

El papel de las Opciones Reales en la valoración de una mina de cobre

Santiago Restrepo Giraldo

Alonso Elías Quiroz Mora

### **Resumen**

El sector de la minería se caracteriza por la existencia de proyectos que poseen flexibilidad operativa y administrativa, debido a la alta volatilidad de los factores externos que afectan el desarrollo de estos proyectos. La metodología apropiada para valorar este tipo de proyectos son las opciones reales ya que incluyen el valor de la flexibilidad en el valor final del proyecto. En la valoración del proyecto minero de cobre se utiliza el método de árboles binomiales, con el cual se analiza y valoriza la opción de cierre temporal de la mina. El resultado de la valoración por este método aumenta en un 10,12% respecto al cálculo realizado por la metodología de valor presente neto, resaltando la importancia de valorar por medio de opciones reales para maximizar el valor total de los proyectos mineros.

**Palabras clave:** opciones reales, valoración, minería, flexibilidad.

## **The role of Real Options in the valuation of a copper mine**

### **Abstract**

The mining sector is characterized by the existence of projects that have operational and administrative flexibility, due to the high volatility of external factors that affect the development of these projects. The appropriate methodology for evaluating this type of project is the real options since it includes the value of the flexibility in the final value of the project. In the valuation of the copper mining project, the binomial tree method is used to analyze and value the option of temporary closure of the mine in five periods. The result of the valuation shows that when assessing the project by this method, the value of the project in the zero period increased 10.12% with respect to the calculation made by the net present value methodology, showing the importance of valuing through real options to maximize the total value of mining projects.

**Key words:** real options, valuation, mining, flexibility

## **1. Introducción**

Las metodologías tradicionales de evaluación de proyectos han sido las más aplicadas al momento de evaluar la viabilidad de estos. Sin embargo, en la actualidad hay proyectos que se caracterizan por la flexibilidad que le dan a la administración para poder tomar decisiones, en torno de cambiar su rumbo inicial. En este contexto la metodología de opciones reales sirve como complemento de las metodologías tradicionales de valoración, tales como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación (PR).

Uno de los sectores donde es propicio encontrar algún tipo de opción real es el sector minero. Por ello bajo esta metodología se evalúa un proyecto de explotación de una mina de cobre, en el que se valoriza la flexibilidad de realizar un cierre Temporal a través de la técnica de árboles binomiales.

La presentación de este trabajo se hace a través de nueve secciones, de tal manera que, la sección uno hace referencia a la introducción en la que se ofrece un breve repaso sobre las metodologías de evaluación de proyectos y las opciones reales. En la sección dos se explica las técnicas tradicionales de valoración de proyectos exponiendo sus ventajas y desventajas frente a la metodología de opciones reales. En la sección tres se analiza el enfoque de la metodología de opciones reales ofreciendo una explicación teórica sobre su importancia en la evaluación de proyectos. En la sección cuatro se establece el contexto aplicativo de las opciones reales en el sector minero y sus ventajas para aplicarlas. En la sección cinco se analiza el contexto minero en Colombia estableciendo la importancia del sector en la economía nacional. En la sección seis se muestran con detalle los supuestos para valorar el proyecto, así como los valores invertidos. En la sección siete se realiza la valoración del proyecto de inversión bajo técnicas tradicionales estableciendo el valor del VPN y la TIR. En la sección ocho se valoriza la opción de cierre temporal que posee el proyecto minero bajo la metodología de opciones reales y se realiza la simulación de los valores arrojados para poder encontrar el valor medio de la opción ajustándolo a las condiciones establecidas.

Por último, en la sección nueve se presenta la conclusión estableciendo la importancia de las opciones reales en esta valoración detallando los resultados obtenidos.

## 2. Técnicas de valuación de proyectos

En un contexto de toma de decisiones frente a la evaluación de proyectos de inversión es importante considerar diferentes métodos que permitan acercarse al mejor resultado. Tradicionalmente se han tenido en cuenta metodologías como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación (PR); las cuales son utilizadas para calcular la viabilidad de los proyectos. A la hora de utilizar dichos métodos se requiere un buen análisis que permita la adecuada interpretación de los datos, ya que se puede comprometer el sostenimiento financiero de un proyecto.

Según Mete (2014), el VPN es el valor actual de los flujos de efectivo de una inversión, entendiéndose como la diferencia de los ingresos y egresos periódicos. Para este método es necesario descontar los flujos netos de efectivo a una tasa que se conoce como tasa de expectativa o alternativa de oportunidad, la cual es el retorno mínimo exigido por el proyecto que permite el retorno de la inversión. Lo anterior se expresa de manera matemática, tal y como se presenta en la ecuación (1).

$$VPN = -Inversión + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1+r)^i} \quad (1)$$

Donde:

FC<sub>i</sub>: flujo de caja correspondiente al período i.

r: tasa de descuento correspondiente al costo de la estructura financiera del proyecto.

i: período analizado medido en tiempo (años).

Otra de las metodologías más utilizadas en la evaluación de proyectos es la TIR, la cual Altuve (2004) define como el valor relativo que iguala el valor actual de la corriente de ingresos con el valor actual de la corriente de egresos estimados. Este método refleja el resultado del rendimiento de los fondos invertidos en el proyecto en un valor consolidado que resume las condiciones y méritos de este. En la ecuación 2 se expresa algebraicamente la TIR.

$$VPN = -I + \frac{FC}{(1+TIR)^i} = 0 \quad (2)$$

Donde:

I= Inversión inicial

FC: Flujo de caja neto

i: período analizado medido en tiempo (años).

Entre las metodologías tradicionales se contempla la de valoración conocida como periodo de recuperación (PR) que Maya (2014 ) cita como un valor en un periodo de tiempo que toma un proyecto en repagar o recuperar la inversión inicial junto con los gastos que ello suponga. El cálculo de esta metodología depende del tipo de flujo de caja que se utilice, ya sea el flujo de caja sin descontar y el descontado. Para el cálculo del PR se cita la ecuación 3:

$$PR = a + \frac{(b-c)}{d} \quad (3)$$

Donde:

a = Año inmediato anterior en que se recupera la inversión.

b = Inversión Inicial.

c = Flujo de Efectivo Acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión.

d = Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión.

