

Determinación de reservas de depósitos minerales

HERZEN HERNANDEZ GARAY*

Ing. de Minas, M.Sc.
Colorado School of Mines, Golden, USA.

RESUMEN

La mayoría de los métodos de cálculo de reservas se tratan en este artículo. La escogencia de un método depende de la calidad de los datos, es decir, con datos preliminares se usarán métodos simples pero a medida que la exploración progresa y se obtiene buena información del depósito se deben considerar factores como características geológicas, métodos de explotación (inventario del depósito) y precisión.

La determinación o cálculo de reservas, después de la exploración de un depósito, comienza con su división en figuras geométricas sencillas que mejor se ajusten al tamaño, forma y distribución de valores dentro del mismo.

Existen numerosos métodos de determinación de reservas, los cuales pueden dividirse en geométricos y estadísticos. Los métodos geométricos cuantifican el depósito y algunos pueden dar información de distribución de valores y características geológicas del depósito, como también datos para programación de operaciones mineras. Los métodos estadísticos sirven para complementar a los geométricos tratando de hallar la dependencia o correlación

* Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

entre las concentraciones y las distancias o posición en el depósito para la asignación de valores a bloques de mineral, pero su utilidad más importante es la determinación de la precisión o error de estimación.

Ambos grupos de métodos se basan en el principio de extensión, así en los geométricos se extiende a un bloque la composición de una o varias muestras. Los métodos estadísticos extienden o asignan a un bloque la combinación lineal de las composiciones o concentraciones de las muestras que rodean a ese bloque.

Métodos geométricos:

En estos se pueden contar: Los de áreas y factores promedios, bloques de extracción, analíticos y los de secciones transversales.

Area y factores promedio:

Comprende los procedimientos que dividen el depósito en bloques con características geológicas o mineras similares, es decir, en los cuales se puede promediar algún factor (área, espesor, tenor, etc.). Ejemplo: Calcular el volumen y tenor promedio del bloque de aluvión aurífero entre secciones N y S de la Figura 1. Los tenores están dados en onzas/ton. y las dimensiones en metros. Una forma rápida de hacer este cálculo es promediar tenores directamente y promediar espesores para encontrar el volumen multiplicando por la superficie. Un método más elaborado consiste en ponderar los tenores con respecto al espesor y al área. Figura 1.

Métodos Analíticos:

La mineralización se divide en bloques triangulares o poligonales, Figura 2. La asignación de tenores se efectúa, en el caso de bloques triangulares, aplicando el promedio de los sondeos de los vértices. En el método poligonal el bloque toma el tenor del sondeo central. Los tenores, en algunos casos, se ponderan con respecto a los espesores, Figura 3.

Estos métodos presentan la ventaja de ser fácilmente computarizables, las variables de entrada son las coordenadas de los sondeos, la elevación, los interceptos de ellos con el mineral y los tenores.

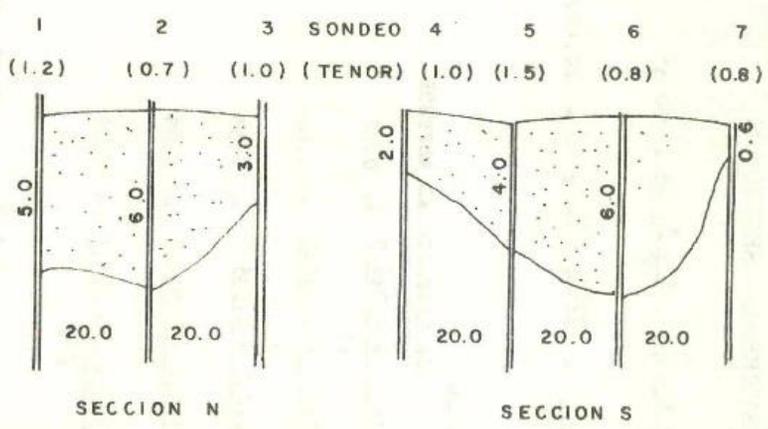
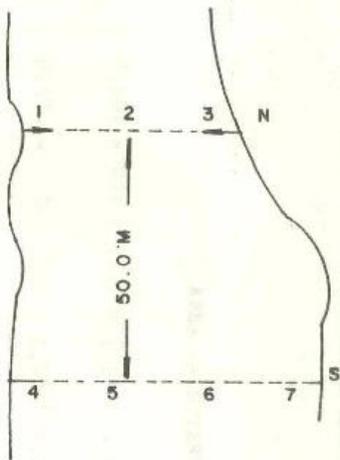


