecer un valor de compra-venta, o para decidir un préstamo bancario. Para estos casos podemos evaluar:

- Un prospecto para decidir su puesta en operaciones
- Yacimientos con laboreos incipientes o minas apenas trabajadas
- Minas preparadas pero que no han entrado en producción
- Minas en operaciones que deseen aumentar el ritmo de producción

Principios básicos del muestreo

La tarea más compleja del proceso de exploración es definir los dos parámetros antes citados: Cantidad y Calidad del mineral estimado en una anomalía, para que la empresa pueda arribar a una decisión fundamentada. Para disponer de los datos suficientes para llegar a una ESTIMACIÓN DE RESERVAS, el paso fundamental es definir las características químicas (leyes, características mineralógicas y comportamiento mineralúrgico) y físicas (dureza, fragilidad, cohesión, tamaños) del mineral en cuestión.

Muestra es una porción de un conjunto, extraída por métodos que permiten considerarla como **representativa** del mismo.

Muestreo es la acción de recoger muestras representativas de un todo, para **inferir** el valor de una o varias características del conjunto.

Población o lote: es el conjunto completo de observaciones que deseamos estudiar.

En un primer paso se debe establecer que entidades se van a estudiar: leyes/contenidos, espesores/ potencia, densidad/peso específico, etc.

La condición básica es que la muestra sea representativa, es decir, que en ella se encuentren representadas todas las características propias de la población, en este caso, de la masa mineralizada.

El **muestreo estadístico** es diferente del **muestreo de minerales**:

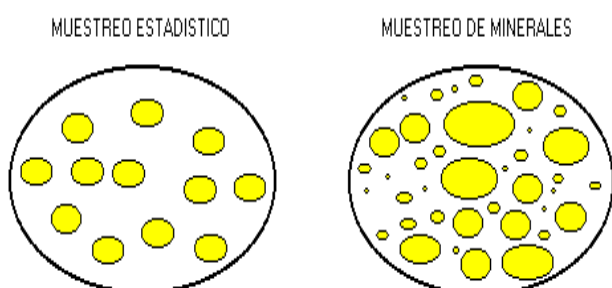


Figura 1: Tipo de muestreos

En el muestreo estadístico, el lote ó población está compuesto por objetos de igual peso.

En el muestreo de minerales, el lote está compuesto de objetos de diferentes pesos.

En las etapas de un proyecto minero, **desde la exploración hasta el cierre de la mina**, casi todas las decisiones que se toman están basadas en valores obtenidos de material **muestreado**. Estas decisiones representan millones de dólares.

Si se toman como ejemplo sondeos de voladura en una mina a cielo abierto, vemos que en éstos, el material acumulado (detritus de la perforación) puede ser enorme, lo que obliga a tomar una muestra.

Sea un depósito minero, con una malla de perforación de 10m x 10m, con altura de banco de 15 m, con diámetro de perforación igual a 25 cm y una densidad de 2.5 t/m³.

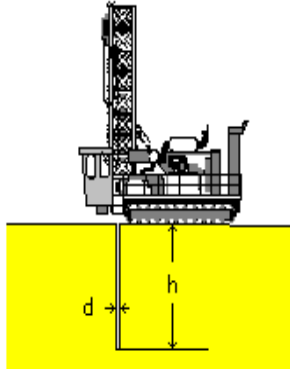


Figura 2: Sondeo de voladura

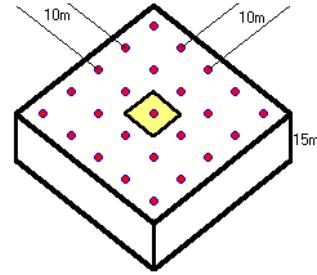


Figura 3: Malla de pozos de voladura

La cantidad de material acumulado, en toneladas, es:

$$\text{Toneladas} = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) h \delta = 3,14 \times (0,25^2 \text{ m}^2/4) \times 15\text{m} \times 2,5 \text{ t/m}^3 = 1,8 \text{ t}$$

Si queremos conocer el valor económico que representa una toma de decisión basada en una muestra de un sondeo, asumiendo un área de influencia de dicha muestra igual a la malla de perforación (Figura 3), para ello debemos calcular el tonelaje que representa la muestra:

$$\text{Tonelaje} = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 2,5 \text{ t/m}^3 = 3.750 \text{ toneladas}$$

Para el caso de un depósito de cobre de 1% Cu (con un precio de 0.70 US\$/libra). Se expresa el tonelaje en libras utilizando un factor de 2.204 (1 libra ≈ 0,454 Kg)

$$\text{Tonelaje} = 3.750 \text{ t} \times 2.204 = 8.265.000 \text{ libras}$$

$$\text{Valor decisión} = \text{US\$ } 57.855.$$

Para el caso es un depósito de oro de 2 gr/t o 2 ppm (con un precio de 1400 US\$/onza): Se expresa el tonelaje en onzas, utilizando un factor de 32.150,75 (1 onza ≈ 31,1 g)

$$\text{Tonelaje} = 3.750 \times 32.150,75 = 120.565.312 \text{ onzas}$$

$$\text{Valor decisión} = \text{US\$ } 337.583$$

El valor de la decisión depende del precio de los metales, pero a menudo es ¡mucho más de lo que se piensa! En una mina a cielo abierto, la ley de un sondeo de voladura es fundamental para la planificación de corto plazo: este valor decide, de una u otra manera, el destino de los materiales (planta, stock o escombrera).

Conceptos importantes en Teoría del Muestreo

Problema principal: La figura 4 resume el problema principal del muestreo: **estimar la media de una población** (con N elementos) **o lote** (de tamaño M_L), **a partir de una muestra** (de tamaño n ó M_S):

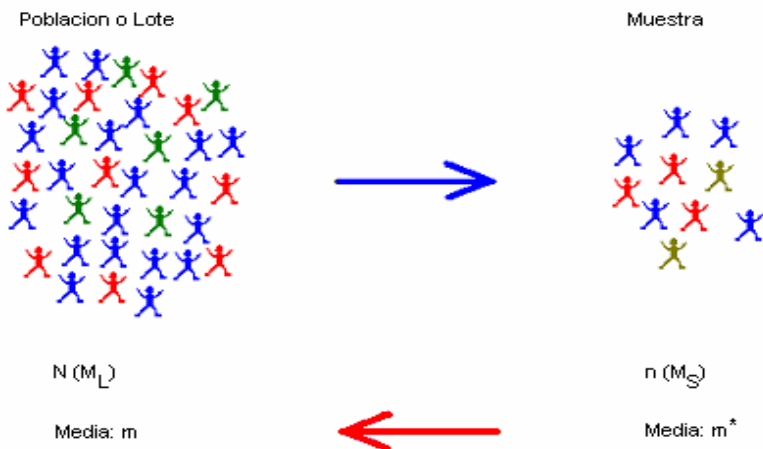


Figura 4: El problema principal del muestreo

En general, el muestreo **exhaustivo**, es decir tomar los N datos ó la masa total M_L (equivale al **censo**) es muy **difícil** y de **alto costo**. Debemos tomar una muestra M_S .

Etapas de un muestreo: En todo muestreo, debe estar bien establecido lo siguiente:

1. Objetivo del muestreo

2. Población a muestrear
3. Datos a recolectar
4. Manera de recolectar los datos
5. Grado de precisión deseado
6. Método de medida

Para cumplir bien con la definición inicial de muestreo, se debe cumplir el hecho siguiente, de vital importancia:
El muestreo debe ser equiprobable

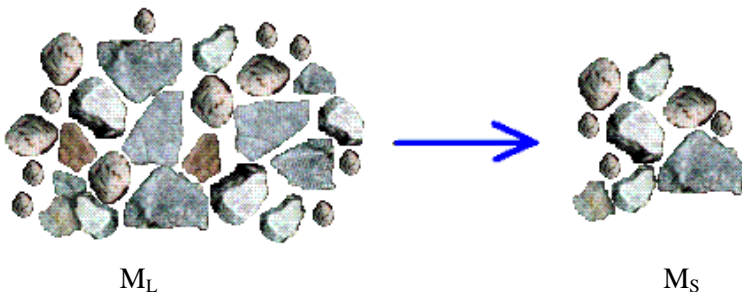


Figura 5: Muestreo de minerales quebrados

En el caso de los minerales, el muestreo de un lote M_L compuesto de N fragmentos es **equiprobable** cuando **todas** las combinaciones de n fragmentos tienen la **misma probabilidad** de ser elegidos para la constitución de la muestra (M_S es la muestra con n fragmentos).

Según Pierre Gy, creador de la teoría moderna del muestreo de minerales, cuando la condición de equiprobabilidad no se cumple, se tiene más bien un “**espécimen**” (un ejemplar) en vez de una muestra.

La figura 6 muestra un ejemplo de espécimen, las extracciones se basan en la hipótesis **no realista y falta de homogeneidad**.