Al evaluar las definiciones de estos métodos se interpreta un análisis lineal en el desarrollo de los proyectos, ya que estos no contemplan los riesgos que en determinado momento el proyecto puede enfrentar y no tienen en cuenta la flexibilidad administrativa para ajustar operativamente el proyecto de acuerdo con la ocurrencia de los riesgos. La metodología de opciones reales considera el valor potencial del proyecto, dando una base más precisa para la toma de decisiones por parte de los inversionistas. Esta analiza cuantitativamente la flexibilidad del mismo, mientras que las metodologías tradicionales solo se fundamentan en

el valor de la etapa inicial, y no examinan los posibles cambios que pueda presentar el proyecto en el futuro.

### **3. Teoría de las opciones reales**

En las últimas décadas la metodología de Opciones Reales ha tomado fuerza en la evaluación de proyectos, ya que las oportunidades de inversión han comenzado a verse como opciones sobre activos reales. Tal y como lo expresan Locatelli, Meroni, Pecoraro y Mancini (2017), al tomar la base teórica de las opciones financieras, el cálculo de las opciones reales ofrece la capacidad de introducir a la evaluación de los proyectos la flexibilidad en la toma de decisiones que estos incorporan, lo cual no sucede en el análisis bajo métodos como VPN, TIR y PR.

Mayer y Kazakidis (2007) detallan la flexibilidad como la capacidad de mejorar los resultados de la organización por medio de la adaptabilidad del proyecto a los cambios internos y externos que se presenten en el desarrollo del mismo. Qiu, Wang y Xue (2015) afirman que al conocer el valor de la flexibilidad los inversores tienen mayor información para tomar decisiones, lo cual agrega valor a los proyectos partiendo de las incertidumbres que los rodean y dando claridad sobre los momentos oportunos para tomar decisiones y asumir las consecuencias de estas.

Autores como Saluga y Kaminski (2016), establecen que el VPN actúa como el valor del activo subyacente al momento de valorar la opción y que este sigue un movimiento Browniano geométrico, implicando que el activo subyacente es el proyecto en sí mismo, pero sin flexibilidad en la administración. El enfoque de opciones reales tiene aplicación cuando el proyecto a realizar tiene alta incertidumbre y su estructura permite a la administración tomar decisiones que puedan afectar el desarrollo operativo del mismo en búsqueda de mitigar o maximizar los beneficios del proyecto según las condiciones del mercado. Para Locatelli, Boarin, Pellegrino y Ricotti (2014) la parte clave de la metodología de Opciones recae en su buena administración y tomar las decisiones en el momento oportuno.

Según Locatelli, Meroni, Pecoraro y Mancini (2017) las opciones reales se pueden clasificar en tres, que serían: expandir, en la cual se decide si incrementar o no la capacidad del proyecto; la de diferir, la cual permite posponer el momento en el cual se debe tomar la

decisión de inversión debido a que hay alta incertidumbre, pero los flujos de caja del proyecto no están siendo muy afectados y, por último, la opción de abandonar que posibilita salir de un proyecto si las condiciones durante el desarrollo de este cambian y se vuelven desfavorables.

Existen industrias como la minera que poseen altos grados de incertidumbre en el desarrollo de sus proyectos. Allí es necesario según Dessureault, Kazakidis y Mayer (2007) que se introduzca en los procesos de ingeniería la flexibilidad necesaria para controlar la incertidumbre, la cual debe ser valorada mediante la técnica de opciones reales. Según Locatelli, Invernizzi y Manini (2016) este método puede evaluar la flexibilidad necesaria para afrontar incertidumbres provocada por diferentes variables que rodeen los proyectos tanto internas como externas.

#### **4. Opciones reales en el Sector Minero**

Las opciones reales en el sector minero han tenido una exitosa aplicación. Esto se puede ver en el trabajo de Lemelin, Abdel Sabour y Poulin (2015) en el cual se estudia la flexibilidad de las empresas para abrir y cerrar las minas que poseen. Aquí se establece que los factores económicos más relevantes para determinar el cierre de una mina son el precio del mineral y su volatilidad, los costos operativos y el tamaño de la mina. Los autores afirman que el método de árboles binomiales es útil para evaluar proyectos mineros.

Savolainen (2016) plantea que el valor de un proyecto de minería depende de la sincronización de la inversión y la evolución de las incertidumbres durante el periodo de operación. Esto se contempla al utilizar las opciones reales, las cuales se relacionan con el tipo de flexibilidad de inversión, capacidad para retrasar decisiones, o definitivamente optar por abandonar el proyecto. Por otra parte, Tesierra y Carrasco (2016) analizan la toma de decisiones bajo incertidumbre en empresas mineras a través de las opciones reales, específicamente en la opción de cierre temporal de una mina. Tal opción aplica si las condiciones del mercado se tornan negativas para la operación, siendo necesario cerrar en espera de mejores condiciones económicas. El mecanismo de decisión para esta opción aplica si los costos fijos son mayores al flujo de caja libre.

Da y Xing (2014) determinan que los activos provenientes de recursos naturales y las opciones financieras poseen fuertes similitudes debido a la volatilidad de los mismos y su mecanismo de determinación de precios. Por otra parte, Liu (2014) establece que la incertidumbre puede ser analizada de forma cuantitativa a través de opciones reales, dando análisis más precisos y facilitando la implementación de los proyectos. Sin embargo, Guj (2016) menciona que las opciones reales pueden determinar el costo de cierre o reapertura de un proyecto minero afectando la inversión inicial de este.

Darkwa (2017) en su estudio determina que el valor agregado de las opciones reales está en incorporar los riesgos e incertidumbres en el sector minero, incluyendo la flexibilidad en procesos para minimizar el riesgo, característica asociada a los proyectos de valoración minera. Darkwa (2017) muestran que solo el 14.3% de las compañías en los Estados Unidos y el 16.8% en Canadá utilizan las opciones reales como método de valoración, lo que demuestra que la gran parte de estas compañías no contemplan este importante método a la hora de evaluar proyectos mineros, evidenciando además que las empresas desconocen la alta volatilidad que maneja esta industria y sus implicaciones sobre el valor del proyecto.

