



VALORACIÓN DE LA OPCIÓN DE ABANDONO EN UN PROYECTO MINERO

VALENTINA GÓMEZ SIERRA

GLOMER BOTERO

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN  
MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN FINANCIERA  
MEDELLÍN  
2019

# VALORACIÓN DE LA OPCIÓN DE ABANDONO EN UN PROYECTO MINERO

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de  
magíster en Administración Financiera

VALENTINA GÓMEZ SIERRA<sup>1</sup>

GLOMER BOTERO BOTERO<sup>2</sup>

Asesor: Eduardo Sánchez Gómez

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN  
MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN FINANCIERA  
MEDELLÍN  
2019

---

<sup>1</sup> [vgomezs4@eafit.edu.co](mailto:vgomezs4@eafit.edu.co)

<sup>2</sup> [gbotero1@eafit.edu.co](mailto:gbotero1@eafit.edu.co)

## Contenido

1. Introducción .....	7
2. Perspectivas de demanda del carbón .....	8
2.1 El mercado de carbón en los principales consumidores .....	9
2.2 El mercado del carbón en Colombia .....	10
2.3 Proceso de extracción del carbón .....	13
3. Valoración bajo escenarios de alta incertidumbre .....	16
4. Caso de estudio.....	21
4.1 Modelación del flujo de caja del proyecto.....	21
4.2 Simulación de Montecarlo: volatilidad del VPN.....	25
4.3 Reticulado – Evolución VPN activo subyacente.....	26
4.4 Reticulado – Valoración de la opción .....	26
5. Resultados.....	27
6. Conclusiones .....	28
7. Referencias .....	30
8. Anexos.....	32
8.1 Anexo A. Estado de resultados proyectado .....	32
8.2 Anexo B. Flujo de caja libre proyectado .....	32
8.3 Anexo C. Análisis de bondad de ajuste.....	33

## Índice de figuras

Figura 1. Mercado de carbón en los principales consumidores.....	10
Figura 2. Consumo y producción de carbón en Colombia.....	11
Figura 3. Ciclo de explotación del carbón en una mina a cielo abierto.....	14
Figura 4. Reticulado – Evolución VPN del activo subyacente .....	18
Figura 5. Reticulado – Valoración de la opción .....	19
Figura 6. Proceso de valoración por opciones reales.....	21
Figura 7. Flujo de caja libre [COP millardos] .....	24
Figura 8. Distribución del VPN.....	25
Figura 9. Proyección del API 2 e impacto en VPN .....	28

## Índice de tablas

Tabla 1. Capacidad efectiva de generación.....	12
--	----

## Resumen

Las opciones reales como metodología de valoración se destacan por incluir el valor generado por la flexibilidad que tienen los administradores de poder tomar decisiones que mitiguen pérdidas en situaciones adversas o incrementen el valor en situaciones favorables. Esta técnica es muy útil al momento de evaluar proyectos que tengan alta incertidumbre.

Este trabajo analiza la viabilidad financiera de abrir una mina de carbón a cielo abierto bajo un panorama de precios y demanda inciertos, adicional a los riesgos operacionales propios de la actividad. Partiendo del valor obtenido mediante una valoración de flujos de caja descontados (FCD), se realiza la valoración de la opción de abandonar el proyecto por medio de reticulados binomiales. Los resultados muestran que incluir la opción incrementa el valor del proyecto en el 33 %, resaltando que las decisiones de la administración deben garantizar la posibilidad de abandonar el proyecto y se pueda realizar el mayor valor.

Palabras claves: opciones reales, valoración, incertidumbre, carbón, opción de abandono.

## Abstract

The attractiveness of real options as a valuation methodology is the flexibility that managers have to make decisions in order to mitigate the losses in adverse situations or to increase the value in favorable ones. This technique is very useful to evaluate projects with a high degree of uncertainty.

This work analyzes the financial viability of opening a surface coal mine under an uncertain demand and price scenario, in addition to the operational risks of the mine activity itself. Starting from a discounted cash flow (DCF) valuation, a binomial lattice approach is used to value the possibility of abandoning the project. In the end, the result

showed that the project's value is maximized and increased by 33 % when managers included under their alternatives the possibility of abandoning the project.

Keywords: Real options, valuation, uncertainty, coal, abandonment option.

Clasificación JEL: G17, G19, G32.
-----------------------------------

## 1. Introducción

El reciente crecimiento económico de China e India, la demanda de energía derivada de este crecimiento y el tiempo necesario para que ambos países hagan la reconversión tecnológica que les permita suplir la demanda interna de energía con fuentes más limpias, hacen que, al menos para los próximos 30 años, la demanda de carbón se sostenga. Sin embargo, en un mundo cada vez más consciente del impacto ambiental de las industrias, el carbón tiene un futuro incierto.

Este escenario de demanda, con alta volatilidad del precio internacional del carbón, así como los riesgos naturales de la operación minera, hace que la valoración de la apertura de una nueva mina de carbón sea más compleja y que los supuestos tomados para ello se tornen más subjetivos. Adicionalmente, al utilizar una metodología de valoración tradicional como los FCD, se excluye de ella la flexibilidad que tiene la administración para tomar decisiones durante la vida del proyecto, logrando mitigar el efecto que estas variables tendrían en su rentabilidad.

En este documento se busca valorar, por medio de opciones reales, la posibilidad de abrir una mina de carbón a cielo abierto, evaluando la capacidad que tiene la administración de abandonar el proyecto si durante su realización se vuelve inviable. Inicialmente se parte de la valoración por medio de los FCD, y por medio de una simulación de Montecarlo se encuentra la volatilidad del valor presente neto (VPN), con la cual se construye un reticulado binomial para la valoración de la opcionalidad.

Los resultados muestran que tanto la volatilidad, como el precio de ejercicio que determina el valor de salida del proyecto deben ser analizados cuidadosamente para no subvalorar o sobrevalorar el precio de la opción. Finalmente, se resalta cómo la valoración mediante opciones reales constituye una herramienta útil que le permite a la administración encontrar el balance óptimo entre flexibilidad y certidumbre que la lleve a maximizar el valor del proyecto.

## 2. Perspectivas de demanda del carbón

El consumo de carbón comenzó a crecer sustancialmente a partir del siglo XVIII con la Revolución Industrial. Entre sus primeros usos a gran escala estaban la calefacción de las fábricas y el combustible para los motores de vapor, lo que disparó su demanda a medida que un comercio cada vez más dinámico necesitaba más barcos y ferrocarriles. Entre 1950 y 2016, su rol en el transporte se redujo sustancialmente al ser remplazado por combustibles líquidos; sin embargo, su consumo continuó creciendo gracias a la demanda de energía procedente del crecimiento en los estándares de vida de la sociedad occidental, y, recientemente, por la industrialización en Asia, especialmente en China e India (McKinsey & Company, 2019).

A hoy, según las estimaciones de British Petroleum (BP, 2018), las reservas mundiales probadas de carbón alcanzarían para sostener el ritmo de producción actual durante los próximos 134 años. Entre los principales consumidores mundiales se encuentran China, India y Estados Unidos, que a su vez y en el mismo orden son los primeros productores. Según The International Energy Agency, IEA (2018), a nivel mundial, el 65 % del carbón es usado para la generación de energía; entre los consumidores del 35 % restante se destacan la industria metalúrgica y la cementera, lo que evidencia la fuerte correlación entre la generación de energía y el futuro del carbón.

Para McKinsey & Company (2019), el consumo de energía crecerá hasta 2030 a una tasa anual compuesta (*compound annual growth rate*, CAGR) del 0.8 %; posteriormente espera un período de estabilidad hasta 2050, con una CAGR del 0.1 %. Adicionalmente, pronostica que en muchos países las energías renovables serán más económicas que el carbón, llevando su participación en el *mix* de generación de energía del 19 % que ocupa en la actualidad al 34 %; como resultado, espera que la demanda global de carbón disminuya a la mitad entre 2040 y 2050, siendo China e India los países que liderarán esta tendencia. Sin embargo, en el corto plazo no será fácil la disminución de su consumo, dado que para construir la infraestructura de generación con fuentes renovables se necesitan metales y energía, y ambas industrias utilizan carbón.