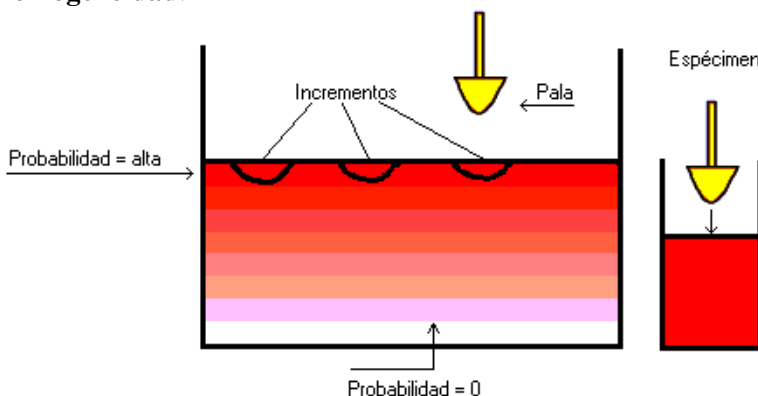


Figura 6: El operador toma incrementos de la parte más accesible del lote. La suma de los incrementos constituye un espécimen.

En el muestreo estadístico, la definición de muestra equiprobable es análoga a la anterior. Los muestreos de **vagonetas, camiones** en minería, por lo general, no son equiprobables, porque se está obligado a tomar una **muestra superficial**.

Tipos de muestreo

La toma de muestras puede hacerse de modos diferentes:

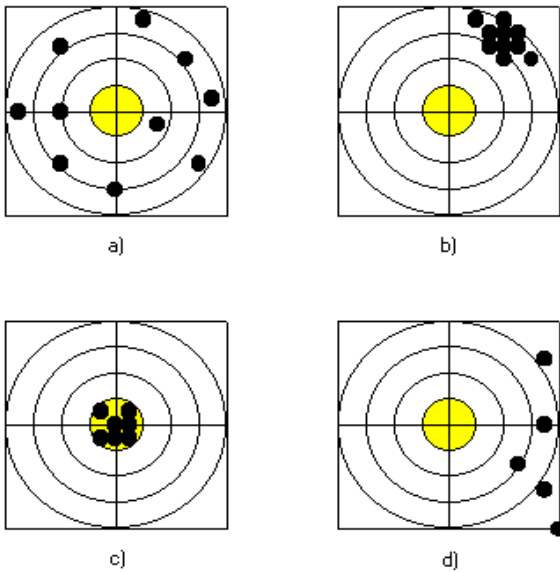
Muestreo aleatorio simple: Son muestras extraídas al azar en el yacimiento, cumpliendo el requisito probabilístico de que cada muestra tiene la misma probabilidad de ser elegida.

Muestreo aleatorio sistemático: En este caso las extracciones de las muestras son determinadas según una regla fija. Consiste en elegir muestras tomándolas a intervalos sistemáticos, o mediante una malla o grilla. Este método permite cubrir todo el yacimiento dando a toda la población la misma oportunidad para quedar incluida en el muestreo. Debe analizarse cuidadosamente el intervalo de muestreo porque existe el peligro de que la mineralización tenga ciclos, de modo que si las muestras caen siempre en un alto o siempre en un bajo se conducirá a conclusiones erróneas.

Muestreo orientativo no probabilístico: Estas muestras pueden ser de gran ayuda en las etapas preliminares para obtener información en sectores específicos del yacimiento, donde se observen aspectos característicos como asociaciones mineralógicas, alteraciones, tipos de ganga, características de las cajas, elementos nocivos, características geotécnicas. Aunque estas muestras no tienen base teórica suficiente para ser utilizadas en una estimación seria de calidad y volumen, pueden ser de gran ayuda en los inicios de la exploración.

Exactitud y Precisión

En teoría del muestreo de minerales se utilizan las nociones de **exactitud** y **precisión**. En términos estadísticos estos conceptos corresponden respectivamente a la **media**, la cual debe ser **insesgada** (exactitud) y a la **varianza** del error, la cual debe ser **pequeña** (precisión)



La figura 7 clarifica estos conceptos. Exactitud y precisión

- a) Exactitud sin precisión.
- b) Precisión sin exactitud.
- c) Exactitud y precisión.
- d) Ninguno.

En síntesis

Exactitud \equiv Media
Precisión \equiv Varianza

“La media debe ser insesgada y la varianza debe ser pequeña”

La propiedad de disponer de un estimador insesgado se cumplirá cuando la muestra sea equiprobable.

En la práctica, cuando sea posible, **siempre se deben utilizar estimadores insesgados** (la experiencia muestra que no es fácil **corregir** sesgos).

Consideraciones prácticas para el muestreo de minerales

Resulta difícil proporcionar recomendaciones prácticas **generales** acerca del muestreo de minerales, debido a que esta operación se realiza en todas las etapas de un Proyecto Minero y a que no existen dos minas iguales entre sí. Para no tener sesgos es necesario contar con:

“Muestras representativas, es decir equiprobables y de varianza pequeña”

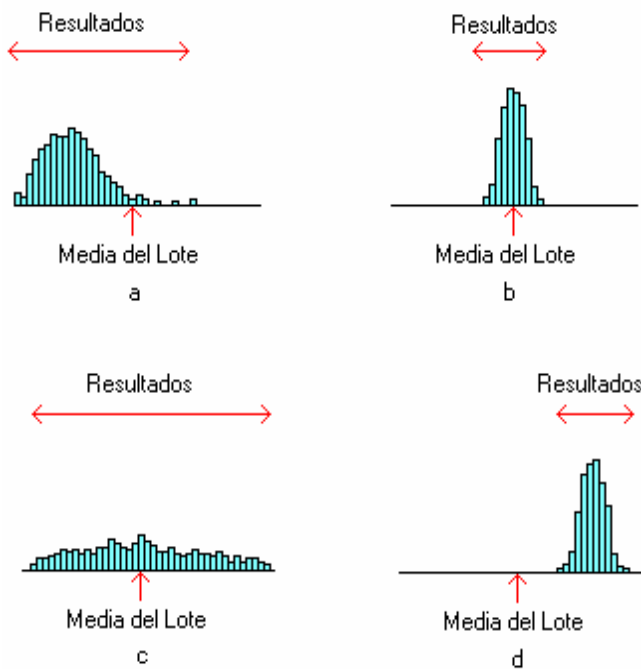


Figura 8: Tipo de muestras:

- a) sesgada, varianza grande
- b) insesgada, varianza pequeña
- c) insesgada, varianza grande
- d) sesgada, varianza pequeña

Recordar que:

insesgado \equiv exacto
varianza pequeña \equiv preciso

Los estados del mineral

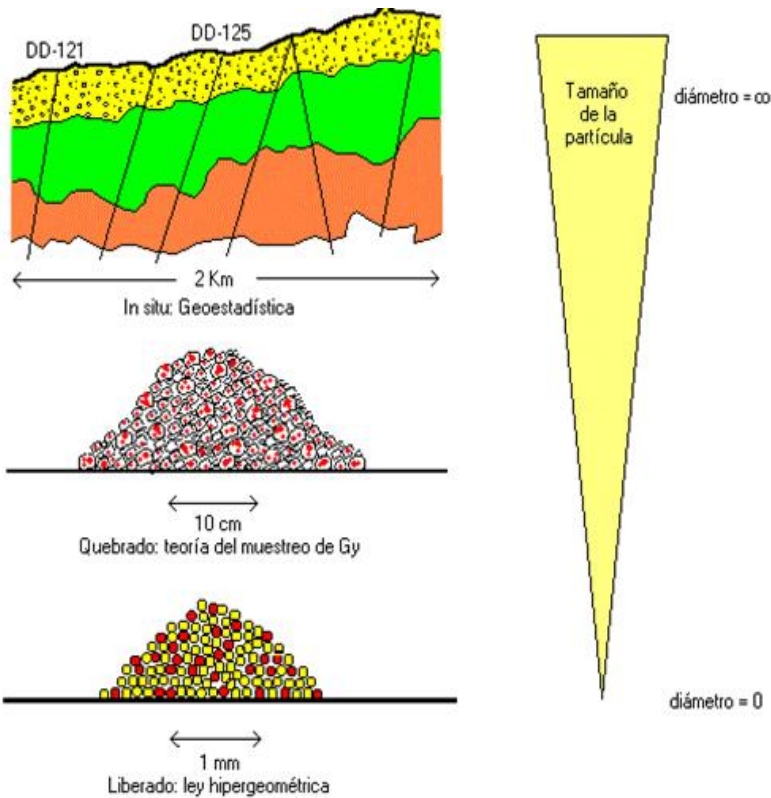


Figura 9: Los estados del mineral

In situ: corresponde en este caso aplicar la Teoría de la **Geostatística**.

Quebrado: corresponde en este caso aplicar la Teoría del Muestro de **Pierre Gy**.

Liberado: en este caso, debido a un proceso de conminución (molienda) se ha separado la **ganga (material estéril)** del componente crítico ó material con valor comercial ó **mena**.

Se observará que el **tamaño de la partícula**, caracterizado por un **diámetro nominal d** decrece de a) a c).

La Segregación

Las partículas de mineral tienden a **segregarse** (figura 10), por ejemplo las más **pesadas** tienen una tendencia a localizarse en el fondo. El fenómeno de segregación es complejo y depende de las **granulometrías, formas y pesos de las partículas**.

Para ver lo anterior podemos hacer un **experimento**; poner en un recipiente transparente una cierta cantidad de porotos y otra cantidad de azúcar: observar que es **imposible** tener un conjunto homogéneo.