FIGURA.1 METODO DE AREA Y FACTORES PROMEDIO

AREA TRANSVERSAL - SECCION N

$$A_N = \frac{5}{2} \times 20 + \frac{5}{2} \times 20 = 200 \text{ m}^2$$

$$\text{VOLUMEN TOTAL} = \frac{200 + 226}{2} \times 50 = 10.650 \text{ m}^3$$

AREA TRANSVERSAL - SECCION B

$$A_B = \frac{2}{2} \times 20 + \frac{4}{2} \times 20 = 226 \text{ m}^2$$

$$\text{DENSIDAD APARENTE} = 2.1 \text{ TON/m}^3$$

TRAZO FORTERADO

CON RESPECTO AL ESPESOR

$$T_{1,2} = \frac{1.2 \times 5.0 + 0.7 \times 6.0}{11} = 0.92$$

$$T_{2,3} = \frac{0.7 \times 5.0 + 1.0 \times 3.0}{9} = 0.80$$

$$T_{4,5} = \frac{1.0 \times 2.0 + 1.5 \times 4.0}{6} = 1.33$$

$$T_{5,6} = \frac{1.5 \times 4.0 + 0.8 \times 6.0}{10} = 1.08$$

$$T_{6,7} = \frac{0.8 \times 6.0 + 0.8 \times 0.6}{6.6} = 0.80$$

CON RESPECTO AL AREA

$$T_{1,2} \times A_{1,2} = 0.92 \times 110 = 102.0$$

$$T_{2,3} \times A_{2,3} = 0.8 \times 90 = 72.0$$

$$T_{4,5} \times A_{4,5} = 1.33 \times 60 = 80.0$$

$$T_{5,6} \times A_{5,6} = 1.08 \times 100 = 108.0$$

$$T_{6,7} \times A_{6,7} = 0.8 \times 66 = \frac{52.8}{414.8}$$

$$T = \frac{414.8}{200 + 226} = 0.97 \text{ ONZ./TON} \quad \text{CONTENIDO FERTALICO} = 10.650 \times 2.1 \times 0.97 = 21.694 \text{ ONZ}$$

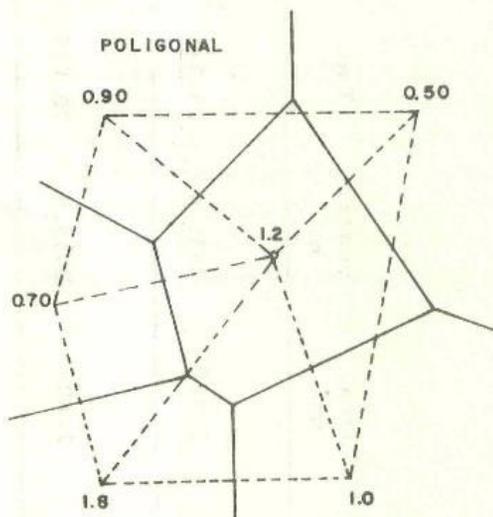
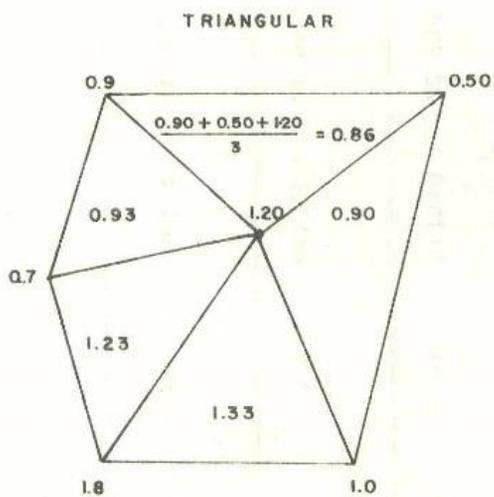