Sin duda, el mayor limitante que tiene el crecimiento de la demanda de carbón es su alto impacto en el ambiente. Adicional al rechazo que genera su uso en algunos grupos

de interés, hay iniciativas concretas tomadas por algunos países de forma autónoma o a través de pactos globales, encaminadas a reducir su consumo. Entre estas se destaca el Acuerdo de París, firmado en 2015, cuyo objeto es “Reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” (Organización de Naciones Unidas, 2015). Los firmantes de este acuerdo se han comprometido a adoptar medidas, según su realidad económica, que permitan mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2° C respecto a los niveles preindustriales, por medio de la disminución de emisión de gases de efecto invernadero y la conservación de los bosques.

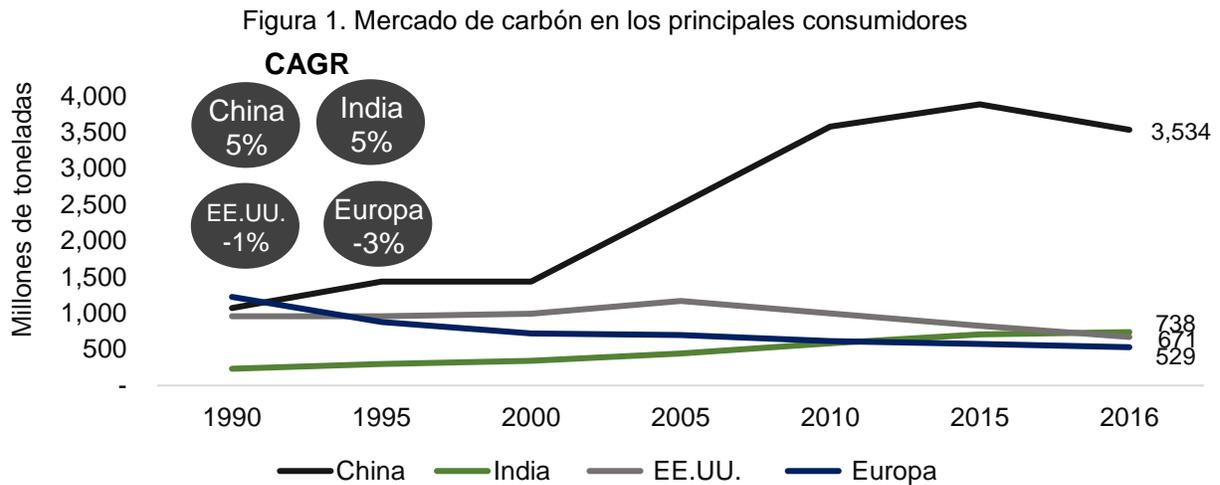
## 2.1 El mercado de carbón en los principales consumidores

Según The International Energy Agency, IEA (2017), la demanda de carbón en China ha disminuido entre 2014 y 2016, a pesar de que su capacidad de generación de energía a partir de carbón ha aumentado. Los principales contribuyentes para esta reducción han sido las pequeñas industrias, los hogares y las industrias cementera y metalúrgica. McKinsey & Company (2019) resalta el ambicioso plan del Gobierno chino, que busca reemplazar el carbón por gas natural en los próximos cinco años, enmarcado en su propósito de “Hacer los cielos azules de nuevo”, lo que llevaría a una reducción en su demanda en el mediano plazo.

En el mismo informe, la IEA (2017) espera que en India continúe aumentando el consumo de carbón hasta 2022, a pesar del rápido crecimiento de la generación de energía con fuentes renovables. La principal causa de ello es la alta demanda de energía y de acero, ligada al crecimiento de sectores como la construcción de ferrocarriles, el ensamblaje de automóviles, los astilleros y la defensa.

En cuanto a las expectativas para Estados Unidos, BP (2018) estima que se fortalecerá como exportador de carbón para abastecer las necesidades del continente asiático, compensando así la disminución en el consumo interno ocasionado por las recientes medidas regulatorias.

La IEA (2017) también señala que en Europa el consumo de carbón está estrechamente ligado a Polonia y Alemania, que actualmente consumen más de la mitad del carbón en la Unión Europea. En Alemania y la mayoría de los países de Europa se espera que la demanda disminuya para 2022, por cambios regulatorios que restringen la generación de energía a partir de combustibles fósiles, lo que ya ha generado el cierre de algunas plantas térmicas. Por otro lado, Polonia mantendría su consumo estable hasta esta fecha [Figura 1].



Fuente: elaboración de los autores a partir de International Energy Agency, IEA (2017).

## 2.2 El mercado del carbón en Colombia

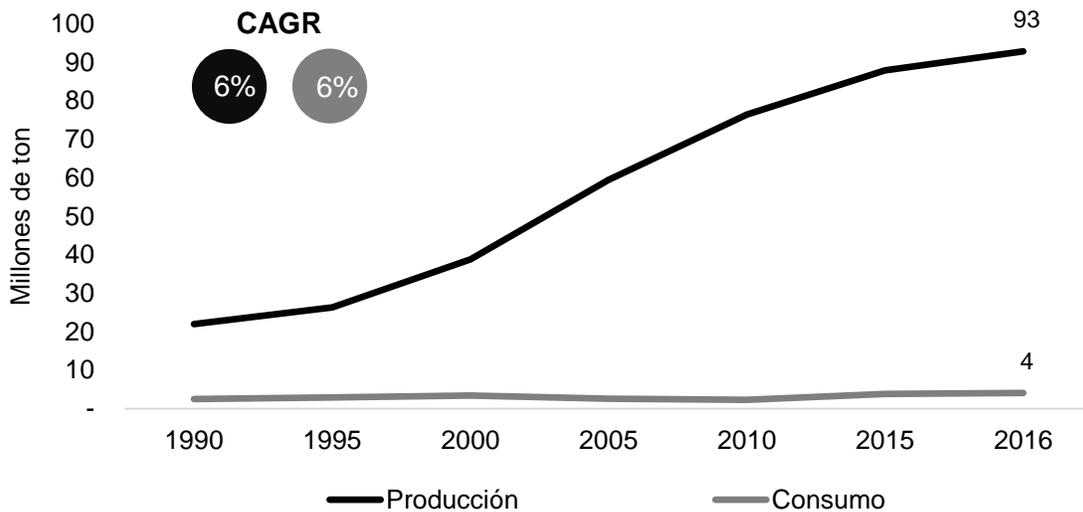
Según la IEA (2018), Colombia es el quinto exportador mundial de carbón y representa el 6 % del comercio mundial. La Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (Colombia, 2018) estima que el país cuenta con reservas de carbón por 6,251 millones de toneladas y recursos<sup>3</sup> por 16,894 millones de toneladas. Según información reportada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, Dane, esta actividad ha representado en promedio el 1.2 % del PIB nacional entre 2005 y 2017 (Colombia,

<sup>3</sup>Recursos: cuando el depósito tiene valor potencial y prospectos razonables de extracción.  
Reservas: cuando adicional a lo anterior es legal y la extracción es técnicamente factible.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Dane, s. f.); adicionalmente, según la Agencia Nacional de Minería, ANM (2018), aporta el 87.7 % de las regalías mineras recaudadas.

En el mismo informe, la ANM (2018) señala que el 94 % de la producción nacional de carbón es exportada. Entre los principales destinos se encuentran Turquía (18 %), Países Bajos (17 %), Chile (8 %) y México (7 %). Estas exportaciones están ligadas al precio internacional del carbón, que a su vez tiene una alta correlación con el precio del petróleo. El 6 % restante se destina al consumo local, donde su precio depende del de combustibles sustitutos para la generación de energía como el gas natural licuado (GNL) y, en menor medida, del precio internacional. Es importante subrayar que en Colombia, el carbón es el único combustible cuyo precio no es regulado [Figura 2].

