

Modelo analítico para evaluar un yacimiento mineral aplicación en un proyecto de minado superficial

Analytical model for ore deposit evaluation. A surface mine project case application

Oswaldo Ortiz Sánchez ¹

Recibido: julio 2018 - Aprobado: noviembre 2018

RESUMEN

Este estudio presenta un modelo analítico simplificado para valorar un yacimiento mineral en un proyecto de explotación o que se encuentra en explotación. Las variables que aparecen en el modelo son las leyes medias de los metales contenidos, el tonelaje anual de extracción mina y la reserva mineral del yacimiento. El modelo calcula el ingreso neto anual de efectivo y a una tasa anual de retorno fijado por el inversionista, calcula el valor neto del yacimiento después de descontar la inversión total. Se ejecuta una aplicación en un yacimiento de cobre-zinc. Las 3 variables que aparecen en el modelo fueron elegidas como las más importantes de un conjunto de factores que influyen en el flujo anual de fondos. El número de variables en el modelo sigue la ley de Pareto del 80/20 que establece que el 20 % de factores explican o representan el 80 % de la solución. Antes de elegir el método superficial se hizo una comparación con 2 métodos de minado subterráneo de menor costo utilizando como criterio la relación crítica de desbroce para descartar preliminarmente uno de los sistemas de minado.

Palabras claves: Valorar; yacimiento; explotación; modelo; ley; retorno; tasa.

ABSTRACT

This study presents a simplified analytical model for ore deposit evaluation for either an orebody in a stage of project or in actual exploitation. Model variables are average ore grades of contained metals, annual rate of ore mined and ore deposit reserves. The model estimates annual net cash income, return on investment and net value of the ore deposit at the investor's fixed annual interest rate after discounting the total investment. An example of the model application is shown for a copper-zinc ore deposit mined by the open pit method. All three variables of the model are considered to be the most important factors and were chosen from a number of known variables of the annual income flow. The criteria for variables selection follow the 80/20 Pareto rule which shows that 20 percent of the factors account for 80 percent of the results. The surface mining method was chosen by comparing the critical waste to ore ratio of two low cost underground mining methods, with the surface mining system.

Keywords: Evaluation; orebody; exploitation; model; grade; economic return; rate.

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú
E-mail: sanmarcosaldia@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Una de las tareas importantes de todo técnico minero es evaluar un yacimiento mineral para su posible compra, venta o puesta en operación. Esto se traduce como un análisis económico del depósito mineral que generalmente debe responder a 3 preguntas básicas: 1) Cuanto debe pagarse por la propiedad minera o cuánto vale la propiedad minera, 2) A qué tonelaje debe explotarse el yacimiento o cual debe ser la vida del yacimiento y 3) Cuanto será el retorno sobre la inversión.

Estas preguntas son inciertas y difíciles de responder si se trata de un yacimiento poco conocido en relación a sus leyes y tonelajes de reserva. Este es el caso de la mayoría de prospectos mineros ya que buen conocimiento del potencial del yacimiento requiere por lo general, alta inversión en exploración.

Las tres variables del modelo se eligieron por ser las más representativas después de efectuar un análisis de regresión y calcular los coeficientes de correlación de cada variable vs. flujo anual de caja encontrando que las mayores correlaciones corresponden a las 3 variables que presenta el modelo. Adicionalmente, el número de variables de un fenómeno físico expresado en la forma de un modelo matemático representativo del problema real puede aproximarse mediante la aplicación de la ley Pareto del 80/20 mostrada por Koch R. (2015, p.183) que establece que el 20 % de variables dan como mínimo el 80 % de la solución de un problema. Cada una de estas variables se interrelacionan con otras variables que modifican a la variable dependiente que es el flujo anual de fondos.

II. CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA

La evaluación de un yacimiento mineral es diferente que la mayoría de evaluaciones económicas industriales debido a la necesidad de elegir una vida económica para el depósito mineral. En una evaluación distinta al caso minero, la vida económica se establece por condiciones externas en cambio en una propiedad minera la vida económica es una incógnita o parámetro que debe calcularse siendo de naturaleza compleja e involucra varias áreas de política de la empresa que generalmente rebasa el cálculo de la vida óptima basado en consideraciones financieras solamente.

La alta inversión y el carácter riesgoso de la puesta en marcha de una operación minera hacen que la rentabilidad y el valor presente se calculen a dos tasas de interés una de las cuales la tasa especulativa, responde al riesgo inherente de un proyecto minero.