Haque, Topal y Lilford (2016) resaltan como factor importante la volatilidad en los proyectos mineros, dado que los flujos de efectivos que estos generan fluctúan de manera considerable por su relación con los precios de los *commodities* en el mercado. La fluctuación del precio del mineral implica un riesgo para esta clase de proyectos, situación que demanda de una estrategia de cobertura para evitar que las pérdidas por esta situación hagan que el proyecto sea inviable. Darkwa (2017) utiliza las opciones reales para reevaluar un proyecto de extracción de oro que inicialmente se valoró utilizando el método de VPN, el cual valoró en \$USD 493 millones. Sin embargo, el proyecto a través de opciones reales registró un valor promedio de \$528 millones con un 62% de probabilidad. Un valor más alto que el calculado a través del VPN. Dimitrakopoulos y Abdel Sabour (2007) presentan un método práctico para evaluar inversiones mineras, el cual muestra que a partir de un estudio de una valoración de un proyecto minero de oro en Australia basado en la metodología de opciones reales logró aumentar entre un 11% y 18% su valor. Esto se dio gracias a que se incluyó en la evaluación la posibilidad operativa que tenía la mina de reducir o aumentar su producción como resultado del diseño original con la que fue construida.



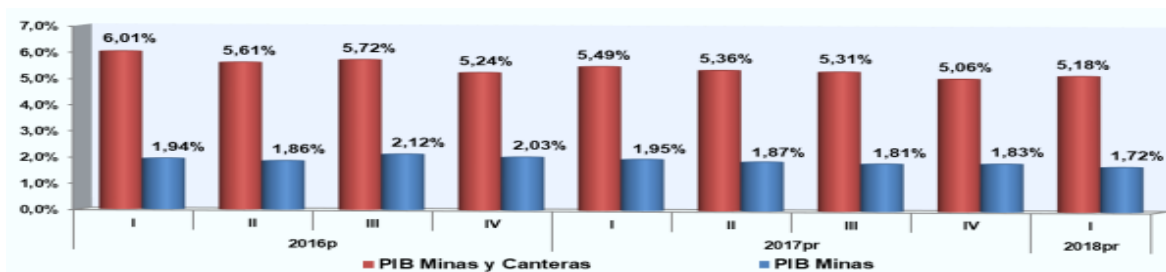
Moel, Alberto y Tufano (2002) tratan de evaluar por medio de los modelos tradicionales VPN, TIR y PR una mina, pero estos no logran maximizar su valor, dado que estos no tienen en cuenta los precios cambiantes que rigen el mercado de *commodities*. En este se observa que al caer el precio del mineral las zonas con alto costo de producción deber sufrir cierres temporales para reducir las pérdidas. En caso contrario, si sube el precio, se debe aplicar una expansión en la producción, y es aquí donde entran las opciones reales para valorar de una forma más precisa dicha flexibilidad, dando a conocer el valor del proyecto en su vida útil. Como resultado, el estudio muestra que la diferencia en el valor de la mina valorado entre el VPN y Opciones Reales depende de la vida útil del proyecto, precio y costo de operación. En un estudio más reciente, Zhang, Nieto, Antonio y Kleit (2015) afirman que los proyectos mineros poseen más valor si estos solo se activan cuando el precio del mineral está por encima de los costos de producción. En este modelo, se modela mediante un proceso de conversión de medias, de tal manera que, el máximo valor de la flexibilidad es mayor cuando el precio del mineral es igual a su costo.

## **5. Sector Minero en Colombia**

El sector minero en Colombia está conformado principalmente por la explotación de minerales como el carbón, el oro y níquel logrando aportar al PIB colombiano en el 2018: el 1,72%. En la imagen 1 se muestra cómo el PIB minero muestra un comportamiento con una leve tendencia a la baja, si tenemos en cuenta que en el primer trimestre del 2016 la participación era del 6,01%, mientras que en el mismo período en el 2018 se tenía una participación del 5,18%. Esto se debe a la competencia minera que se ha dado a nivel mundial, y en particular en el mercado latinoamericano, siendo los competidores más fuertes en la región Chile, Perú y Brasil.

Imagen 1

Participación de PIB Minas y PIB Minas y Canteras en el PIB Total.



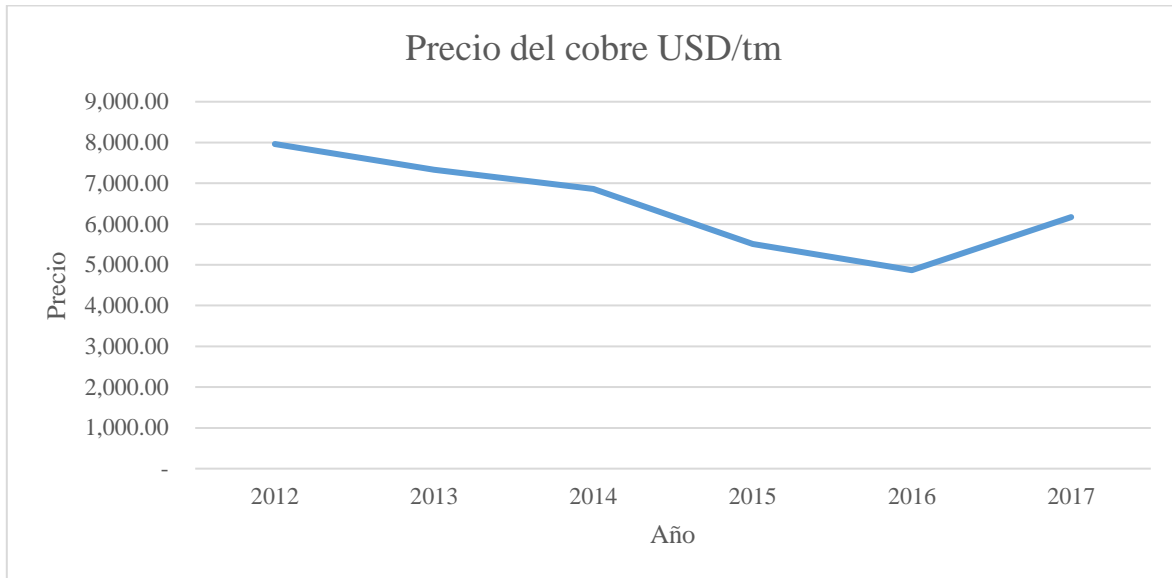
Fuente: DANE.