Figura 2. Consumo y producción de carbón en Colombia



Fuente: elaboración de los autores a partir de International Energy Agency, IEA (2017).

Siguiendo la tendencia mundial, en el país, el carbón se usa principalmente en la generación de energía. Sin embargo, según la UPME (Colombia, 2013), la generación eléctrica con carbón representa menos del 10 % de la capacidad instalada y seguirá así hasta 2050, como margen de seguridad del Sistema Interconectado Nacional (SIN) [Tabla 1].

Tabla 1. Capacidad efectiva de generación

Tipo de Central	Capacidad MW	Participación %
Despachadas centralmente		
Hidráulica	10,978	63.3
Térmica	5,094	29.4
Gas	2,129	12.3
Carbón	1,619	9.3
Combustóleo	272	1.6
ACPM	766	4.4
Jet A1	44	0.3
Gas-Jet A 1	264	1.5
No despachadas centralmente		
Autogenerador	51	0.3
Cogenerador	149	0.9
Eólica	18	0.1
Hidráulica	868	5.0
Térmica	180	1.0
Total	17,338	100

Fuente: elaboración de los autores a partir de XM (s. f.).

Vale la pena resaltar que Colombia se acogió al Acuerdo de París. García Arbeláez, Vallejo López, Higgins y Escobar (2016) resaltan que el país tendrá como meta reducir el 20 % de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, objetivo que planea lograr con diferentes iniciativas que transformarán los sectores productivos. Entre las medidas que impactarán la industria del carbón se encuentran las siguientes:

1. Promover la sustitución de carbón por biomasa.
2. Introducir combustibles con menor intensidad de carbono, además de buscar eficiencias energéticas en calderas, hornos y motores.
3. Aumentar el portafolio de energías renovables –especialmente la eólica y la solar.

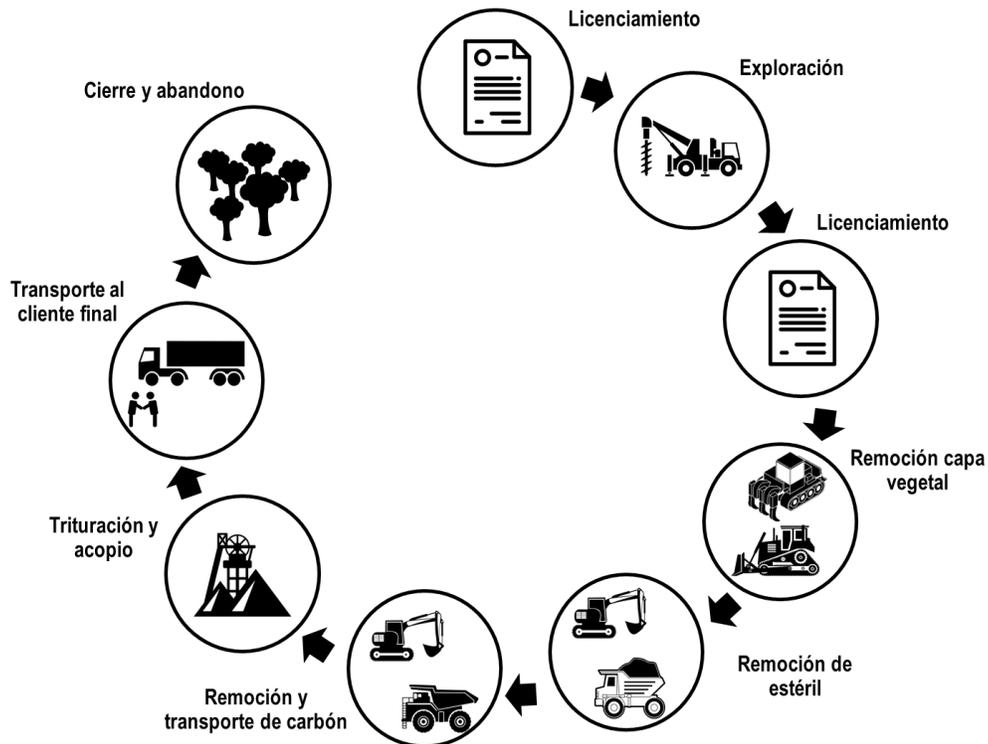
4. Mejorar la gestión del metano en los yacimientos y minas de carbón.
5. Impulsar el uso de energía solar en las viviendas.

Los mismos autores (2016) también destacan que, aunque actualmente el 70 % de la energía que consume Colombia proviene de las hidroeléctricas, el Ministerio de Minas y Energía hace énfasis en la necesidad de repensar la generación de energía bajo escenarios de estrés hídrico, de tal manera que mantenga una huella de carbono baja y no afecte la seguridad energética ni el medioambiente, invitando de paso a no aumentar la capacidad de generación térmica, dado que es una infraestructura que tiende a perder relevancia a nivel mundial.

### 2.3 El proceso de extracción del carbón

Existen dos métodos para la extracción del carbón: minería a cielo abierto y subterráneo. El primero suele ser más económico y seguro, mientras que el segundo es el más común y tiene menos impacto ambiental, pero demanda maquinaria más especializada y es más riesgoso. La escogencia de cuál método usar depende principalmente de la profundidad y la calidad del carbón. Según el *Boletín Estadístico de Minas y Energía* (Colombia, Unidad de Planeación Minero Energética, UPME 2018), el 94 % de la producción nacional de carbón proviene de explotaciones a cielo abierto –la que se evaluará en este trabajo– [Figura 3].

Figura 3. Ciclo de explotación del carbón en una mina a cielo abierto



Fuente: elaboración de los autores a partir de Google Images (s. f.).

Otro aspecto que diferencia a las explotaciones mineras es el grado en que la empresa propietaria delega la operación de la mina, que puede variar entre operación propia, operación tercerizada o cualquier punto intermedio en el que se tercericen solo determinados procesos.

Para The Indian Chamber of Commerce (2013), la operación propia es adoptada por compañías con amplios portafolios mineros o con expectativas de construir uno, que buscan desarrollar capacidades internas para extraer valor de la cadena de producción a través del control de los activos y la consolidación de economías de escala, asumiendo todos los riesgos y recompensas del negocio.

La tercerización es una práctica común en los casos en que el dueño de la mina ejerce otras actividades diferentes a la minería, por ejemplo, es un fondo de inversión o

una empresa metalúrgica que necesita el producto de la mina como un insumo en su proceso productivo. Como lo señalan Sivakumar, Kannan Murugesan (2015), esta práctica permite contratar un operador con mayor experiencia y conocimiento, logrando reducir los costos de operación, aumentar la productividad, acceder al conocimiento de expertos, implementar nuevas tecnologías y focalizarse en competencias *core*. No obstante lo anterior, la mayor ventaja de la operación tercerizada es la disminución de los requerimientos iniciales de caja.

Según The Indian Chamber of Commerce (2013), históricamente en la minería se tercerizaban los mantenimientos de maquinaria, la remoción de estéril y algunas actividades logísticas. Hoy es común que también se tercericen actividades como la perforación y la voladura, el monitoreo de equipos, la supervisión del cumplimiento de regulaciones y la administración depósitos, entre muchos otros procesos.

### 3. Valoración bajo escenarios de alta incertidumbre

Una valoración por opciones reales incorpora la flexibilidad que tienen los administradores de gestionar un proyecto según la información relevante que van recibiendo, lo que les permite tomar decisiones para mejorar los resultados y poner un piso a las pérdidas, aun en momentos adversos. Por ejemplo, pueden aumentar o disminuir el alcance, posponer, abandonar, pagar para “aprender” o incluso cambiar por otro proyecto.