2.1. Vida económica óptima de un yacimiento mineral

Este término es sinónimo de nivel de producción óptimo y puede aplicarse los mismos conceptos estándar que los usados en cualquier otro tipo de inversión. Se tiene el costo de capital como criterio para medir la bondad de un proyecto ya que cualquier inversión que rinda una tasa de retorno menor que el costo de capital tenderá a disminuir la tasa de crecimiento de las utilidades o rendimiento de los dividendos de los accionistas. A diferencia de cualquier otra industria donde la producción puede continuar por tiempo

indefinido, una operación minera se agota y desaparece forzando a tomar medidas de tipo social y de restauración del medio ambiente alterado que representa un alto costo para el gestor minero.

III. OBJETIVO

Tratando de responder las 3 preguntas planteadas en la introducción, se desarrolla un modelo analítico para determinar el valor de venta, la velocidad de explotación y la tasa de retorno sobre las inversiones aplicadas a leyes, tonelajes de reservas y niveles de tratamiento. Adicionalmente, se prueba el modelo en el yacimiento Magistral ubicado en la sierra norte de la Región La Libertad evaluándolo para una posible explotación comercial a una tasa de interés sobre el capital invertido.

Si se conoce el tamaño del yacimiento expresado en tonelaje de mineral, el valor presente del yacimiento varía con el nivel de producción elegido. A mayor velocidad de minado y tratamiento del mineral, mayor valor presente del yacimiento por lo que la evaluación de un depósito mineral es dinámico y va a cambiar no solo con el tiempo sino con sus parámetros como ley, calidad del mineral, precios de los metales contenidos, costo operativo, etc.

IV. INFORMACIÓN PARA EL CÁLCULO ECONÓMICO

4.1 Calidad del mineral y reservas

Para el desarrollo del modelo se tienen los datos sobre tonelajes de reservas, leyes y calidad del mineral este último expresado en términos de contaminantes que pueden reducir y hasta anular el valor del mineral.

El depósito mineral Magistral contiene minerales primarios de sulfuros de cobre y zinc sin contaminantes de arsénico, plomo, mercurio, antimonio y otros según el análisis preliminar. Es un depósito mineral compuesto por un cuerpo tabular inclinado y vetas menores localizados cercanos a la superficie topográfica.

Los datos sobre tonelaje de mineral se basan en la perforación de prospección geológica del yacimiento conteniendo 3 millones de tons. de mineral con leyes medias de 0.70 por ciento cobre y 1.10 por ciento zinc. Adicional a este tonelaje de reservas probadas, se efectuó un programa de perforación de taladros DTH habiendo descubierto un millón de toneladas adicionales de reservas probables al norte del cuerpo mineral principal. No se toma en cuenta la reserva posible mostrada por la exploración geológica.

4.2 Datos para el cálculo económico

El análisis preliminar muestra que el yacimiento puede explotarse por métodos superficiales lo cual se probó preliminarmente analizando dos métodos de minado subterráneos posibles competidores del cielo abierto en este proyecto. Los sistemas de subniveles con sostenimiento y el de cámaras y pilares cuyos costos de minado + tratamiento + transporte y gastos generales se estimó en \$ 18.50 y 21.10 por tonelada tratada respectivamente. Para el método a cielo abierto se consideró un costo de desencapado de \$ 3.10/ton de estéril y un costo de minado de \$ 3.40/ton de mineral.

Con estos datos se evaluó cada método subterráneo contra el sistema superficial (cielo abierto), calculando las relaciones críticas de desbroce con el criterio de que es aplicable el método superficial si la relación crítica resultante es superior a uno. Para relaciones críticas iguales a uno puede usarse cualquiera de los métodos debiendo analizarse otros parámetros para descartar uno de los métodos.

Método de Subniveles:

$$(18.50 - 3.40) / (3.10 \times 3.40) = 1.4 > 1$$

aplicar minado superficial.

Método de Cámaras y Pilares:

$$(21.10 - 3.40) / (3.1 \times 3.40) = 1.6 > 1$$

aplicar método superficial.

Adicionalmente, el método superficial es aplicable por tratarse de un yacimiento tabular y sistema de vetas a poca profundidad.

El análisis económico se efectuó mediante un modelo analítico versátil desarrollado en base a variables conocidas como precios, leyes de los metales existentes en el mineral y el concentrado, recuperación lograda y relación de concentración. Se asumirá ciertos datos necesarios como costos de minado y tratamiento en planta, flete y/o transporte, regalía, gastos administrativos y de venta y costo general. La Tabla 1 presenta los datos básicos que se empleará en el desarrollo del modelo.