Colombia posee una extensión territorial de aproximadamente 114 millones de hectáreas de las cuales el 5% (5,7 millones) están designadas para el desarrollo de proyectos mineros, en las que el 2,3% de hectáreas están en exploración para la viabilidad de proyectos, el 1,6% se encuentran en etapa de construcción y montaje y solo el 1,1% se encuentra en explotación. La Agencia Nacional Minera presenta en su informe anual del sector minero en Colombia, donde manifiesta que, de los 9.602 títulos mineros vigentes en Colombia, se explotan 312 tipos de minerales. El más explotado son los materiales de construcción con un 57%, lo sigue el carbón con un 17%, metales preciosos con 11%, caliza con 5%, minerales industriales con un 4%, piedras preciosas con 4% y otros metales con 2%. Las áreas geográficas que más aportan al sector minero colombiano son Antioquia con un 22%, seguido por el departamento del Bolívar y el departamento del Cesar con un peso del 10% cada uno. Sin embargo, se puede resaltar un aporte de todos los departamentos colombianos a este sector, puesto que 30 de los 32 departamentos colombianos presentan explotación minera.

Según la Agencia Nacional de Minería (ANM), Colombia se ubica en el puesto número 49 en producción mundial de cobre mostrando así un desempeño de productividad con 5,463 toneladas en el 2015 e incrementando a 9,355 toneladas en el 2017. Actualmente, la producción de cobre en Colombia es liderada por el proyecto el roble. En la imagen 2 se evidencia el desempeño que ha tenido el precio de cobre en los últimos años mostrando una tendencia a la baja. Esto debido a la gran producción mundial y en la eficiencia de Chile el mayor productor ubicándose en el puesto número uno con una producción de 5,3 millones de toneladas al año.

*Imagen 2*

*Precio promedio últimos 6 años USD/tm*

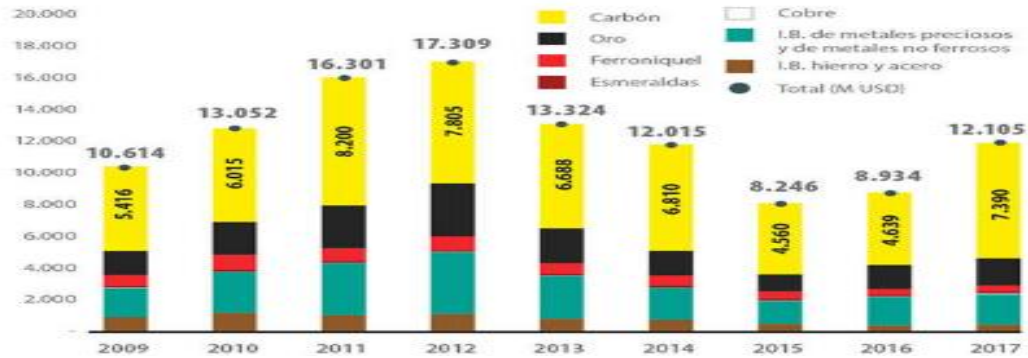


Fuente: Agencia Nacional de Minería (Informe sobre la Producción de Cobre).

Por otra parte, la imagen 3 muestra el comportamiento de las exportaciones del sector minero en Colombia, ubicando al carbón como rubro importante, ya que entre los años 2009 y 2017 siempre ha liderado con una participación que oscila entre los 10 mil millones de dólares y 12 mil millones de dólares por año, seguido por el oro. Esto muestra un desempeño en la misma línea de tiempo, oscilando entre los 3,900USD millones y 4,000USD millones, lo cual refleja el potencial que tiene este metal precioso. en la imagen también se observa un mineral con un peso representativo como lo es el caso del ferróníquel que aportó en promedio 2 mil millones de dólares por año entre los periodos del 2009 al 2017.

Imagen 3

Exportaciones minerales Colombia



Fuente: Agencia Nacional de Minería (Informe sobre la producción de cobre)

### 6. Caso de estudio

El caso de estudio analizado comprende la evaluación de un proyecto de inversión en una mina de cobre en Colombia en el Departamento de Antioquia, la cual posee la opción de cierre temporal si las condiciones del mercado se ponen desfavorables para la continuación de la operación de extracción. La inversión inicial del proyecto es de \$30,914,900,000, la cual comprende toda la etapa de adecuación, puesta en marcha de la mina y será amortizada de forma homogénea en cinco años. La inversión en capital circulante para empezar el proceso de extracción del mineral es de \$15,457,450,000, en tanto que los costos operacionales del proyecto representan el 50% de las ventas de la empresa. Se proyecta con base en los estudios geológicos que la capacidad de extracción de la mina sea de 2,500 toneladas de mineral al año con un precio por tonelada al iniciar el proyecto de \$20,057,587 con una tendencia de crecimiento anual de 9.3%. El proyecto será financiado 50 por ciento con capital propio con un costo del patrimonio de 40% E.A, mientras que el resto será financiado a través de una deuda con el sector financiero a una tasa del 29.85% E.A. Hay que tener en cuenta que para el sector se trabaja con una tasa impositiva del 33%.

## 7. Valuación del proyecto por técnicas tradicionales

Para la construcción del flujo de caja libre se realiza una proyección a cinco años, partiendo con una inversión inicial en el periodo cero de \$46,372,350,000. A partir del año 1 se establece un ritmo de producción constante hasta el año cinco, de 2500 toneladas por año con un incremento del precio anual del 9.3%, el cual se obtuvo del crecimiento del precio del cobre en los últimos cinco años (Portal Minero 2019). Se establece una tasa de costos operacionales del 50% sobre el valor vendido del mineral. Teniendo en cuenta que el proyecto es financiado 50% con capital propio y 50% con financiación externa el cual se establece un *benchmark* con el que se logra obtener la tasa con la cual la banca financia este tipo de proyectos, se realiza el descuento de los flujos de caja con un costo promedio ponderado de capital WACC (Weighted Average Cost of Capital) del 30%, el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$WACC = K_d \cdot \%D \cdot (1 - T) + K_e \cdot \%E \quad (4)$$

Donde:

$K_d$ : costo de la deuda.