Siguiendo la lógica propuesta por Myers (1977), una empresa se puede ver como la mezcla de activos reales que tienen valor por sí mismos –independientemente de la estrategia de la empresa– y opciones reales representadas en las oportunidades para disponer de los activos a la hora de ejecutar una estrategia de inversión.

Dado que esta técnica de valoración refleja la volatilidad e incertidumbre propias de los negocios, también permite revelar valores ocultos en técnicas tradicionales como los FCD que, aunque proporcionan criterios de decisión sistemáticos y claros, tienen restricciones al asumir los flujos como determinísticos y predecibles, basándose únicamente en la caja como fuente de valor (Bailey *et al.*, 2004). Si bien con los métodos tradicionales se pueden plantear diferentes escenarios y analizar sensibilidades, sus resultados no capturan completamente la flexibilidad existente en un proyecto, especialmente si tiene múltiples etapas, ignorando que las intervenciones de la dirección tienden a agregar valor (McKinsey & Company, 1998). Es importante aclarar que la valoración por medio de opciones reales no reemplaza el método de los FCD: por el contrario, lo incorpora como uno de sus componentes (Bailey *et al.*, 2004).

Existen varias metodologías para la valoración por opciones reales. Isaza Cuervo y Botero Botero las resumen en tres grupos:

- Valoración a través de ecuaciones diferenciales, siendo Black & Scholes<sup>4</sup> la más utilizada.
- Valoración a través de mallas y arboles binomiales.
- Simulaciones (Isaza Cuervo y Botero Botero, 2014).

Para este trabajo se utilizarán reticulados binomiales, que mezclan elementos de las dos últimas categorías, con el objetivo de valorar una opción de abandono –equivalente a una opción *put* americana<sup>5</sup>.

Por medio de un diagrama –retícula–, los reticulados binomiales reflejan todas las trayectorias posibles que se derivan de cada decisión que puede tomar la administración. Según Mun (2002), mediante esta técnica es posible definir cinco pasos para hacer una valoración:

1. Encontrar el VPN del activo subyacente ( $S$ ) por medio de un modelo de FCD para  $T$  años.
2. Por medio de una simulación de Montecarlo, hallar la volatilidad del VPN para calcular los factores de crecimiento ( $u$ ) y decrecimiento ( $d$ ) que, al multiplicarlos por  $S$  establecen los primeros nodos ( $Su$  y  $Sd$ ).

$$u = e^{\sigma \sqrt{\frac{T}{N}}} \quad (1)$$

$$d = e^{-\sigma \sqrt{\frac{T}{N}}} \quad (2)$$

Donde,

$\sigma$ : volatilidad del VPN – coeficiente de variación [%]

$T$ : tiempo de expiración del proyecto [años]

$N$ : cantidad total de pasos ( $n = 1, \dots, N$ ).

---

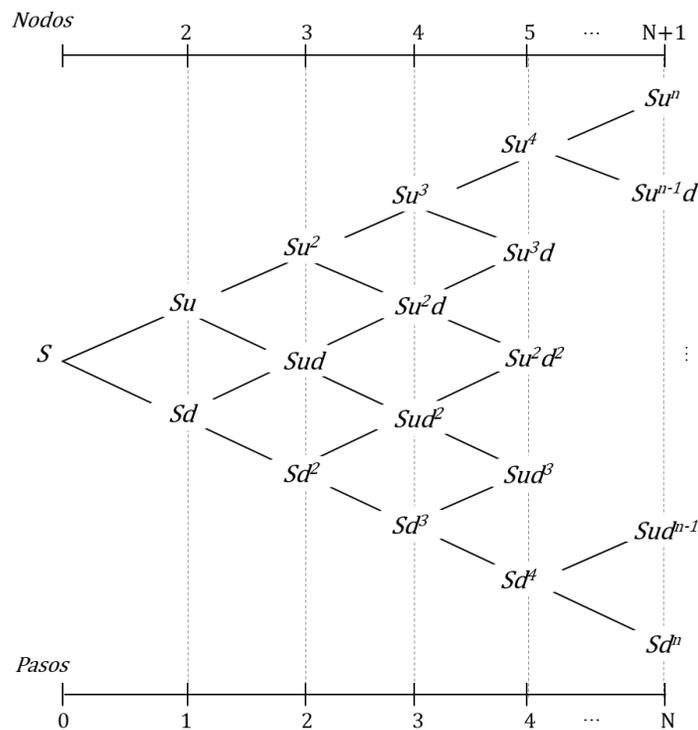
<sup>4</sup> Desarrollada por Black, Scholes y Merton, es una metodología para calcular los precios de opciones europeas sobre acciones que no pagan dividendos.

<sup>5</sup> Opción *put*: le confiere al tenedor el derecho –pero no la obligación– de vender el activo subyacente a un precio de ejercicio ( $K$ ) pactado con anterioridad.

Opción *call*: confiere al tenedor los mismos derechos, pero para la compra del activo. Al ser una opción americana, se puede ejercer en cualquier momento, durante la vigencia de la opción (si es europea solo al vencimiento).

- Se multiplican los valores del paso anterior ( $S_u$  y  $S_d$ ) por los mismos factores  $u$  y  $d$ , formando tres nuevos nodos:  $S_u^2$ ,  $S_{ud}$  y  $S_d^2$ . Se continúa así hasta llegar al paso  $N$  y al nodo  $N + 1$ . A mayor número de nodos, se obtiene un mejor estimado del valor, resultado que converge al obtenido por las ecuaciones de Black & Scholes [Figura 4].

Figura 4. Reticulado – Evolución VPN del activo subyacente



Fuente: elaboración de los autores.

- Posteriormente se construye el reticulado de valoración de la opción. Por tratarse de una opción *put*, el objetivo es identificar los nodos en los cuales el VPN del activo subyacente ( $S$ ) es superior al valor  $K$  que se obtendría por abandonar el proyecto;<sup>6</sup> por tanto, no se ejerce la opción y se continúa operando. En los demás casos, dado que  $K > S$ , resulta mejor ejercer la opción y abandonar [Figura 5].

<sup>6</sup> Este valor de salvamento equivalente al precio *strike* de la opción de abandono.

Una vez se ha terminado de construir la retícula hasta el paso  $N$ , se descuenta cada nodo desde el último paso hasta el primero, con una probabilidad de riesgo-neutral ( $p$ ) [Figura 5].<sup>7</sup>

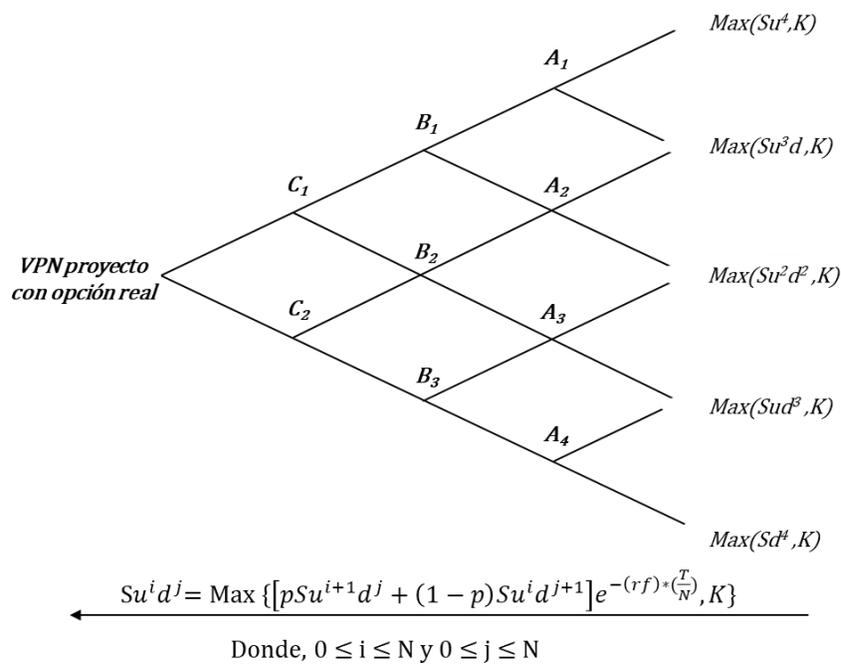
$$\text{Factor descuento} = \{ p * u + [(1 - p) * d] \} e^{-rf \frac{T}{N}} \quad (3)$$

$$\text{Con } p = \frac{e^{rf(\frac{T}{N})} - d}{u - d} \quad (4)$$

Donde,

$rf$ : tasa libre de riesgo [%]<sup>8</sup>

Figura 5. Reticulado – Valoración de la opción



Fuente: elaboración de los autores.