Tabla 1. Información para el análisis del modelo

	Cobre	Zinc
Ley del mineral (%)	0.7	1.1
Ley del concentrado (%)	22	49
Recuperación (%)	75	85
Relave (%)	0.18	0.17
Relación de concentración	42.0/1	52.4/1
Precio neto metal en mineral (\$/lb)	2	0.85
Relación D/M	2.5/1	
Costos:		
Minado (base 360,000 tma)	\$ 7.00/tm de mineral	
Concentración (base 360,000 tma)	\$ 8.50/tm	
Flete (transporte)	\$ 100.00/tm de concentrado	
Regalía	5 % de venta neta	
Gasto de venta	3% de venta bruta	
Otros gastos	25 % de costo de producción	

V. METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DEL MODELO

Se desarrolla una fórmula analítica, para el cálculo del ingreso neto conteniendo variables como ley del mineral minado, tonelaje de reservas y producción anual. Los costos de inversión y operación se estimaron mediante indicadores de inversión y de costos de operación tanto en mina como en planta de flotación tomando en cuenta además la experiencia existente en relación a variación del costo a diferentes niveles de producción.

Con la expresión del ingreso neto se calculó el retorno sobre la inversión para varios niveles de producción anual usando estimados de leyes y reservas. La tasa mínima aceptable definida por Baca Urbina (2015, p. 69), se fijó en 20 por ciento.

Se graficó para cada una de las reservas probadas y probadas más probables, el retorno sobre la inversión vs. Tonelaje de producción anual. Igualmente se trazaron curvas de valor del yacimiento para diferentes niveles de producción anual.

5.1 Proceso de cálculo

Se calcula primero los metales recuperados para obtener el ingreso bruto, luego el valor neto del concentrado después de restar el costo de transporte. Se acumulan los costos de operación mina y planta, gasto administrativo, gasto de venta, amortización de la inversión en mina y planta y la regalía fijada para luego restarlo del valor neto obteniendo el ingreso anual. A este monto se aplica el impuesto a la renta para estimar finalmente el flujo anual de caja al agregarle la amortización del capital invertido en planta y mina. Este monto se convierte en valor presente neto a una tasa de interés del 20 por ciento.

5.1.1 Nomenclatura de Variables

En el modelo analítico se consideraron las siguientes variables:

- A = Libras de cobre/ton.m. de mineral tratado en planta.
- B = Libras de zinc/ton. métrica de mineral tratada en planta
- C = Capacidad anual de planta en ton.m.
- R = Relación de concentración
- D = Libras de cobre recuperadas/año
- E = Libras de zinc recuperadas/año
- f = Porcentaje de cobre en relave
- g = Porcentaje de zinc en relave
- T = Toneladas métricas de reservas

5.1.2 Metales recuperados

Las libras de cobre recuperadas por año (D) se calculó multiplicando el contenido unitario de metal/tonelada de mineral por la capacidad anual de planta en toneladas y luego restando de esta cantidad el metal en relaves.

Cobre recuperado:

$$\begin{aligned} D &= A.C - 2204.f / 100 (C - C / R) \\ &= C [A - 22.04 f + 22.04 f / R] \\ &= C [A - 22.04 f] (1) \end{aligned}$$

Debido a que R es una cantidad grande y relativamente constante en el mineral que va a planta, el último término del paréntesis es pequeño por lo que puede no considerarse con el objeto de simplificar los cálculos.

Zinc recuperado

El tonelaje de zinc recuperado/año tiene la misma estructura que (1) por lo que puede expresarse como:

$$E = C [B - 22.04 g] (2)$$

5.2 Valor del concentrado

Pruebas efectuadas en el laboratorio nos dan leyes de 22.0 por ciento y 49.0 por ciento para los concentrados de cobre y zinc respectivamente. Las recuperaciones son de 75 por ciento y 85 por ciento para el cobre y zinc respectivamente. Los relaves ensayan 0.18 por ciento cobre y 0.17 por ciento zinc. Las relaciones de concentración son de 42 /1 para el cobre y 52.4/1 para el zinc. Los precios analizados son de US \$ 2.00/lb para el cobre y US. \$ 0.85/lb para el zinc. Estos precios son conservadoramente bajos pero no invalidan el modelo.

5.2.1 Ingreso bruto

El ingreso bruto depende de la recuperación del cobre y del zinc y de la capacidad real de la planta de concentración en tons de mineral tratado.