$K_e$ : Costo del patrimonio.

T: tasa impositiva.

%D: participación de la deuda calculada como Deuda / (Deuda + Patrimonio).

%E: participación del patrimonio calculado como Patrimonio / (Deuda + Patrimonio).

$$WACC = 29.85\% \cdot 50\% \cdot (1 - 33\%) + 40\% \cdot 50\% \quad (5)$$

$$WACC = 30\% \quad EA \quad (6)$$

Para los años analizados, dando como resultado el cálculo del VPN como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Calculo VPN y TIR

Años	0	1	2	3	4	5
Utilidad Operativa		\$21,220,698,403	\$23,769,240,494	\$26,554,797,000	\$29,599,410,261	\$32,927,172,555
Amortización		\$ 6,182,980,000	\$ 6,182,980,000	\$ 6,182,980,000	\$ 6,182,980,000	\$ 6,182,980,000
Inversión inicial	-\$30,914,900,000					
Inversión en capital circulante	-\$15,457,450,000					
Recuperación KW						\$15,457,450,000
<b>Flujo de Caja Operativo</b>	<b>-\$46,372,350,000</b>	<b>\$27,403,678,403</b>	<b>\$29,952,220,494</b>	<b>\$32,737,777,000</b>	<b>\$35,782,390,261</b>	<b>\$54,567,602,555</b>
Impuesto operativo	\$ -	-\$ 7,002,830,473	-\$ 7,843,849,363	-\$ 8,763,083,010	-\$ 9,767,805,386	-\$10,865,966,943
<b>Flujo de Caja Libre</b>	<b>-\$46,372,350,000</b>	<b>\$20,400,847,930</b>	<b>\$22,108,371,131</b>	<b>\$23,974,693,990</b>	<b>\$26,014,584,875</b>	<b>\$43,701,635,612</b>
<b>VPN</b>	\$14,193,505,521	<b>VPN Medio</b>	<b>\$14,134,461,658</b>			
<b>TIR</b>	43.51%	<b>TIR Medio</b>	<b>43.46%</b>			

Fuente: Elaboración Propia.

El resultado de la evaluación del proyecto por medio del método de VPN arroja como resultado que su valor es de \$14,193,505,521, implicando que este se debe realizar a priori bajo el análisis de esta metodología, ya que estaría generando un valor superior al que los inversionistas esperan. El otro método utilizado es el de la TIR, el cual arroja como resultado 43.51%, tasa de retorno superior a la exigida por los inversores del 30%. Luego del cálculo del valor del proyecto se procede a realizar 10 mil simulaciones con el objetivo de conocer el efecto de las variaciones de los precios del cobre, la tasa de cambio COP/USD y la tendencia de crecimiento de crecimiento del precio del cobre en los resultados de valuación del proyecto, tanto VPN como TIR.

En la tabla 2 se muestran los diferentes escenarios a partir de los cuales se realiza la simulación. En esta se presentan los escenarios mínimos, máximos y más probables sobre los cuales fluctúan las variables de entrada para la simulación. En el escenario pesimista se prevé un precio por tonelada de \$20 000,000, una TRM en \$2900 y una tendencia de crecimiento del precio del cobre de 7.3%. Para el escenario optimista se prevé que el precio del cobre se ubique en \$20,115,174 la tonelada una TRM en \$3,300 y se presente una tendencia de crecimiento del precio de 11.3%. Por último, el escenario moderado ubica el precio de la tonelada en \$20,057,587, una TRM en \$3041.49 y una tendencia de crecimiento de los precios de 9.3%.

Tabla 2

Escenarios variables de Entrada Simulación

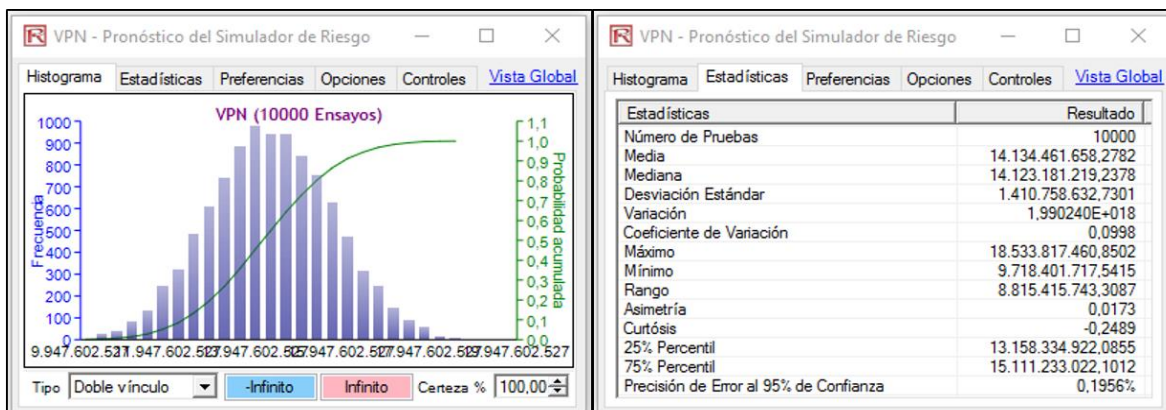
Variable	Escenarios		
	Pesimista	Moderado	Optimista
Precio del cobre US \$ por Tonelada	\$ 20,000,000	\$ 20,057,587.12	\$ 20,115,174
TRM (\$/US\$)	\$2,900	\$3,091.49	\$3,300
Tendencia de crecimiento del precio	7.3%	9.3%	11.3%

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 4 se puede observar que a partir de la simulación realizada las variables de entrada descritas anteriormente en VPN medio de salida es de \$ 14,134,461,658 implicando que el proyecto debe ser aceptado, lo cual también sucede para los escenarios más pesimistas (Mínimo) y el escenario más optimista (Máximo) en los cuales el VPN positivo denota una aceptación del proyecto en todos los escenarios.