FIGURA 2 METODOS ANALITICOS

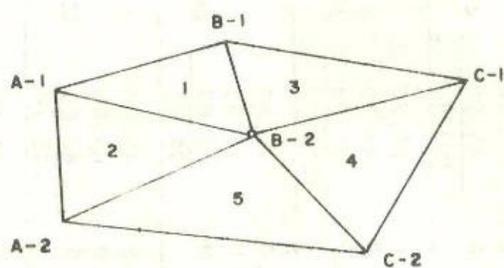


FIGURA 3 DETERMINACION DE VALORES PARA CADA TRIANGULO, PONDERANDO CON ESPESORES

	Sondeo	Esesor Mts.	Análisis % X	E. % X	X	Esesor Promedio	Área. m ²	Volumen m ³	Ton.	X Tons.
1	A - 1	3.5	25.0	85.50	21.84	3.07	2.520	7736.4	19.341	4.224
	B - 1	3.2	22.0	70.40						
	B - 2	2.5	18.0	45.00						
		9.2		200.90						
2	A - 1	3.5	25.0	85.50	20.31	2.87	2.608	8058.9	20.147	4.092
	A - 2	2.6	17.0	44.20						
	B - 2	2.5	18.0	45.00						
		8.6		174.70						
3	B - 1	3.2	22.0	70.40	20.51	2.90	3.150	9135.0	22.837	4.684
	B - 2	2.5	18.0	45.00						
	C - 1	3.0	21.0	63.00						
		8.7		178.40						
4	B - 2	2.5	18.0	45.00	21.68	2.70	2.375	6412.5	16.031	3.476
	C - 1	3.0	21.0	63.00						
	C - 2	2.6	26.0	67.60						
		8.1		175.40						
5	A - 2	2.6	17.0	44.20	20.36	2.57	2.484	6383.9	15.960	3.249
	B - 2	2.5	18.0	45.00						
	C - 2	2.6	26.0	67.60						
		7.7		156.80						

Secciones Transversales:

El cuerpo mineralizado se divide en bloques definidos por secciones transversales paralelas. Figura 4. Según la variabilidad de los tenores se utilizan dos sistemas para la asignación de valores a los bloques, así:

En el método corriente se asume que la influencia de un sondeo va hasta el punto medio entre dos sondeos aledaños y es más adecuado cuando la variación de los tenores no es brusca, Figura 4. a) en caso contrario es preferible utilizar el método de la correlación lineal, Figura 4. b) en el cual dos sondeos limitan un bloque y el tenor asignado es el promedio entre ellos. Esto permite suavizar los errores que pueden introducir los saltos de los valores. En algunos pocos casos las secciones se construyen uniendo puntos de igual tenor (isoclinas).