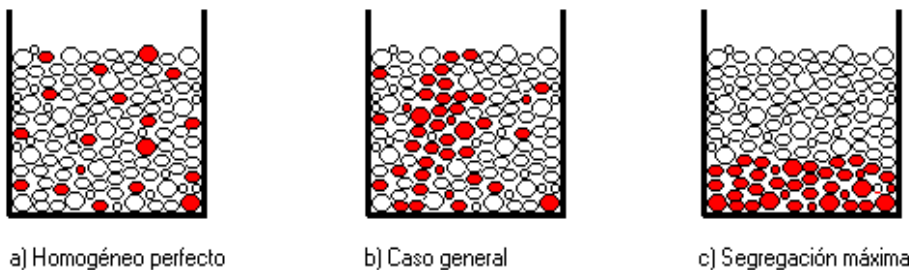


Figura 10: Diferentes casos de segregación

Una manera para **disminuir el efecto de la segregación** en la toma de la muestra es realizar varios **incrementos**, es decir tomar un cierto número de **submuestras** para constituir una muestra primaria (figura 11).

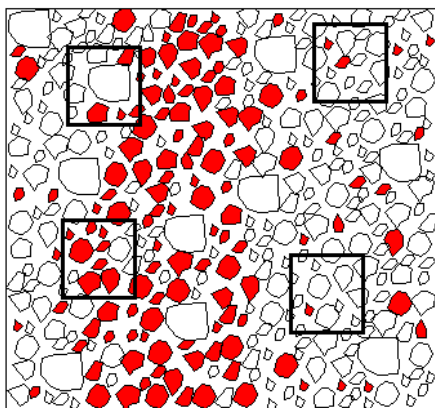
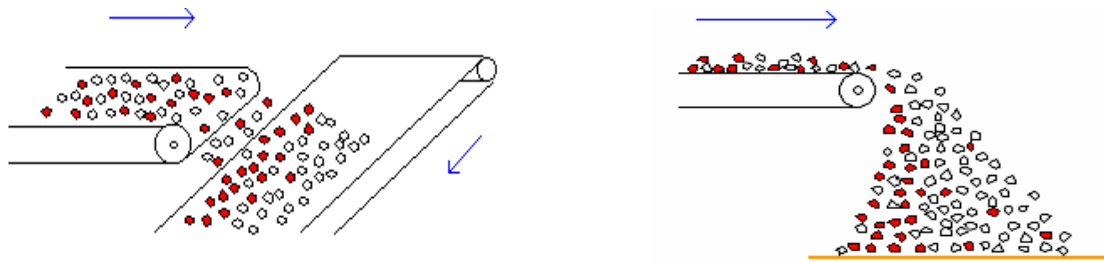


Figura 11: Incrementos para constituir una sola muestra, disminuyendo el efecto de segregación.

Donde se producen segregaciones importantes es en las cintas transportadoras de mineral, tal como muestra la figura 12.



La extracción de la Muestra

La extracción e integridad de la muestra es de vital importancia en el muestreo minero. Es muy difícil tener la situación ideal de **recuperación** de sondaje. En la mayoría de los casos se trabaja, desafortunadamente, en un punto intermedio entre la situación correcta e incorrecta.

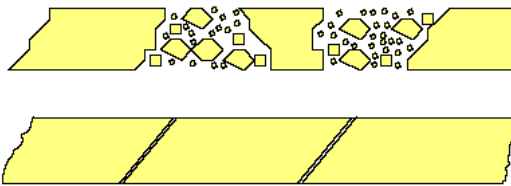


Figura 13: Testigo. Situación incorrecta (superior) y correcta (inferior)

En este tipo de situaciones se debe estudiar la correlación entre la recuperación de la muestra y la ley de mineral y llevar lo anterior a un gráfico. No debería haber correlación entre estas variables.

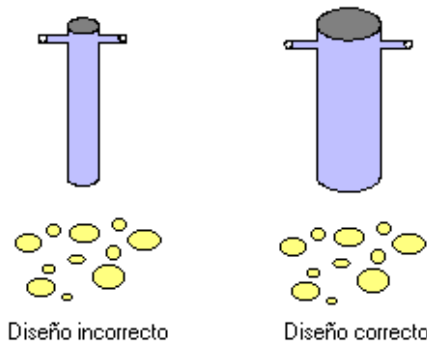


Figura 14: Tubos para captar detritus. Los **tubos** de muestreo de detritus deben tener una abertura adecuada

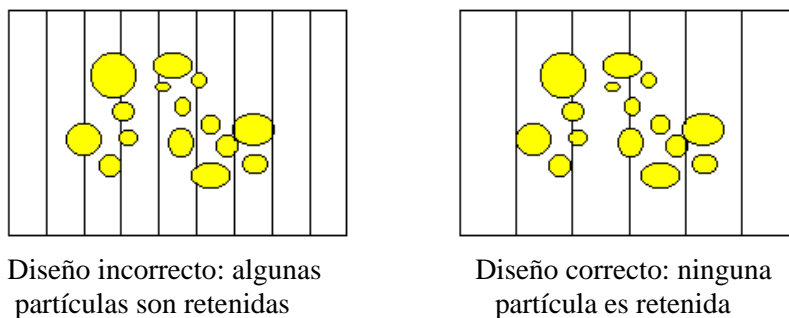


Figura 15. El **riffle** (aparato utilizado para dividir una muestra en dos) debe tener abertura de manera de contener todas las partículas

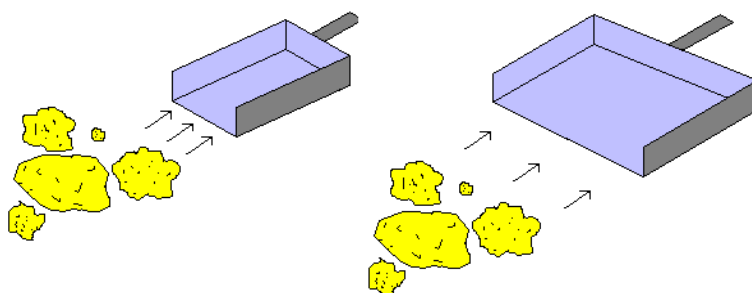


Figura 16: Palas de muestreo. Diseño incorrecto (izquierda), diseño correcto (derecha).

Las palas deben tener una abertura suficiente de manera de contener los diferentes tipos de tamaño (granulometría) del material quebrado.

Una solución para el diseño es tomar el diámetro d de la abertura de manera tal que: $d > 3dM$ en que dM es el diámetro de la partícula máxima. En general la muestra debe respetar la **granulometría** del lote debido a que en la mayoría de los casos, **la ley del material fino puede ser muy diferente de la ley del material grueso**.

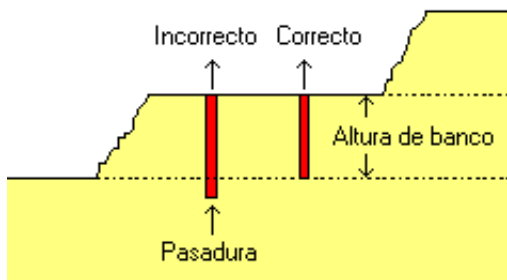


Respecto a la integridad de la muestra. Es evidente que si se usa una bolsa, ésta debe ser resistente, estar bien etiquetada (rotulada) y guardada en un lugar seguro. En ciertas ocasiones la muestra debe estar a prueba de **fraudes** o de **contaminación**

Figura 17: Protección de la muestra. Con buena identificación (interior y/o exterior).

La delimitación de la Muestra

La **delimitación** de una muestra está íntimamente relacionada con la **representatividad** de la misma. Es importante que la delimitación sea correcta. Algunos ejemplos dan claridad a lo expresado:



Ejemplo 1: En una mina a cielo abierto, la muestra de un pozo de voladura debe ser **representativa del banco** y no debería considerarse la **pasadura**. Lo anterior, dependiendo del método, ocasiona **problemas operacionales**, debido a que habría que detener la perforación del pozo y/o cubrir el cono de detritus con una lona ó plástico.

Figura 18. La muestra debe representar al “banco”.

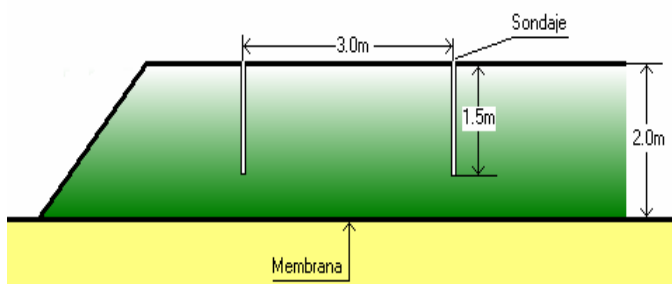
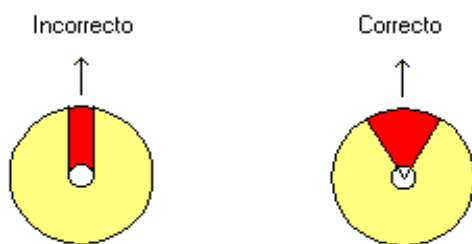


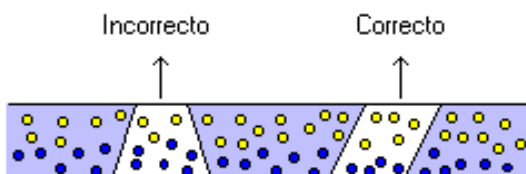
Figura 19: Pozos en una pila de lixiviación

Ejemplo 2: En una pila de lixiviación de 2 m de altura, se toman muestras de sondajes de profundidad 1.5 m (para no destruir la membrana inferior). Esta muestra, mal delimitada, está **sesgada** debido a que, por lo general, la ley del fondo es mayor que la ley de la superficie.