Imagen 4

Simulación VPN

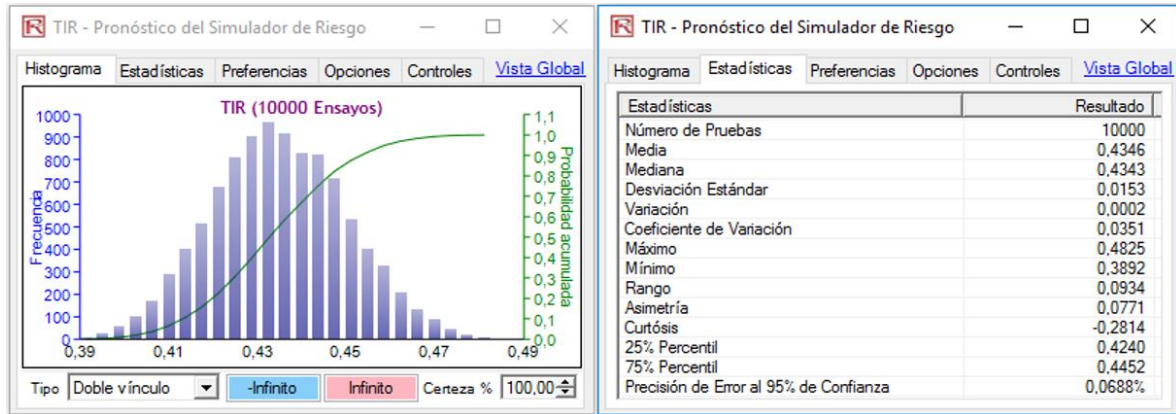


Fuente: Elaboración Propia @Risk Simulator.

La simulación sobre la TIR arroja en la imagen 5 que la tasa más probable es de 43.46%, para el escenario más pesimista (Mínimo) 38.92% y para el escenario más optimista (máximo) 48.25%. Para todos los niveles la TIR presenta niveles superiores a la tasa mínima exigida del 30%, por lo cual el proyecto debe aceptarse desde esta metodología de análisis.

Imagen 5

Simulación TIR



Fuente: Elaboración Propia @Risk Simulator.

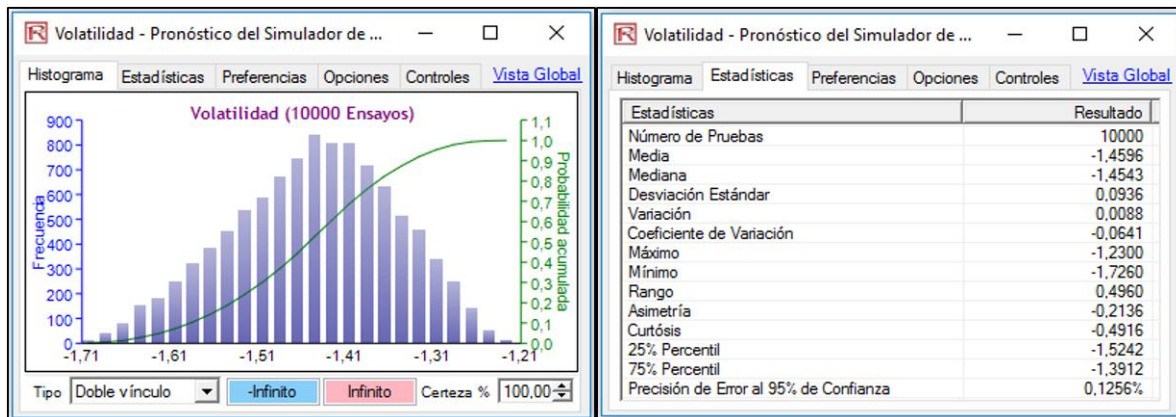
Para conocer la volatilidad de los flujos de caja del proyecto se utiliza la ecuación 3 y se realiza la simulación para conocer la desviación estándar de estos, lo cual será importante para realizar el cálculo del valor de la opción.

$$\ln\left(\frac{VP_1}{VP_0}\right) = \ln\left(\frac{-Inversión + VP_1(FC_1) + VP_2(FC_2) + \dots + VP_t(FC_t)}{VP_1(FC_1) + VP_2(FC_2) + \dots + VP_t(FC_t)}\right) \quad (7)$$

Se observa en la imagen 6 que a partir de la simulación la volatilidad media de los flujos de caja de proyecto es de 9.36%, lo cual se presenta como resultado en los cambios de las variables de entrada para la simulación.

Imagen 6

Simulación Volatilidad



Fuente: Elaboración Propia @Risk Simulator.



En general se observa que los resultados de la evaluación del proyecto por medio de los métodos tradicionales dan información a los inversores para aceptar el proyecto, ya que tanto VPN como TIR calculadas y simuladas están por encima de las expectativas de los inversores. Además, se observa que la desviación estándar de los flujos de caja del proyecto da a los inversionistas información importante sobre la cual pueden trabajar para mitigar los riesgos del proyecto.

## 8. Valuación de la opción de Cierre Temporal

El proyecto desde su estructura operativa da la posibilidad de realizar un cierre temporal si las condiciones del mercado se vuelven adversas y ponen en peligro la viabilidad del mismo. Esta opción será evaluada al cierre de cada año durante cinco periodos luego de la puesta en marcha del proyecto. La metodología utilizada para el cálculo del valor de la opción es la de árboles binomiales, en la que se utilizan los siguientes parámetros: volatilidad de los flujos de caja ( $\sigma$ ), tiempo en el que perdura la opción ( $T$ ), tiempo de revisión de la opción ( $\Delta t$ ), número de momentos que posee el árbol ( $n$ ), factor de expansión ( $u$ ), factor de contracción ( $d$ ).

A continuación, se procede a calcular el valor de los parámetros y realizar el posterior árbol subyacente en el cual se establecen los posibles valores del VPN en los escenarios positivos y negativos para cada momento de revisión.

$$n = \frac{T}{\Delta t} = \frac{5}{1} = 5 \quad (8)$$

Seguidamente, se calculan los parámetros de expansión y contracción, así:

$$u = e^{\sigma \cdot \sqrt{\Delta T}} = e^{0,0936 \cdot \sqrt{1}} = 1,098 \quad (9)$$

$$d = \frac{1}{u} = \frac{1}{1,098} = 0,911 \quad (10)$$

Luego de calcular los parámetros de crecimiento y decrecimiento, se procede a calcular el árbol subyacente como se muestra en la tabla 3, teniendo como punto de inicio el VPN medio que se obtuvo de la simulación realizada. El método para calcular los valores del árbol subyacente consiste en multiplicar el VPN en el periodo cero por los factores de crecimiento ( $u$ ) para el escenario positivo y decrecimiento ( $d$ ) para el escenario negativo arrojando como

resultado los VPN del periodo 1. Luego se procede a realizar el mismo procedimiento para los VPN del periodo 1 que resultaron del cálculo inicial y así para las ramas siguientes hasta llegar el periodo 5.