<sup>7</sup> Se usa probabilidad de riesgo-neutral, calculada con una tasa libre de riesgo ( $rf$ ), dado que cada uno de los valores de los nodos ya incorpora el riesgo inherente.

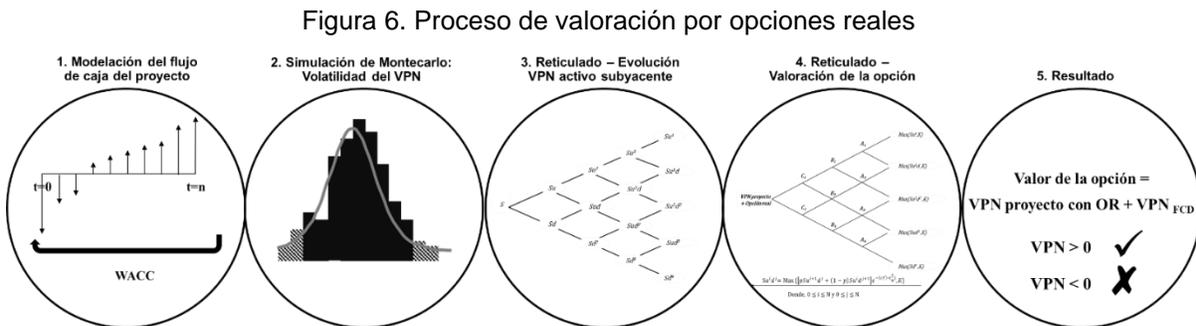
<sup>8</sup> Corresponde a los bonos del tesoro de EE. UU. a 10 años.

5. El resultado del Punto 4 es el valor del proyecto incorporando el valor de la flexibilidad inherente a la opción; por tanto, el valor de la opción resulta de:

$$\text{Valor de la opción} = \text{VPN del proyecto con opción real} - \text{VPN}_{\text{FCD}} \quad (5)$$

## 4. Caso de estudio

En este trabajo se evalúa mediante opciones reales la apertura de una nueva mina de carbón por parte de una empresa minera. Se espera que esta mina tenga una relación de estéril/carbón<sup>9</sup> inferior a aquella en la que actualmente opera, lo que implicaría menores costos de producción. Sin embargo, la alta incertidumbre del proyecto, por depender del precio de un *commodity*, del dólar y de factores geológicos y climáticos, pueden volverlo inviable, haciendo que sea mejor opción clausurar la mina. Los pasos por seguir se presentan a continuación [Figura 6].



Fuente: elaboración de los autores.

### 4.1 Modelación del flujo de caja del proyecto

Para la modelación del flujo de caja del proyecto se partió del secuenciamiento minero realizado por la compañía y su información histórica,<sup>10</sup> el cual cuenta con las siguientes premisas:

1. Ratio de estéril respecto a carbón: 5.4 m<sup>3</sup>/ton
2. Reservas estimadas por 15,000,000 ton
3. Diez años de explotación

<sup>9</sup> Metros cúbicos de material que se debe de extraer para obtener una tonelada de carbón.

<sup>10</sup> Se parte de la información suministrada por una compañía del sector real. Sin embargo, las cifras fueron modificadas (conservando la proporcionalidad) dada la confidencialidad del proyecto.

Según lo anterior, se realizaron las proyecciones del flujo de caja libre del proyecto, partiendo de los siguientes supuestos:

#### 1. Ingreso

- Se proyectan unas cantidades de 1,1 millones de toneladas para los dos primeros años; y a partir del tercer año suben a 1,6 millones de toneladas, asumiendo que se tienen dos años para llegar al nivel de ventas propuesto.
- Para proyectar el precio de venta en dólares se parte de una proyección del índice API 2,<sup>11</sup> que se usa como referencia del precio internacional del carbón, al cual se le descuenta un *spread* de USD 7,7/ton, según los precios de venta históricos de la empresa. Por otro lado, se proyecta la tasa de cambio COP/USD con la devaluación implícita –diferenciales de la inflación esperada.

#### 2. Costo: se asume una operación tercerizada, partiendo de los niveles de producción y ratios mencionados anteriormente. El análisis y la proyección del costo se realizó según las siguientes categorías:

- Costo directo, que incluye actividades relacionadas con el desarrollo de la mina, la explotación, la trituración y el acopio: el 63 % del costo total.
- Costos indirectos: el 37 % del costo total.

Estos costos, que dependen principalmente de la ratio estéril/carbón y la distancia de acarreo, se incrementan con la inflación y no incluyen los costos de transporte al cliente final, pues se asumen precios de venta en patio de mina.

#### 3. Gastos: los gastos de estructura anuales se incrementan con la inflación y corresponden en el año base a:

- Gatos de administración: COP 10,000 millones
- Gastos de ventas: el 1 % de las ventas

---

<sup>11</sup> Índice de precios del carbón calculado por Argus & McClosky con base en las importaciones de los países del noroeste europeo, usado como referencia en la mayoría de los derivados sobre carbón.

#### 4. Capital de trabajo

- Cuentas por cobrar: rotan cada 35 días.
- Cuentas por pagar: rotan cada 25 días, principalmente por los pagos al operador minero.
- Inventarios: con rotación de 114 días en promedio durante los diez años del proyecto; varían con base en la relación entre el costo y los inventarios, según el desarrollo de la mina.

5. Impuestos operacionales: se asumen según la última reforma tributaria.

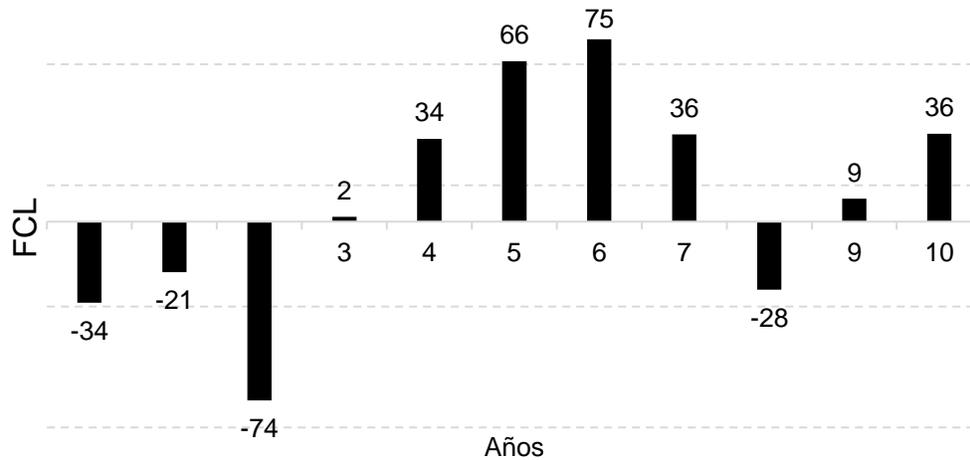
6. Capex por COP 33,500 millones para ejecutarse en el año 1: incluye principalmente:

- Compra de predios: COP 20,000 millones.
- Construcción y montaje de la mina –vías de acceso al complejo, campamento, patios de preparación, trituración, acopio, despacho y remoción de capa vegetal–: COP 10,000 millones.
- Permisos, licencias: COP 3,500 millones.