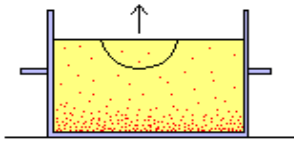
Ejemplo 3: Si se utiliza un **captador** de polvo de perforación, éste debe ser **radial** (de esta manera se respeta la proporción de finos/gruesos en la muestra, tal como veremos más adelante).

Figura 20: Sondeos para voladuras. El captador debe ser radial.



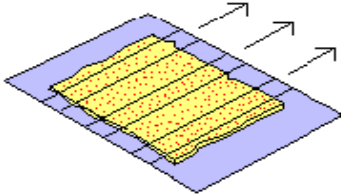
Ejemplo 4: En una **cinta transportadora** la geometría de la muestra debe ser un **rectángulo** ó un **paralelogramo**.

Figura 21: Vista de arriba. En una cinta transportadora la muestra correcta corresponde a un rectángulo o un paralelogramo.



Incorrecto

Ejemplo 5: Una **submuestra** no se puede tomar en forma **superficial**, sobre todo si existe el fenómeno de **segregación**.



Correcto

Figura 22: Forma incorrecta y correcta de tomar submuestras.

Reducción de la Muestra

La **reducción** ó **división** de una muestra **es necesaria** en la práctica. Principalmente se utiliza el **Cuarteo** y el **Riffle**. El cuarteo manual debe realizarse en forma cuidadosa (Figura 23).

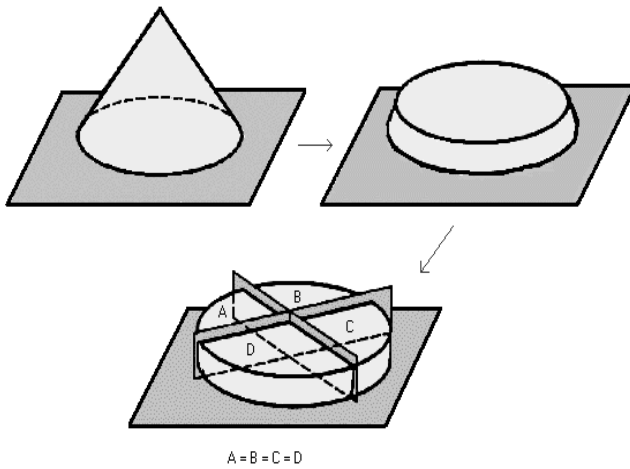
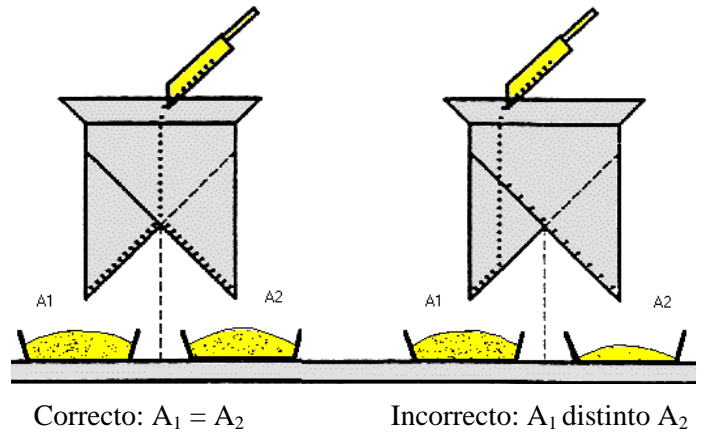
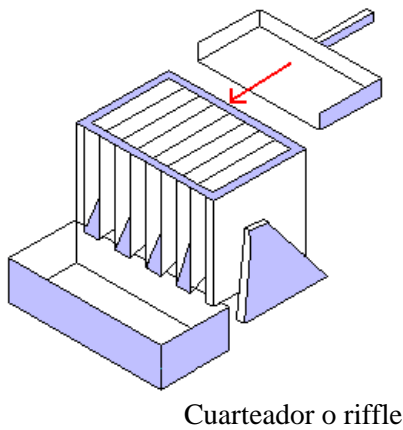


Figura 23: Cuarteo manual



Las figuras 24 y 25 muestran muestra un riffle y la manera adecuada de cargarlo. Debe realizarse en el centro, lentamente, con una pala adecuada. Esto asegura que las 2 **submuestras** son aproximadamente iguales (para garantizar la equiprobabilidad).

Granulometrías. El estudio de las granulometrías es muy importante dado que a menudo la ley de los finos es significativamente diferente de la ley de los gruesos. Se utilizan tamices como en la figura 26. Si se compara la granulometría de la figura 27 con la de la figura 28 se observa su diferencia. Mayor detalle aportarán los respectivos histogramas de frecuencias absolutas y acumuladas de los diámetros de sus partículas.



Figura 26: tamiz para clasificación granulométrica



Figura 27: muestra granulométrica 1

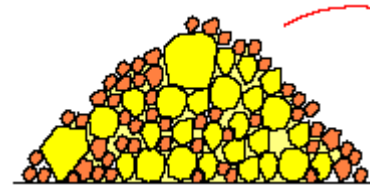


Figura 28: muestra granulométrica 2

Métodos de muestreo

Existen numerosos métodos de muestreo según sean las características del yacimiento explorado, los más comunes son:

1. Muestro de yacimientos vetiformes
2. Muestro de yacimientos diseminados y en manto
3. Muestro de yacimientos aluvionales
4. Muestro de pilas y montones
5. Muestreos particulares

Muestreo de yacimientos vetiformes: En este tipo de yacimientos, verticales o subverticales, y casi siempre desarrollados mediante labores subterráneas, un método de muestreo que se adapta es el “de canaletas”, tomadas en el techo de cada labor para evitar la contaminación de la muestra. Consiste básicamente en cortar canaletas transversales a la veta (o estructura mineralizada) normales al rumbo y al buzamiento. Los sitios de muestreo deben señalarse con claridad para facilitar cualquier verificación o control posterior; también se deben marcar lo mejor posible en el plano o carta topográfica, relacionando cada muestra con puntos fijos.

Cada sitio de muestreo debe limpiarse muy bien previamente, siendo necesario descartar 1 a 3 cm de la superficie para estar seguro de que no existen contaminaciones naturales o provocadas.

Las dimensiones habituales de una canaleta son de 3 a 5 cm de profundidad por 6 a 10 cm de ancho, y un largo igual a la potencia de la veta. El material desprendido a maza y puntas de acero constituye la muestra y debe ser recogida íntegramente sobre lonas en el piso. Es importante evitar pérdidas por proyección, muy comunes si la veta es muy dura o el techo de la labor está muy alto.

Si el material extraído fuera mucho, conviene cuartearlo en el mismo lugar, pero para ello primero es imprescindible homogeneizar la granulometría. El material definitivo se guarda en bolsas de polietileno, en cantidades que oscilan entre 2 a 4 Kg por metro de potencia de veta.

En algunas minas subterráneas se ha abandonado el muestreo por canaletas. En otras se utiliza como alternativa perforaciones de poca profundidad.

Cada muestra debe quedar claramente identificada mediante cartones o chapitas numeradas, colocadas en las bolsas siempre en el mismo lugar (siempre arriba o siempre abajo del material) para no crear molestias en los pasos posteriores.

La libreta de muestreo, que solo debe estar en manos del profesional responsable, debe contener los datos indispensables para ubicar la muestra, detallar las características de la veta en el lugar del muestreo (estructura, mineralogía, litología de las cajas, dureza, cohesión, alteraciones, etc). También conviene dar una idea de la calidad del mineral en el lugar del muestreo, como control del laboratorio de análisis. Deben anotarse los elementos a analizar, las características de las cajas, potencia aparente, buzamiento, ganga. Cada hoja debe llevar la fecha de la operación.

Ancho real o potencia de la veta: En un socavón, rajo o trinchera, no siempre resulta fácil medir el ancho verdadero de una veta, cuando la veta buza, el espesor que se ve no es la potencia verdadera y debe ser corregida trigonométricamente (Figura 30).

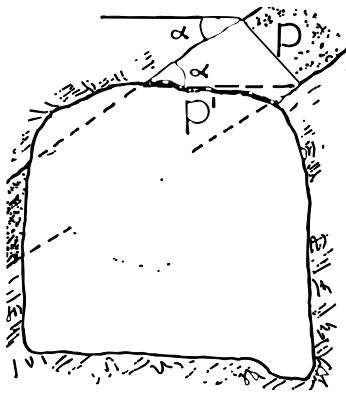


Figura 29: Muestreo en vetas. P': ancho medido; P: potencia real; α : buzamiento
 $P = P' \text{ sen } \alpha$

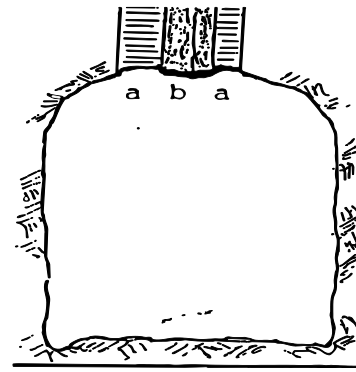


Figura 30: Muestreo en vetas angostas

Si se cuenta con un martillo neumático, se puede efectuar un corte en el techo de la labor para dejar expuesta la verdadera potencia o espesor de la veta, de esta manera se puede medir directamente y dejar de lado los cálculos. También se cuenta con una superficie fresca y no contaminada para muestrear.