Bloques de extracción

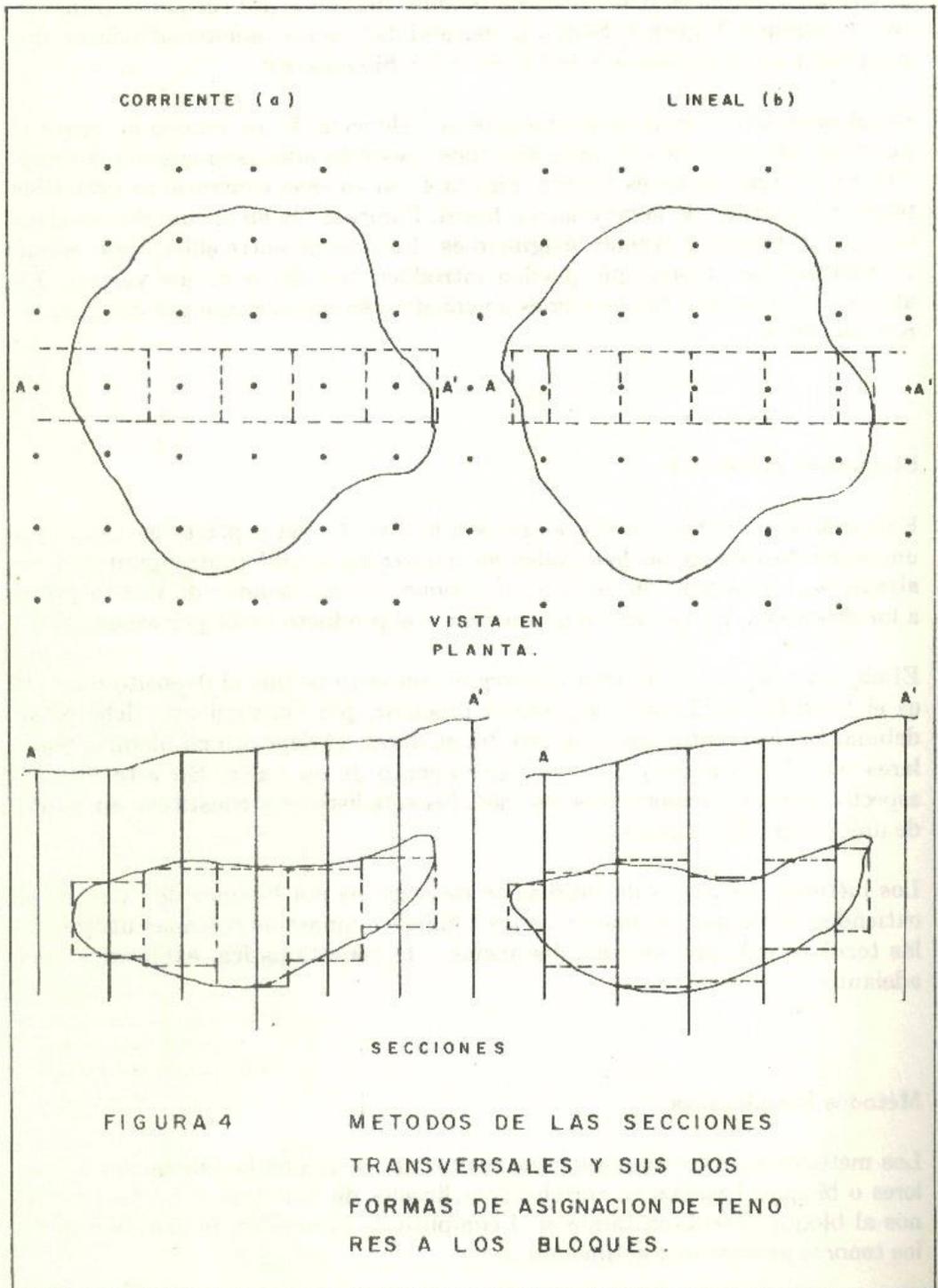
Este método se refiere principalmente a la división del depósito en bloques o unidades de extracción los cuales se muestrean en diferentes puntos a su alrededor. La asignación de tenor al bloque se hace ponderado con respecto a los espesores. La variable a promediar es el producto tenor por espesor.

El objetivo de estos métodos obedece al concepto de que el depósito mineral es el almacén de la materia prima a procesar, por consiguiente, debe estar debidamente inventariado, con este fin se divide el depósito en bloques regulares bien localizados y con un conocimiento de su valor. En este último aspecto, son muy importantes los métodos estadísticos y constituye su punto de unión con los geométricos.