La venta bruta anual se estima multiplicando el peso de cada tipo de metal por su cotización respectiva y luego sumando:

$$\begin{aligned} \text{Ingreso Bruto} &= 2.00 D + 0.85 E \\ &= C [2.00(A - 22.04 f) + \\ &0.85 (B - 22.04 g)] \end{aligned}$$

Con la finalidad de alcanzar flexibilidad o la posibilidad de considerar las ventajas económicas de extraer o minar mineral de leyes altas o bajas, se expresa la recuperación en términos de la ley del mineral minado y tratado. Las pruebas de flotación indican que los relaves contienen 0.18 % Cu y 0.17 % Zn. Por lo tanto todos los valores de cobre y zinc por encima de estos niveles serán recuperados.

De esta forma la venta bruta anual (VBA) puede expresarse de la siguiente manera:

$$VBA = C (2.00 A + 0.85 B - 11.12) (3)$$

5.2.2 Costo del flete

Para calcular el costo anual del flete se multiplica las toneladas anuales de concentrados producidos por el costo unitario del flete. Este costo se estimó en US \$ 100.00/ ton.m. en base al precio FOB puerto Callao.

Llamando: k1 y k2 el porcentaje de cobre y zinc en concentrados respectivamente y X ton. m. de concentrado producidos/año, se tiene:

$$X = 100D/(2204k1) + 100E/(2204k2) = 100C[(A - 22.04 f)/(2204x22) + (B - 22.04g)/(2204x49)]$$

$$\text{Costo flete: } C (0.2062 A + 0.0926 B - 1.17)$$

$$\text{Costo flete: } C(0.21A + 0.09 B - 1.17) (4)$$

5.2.3 Ingreso neto

Se obtiene restando el costo del flete del ingreso bruto. De este modo la fórmula del ingreso neto (IN) es:

$$\begin{aligned} IN &= C[2.0A + 0.85B - 11.11] - C[0.21A + 0.09 B - 1.17] \\ &= (1.79A + 0.76 B - 9.94)C (5) \end{aligned}$$

5.3 Regalía

La Regalía anual se fijó en 5 % de la venta neta o sea: $C(1.79 A + 0.76B - 9.94) \times 0.05$

$$\text{Regalía} = [0.09A + 0.038 B - 0.497] C (6)$$

5.4 Costo Operativo

Para estimar el costo operativo así como la inversión debe elegirse primero el nivel de producción (VOE) basado en las reservas totales (probadas y probables) de 4 millones de ton. métricas. Este cálculo nos permite estimar la vida del proyecto. Hay casos en que en forma empírica se elige la vida del proyecto entre 8 y 20 años considerando que se requiere 8 años en promedio para recuperar la inversión hasta un máximo de 20 años. Es recomendable que el tamaño de la operación mina y planta se escojan tal que los ingresos maximicen la utilidad sobre el capital invertido.

Existen varios métodos y fórmulas empíricas para establecer el tamaño de una operación minera basados en la función $y = K Q^x$ donde

K es una constante, Q valor numérico que más influencia tiene en la variable dependiente "y". "x" es exponente que varía entre 0.1 y 1.0 y que puede calcularse estadísticamente por mínimos cuadrados. Una de estas fórmulas $VOE = (1 \pm 0,2) 6.5$. (Reservas millones de tons)^{0.25} se encuentra en Hustrulid W. (1995, p. 447) que luego fue afinado por otros autores a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} VOE &= 7.6 (\text{Reservas millones de tons})^{0.276} \\ &= 7.6 \times 4^{0.276} = 11 \text{ años} \end{aligned}$$

$$\text{Luego: Producción anual mina} = 4'000,000$$

$$/11 = 360,000 \text{ tma.}$$

Para reservas probadas solamente se tendría:

$$\begin{aligned} \text{Producción anual mina} &= 3'000,000 / (7.6 \times \\ &3^{0.276}) = 290,000 \text{ tma.} \end{aligned}$$