Tabla 3

Árbol de Subyacente

Periodos					
0	1	2	3	4	5
					\$22,569,871,664
				\$20,553,184,751	
			\$18,716,694,969		\$18,716,694,969
		\$17,044,301,154		\$17,044,301,154	
	\$15,521,340,829		\$15,521,340,829		\$15,521,340,829
\$14,134,461,658		\$14,134,461,658		\$14,134,461,658	
	\$12,871,504,373		\$12,871,504,373		\$12,871,504,373
		\$11,721,396,176		\$11,721,396,176	
			\$10,674,053,656		\$10,674,053,656
				\$ 9,720,294,386	
					\$ 8,851,756,418

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se realiza en la tabla 4 el cálculo del árbol del ejercicio, en el cual se aplicó la regla de elección de una opción PUT financiera para escoger el valor que debe llenar las ramas del árbol. Como en este caso se evalúa la opción de abandono del proyecto se entiende como una opción PUT por lo cual se utiliza la siguiente regla de elección:

$$\text{Max} ((\text{Inversión} - \text{VPN}_i); 0) \quad (11)$$

$$\text{Max} ((\$15,457,450,000 - \text{VPN}_i); 0) \quad (12)$$

Tabla 4

Árbol de Ejercicio

Periodos					
0	1	2	3	4	5
					\$ -
				\$ -	
			\$ -		\$ -
		\$ -		\$ -	
	\$ -		\$ -		\$ -
\$ 1,322,988,342		\$ 1,322,988,342		\$ 1,322,988,342	
	\$ 2,585,945,627		\$ 2,585,945,627		\$ 2,585,945,627
		\$ 3,736,053,824		\$ 3,736,053,824	
			\$ 4,783,396,344		\$ 4,783,396,344
				\$ 5,737,155,614	
					\$ 6,605,693,582

Fuente: Elaboración Propia.

Luego de haber realizado el árbol del ejercicio se procede a calcular el árbol de la opción viva. Este árbol en el periodo 5 toma los mismos valores del árbol del ejercicio y se empieza a llenar de derecha a izquierda aplicando la fórmula 13.

$$\frac{(Max(alza\ 5\ de\ la\ OV;laza\ 5\ del\ E)*q+Max(baja\ 5\ de\ la\ OV;baja\ 5\ del\ E)*(1-q))}{(1+rf)^{\Delta T}} \quad (13)$$

El parámetro que se entiende como la probabilidad neutral al riesgo (q) y  $R_f$  es la tasa libre de riesgo de los bonos del tesoro a 5 años. El cálculo del parámetro se muestra a continuación.

$R_f = 2.53\% \text{ EA}$

$$a = e^{rf*\Delta t} \quad (14)$$

$$a = e^{2.53*1} = 1.03 \quad (15)$$

$$q = \frac{a-d}{u-d} \quad (16)$$

$$q = \frac{1.03-0.91}{1.10-0.91} = 0.61 \quad (17)$$

Teniendo en cuenta el desarrollo anterior, se presenta el árbol de la opción “viva” en la tabla 5.

Tabla 5

Árbol de la Opción Viva

Periodos					
0	1	2	3	4	5
					\$ -
				\$ -	\$ -
		\$ 188,144,266		\$ -	\$ -
	\$ 611,460,378		\$ 498,911,486		\$ -
\$ 1,340,963,512		\$ 1,273,636,171		\$ 975,184,690	
	\$ 2,200,320,030		\$ 2,200,320,030		\$ 2,585,945,627
		\$ 3,350,790,562		\$ 3,350,790,562	
			\$ 4,398,463,041		\$ 4,783,396,344
				\$ 5,352,522,786	
					\$ 6,605,693,582

Fuente: Elaboración Propia.

Luego del cálculo de la opción viva y del árbol del ejercicio se procede a calcular el árbol de la opción con la fórmula 18.

Max (arbol de la opcion viva ; arbol del ejercicio) (18)

Tabla 6

Árbol de la Opción

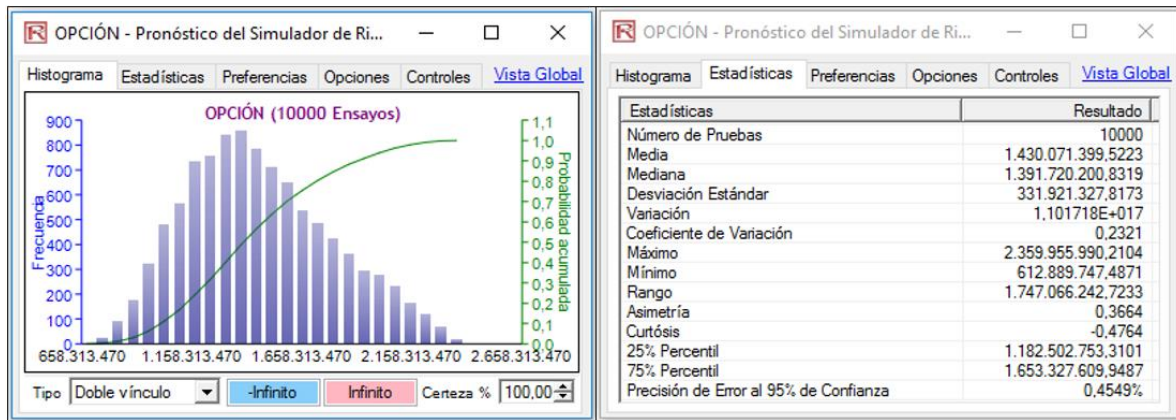
Periodos					
0	1	2	3	4	5
					\$ -
				\$ -	
		\$ 188,144,266		\$ -	
	\$ 611,460,378		\$ 498,911,486		\$ -
\$ 1,340,963,512		\$ 1,322,988,342		\$ 1,322,988,342	
	\$ 2,585,945,627		\$ 2,585,945,627		\$ 2,585,945,627
		\$ 3,736,053,824		\$ 3,736,053,824	
			\$ 4,783,396,344		\$ 4,783,396,344
				\$ 5,737,155,614	
					\$ 6,605,693,582

Fuente: Elaboración Propia.