Muestreo de vetas angostas: En estos casos conviene conocer de antemano el ancho mínimo de la labor, que dependerá del método de explotación elegido. En estos casos en que la veta es más angosta que la labor aparece el problema de la DILUCIÓN (mezcla de roca de caja con el mineral) que tendrá incidencia en el costo de explotación. El muestreo se limitará solo a la veta y, eventualmente las salvandas si las circunstancias lo aconsejan, Figura 31. Los cálculos de la dilución se realizarán en el gabinete.

Muchas veces es recomendable incluir parte de las salvandas, si se está seguro de que éstas caerán indefectiblemente junto con la veta durante el arranque del mineral; de este modo se conocerá de antemano la dilución inevitable, factor que influirá en la factibilidad de explotación del yacimiento.

Muestreo de vetas muy anchas: A veces las vetas alcanzan potencias del orden de los 3 a 4 metros como en Farallón Negro; si la mineralización es homogénea puede muestrearse de pared a pared dentro del 1,60 a 1,80 m del ancho de la galería (recordar que la veta es más ancha) y cada 8 a 10 muestras hacer cortavetas hacia ambos lados de la galería hasta encontrar las cajas (esta labores auxiliares luego serán utilizadas para planificar la futura explotación). Los espesores totales entre cortavetas se extrapolan. En los casos donde la estructura o la mineralización son muy irregulares convendrá obtener datos más próximos entre sí. En estas labores se debe recurrir al martillo neumático, se reconoce cuando la perforación alcanzó la caja por el cambio de color del producto de la perforación.

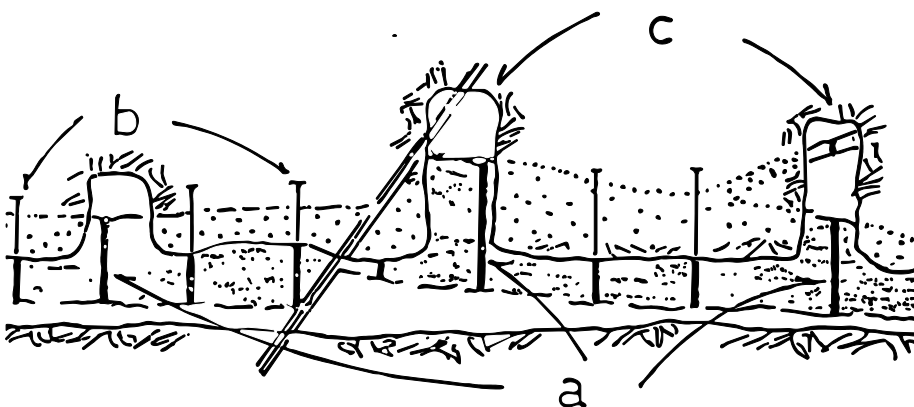


Figura 31: Muestreo en vetas anchas

Si la mineralización aparece en bandas de propiedades físicas (dureza) o químicas (leyes) muy dispares, conviene muestrear por separado cada banda, subdividiendo la muestra para luego combinar los resultados en gabinete, asignándole peso a cada espesor.

Las cajas: Siempre conviene tomar muestras de las cajas, pues suele ocurrir que exista algún elemento contaminante o nocivo para el proceso de tratamiento o, por el contrario, que aparezca algún mineral valioso

finamente diseminado. Conocer el comportamiento geomecánico de las cajas también es una información importante, en especial si se decide pasar a la etapa de pre-producción y se necesita preparar los futuros rajos de explotación. A veces se suele dejar el rajo vacío por ser firmes las cajas, otras veces es necesario rellenarlos por su incompetencia. Son factores que influyen decisivamente en el costo de explotación.

Muestro por esquirlas: En algunos minerales muy duros es difícil cortar canaletas de 3 cm de profundidad por 10 cm de ancho. En este caso el muestreo puede hacerse mediante una incisión normal al rumbo obteniéndose esquirlas o trocitos pequeños. Las esquirlas se desprenden con punta de acero y maza, a veces con piqueta y se recogen directamente en la bolsa de muestreo.

En mineralizaciones erráticas, de baja ley o anidadas, no es recomendable este método porque la probabilidad de que una partícula de elemento valioso caiga dentro de la muestra es baja, por lo tanto los datos tendrán un sesgo muy marcado que llevará a conclusiones erróneas.

Muestreo de aluviones: Un muestreo a veces semejante al de pilas y desmontes es el de los aluviones y derrumbes de falda (coluvio) cuando se trabaja mediante trincheras y pozos; estas labores se suelen hacer en forma manual (a pala y pico) o bien mediante retroexcavadora.

En este tipo de depósitos a veces el material está muy suelto y es necesario armar estructuras de sostenimiento de paredes en las labores de exploración, se arman cuadros con paneles, estacas o planchas metálicas curvadas de mucho más fácil montaje y recuperación. En los aluviones la presencia de la capa freática o el nivel de curso de agua suele provocar dificultades, especialmente por los peligros de derrumbes que no solo contaminan la muestra sino que ponen en peligro al muestreador. Cuando el aporte del acuífero es importante, la única solución es muestrear con sondas a percusión o cable, entubando el pozo según se va profundizando, este tipo de perforación tiene dos inconvenientes: la posibilidad de encontrar un gran rodado que desvíe la herramienta u obligue a suspender el sondeo, y el escaso volumen de muestra.

Si la propiedad minera es grande y el negocio se vislumbra de interés, una forma de trabajar es inundar el sector y utilizar una draga para muestrear; en este caso la tarea sirve como ensayo piloto de explotación.

El material resultante de la excavación se separa a intervalos regulares según avanza la profundización; una costumbre muy aceptada es considerar cada 1,50 m como muestra individual, pero eso será una decisión que tome el responsable. Es necesario un buen soporte topográfico como base para el diseño del perfil de aluvión. SIEMPRE deben clasificarse las muestras en submuestras por clases granulométricas, de modo que el equipo debe contar con un juego de zarandas, fáciles de transportar, tipo albañil, por lo general los tamaños mayores a 25 mm se descartan previa inspección y lavado. El subtamaño puede separarse en $- 12\text{mm} + 3\text{mm}$ y $- 3\text{mm}$, cada muestra es analizada por separado. Las leyes se expresan por lo general en g/m³ (oro), o en kg/m³ para otros.

Muestreo de pilas y desmontes: Muchas veces ha ocurrido que variaciones de importancia en las cotizaciones de un mineral o desarrollo de nuevas técnicas de recuperación han hecho aconsejable el estudio de pilas y desmontes de viejas minas dando lugar a negocios mineros de muy buena rentabilidad. También se han vuelto a tratar relaves de antiguas plantas de concentración, ya que las recuperaciones varias décadas atrás no tenían la eficiencia de ahora.

Cuando se trata de muestrear una pila, escombrera o desmonte con material compuesto por trozos de distinto tamaño volcados desde vagonetas, se produce una selección natural pues los fragmentos más grandes ruedan más lejos hacia abajo y el material más fino queda en las capas superiores. Si los distintos tamaños (clases granulométricas) difieren en sus contenidos de mineral valioso, como generalmente ocurre, la segregación de tamaños irá acompañada también por una segregación de valores o leyes.

El muestreo se realiza mediante trincheras que atraviesan la pila de lado a lado, o bien mediante pozos que llegan hasta el piso natural. El material extraído siempre debe ser clasificado por tamaño (clases granulométricas) pesando cada clase para analizarla por separado. También debe marcarse la distribución de cada clase en el perfil de la pila para facilitar la explotación del sector.

Cuando se trata de relaves no existe la heterogeneidad de las escombreras por cuanto el material ha pasado por el molino y tiene una sola clase granulométrica, por lo general entre 80 a 200 mallas, en estos casos el problema se simplifica bastante pues para cada trinchera habrá una sola muestra, sin subdivisiones por clases de tamaño. No obstante, en este caso también debe muestrearse por niveles, ya que la planta puede haber pasado períodos con leyes de cabeza muy bajas y esos sectores de las colas podrían ser antieconómicos.

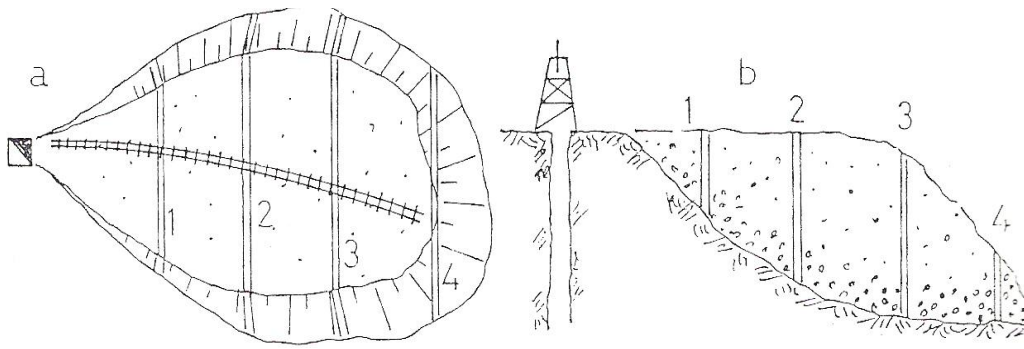


Figura 32: Muestreo en pilas y escombreras

Muestreo de frentes de explotación: Si el frente de explotación es el de un túnel, se divide el frente en una grilla regular y se toma muestra en cada nodo de la grilla.