7. En el último año se incluye un egreso por COP 9,200 millones que corresponde al cierre y abandono de la mina.

De esta manera se llega al flujo de caja libre (FCL) que se presenta a continuación [Figura 7].

Figura 7. Flujo de caja libre [COP millardos]



Fuente: elaboración de los autores.

Estos flujos fueron descontados con un WACC del 11 %, teniendo en cuenta una estructura de capital sin deuda y los siguientes supuestos:

Tasa libre de riesgo:<sup>12</sup> 2.08 %  
 Prima de mercado:<sup>14</sup> 5.44 %  
 Beta desapalancada:<sup>16</sup> 1.04

Riesgo país Colombia:<sup>13</sup> 1.96 %  
 Devaluación LP:<sup>15</sup> 1.18 %

Con estos supuestos, por medio de los FCD, se llega a un VPN del proyecto de COP 13,037 millones.

<sup>12</sup> Fuente: Bloomberg.

<sup>13</sup> Fuente: JP Morgan.

<sup>14</sup> Fuente: Damodaran.

<sup>15</sup> Fuente: Proyección IPC Bloomberg; cálculo propio.

<sup>16</sup> Fuente: Damodaran.

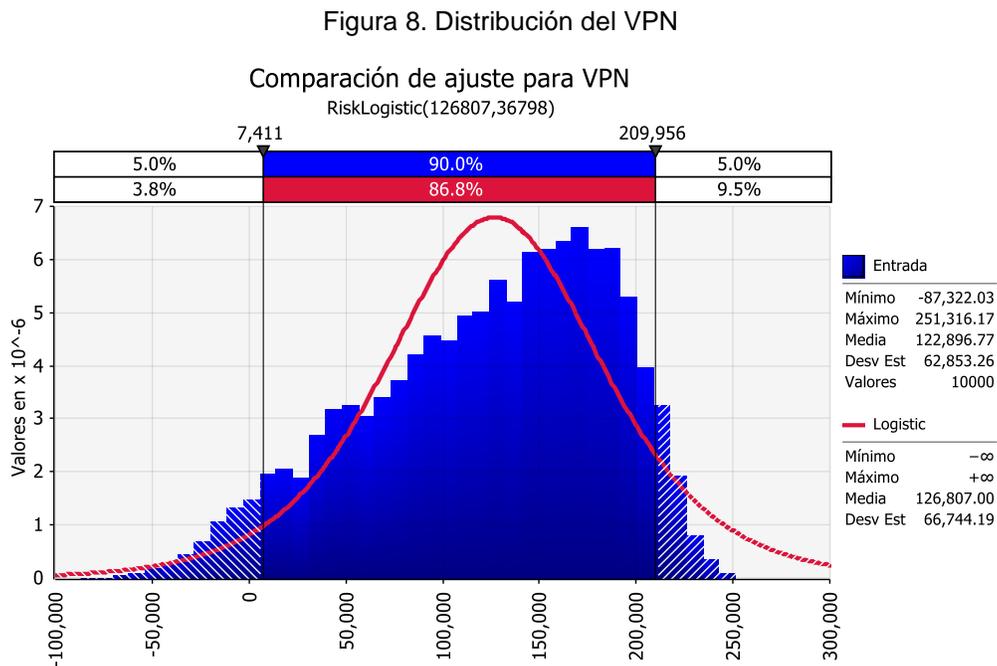
## 4.2 Simulación de Montecarlo: volatilidad del VPN

Se identificaron las siguientes variables críticas del proyecto:

1. Ratio promedio de estéril respecto a carbón de la mina
2. Variación anual del precio de venta (API 2)
3. Variación promedio del costo de desarrollo

Al realizar las pruebas de bondad de ajuste se observa que el API 2 y el costo de remoción de estéril se aproximan a una distribución de probabilidad logística. Para la ratio, dado que es un proyecto nuevo y que la información de una mina a otra cambia sustancialmente, se aplicó una distribución triangular según el secuenciamiento minero realizado –v. el Anexo 3.

Con estas variables de entrada se realizó una simulación de Montecarlo en @Risk con 10,000 iteraciones, y se encontró que el VPN del proyecto se ajusta a una distribución logística, con media de COP 126,807 millones, y una desviación estándar de COP 66,744 millones –coeficiente de variación del 53 % [Figura 8].



Fuente: elaboración de los autores con @Risk.

#### 4.3 Reticulado – Evolución VPN activo subyacente

Se construyó el reticulado con la evolución del VPN siguiendo la metodología recomendada por Mun (2002) y usando 1,000 pasos y los siguientes parámetros:

Tasa libre de riesgo: 2.08 %	T/N: 0.01
Volatilidad: 53 %	Factor de crecimiento: 1.0540
Factor de decrecimiento: 0.9487	Probabilidad de riesgo neutral: 0.4888

#### 4.4 Reticulado – Valoración de la opción

Para encontrar el precio de ejercicio de la opción –el valor de abandono de la mina–, se supuso lo siguiente:

- Venta de los predios: varía entre COP 18,000 y 12,000 millones en función de la pérdida de la vocación minera y del porcentaje de área total explotado.
- Venta de la maquinaria fija utilizada en los patios de preparación, trituración, acopio y despacho por su valor en libros –asumiendo una depreciación en línea recta por 10 años.
- Liquidación del personal –COP 1,600 millones–, asumiendo los pagos según la normatividad.
- Indemnización al operador de la mina por la terminación del contrato por fuerza mayor. Se asume como el 4.5 % de los costos futuros –en valor presente.

Estos aspectos se destacan por ser fundamentales al momento de garantizar la posibilidad de abandonar el proyecto.

Posteriormente se realizó el reticulado de valoración de la opción y se encontró para cada nodo el mayor valor entre mantener la mina abierta o ejercer la opción de abandono, descontándolo con la probabilidad de riesgo neutral.

## 5. Resultados

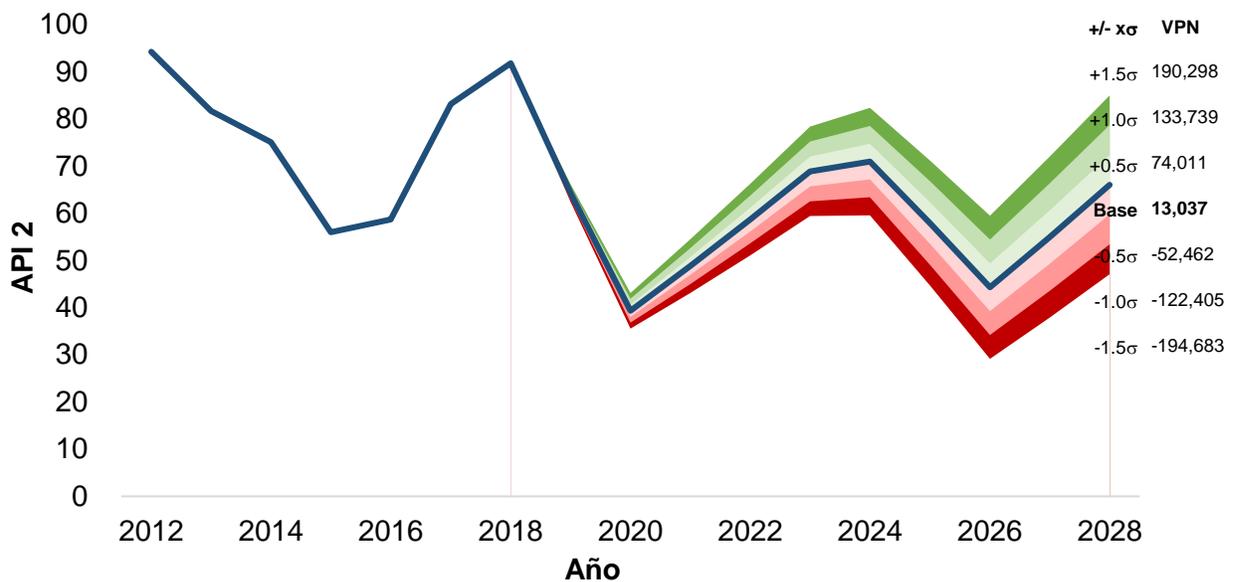
VPN del proyecto con opción real (+)	COP 17,395 millones
VPN proyecto con FCD	(-) COP 13,037 millones
<hr/>	
Valor de la opción	COP 4,359 millones

La flexibilidad que tiene la empresa de gestionar y tomar decisiones con la información relevante que va recibiendo añade un 33 % de valor al proyecto. Esto constituye una herramienta de gestión para los administradores, de manera que cualquier negociación que establezca obstáculos a un posible cierre del proyecto, como contratos de operación, acuerdos de suministros o pactos colectivos, entre otros, sea analizada a la luz de la flexibilidad a la que la compañía estaría renunciando y el valor asociado a ella.