Al tener en cuenta estos resultados se incluyó en la simulación como variable de salida el valor de la opción en el periodo cero para que sea calculada en la simulación y establecer el valor medio que esta arroje.

Imagen 7

Simulación Valor de la Opción



Fuente: Elaboración Propia.

El valor medio de la opción de cierre temporal como se muestra en la imagen 7 es de \$ 1,430,071,399, lo cual da como resultado que el valor total del proyecto sea el VPN medio más el valor medio de la Opción arrojados por la simulación.

Tabla 7

*Valor final del Proyecto*

<b>Valor Total</b>	<b>VPN</b>	<b>OR</b>
\$ 15,564,533,057	\$ 14,134,461,658	\$ 1,430,071,399

Fuente: Elaboración Propia

La metodología de opciones reales establece que el valor del proyecto se incrementa debido a la flexibilidad que este posee para realizar un cierre temporal si las condiciones del mercado se ponen desfavorables. Es importante destacar que, si no tiene en cuenta la opción, los inversores al momento de realizar la evaluación del proyecto estarían dejando de percibir el valor de esta y terminar perdiéndolo en caso de que este pudiese ser vendido a otros inversores.

## **9. Conclusiones**

La aplicación de la metodología de opciones reales como metodología cuantitativa es fundamental a la hora de valorar proyectos del sector minero, como consecuencia de la incertidumbre que este tipo de proyectos presenta ya que debido a su naturaleza son proyectos donde el inversionista debe tomar decisiones importantes para saber si aumenta o debe abandonar el proyecto según se desarrollen las condiciones del mercado. El protagonismo que esta metodología ha adquirido se debe a que en la industria las incertidumbres relacionadas con factores como el precio de los minerales se encuentran a la orden del día, lo cual debe otorgar al gobierno corporativo la flexibilidad administrativa y operativa para mitigar los riesgos y aprovechar los momentos de bonanza en aras de maximizar los beneficios económicos.

En este trabajo se logró identificar que si no se tiene en cuenta la valoración de la flexibilidad que poseen los proyectos mineros, los inversores estarían dejando de lado un valor que sería importante a la hora de realizar una posible venta del proyecto o de tomar decisiones respecto al momento adecuado para realizar el cierre temporal de la mina, si las condiciones del mercado son desfavorables.

## 10. Referencias

- Altuve, J. (2004). El uso del valor actual neto y la tasa interna de retorno para la valoración de las decisiones de inversión. *Actualidad Contable*, 7-17.
- Da, W., & Xing, W. (2014). Study on the Application of Real Options in Coal Resources Investment. *Trans Tech Publication*, 265-271.
- Darkwa, K. (2017). Reasons why Real Options Analysis (ROA) is not widely adopted in the mineral industry. *University of Queensland*.
- Dessureault, S., Kazakidis, V., & Mayer, Z. (2007). Flexibility valuation in operating mine decisions using real options pricing. *Int. J. Risk Assessment and Management*, 656-674.
- Dimitrakopoulos, R., & Abdel Sabour, S. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference? *Resources Policy*, 116-125.
- Guj, P. (2016). A practical methodology to optimise marginal mineral deposits using switching real options. *Ore Geology Reviews*, 336-345.
- Haque, A., Topal, E., & Lilford, E. (2016). Estimation of Mining Project Values Through Real Option Valuation Using a Combination of Hedging Strategy and a Mean Reversion Commodity Price. *Natural Resources Research*.
- Lemelin, B., Abdel Sabour, S., & Poulin, R. (2015). Valuing mine 2 at raglan using real options. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*.
- Lina, M. (2014). Revisión metodológica a las herramientas de evaluación financiera de proyectos de inversión: opciones reales, flujos de caja descontados, simulación de montecarlo y árboles de decisión. 18.
- Liu, J. (2014). CCS Investment Decision Based on Real Options. *International Journal of Nonlinear Science*, 182-187.
- Locatelli, G., Boarin, S., Pellegrino, F., & Ricotti, M. (2014). Load Following Whit Small Modular Reactors (SMR): A Real Options Analysis. *Energy* 80, 41-54.

- Locatelli, G., Meroni, G., Pecoraro, M., & Mancini, M. (2017). valuation, Appraisal of small modular nuclear reactors with 'real options'. *ICE Publishing*, 51-66.
- Locatelli, Giorgio; Invernizzi, DC; Manini, Mauro. (2016). Investment and risk appraisal in Energy Storage Systems. *White Rose*, 114-131.
- Mayer, Z., & Kazakidis, V. (2007). Decision making in flexible mine production system design using real options . *Journal of construction engineering and management* , 169-180.
- Mete, M. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el analisis y evaluacion de proyectos de inversion. *Fides et Ratio*, 65-85.
- Moel, Alberto, & Tufano, P. (2002). When Are Real Options Exercised? An Empirical Study of Mine Closings. *Oxford University Press*, 35-64.
- Portal Minero*. (2019).
- Qiu, X.-H., Wang, Z., & Xue, Q. (2015). Investment in deepwater oil and gas exploration projects: a multi-factor analysis with a real options mode. *Springerlink*, 525-533.
- Saluga, P., & Kaminski, J. (2016). Hard coal project valuation based on real options approach: multiplicative vs. arithmetic stochastic process. *DE Gruyter Open* , 25-40.
- Savolainen, J. (2016 ). Analyzing the profitability of metal mining investments with system dynamic modeling and real option analysis. *Lappeenranta* .
- Tesierra, A., & Carrasco, C. (2016). Valoración de Opciones Reales: Modelo Ornstein-Uhlenbeck. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science* 21, 56-62.
- Zhang, K., Nieto, Antonio, & Kleit, A. (2015). The real option value of mining operations using mean-reverting commodity prices. *Miner Econ* , 11-22.