5.4.1 Costo operativo mina

A un nivel de producción de 360,000 tma de mineral de mina existen estimaciones del costo operativo mina de \$ 7.00/tm de mineral para una relación D/M = 2.5/1 a un costo de minado de \$ 3.40/tm de mineral y \$ 3.10/tm de desmonte para el desencapado. Adicionalmente, la experiencia indica que aproximadamente 1/3 de este costo es labor y 2/3 materiales y suministros. Estos costos varían con la capacidad anual de minado (C) pudiendo expresarse en la forma de un polinomio del modo siguiente:

$$\text{Costo operativo mina} = d C^x + e C.$$

Estadísticamente se ha encontrado que el costo anual de labor es proporcional a la potencia $x = 0.4$ de la capacidad anual (Arteaga R., et al, 1997, p. 178) y que los

materiales y suministros son directamente proporcionales a la capacidad anual, con lo que se tiene la siguiente relación:

$$7.00 = d (360,000)^{0.40} + e (360,000) \text{ de donde:}$$

$$d = 2.30 \times 360,000 / (360,000)^{0.40} = 4960 \text{ y}$$

$$e = 4.70 \times 360000 / 360000 = 4.70$$

Por lo tanto: Costo Operativo Mina =

$$4,960 C^{0.4} + 4.70 C. (7)$$

5.4.2 Costo operativo plata de flotación.

Para el nivel de tratamiento en planta de 360,000 tma se ha estimado en forma independiente el costo unitario de \$ 8.50/ton.m. Se asume que aproximadamente 45 por ciento de este costo es labor y 55 por ciento son materiales y suministros. De acuerdo a la experiencia y lo mostrado por Arteaga R., et al (1997, p. 130), el costo de labor es proporcional al exponente 0.40 de la capacidad de tratamiento (C) y los materiales y suministros son directamente proporcionales a la primera potencia de la capacidad anual de la planta. De esta forma la expresión para el costo de tratamiento puede ponerse en la forma de un polinomio del modo siguiente:

$$\text{Costo Operación Planta de flotación} = j C^{0.40} + k C.$$

Por lo tanto para el nivel de producción planta de 360,000 tma se tendrá el equivalente:

$$8.50 = j 360,000^{0.4} + k 360,000$$

de donde se deducen las constantes j y k:

$$j = 3.80 \times 360000 / 360000^{0.4} = 8,200 \text{ y}$$

$$k = 4.70 \times 360000 / 360000 = 4.70$$

Por lo tanto: Costo operativo planta de flotación:

$$8,200 C^{0.4} + 4.70 C. (8)$$

5.5 Costo de Capital y Amortización

El costo de capital y la amortización pueden darse en función del tonelaje anual extraído o tratado y son de la forma $Y = K C^x$ donde K es una constante, x es el exponente que varía entre 0.0 y 1.0, y C es la capacidad anual. Estas funciones están influenciadas por el tamaño de la operación con mayor economía a mayor capacidad. Otras variables son los cambios inflacionarios y tecnológicos, ubicación, condiciones socio-económicas del entorno, disponibilidad de mano de obra etc., por lo que es recomendable evaluarlo por áreas de costo, mina, planta, talleres, etc. cada uno con su curva inversión-capacidad.

5.5.1 Inversión y amortización en Mina.

Se estimó en forma independiente la inversión en mina para una capacidad de 360,000 tma obteniendo un monto de US \$ 5'570,000. Esta inversión varía con la potencia 0.8 de la capacidad anual de extracción. El equipo mina tiene el máximo peso en esta inversión.

De esta forma la inversión en mina puede expresarse como:

$$\text{Costo de capital mina} = r (360,000)^{0.8} \text{ ó}$$

$$r = 5'570,000 / (360,000)^{0.8} =$$

$$5'570,000 / 27,850 = 200$$

$$\text{Costo de capital mina} = 200 C^{0.8} (9)$$

El equipo mina se amortiza en 5 años que es un periodo justificable en forma contable y además este periodo se aproxima a lo que se tendría en caso de contratar la extracción mina. De esta forma:

Costo de amortización equipo mina:

$$200/5 C^{0.8} = 40.00 C^{0.8} (10)$$

5.5.2 Costo de capital y amortización planta de tratamiento.

Para una capacidad de 360,000 tma las estimaciones de inversión en planta son de US \$ 13'500,000. Se asume que esta inversión variará con la capacidad a la potencia 0.70 y como la vida de la planta se estima dividiendo el tonelaje de reserva entre la capacidad anual lo que puede mostrarse en la siguiente forma: Sea h la constante de proporcionalidad y T el tonelaje de reservas, el costo de capital se puede estimar de la relación:

Costo de capital planta

$$= h (360,000)^{0.7} = 13'500,000 \text{ ó } h = 1,741.$$

Por lo tanto:

$$\text{Costo de capital planta de flotación} = 1,741 C^{0.7} (11)$$

La amortización de la inversión en planta se estima dividiendo el costo de capital entre el tonelaje de reservas y luego multiplicando este resultado por la capacidad anual de planta, con lo que la amortización aplicable a planta será:

$$\text{Amortización planta de flotación} = 1,741 C^{1.7}/T. (12)$$

5.6 Gasto administrativo

Depende del costo de producción en lugar del costo de venta pudiendo calcularse como un porcentaje del costo operativo. Utilizando el costo de presupuesto de empresas similares puede deducirse que el costo administrativo sin considerar ventas es aproximadamente 25 por ciento del costo de operación y su expresión analítica para el caso del proyecto Magistral es:

Gasto administrativo

$$= 0.25(4960 C^{0.4} + 4.70 C + 8200 C^{0.4} + 4,70 C)$$

$$= 0.25(13,160 C^{0.4} + 9.40 C)$$

$$= 3290 C^{0.4} + 2.35 C (13)$$

5.7 Gasto de venta

Se supone que las ventas serán efectuadas por convenio con alguna empresa vendedora calculándose un costo de 3 por ciento del valor bruto del tonelaje anual producido o sea:

$$\text{Gasto de venta} = 0.03C (2.00 A + 0.850 B - 11.12)$$

$$= (0.06 A + 0.026 B - 0.34) C (14)$$

5.8 Capital de trabajo

Se calcula como un porcentaje del valor de la venta neta pero también podría estimarse como equivalente al 25 por ciento del costo total de operación más el gasto administrativo sin incluir ventas o sea que el capital de trabajo es equivalente a 3 meses de gastos de operación más gasto administrativo por lo que su expresión analítica es:

$$\begin{aligned} \text{Capital de trabajo} &= 0.25 (4960 C^{0.4} + 4.70 C + 8200 C^{0.4} + 4.70 C + 3290 C^{0.4} + 2.35 C) \\ &= 4113 C^{0.4} + 2.94 C \quad (15) \end{aligned}$$

5.9 Agotamiento

En la legislación minera peruana no se aplica este rubro en la actualidad.

VI. INGRESO

Este ítem ya fue calculado en el acápite 5.2 pero ahora se descontará todos los rubros del costo para aplicar la tasa del impuesto a la renta y tener los componentes del flujo anual de fondos.

6.1 Ingreso neto antes de Impuestos (INAI)

Al combinar todas las expresiones dadas anteriormente para los componentes del ingreso y del costo, se obtiene el ingreso neto antes de impuestos en la forma de un modelo analítico. En esta expresión no se incluye los costos de capital mina y planta ya que estos son tomados en cuenta como gastos de amortización. Igualmente no se incluye el capital de trabajo porque este rubro se recupera al final de la vida de la operación. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{INAI} &= C (1,79 A + 0,76 B - 9,94) + C (0,09 A + 0,038 B - 0,497) - 4960 C^{0.4} - 4.70 C - 40 C^{0.8} + 1741 C^{1.7} / T - 3290 C^{0.4} - 2.35 C - 0.06 A C - 0.026 B C + 0.33 C \\ &= C (1.64A + 0.696B - 20,86) - 16450 C^{0.4} - 40 C^{0.8} - 1741 C^{1.7}/T \quad (16) \end{aligned}$$

6.2 Ingreso Neto después de Impuestos (INDI)

Aplicando la tasa de 30 por ciento de impuesto al

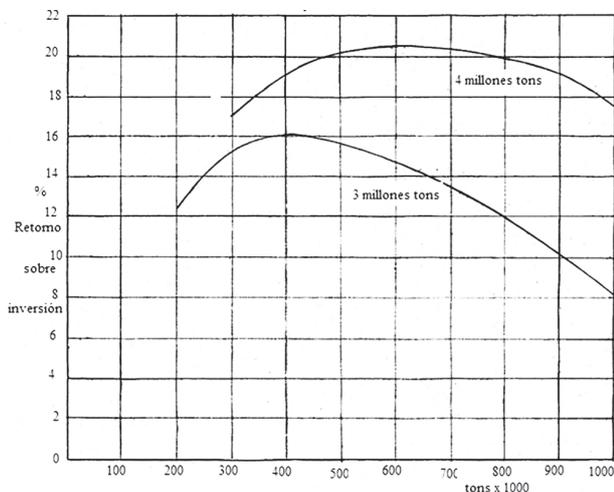


Figura 1. Retorno sobre la inversión (%) vs. Producción anual (tons) a 20% de interés mínimo aceptable

ingreso neto o renta se tiene el ingreso neto después de impuestos (INDI).