Muestras particulares: Calizas y dolomitas: Se trata casi siempre de cerros enteros o de grandes porciones de una serranía. La base del operativo es siempre un buen relevamiento topográfico, mapeando cuidadosamente las formaciones sedimentarias, la experiencia ha demostrado que cada banco tiene propiedades físico-químicas uniformes, variando la calidad sólo de un banco u horizonte a otro. En consecuencia el muestreo debe hacerse horizonte por horizonte, en canaletas transversales a las formaciones sedimentarias. Las líneas de muestreo transversales serán paralelas entre sí y estarán separadas a distancias regulares.

Si el mineral está destinado a la industria cementera deberá prestarse especial atención a la presencia de MgO ; si en cambio se pretende abastecer a la siderurgia, el factor controlante será la SiO_2 ; para los caleros importa contar con un máximo de CaO y un mínimo de SiO_2 y MgO .

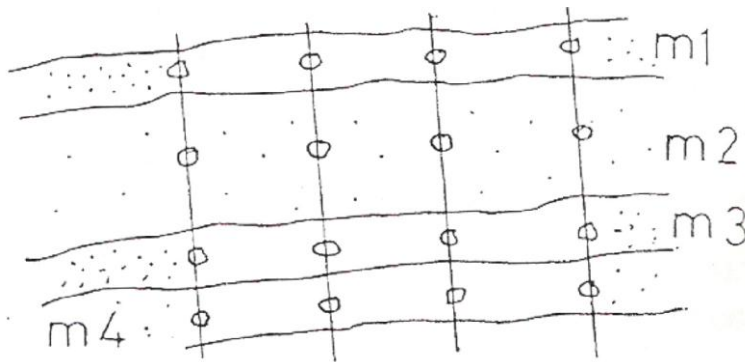


Figura 33: Muestreo en frentes de calizas o dolomitas

Muestreo de canaletas: La figura siguiente muestra lo difícil que puede resultar un buen muestreo de canaletas o canales, debido a la diferente calidad de los materiales a muestrear. En una veta se trata de llevar una galería en el sentido de la misma. Se toma una canaleta (manual o con una sierra) en dirección ortogonal a la veta (figura 35). Si hay diferentes tipos de mineralizaciones se debe sacar una muestra por cada tipo. Luego se determinará si se mezclan o no.

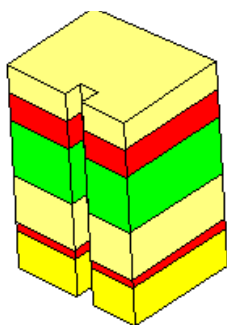


Figura 34 :Canaleta bien muestreada

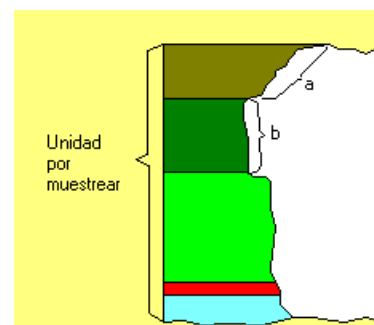


Figura 35:Frente mal muestreado

Factores que afectan la calidad de la muestra de canal

a) Por lo general son **manuales** y el operador corta (en forma consciente ó inconsciente) las partes más **blandas** de la pared ó partes que tienen una característica común (color), etc. (Figura 36)

b) En ciertas minas las leyes altas se encuentran en **fracturas**. Al construir las galerías, las paredes de éstas corresponden en forma natural a caras de fracturas.

En la gran mayoría de las minas que utilizan canaletas, se ha comprobado que existe un **sesgo**, al comparar las leyes de las canaletas con las leyes de los **sondajes próximos**.

Muestro de yacimientos diseminados y en manto: En la actualidad la mayoría de los yacimientos que están en explotación son del tipo diseminado o en mantos horizontales o subhorizontales, caracterizados por grandes volúmenes y baja ley; en esos tipos de yacimientos el método de muestreo más utilizado es el de sondeos mediante perforadoras de diversos tipos. También se emplean sondeos para muestrear desde labores subterráneas, para ampliar las reservas en depósitos de todo tipo, pero fundamentalmente para yacimientos de gran extensión areal que se explotan desde la superficie.

Existen tres métodos clásicos de perforación:

- De percusión o cable
- El rotary a tricono
- El de corona diamantada o sacatestigo (diamantina)
- Martillo de fondo de pozo (Down The Hole, DTH)
- Circulación reversa

El sistema ROTARY y el DTH son ideales cuando resignamos la seguridad e incontaminación de los resultados ante la velocidad de avance a muy bajo costo. Ambos métodos son muy efectivos en formaciones de dureza mediana, no arcillosa, con poco o nada de agua (acuíferos). En esas condiciones, usando aire a alta presión, se logran avances de 30 a 60 m por día.

La perforación rotary con tricono es posible hasta en grandes profundidades utilizando lodos de inyección. Con rotary es probable que las muestras del lodo se contaminen al pasar por horizontes con minerales solubles o que al pasar por formaciones blandas el pozo aumente de diámetro aportando más muestra de esa roca o mineral que las restantes; en formaciones sólidas, homogéneas, pueden recuperarse muestras bastantes seguras; en formaciones muy fracturadas y si alternan horizontes duros con blandos, se pueden anticipar datos no confiables. En ciertas formaciones es imposible recuperar muestra alguna porque tanto el aire como el líquido de inyección escapan a través de la roca fracturada llevándose la muestra con ellos.

La circularon reversa: A partir de 1960 los sondeos con circulación reversa han tenido un auge asombroso. El sistema, sintéticamente, consiste en un caño de doble pared, el externo termina en una zapata que va penetrando en el terreno y el interno sirve para recuperar el material molido tomado como muestra, elevándose hasta la superficie mediante aire a gran presión que circula a través del espacio anular entre los dos tubos y limpia el fondo del pozo, arrastrando las partículas hacia arriba. La mezcla de aire y fragmentos de roca va a un ciclón donde se separan los componentes según peso y tamaño.

La principal ventaja de la circulación reversa es su velocidad de operación, lo cual implica lógicamente un menor costo; desde luego, la información no es tan completa como la ofrecida por la corona sacatestigos, pero no siempre son necesarios tantos datos en determinadas etapas de una explotación. En estos sistemas cuando aparecen minerales de gran peso específico (como el oro), sus partículas demorarán en subir, desfasando la profundidad y el espesor del horizonte atravesado.

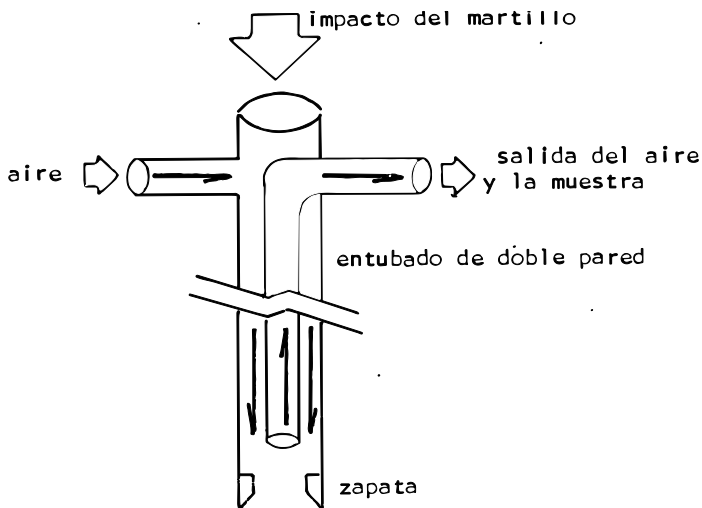


Figura 36: Diagrama muy esquemático del sistema de circulación reversa

Muestreo con sondeos de aire reverso

El objetivo del muestreo con sondeos de aire reverso es obtener muestras representativas de los intervalos atravesados por la perforación para luego enviarlos al laboratorio de análisis químicos.

El equipo que debe llevar el geólogo o supervisor es: bolsas plásticas, bolsas grandes de arpillera plástica, talonario de tickets de muestras, planillas de recuperaciones de muestras, cuarteador, marcadores permanentes, báscula, biromes, cuaderno de registro de envíos.

El ayudante debe llevar: máscaras con filtros respiratorios descartables, casco, anteojos, protector auditivo, mameluco, chaleco reflectivo, faja lumbar.

En primer lugar el supervisor debe verificar las condiciones de seguridad, cercar el lugar y posicionar la perforadora en el punto indicado.

Cuando la perforadora tiene a la salida un ciclón, debe colocarse una bolsa de 50 x 70 cm en la boca de salida y una bolsa de 30 x 40 cm en la salida de polvos en la parte superior de la perforadora.