## 6. Conclusiones

Una de las limitaciones de la valoración tradicional por FCD es que al usar supuestos discrecionales y revelar solo un valor del proyecto, la hace sensible a la opinión del evaluador. Para evidenciarlo, se hizo la valoración del proyecto cambiando la proyección del API 2 entre +1.5 y -1.5 desviaciones estándar, y como resultado el VPN varió entre COP 190,298 millones y -COP 194,683 millones [Figura 9].

Figura 9. Proyección del API 2 e impacto en VPN



Fuente: elaboración de los autores.

Aunque una valoración por opciones reales incorpora el valor inherente a la flexibilidad que tenga el proyecto, no logra solucionar completamente la subjetividad de la valoración que en este caso manifiesta en la estimación del precio de ejercicio de la opción. Para tener una idea de la magnitud de lo anterior, con la exclusión de las multas al operador minero incorporadas en esta valoración, el precio de la opción se incrementaría 3.7 veces. En la literatura analizada sobre opciones reales se retoma la teoría de opciones financieras, señalando la volatilidad como el factor fundamental en la determinación del valor de la opción y descuidando la importancia de una buena estimación del precio de

ejercicio. En las opciones financieras, este aspecto no es relevante, dado que el precio de ejercicio lo determina el mercado; sin embargo, en las opciones reales sí es necesario estimarlo.

Teniendo en cuenta que la administración tiene más margen de acción sobre las variables relacionadas con la posibilidad de ejercer la opción y su costo que sobre la volatilidad que generalmente depende del mercado, es ella la encargada de garantizar el mayor valor que la flexibilidad le aporta al proyecto. De no poderse ejercer la opción debido a asuntos contractuales, por falta de mercado secundario para la venta de los activos o porque las multas hagan que el “precio *strike*” sea negativo, se desvirtuaría el valor de la opcionalidad.

Por esto, la valoración por medio de opciones reales, además de servir para la toma de decisiones de inversión, es una herramienta dinámica que le permite a la administración adquirir conciencia del valor adicional a un enfoque solo de caja, de tal forma que en las negociaciones logre encontrar el balance óptimo entre flexibilidad y certidumbre.

## 7. Referencias

- Agencia Nacional de Minería, ANM (2018). *Carbón* [en línea]. Disponible en [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ficha\\_carbon\\_es.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ficha_carbon_es.pdf)
- Bailey, W., Couët, B., Bhandari, A., Faiz, S., Srinivasan, S. y Weeds, H. (2004). Valoración de las opciones reales. *Oilfield Review*, s. v., s. n., 4-19, s. doi. Disponible en [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish04/spr04/p4\\_19.ashx](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/spr04/p4_19.ashx)
- British Petroleum, BP (2018). *Statistical review of world energy* [en línea]. Londres: BP Energy Economics. Disponible en <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Colombia, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Dane (s. f.). *Producto Interno Bruto (PIB). Base 2015* [en línea]. Disponible en <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales>
- Colombia, Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2018). *Boletín Estadístico de Minas y Energía*. Bogotá: UPME. Disponible en <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/Boletin-estadistico-de-ME.aspx>
- Damodaran, A. (2012). *Investment Valuation*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- García Arbeláez, C., Vallejo López, G., Higgins, M. y Escobar, E. M. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Cali: World Wildlife Fund, WWF.
- Hull, J. C. (2009). *Introducción a los mercados de futuros y opciones*. Ciudad de México: Pearson Educación.
- Indian Chamber of Commerce (2013). *Coal mining. Is private participation the answer?* [en línea]. Londres: PricewaterhouseCoopers. Disponible en <https://www.pwc.in/assets/pdfs/industries/power-mining/coal-mining-icc-report-v2-300613.pdf>

- International Energy Agency, IEA (2017). *Coal 2018: Analysis and forecasts to 2022*. París: IEA.
- International Energy Agency, IEA (2018). *Coal information overview*. París: IEA.
- Isaza Cuervo, F. y Botero Botero, S. (2014). Aplicación de las opciones reales en la toma de decisiones en los mercados de electricidad. *Estudios Gerenciales*, 30(133), 397-407, octubre, <https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.06.003>
- McKinsey & Company (1998). Making real options real. *The McKinsey Quarterly*, 3, 128-141. Disponible en [https://faculty.fuqua.duke.edu/~charvey/Teaching/BA456\\_2006/McK98\\_3.pdf](https://faculty.fuqua.duke.edu/~charvey/Teaching/BA456_2006/McK98_3.pdf)
- McKinsey & Company (2019). *Global energy perspective 2019: Reference case*. Ciudad de Nueva York, NY: McKinsey & Co. Disponible en [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202019/McKinsey-Energy-Insights-Global-Energy-Perspective-2019\\_Reference-Case-Summary.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202019/McKinsey-Energy-Insights-Global-Energy-Perspective-2019_Reference-Case-Summary.ashx)
- Mun, J. (2002). *Real options analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Myers, S. C. (1977). Determinants of corporate borrowing. *Journal of Financial Economics*, 5(2), 147-175, noviembre, [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(77\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0304-405X(77)90015-0)
- Organización de Naciones Unidas, ONU (2015). *Acuerdo de París* [en línea]. Disponible en [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf)
- Sivakumar, R. Kannan, D. y Murugesan, P. (2015). Green vendor evaluation and selection using AHP and Taguchi loss functions in production outsourcing in mining industry. *Resources Policy*, 46(part 1), 64-75, diciembre, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.008>
- XM (s. f.). *Capacidad efectiva por tipo de generación* [en línea]. XM Paratec, parámetros técnicos del SIN. Disponible en <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>