$$\begin{aligned} \text{INDI} &= 0.7 C (1.64 A + 0.696 B - 20.86) - 11515 C^{0.4} - 28.0 C^{0.8} - 1218.7 C^{1.7} / T \\ &= C (1.148 A + 0.487 B - 14.60) - 11515 C^{0.4} - 28.0 C^{0.8} - 1218.7 C^{1.7} / T \quad (17) \end{aligned}$$

6.3 Flujo anual de caja: (FAC)

El flujo anual de caja se obtiene agregando a la expresión anterior el monto de la amortización anual o sea:

$$\text{FAC} = (1.148 A + 0.487 B - 14.6) C - 11515 C^{0.4} - 28.0 C^{0.8} - 1218.7 C^{1.7} / T + 864.3 C^{1.7} / T$$

$$\text{FAC} = (1.148 A + 0.487 B - 14.60) C - 11,515 C^{0.4} + 12.0 C^{0.8} + 522.3 C^{1.7} / T \quad (18)$$

Esta expresión nos da el ingreso o flujo neto de efectivo que puede obtenerse de la operación del yacimiento Magistral en términos de las leyes del mineral minado, el tonelaje de reservas y la producción anual.

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se puede graficar el retorno sobre la inversión, el valor del yacimiento, el costo operativo total y la inversión total ya que se tiene las expresiones de cada uno de ellos. Se presentan los dos primeros en función de la capacidad anual minada y tratada en planta.

7.1 Retorno sobre la inversión

En la Figura 1 se muestra el retorno de la inversión en por ciento vs. producción anual para los dos niveles de reservas 3 y 4 millones de ton. métricas. En todos los casos se fijó en 20 por ciento la tasa mínima de rendimiento que puede traducirse como la tasa de inflación más el premio al riesgo.

La función del ingreso neto después de impuestos (INDI) puede maximizarse por derivación con respecto a la capacidad anual de tratamiento en planta y luego igualando

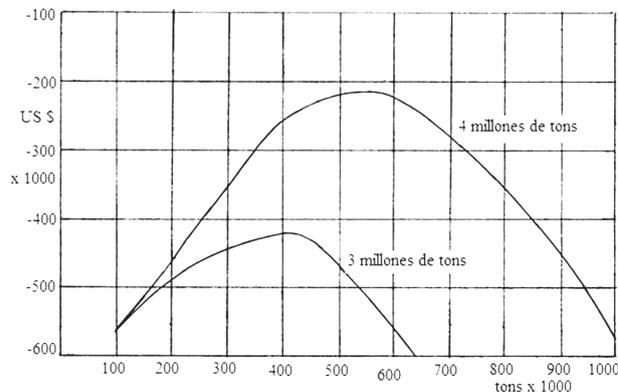


Figura 2. Valor del yacimiento vs. Producción anual a 20% de interés mínimo aceptable

a cero $d(\text{INDI}) / d(C)$. Se determinó que el valor máximo del retorno sobre la inversión para 3 millones de ton.m. de reservas se obtendría a un ritmo de minado de 420,000 tma y para 4 millones de tm de reservas el máximo retorno sobre la inversión es a los 560,000 tma.

A los máximos niveles de extracción anual de mina indicados el retorno sobre la inversión para 3 millones de toneladas métricas de reservas es de 16.1 por ciento en 7.1 años de vida del proyecto y para 4 millones de toneladas de reservas el retorno sobre la inversión es de 20.5 por ciento en 7.1 años de vida del proyecto.

7.2 Valor del yacimiento

Las curvas mostradas en la Figura 2 presentan el valor del yacimiento a cualquier tonelaje de producción anual para las reservas de 3 y 4 millones de toneladas. Los máximos retornos de la inversión son de 16.1 por ciento a un ritmo de minado de 420,000 tma para 3 millones de tm de reservas y de 20.5 por ciento a un nivel de extracción

mina de 560,000 tma para las reservas de 4 millones de tm. Este valor es el valor presente del retorno sobre la inversión por encima del 20 por ciento fijado en este proyecto como la meta para una inversión aceptable. Representa el monto que puede usarse para la adquisición del yacimiento.

Estas curvas se trazaron determinando el ingreso neto de efectivo en cada año por medio de la expresión (18) y calculando luego el valor presente de estos ingresos netos anuales a una tasa de 20 por ciento a lo largo de la vida del proyecto. Esta suma menos la inversión total es el valor del yacimiento. Los valores máximos ocurren a 420,000 y 560,000 tm. anuales de explotación mina. Estas sumas son de \$ -440,000 y \$ -210,000 respectivamente.