Cuando se completa la perforación del primer tramo (2 m), se detiene la operación, se retiran las bolsas y colocan nuevas para el tramo siguiente. El ayudante inicia el cuarteo y el perforista reinicia la perforación.

Se mezclan los contenidos de las dos bolsas (cuting y polvo), se pesa, se anota en planilla de recuperaciones el número de muestra y se vierte en el cuarteador o rifle cuantas veces como sea necesario hasta lograr dos fracciones de aproximadamente 1,5 Kg cada una, se colocan en las bolsas adecuadas con el número de muestra, el número de pozo e intervalo. Una fracción va al laboratorio químico y la otra a depósito.

El número de muestra se coloca en la bolsa y dentro de ella se coloca el ticket (los números deben coincidir). En una bolsa grande de arpillera plástica se colocan bolsas de muestras hasta completar unos 25 Kg, con un rótulo del área y número de muestras que contiene. Se llena el cuaderno de envíos con el número de bolsa, el número de muestras, peso total, equipo utilizado.

Se debe evitar efectuar derrames de combustibles, lubricantes; si esto ocurre hay que remediar el problema.

Con los resultados de los análisis y las coordenadas proporcionadas por los topógrafos se llena una planilla excel con el número de identificación del pozo, sus coordenadas (x, y, z), inclinación del sondeo, y leyes de cada uno de los intervalos.

El muestreo de sondeos de voladura

Cuando se perfora un pozo de voladura se produce una segregación de las partículas (Figura 37). Las más livianas se van a la atmósfera. ¿Dónde van las más pesadas?

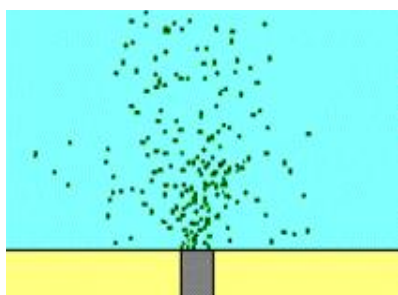


Figura 37: Perforación de un pozo

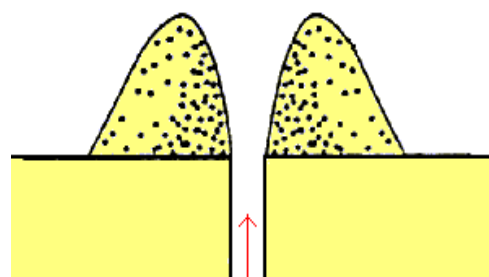


Figura 38: esquema de un sondeo de voladura

En algunos casos el material acumulado en el **cono** puede ser del orden de 2 a 3 toneladas. Es imprescindible entonces tomar una muestra de unos cuantos kilos (Figura 38).

En la figura 39 se demuestra con un ejemplo hipotético que si se utiliza un **captador** de detritus, su diseño debe ser **radial**. Un corte en el cono proporciona un círculo de radio $2r$.

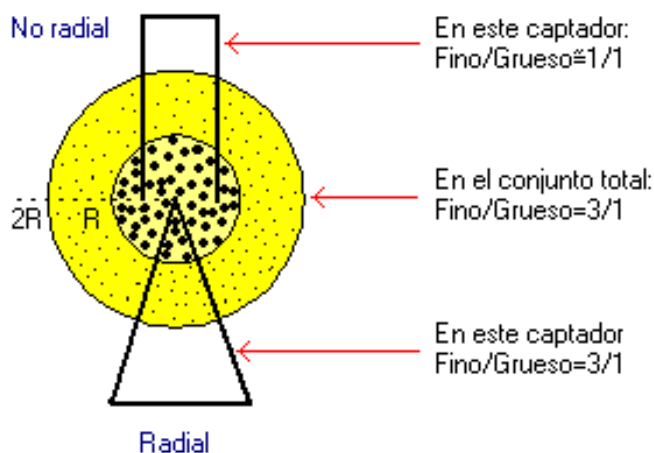


Figura 39: Comparación entre captador radial y no radial.

Si suponemos, por ejemplo, que los gruesos están en un círculo concéntrico de radio r y los finos en el exterior, entonces la proporción real de finos/gruesos es de 3:1. En este ejemplo, un captador rectangular entrega una proporción de finos/gruesos de aproximadamente 1:1

Sondeos con corona sacatestigos: Pese a ser un método relativamente lento y más caro que los demás, es muy utilizado porque proporciona muestras no contaminadas con un máximo de información y la posibilidad de realizar ensayos geomecánicos en cada tramo requerido. Con el testigo a mano, el prospectador puede definir tipo de roca, mineralización, ganga, alteraciones, granulometría, fracturas, rellenos, directrices estructurales, etc. No afectan al operativo muestreo la presencia de niveles freáticos ni fallas, en caso de encontrar minerales solubles éstos quedan dentro del testigo o muestra.

La adaptación de lodos bentoníticos para la inyección, elevó las recuperaciones hasta un 70-90 %, también facilitó la perforación en zonas fracturadas cuyas paredes se sostienen gracias al lodo bentonítico inyectado. Los testigos recuperados representan muy bien las condiciones naturales de la roca o mineral in situ y la contaminación es prácticamente nula.

Se puede perforar hasta profundidades del orden de los 1000 a 1300 m con diámetros de testigos razonables debido a que el lodo de inyección sirve de refrigerante.

Para muestrear a diamantina un depósito mineralizado se puede seguir dos criterios:

- Muestrear toda la longitud del sondeo: En general siempre se comienza con un corto antepozo, cementado y de gran diámetro, hasta superar la faja superficial de suelo o de roca muy alterada; luego se inicia el sondeo con los diámetros de corona mayores y se va reduciendo en forma programada al aumentar la profundidad. Este método es caro pero permite disponer de una excelente información sobre las eventuales capas superiores del yacimiento.
- Muestreo de ciertos tramos: Dado al elevado costo por metro de la perforación con corona sacatestigos, es común que los primeros tramos del sondeo se perforen con otros sistemas; cuando no es necesario disponer de testigos de todo el perfil atravesado se puede comenzar con rotary (tricono) hasta que se estime se está cerca de la formación mineralizada, para entonces pasar a diamantina. Esto significa una importante reducción de costos y de tiempo.

Tipos de coronas sacatestigos más comunes		
Corona	Diámetro	Diámetro
EX	7/8"	2,19 cm
AX	1 1/8"	2,81 cm
BX	1 5/8"	4,06 cm
NX	2 1/8"	5,31 cm

Cuando se muestrea la zona mineralizada, cada 10 o 15 muestras destinadas al laboratorio químico se debe tomar un trozo sano para enviarlo a ensayos físico-mecánicos.

Salvo en el caso de testigos de diámetro pequeño (EX), cada tramo tomado como muestra (de 1,50 a 5,00 m) deberá ser partido en media caña con un core-splitter para enviar una mitad la laboratorio químico, quedando la otra mitad para estudios petro y calcográficos y para eventuales ensayos de control y verificación. Todo el material sobrante debe quedar cuidadosamente guardado e identificado.

Muestro en pozos de producción (ore control): Esta actividad tiene por finalidad llevar un control del material que será volado en la mina, tanto mineral como roca de caja. La tarea se efectúa en los pozos realizados para realizar las voladuras en los bancos.

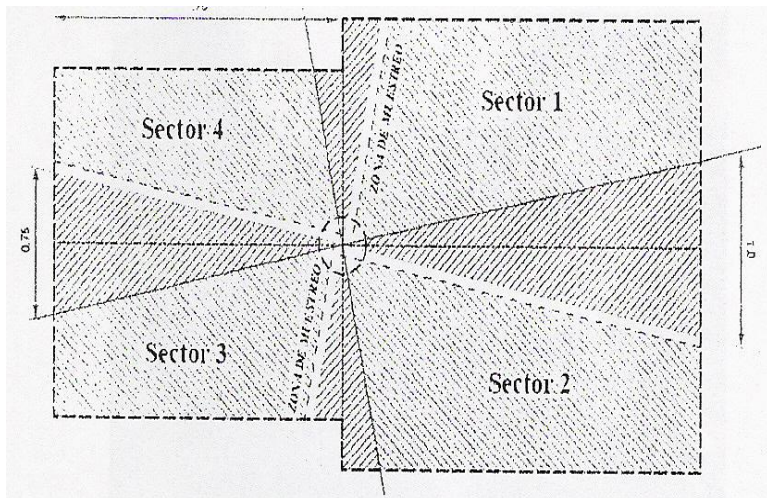


Figura 40: Muestreo en pozo de producción

La técnica de muestreo es la siguiente: De acuerdo a la malla de perforación se marcan algunos pozos destinados a ser muestreados. Una vez iniciada la perforación, del cono de material generado por la perforadora (aire reverso) se toma una franja radial que va desde la parte más alta del cono hasta el piso. Con la pala en posición vertical se abre una canaleta en sentido radial al cono de detritos desde el borde del pozo hasta la parte exterior del cono y desde la parte superior hasta el piso de la plataforma. (a veces es necesario eliminar el material superior del material porque puede provenir de la zona de sobreperforación). La ubicación de la zanja de donde se saca el detrito del cono debe ser aleatoria, tratando de variar las posiciones y orientaciones

La pala utilizada en el muestreo debe ser limpiada antes de extraer la próxima muestra para evitar contaminaciones. El material del sector del cono marcado por la pala se deposita en la bolsa, tratando de obtener una muestra de aproximadamente 6 a 8 Kg como mínimo. Para la identificación de las muestras se asigna un código a cada una de ellas, por ejemplo: **F-3265-001-12**, donde **F**: denomina el lugar de extracción; **3265**: la cota media del banco; **001**: número de malla de sondeos y **12**: número de pozo. Al término de la operación se marca en la malla el pozo muestreado para llevar un control y registro de los mismos. Cada muestra embolsada y etiquetada será enviada al laboratorio. Luego se realizará una verificación entre los datos aportados por la muestra y los resultados por el laboratorio.