Los métodos modernos de estimación de reservas por bloques de extracción, extienden al bloque los tenores de los sondeos o muestras cercanas utilizando las técnicas del inverso a las distancias o la geoestadística, explicados más adelante.

Métodos Estadísticos:

Los métodos estadísticos tienen su mayor aplicación en la asignación de valores o bloques basados en correlaciones lineales de muestras o sondeos cercanos al bloque. Permiten también el cómputo de intervalos de confianza de los tenores asignados o estimados.



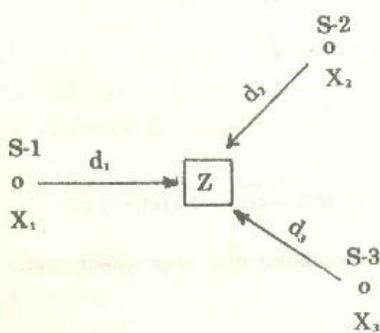
SONDEO	TENOR	ESTIMACION DE LA PRECISION
1	9.2	X = Tenores individuales N = Número total de ensayos
2	8.6	ΣX = Sumatoria de ensayos X = Promedio = $\frac{\Sigma X}{N}$
3	9.6	ΣX^2 = Sumatoria del cuadrado de los ensayos
4	9.4	$(\Sigma X)^2$ = Cuadrado de la sumatoria de X
5	9.8	S = Desviación Standard
6	8.4	$S = \sqrt{\frac{\Sigma X^2 - X(\Sigma X)}{n - 1}}$
9	10.0	$t_{0.025}$ valor estadístico para la estimación de límites con el 95% de confianza.
10	9.0	
11	10.1	$T_{0.025}$ para $N = 40$ $t_{0.025} = 2.021$
12	10.3	Valor promedio estimado = $X \pm '0.025^s/\sqrt{N}$
14	9.7	$X = 10.03$ $S = 0.695$ $N = 40$
15	9.9	
16	9.6	$X \pm '0.025^s/\sqrt{N} = 10.03 \pm 2.021 (0.695/\sqrt{40}) = 10.03 \pm 0.22$
17	9.5	
18	9.4	Se dice que existe 95% de probabilidad que el promedio está entre 9.81 y 10.25.
19	9.6	
20	9.9	Ai se quiere reducir el intervalo de confianza a 0.10 es decir
21	10.1	que tenta el 95% de probabilidad de que el promedio varía entre
22	10.3	10.03 ± 0.10 . ¿Cuántas perforaciones más se requieren?
25	10.2	
26	10.4	$0.10 = \frac{'0.025 \cdot S}{\sqrt{N}}$ $N = \left(\frac{'P.025 \times S}{0.10} \right)^2$
27	10.5	
28	10.4	
29	10.6	29
29	10.6	$N = \left(\frac{2.021 \times 0.695}{0.10} \right)^2 = 196$ Rta = 156
30	10.6	
31	9.8	
33	10.2	Aquí se ha empleado la misma S pero es evidente que con mayor
34	10.8	Número de muestras ésta será menor de modo que al efectuar
35	10.4	las 156 perforaciones, el intervalo de confianza será menor.
37	11.2	También se podría distribuir determinado número de sondeos
38	11.0	y recalculer N , repetir el proceso hasta obtener la precisión
39	11.4	deseada.
40	11.6	

FIGURA 5.— Análisis estadístico corriente

Las técnicas estadísticas son una herramienta para determinar el número adecuado de perforaciones para alcanzar determinada precisión en el cálculo de tenores promedio y consecuentemente de las reservas, Figura 5.

Se mencionarán aquí dos métodos: El estadístico corriente y el geoestadístico.