VIII. CONCLUSIONES

El yacimiento Magistral con 3 millones de ton.m. de reservas de mineral probados generará el máximo retorno sobre la inversión si se explota a 420,000 tm/año con una

Tabla 2. Ingreso neto y Retorno sobre la Inversión del yacimiento Magistral

Detalle	A 420,000 tm/día		A 560,000 tm/día	
	Por ton.m.	Total	Por ton.m.	Total
OPERACIONAL				
Venta bruta	40.32	15'934,400	40.32	22'584,500
Flete	4.25	1'785,000	4.25	2'379,700
Venta Neta	36.07	15'149,400	36.08	20'204,800
Costo operativo	14.96	6'283,200	14.08	7'885,300
Regalía	1.84	770,700	1.81	1'014,600
Utilidad	19.27	8'095,500	20.19	11'304,900
Gasto general y administrativo	3.74	1'571,800	4.74	2'651,800
Utilidad operacional	15.53	6'523,700	15.45	8'653,100
Amortización	8.01	3'365,500	7.43	4'161,400
Utilidad neta	7.51	3'158,200	8.02	4'491,700
Ingreso antes de impuesto	7.51	3'158,200	8.02	4'491,700
Impuesto a las utilidades	2,25	947,460	2,41	1'347,600
Ingreso neto	5.26	2'210,700	5.61	3'144,100
Flujo de caja	13.27	5'576,200	13.04	7'305,500
INVERSIÓN				
Mina a cielo abierto	6'304,000		7'935,600	
Planta de flotación	15'033,000		18'387,800	
Capital de trabajo	1'965,000		2'465,700	
Total	23'302,000		28'789,100	
Retorno sobre la inversión (%)	16.1		20.1	
Tasa mínima de interés (%)	20		20	
Relación Ingreso/Inversión total	23.9		27.3	
VIDA DEL PROYECTO				
Tons de Mineral	3'000,000		4'000,000	
Tons de concentrados	63,500		85,400	
Años de operación	7.1		7.1	

vida de 7.1 años. El capital invertido será de \$ 23'302,000, el ingreso neto de efectivo será de \$ 5'576,200 por año con un retorno sobre la inversión de 16.1 por ciento. Este retorno sobre la inversión fue maximizado mediante la selección del nivel óptimo de producción anual o alternativamente, la vida óptima de la operación.

Para un nivel de reservas de mineral de 4 millones de tm, el nivel óptimo de explotación es de 560,000 tma con una vida óptima de 7.1 años. El capital de inversión será de \$ 28'789,100, el flujo neto de caja será \$ 7'305,500 anualmente con una tasa de retorno de 20.1 por ciento. La tabla 2 presenta la tabulación de costos e ingreso neto para este caso y el mostrado anteriormente.

A los ingresos indicados anteriormente hay que agregar otros valores tangibles que puede obtenerse de la explotación del yacimiento Magistral. La inversión en planta y mina (equipo de mina), tiene un valor residual después de impuestos de aproximadamente \$ 0.30 por cada \$ 1.00 al final del periodo de vida del proyecto. El estimado de capital no incluye el costo de compra del yacimiento porque se atribuye valor nulo al yacimiento. El yacimiento tendrá valor para el propietario medible en términos del porcentaje de retorno por encima del por ciento de retorno que el concesionario obtiene en otras oportunidades de inversión. Si se considera como meta 20 por ciento de retorno como mínimo la reserva de 3 millones de toneladas de mineral equivale a \$ -420,000 y la reserva de 4 millones de ton. m. de mineral valdría \$ -210,00.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arteaga Rodríguez, R., López Jimeno, C. y Otros (1997). *Manual de evaluación técnico-económico de proyectos mineros de inversión*, p 130- 191, Instituto Tecnológico Geomecánico de España (ITGE). Madrid, España: Editorial Diseño Gráfico.
- Baca Urbina, G. (2015). *Ingeniería económica*. México D.F., México: Edamsa Impresiones S.A.
- Hustrulid W. and Kuchta M., (1995). *Open pit mine planning and design*, p 477. Rotterdam, Netherlands: Editorial A.A. Balkema/Rotterdam, Netherlands.
- Koch Richard (2015). *El principio 80/20 y otras 92 poderosas leyes de la naturaleza*, p. 183. Iztapalapa, México: Grupo Editorial Patria.