## 8. Anexos

### 8.1 Anexo A. Estado de resultados proyectado

<i>Cifras COP millones</i>	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos operacionales	185,610	104,686	199,499	249,134	301,497	314,271	251,365	184,656	240,462	299,246
Costos	126,288	129,078	191,178	196,151	201,579	207,274	213,170	219,248	225,506	231,948
<b>Utilidad Bruta</b>	<b>59,322</b>	<b>-24,391</b>	<b>8,321</b>	<b>52,982</b>	<b>99,917</b>	<b>106,997</b>	<b>38,195</b>	<b>-34,592</b>	<b>14,956</b>	<b>67,298</b>
<i>Margen Bruto</i>	32%	-23%	4%	21%	33%	34%	15%	-19%	6%	22%
<b>Gastos de Estructura</b>	<b>11,898</b>	<b>11,419</b>	<b>12,689</b>	<b>13,505</b>	<b>14,358</b>	<b>14,824</b>	<b>14,545</b>	<b>14,237</b>	<b>15,166</b>	<b>16,135</b>
Gastos de administración	10,000	10,330	10,652	10,972	11,301	11,640	11,989	12,349	12,719	13,101
Gastos de ventas	1,856	1,047	1,995	2,491	3,015	3,143	2,514	1,847	2,405	2,992
Gastos de D&A	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Utilidad Operacional</b>	<b>47,425</b>	<b>-35,810</b>	<b>-4,368</b>	<b>39,478</b>	<b>85,560</b>	<b>92,172</b>	<b>23,650</b>	<b>-48,829</b>	<b>-210</b>	<b>51,163</b>
<i>Margen Operacional</i>	26%	-34%	-2%	16%	28%	29%	9%	-26%	0%	17%
<b>EBITDA</b>	<b>48,816</b>	<b>-34,418</b>	<b>-2,976</b>	<b>40,869</b>	<b>86,951</b>	<b>93,564</b>	<b>25,042</b>	<b>-47,438</b>	<b>1,182</b>	<b>52,555</b>
<i>Margen EBITDA</i>	26%	-33%	-1%	16%	29%	30%	10%	-26%	0%	18%
Financieros, neto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>	<b>47,425</b>	<b>-35,810</b>	<b>-4,368</b>	<b>39,478</b>	<b>85,560</b>	<b>92,172</b>	<b>23,650</b>	<b>-48,829</b>	<b>-210</b>	<b>51,163</b>
Impuesto de renta	15,650	0	0	12,238	26,523	28,573	7,332	0	0	15,861
<b>Utilidad Neta</b>	<b>31,775</b>	<b>-35,810</b>	<b>-4,368</b>	<b>27,240</b>	<b>59,036</b>	<b>63,599</b>	<b>16,319</b>	<b>-48,829</b>	<b>-210</b>	<b>35,302</b>
<i>Margen neto</i>	17%	-34%	-2%	11%	20%	20%	6%	-26%	0%	12%

Fuente: elaboración de los autores.

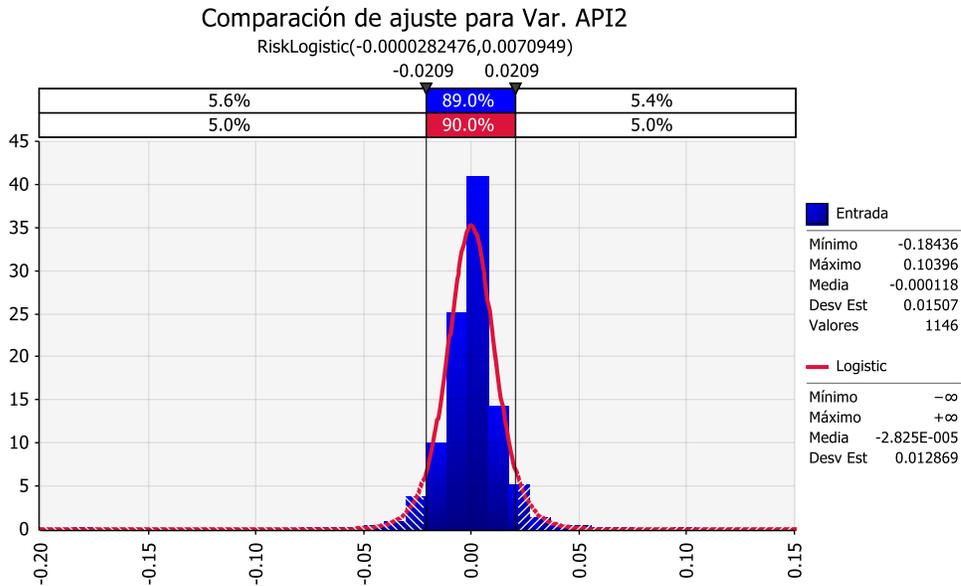
### 8.2 Anexo B. Flujo de caja libre proyectado

<i>Cifras COP millones</i>	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>EBITDA</b>	<b>48,816</b>	<b>-34,418</b>	<b>-2,976</b>	<b>40,869</b>	<b>86,951</b>	<b>93,564</b>	<b>25,042</b>	<b>-47,438</b>	<b>1,182</b>	<b>52,555</b>	
Cierre y abandono	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9,200
<b>Capital de Trabajo</b>	<b>-53,978</b>	<b>-39,433</b>	<b>5,026</b>	<b>5,576</b>	<b>5,824</b>	<b>10,277</b>	<b>18,271</b>	<b>19,365</b>	<b>8,301</b>	<b>8,809</b>	
Cuentas por Cobrar	-18,045	7,868	-9,218	-4,826	-5,091	-1,242	6,116	6,486	-5,426	-5,715	
Inventarios	-45,432	-47,461	9,843	9,999	10,479	11,091	11,765	12,479	13,227	14,010	
Proveedores y CxP	9,500	160	4,401	402	436	428	390	401	499	515	
<b>Impuestos</b>	<b>-15,650</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-12,238</b>	<b>-26,523</b>	<b>-28,573</b>	<b>-7,332</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-15,861</b>	
<b>Flujo de Caja Operativo</b>	<b>-20,812</b>	<b>-73,851</b>	<b>2,050</b>	<b>34,207</b>	<b>66,252</b>	<b>75,267</b>	<b>35,981</b>	<b>-28,072</b>	<b>9,483</b>	<b>36,303</b>	
Inversión en CapEx	-33,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>FCL</b>	<b>-33,500</b>	<b>-20,812</b>	<b>-73,851</b>	<b>2,050</b>	<b>34,207</b>	<b>66,252</b>	<b>75,267</b>	<b>35,981</b>	<b>-28,072</b>	<b>9,483</b>	<b>36,303</b>

Fuente: elaboración de los autores.

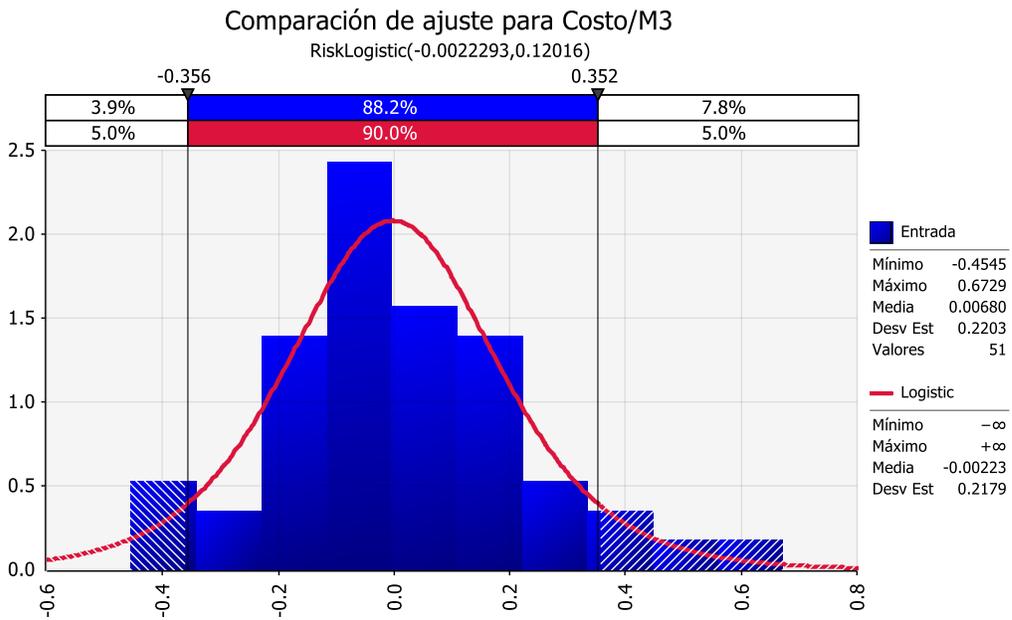
### 8.3 Anexo C. Análisis de bondad de ajuste

- Variación anual del API 2



Fuente: elaboración de los autores con @Risk.

- Variación promedio del costo de desarrollo



Fuente: elaboración de los autores con @Risk.