En el primero se considera que las variables de un depósito son aleatorias es decir, totalmente independientes. Un análisis sencillo calcula desviaciones típicas a varianzas e intervalos de confianza como medida de precisión en el muestreo, Figura 5. La asignación de tenores se efectúa por el método de la ponderación de los tenores conocidos cercanos al bloque con el inverso de las distancias elevadas a un exponente empírico, usualmente entre 1 y 2, Figura 6.



$$X_z = \frac{X_1/d_1^m + X_2/d_2^m + X_3/d_3^m}{d_1^m + d_2^m + d_3^m}$$

m = Factor de ponderación, entre 1 y 2 usualmente
 S = Sondeo
 X_i = Tenores

FIGURA 6.— Asignación de tenor a un bloque por el método del inverso a las distancias.

La geoestadística busca correlaciones entre las muestras y las distancias que las separan. La geoestadística trata de perfeccionar las técnicas estadísticas al considerar que:

- Los parámetros de un depósito (tenores, espesores) no son del todo independientes, es decir, pueden presentar cierta continuidad.
- Los tenores tienen un soporte, es necesario definir el pequeño volumen que los contiene.
- La continuidad puede no ser la misma en todas las direcciones, se dice entonces que el depósito presenta anisotropías.
- Las variables presentan una estructura, la dependencia de las muestras decrece con la distancia y puede alcanzar niveles de inde-

pendencia en algunos casos, o continuar la dependencia en otros, o ser totalmente independientes.

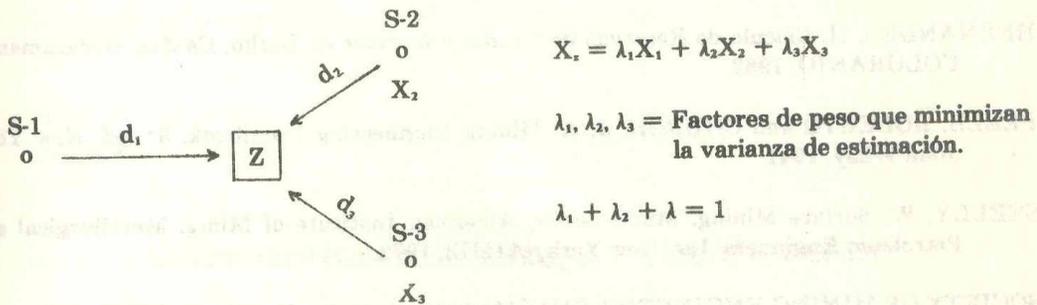


FIGURA 7.— Asignación de tenor a un bloque por el método geoestadístico

El método geoestadístico tiene las mismas aplicaciones que el estadístico corriente. La asignación de tenores se realiza usando la ecuación, Figura 7.

$$X_z = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3$$

donde $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, son factores de ponderación (Kriging) que minimizan la varianza de estimación para el tenor asignado X_z .

La geoestadística es una rama de la estadística y su tratamiento es más amplio que los propósitos de este artículo

ABSTRACT

Most ore reserve calculation methods are treated in this paper. The choice of the method depends on the reliability of the data, in other words with preliminary data, simple method must be used. But when exploration progresses and good information is obtained such factors as geological features, exploitation methods (ore reserves inventory) and precision should be considered in the selection of the reserve calculation procedure.

BIBLIOGRAFIA

- HERNANDEZ, H.** Cálculo de Reservas de Caolín de Barroblanco, Oiba, Santander, Bucaramanga, UIS, 1976.
- HERNANDEZ, H.** Cálculo de Reservas de Uranio y fosfatos de Berlín, Caldas. Bucaramanga, COLURANIO, 1982.
- PEELE, ROBERTO and CHURCH, J. A.** Mining Engineering Handbook. 3ª. ed. New York, John Wiley, 1941.
- SEELEY, W.** Surface Mining. Mudd Series, American Institute of Minig, Metallurgical and Petroleum Enginners, Inc. New York, (AIME), 1972.
- SOCIETY OF MINING ENGINEERS. SME.** Minig Enginerring Handbook AIME, 1972.
- TULCANAZA, F.** Los procedimientos Geoestadísticos en análisis y estimación de yacimientos. Bucaramanga (Colombia, UIS. Boletín de Geología, 11(25), junio 1977.