Volumen y distancia entre muestras: El volumen habitual de una muestra oscila entre 2 a 4 Kg por metro de potencia de veta, no obstante, debe tenerse presente que cuando el mineral es muy errático es preferible tomar volúmenes mayores y no cuartear. El límite para este problema está dado por la economía del proceso, los auxiliares disponibles, las facilidades de transporte, el equipamiento del laboratorio y del presupuesto previsto. La distancia entre muestras está vinculada directamente con la cantidad de muestras que se deben tomar para alcanzar un cierto límite de confianza, basándose en la desviación típica y el error de muestreo calculados con datos aportados por muestreos preliminares.

CONTROL DE CALIDAD

En todas las etapas de muestreo existen probabilidades de cometer errores de manera que se impone un control de calidad que nos habilite para reconocerlos y corregirlos. El control de calidad debe aplicarse a lo largo de todas las fases de la industria minera. El sistema más usado en la actualidad para el control de calidad es el uso de muestras con características conocidas y que aleatoriamente son introducidas en una partida de muestras que va al laboratorio. Estas muestras pueden ser:

Standard: Son muestras con valores conocidos

Blanco: Son muestras que no contienen ningún valor mineral, ya que se extraen de rocas estériles.

Duplicados: Son muestras del mismo lugar.

Una práctica común es intercalar cada 20 muestras comunes una *standard*, una en *blanco* y una *duplicada*. Todas estas muestras van intercaladas en forma aleatoria y tienen la finalidad de chequear el trabajo del laboratorio. Durante la fase de factibilidad del proyecto es absolutamente necesario hacer un control interlaboratorio, para ello es necesario hacer una ronda de chequeos en varios laboratorios.

Un resultado aceptable del chequeo se considera cuando la variación no supera el 10%.

TRATAMIENTO DE DATOS

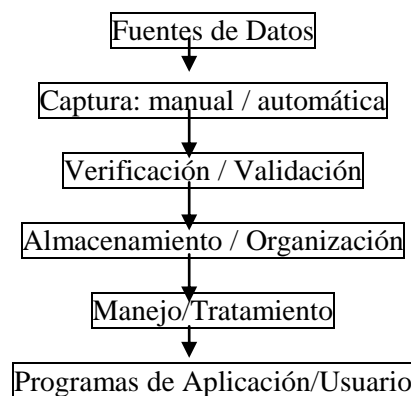
A partir de una serie de observaciones de fenómenos Geológicos, Mineros y Ambientales se puede extraer un conjunto de datos (*captación de datos*) que ha de ser utilizado para construir un modelo que represente la realidad del yacimiento (*Modelo de Datos*).

Es necesario eliminar del conjunto de datos aquellos *incorrectos* (los que no coinciden con el tipo o descripción) y los datos correctos pero *no probables* (aquellos que no representan a la mayoría de la información). Los datos obtenidos a través de estas dos selecciones serán almacenados para su posterior tratamiento y utilización por un conjunto de aplicaciones y usuarios. El objetivo perseguido es que sean almacenados y usados aquellos datos que aporten un conocimiento de la realidad a estudiar.

El alto costo de obtención de datos en Geología, Minería y Medio Ambiente, generalmente es la causa por la que el número de variables a determinar para cada individuo sea relativamente pequeña. Se debe priorizar, mediante un adecuado muestreo, la obtención de datos representativos de la realidad a estudiar (*datos coherentes*), más que la obtención de un gran número de escaso significado.

A continuación se muestra un esquema del proceso general que sigue el tratamiento de la información:

PROCESO GENERAL DE LA INFORMACIÓN



Fuentes de datos

La clasificación de los datos puede ser realizada en función del modo en que se registraron. Podemos tener:

Datos de registro manual, que se caracterizan por:

- Captación mediante observación visual
- Menor exactitud del dato al depender su medición de un observador.
- No hay tratamiento automático del error de medición.
- Soporte de papel con riesgo de errores de transcripción.
- Necesidad de grabación manual y verificación de los datos.

Datos de registro automático, se caracterizan por:

- Captura interactiva de datos (medición automática, sensores)
- Mayor exactitud del dato al no depender su medición de un observador.
- Tratamiento automático del error sistemático de medición.
- Transmisión directa a la computadora.
- Escaso riesgo de errores de transmisión.

Captación y validación de datos

Se denomina *captación* a la secuencia de procesos de observación/medición y transmisión de datos desde un modelo exterior a la memoria de una computadora. *Validación* es el conjunto de procesos mediante los cuales son examinados los datos, comprobándose el tipo, formato, etc.

Tanto la *captura* como la *validación* de datos persiguen que la introducción de datos a la computadora sea realizada de forma clara para el usuario y de modo que los valores introducidos sean perfectamente aceptables por el conjunto de aplicaciones posteriores.

Errores

Errores de medición o calibrado: Son errores sistemáticos que afectan al conjunto de datos, introduciendo un sesgo o desviación. Solo se pueden eliminar con la calibración del aparato de medida.

Errores de asignación: El valor de una variable es asignado a otra. Se detectan por su tipología (tipo, signo)

Errores de operatoria matemática, si existen datos a calcular a partir de datos primarios.

Los valores extraños

Los valores extraños se pueden definir estadísticamente como aquellos valores poco significativos, menor del 5%, es decir, aquellos poco probables. Los valores extraños se clasifican en:

Valores defectuosos o errores, que pueden ser: de muestreo; de análisis y/o ensayo de laboratorio; de editado en el campo; de editado en la computadora; de cálculo

Valores anómalos o irregularidades naturales que pueden deberse a causas geoquímicas (mineralizaciones); catástrofes naturales (terremotos, aluviones, etc.); antrópicas (contaminación por el hombre)

La detección y depuración de valores no correctos consiste en la anulación de los datos que carecen de validez y/o de consistencia lógica, como tipo, signo. La detección de estos errores requiere un conocimiento completo del significado de cada variable.

Las **técnicas estadísticas** ponen en manifiesto aquellos valores que se apartan de la nube de puntos o estructura general de los datos. Este proceso persigue la identificación, dentro del conjunto de datos, de aquel subconjunto que aporte información acerca del modelo geológico, minero o medio ambiental, desechando aquellos datos que perturban la comprensión de la realidad observada.

Algunas veces el objeto del modelo es estudiar justamente los valores extraños, ya que éstos pueden ser la mineralización, la contaminación, etc., pero previamente hay que determinar que valores extraños corresponden a anomalías y cuales son errores.

Representación gráfica de los datos

Otra manera de detectar errores es mediante su representación gráfica, a través de curvas de isovalores (en dos dimensiones), sábanas (en tres dimensiones). Estas representaciones se hacen en mapas y planos cuya fidelidad dependerá, no solo de la calidad de las muestras sino también de la correcta ubicación de los sondeos y muestras, en síntesis de la base de datos. Aquella persona que conozca el terreno estudiado detectará inmediatamente las irregularidades si éstas son presentadas en los gráficos.

Determinación del número óptimo de datos para una muestra

Para una población con distribución normal o log-normal, el número ideal de datos a ser recogidos en un muestreo es matemáticamente calculado por la expresión:

$$N^{\circ} = \frac{t^2 \cdot V^2}{E^2} \quad \text{Donde:}$$

E: es el error máximo aceptado en el muestreo

V: es el mayor coeficiente de variación del área (Error relativo), o sea $\frac{\sigma}{\mu}$

t: es la constante *t* de Student que depende del grado de confiabilidad con que se quiere expresar el resultado y del grado de libertad en el muestreo (se extrae de tabla). El grado de confiabilidad o de confianza expresa la probabilidad de tomar una decisión correcta. Un nivel de confiabilidad del **95%** indica que existen 95 probabilidades de cada 100 de tomar una decisión correcta utilizando ese valor de *t*. El grado de libertad es igual al número de muestras consideradas en el cálculo menos 1, o sea que **G = N-1**. Habitualmente se utiliza **t = 2**

Ejemplo: Si **30** muestras exploratorias extraídas de un yacimiento nos da una media: $\mu = 5\text{g/t}$ y una desviación estándar: $\sigma = 4\text{g/t}$

El coeficiente de variación será: $\frac{\sigma}{\mu} = 0,8$ o sea del **80%**

Si establecemos que queremos un error menor del **20%**, con un nivel de confianza del **95%**, el número total de muestras necesarias será:

$$N^{\circ} = \frac{t^2 \cdot V^2}{E^2} = \frac{(2)^2 \cdot (80)^2}{(20)^2} = \mathbf{64 \text{ muestras}}$$

Como ya teníamos **30** muestras anteriores, será necesario obtener **34** muestras más para cumplir con las condiciones establecidas.