



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ANÁLISIS PRÁCTICO DE EVALUACIÓN POR OPCIONES REALES APLICADO A  
PROYECTOS DE INVERSIÓN TIPO BROWNFIELD EN UNA COMPAÑÍA MINERA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN  
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

**LEONARDO ANDRÉS COQUI DÍAZ**

**PROFESOR GUÍA  
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
GAUTAM PARIMOO  
JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO  
IVÁN BRAGA CALDERÓN**

**SANTIAGO DE CHILE  
2014**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Magister en Gestión y Dirección de  
Empresas versión Industria Minera  
**Por:** Leonardo Andrés Coqui Díaz  
**Fecha:** 20/06/2014  
**Profesor Guía:** Luis Zaviezo Schwartzman

## **ANÁLISIS PRÁCTICO DE EVALUACIÓN POR OPCIONES REALES APLICADO A PROYECTOS DE INVERSIÓN TIPO BROWNFIELD EN UNA COMPAÑÍA MINERA**

El presente trabajo de tesis expone el resultado de un análisis de aplicación de la metodología de evaluación por opciones reales a proyectos tipo “Brownfield” en una compañía minera.

El objetivo principal de esta tesis es la selección de una metodología de evaluación por opciones reales aplicable a proyectos de incremento marginal de producción (tipo “Brownfield”), de manera de realizar una aplicación piloto a un proyecto específico y discutir sobre la conveniencia, facilidad y ventajas de aplicar opciones reales como un complemento a la metodología tradicional de evaluación de proyectos.

La metodología de Evaluación por Opciones Reales ha ganado terreno en la industria en los últimos años como una herramienta complementaria a las prácticas tradicionales de evaluación de inversiones. Sin embargo su principal obstáculo para masificarse sigue siendo la complejidad matemática y la falta de profesionales preparados para su aplicación. Por otro lado, la mayor parte del desarrollo actual y aplicaciones prácticas dentro de la industria minera se ha enfocado a proyectos mineros en yacimientos nuevos (tipo “Greenfield”)

En ese sentido el objetivo se alcanzó, seleccionándose una metodología práctica y fácil de comunicar, que permite evaluar el valor de las flexibilidades de proyectos tipo Brownfield en periodos de evaluación acotados. En el proyecto piloto usado para la aplicación se obtuvo una evaluación del valor de la flexibilidad de cerrar, expandir y abandonar el proyecto. Si bien la evaluación estándar de este proyecto arrojó buenos resultados por sí sola, el uso de opciones reales permitió determinar otras fuentes de valor no capturadas por la evaluación tradicional. Se dejó planteada la profundización de la aplicación de esta metodología apoyándose en una estructuración ad hoc del modelo financiero del LOM de la compañía.

Se ha propuesto que el mejor escenario para plantear el uso de evaluación por opciones reales se presenta al comparar dos proyectos de tipo “Brownfield” en el proceso de selección de inversión. Al aplicar las opciones reales y determinarse el valor de las flexibilidades propias de cada proyecto es posible discernir de mejor manera donde se maximiza el valor de la inversión, sobre todo cuando los proyectos muestren indicadores de evaluación tradicional de similares magnitudes.

Por último, se dejó planteada la metodología a usar en proyectos tipo “Stay in Business”, nuevamente, como complemento a la evaluación tradicional de manera de fortalecer el proceso de toma de decisiones en proyectos de inversión.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa por su amor, paciencia, comprensión y apoyo en todo momento, por darme aliento y ánimo cuando el cansancio y el estrés aparecieron, y por ser fuente de motivación y por darme los dos más grandes regalos de mi vida, nuestros hijos.

A mis pequeños Mateo y Sebastian por tomar prestado parte del tiempo y dedicación que merecen durante estos últimos años, y nuevamente a su maravillosa madre quién supo llenarlos de amor y atención durante mis ausencias, sobre todo durante mi asignación de trabajo en terreno. Es mi compromiso compensarlos hasta el último segundo.

A mi madre, padre y hermanos por darme la oportunidad de creer y encontrar las formas de buscar siempre ser mejor.

A todas las personas que fueron un apoyo significativo en el desarrollo del trabajo de tesis: Andrés Kettlun, MsC (Codelco, Sub Gerente Evaluación Financiera), Michael Samis, Ph.D., P.Eng. (Earnest&Young, Valuation and Business Modeling), Luis Martinez, Ph.D. (ROMPEV, Managing Director and Principal Consultant), Juan Ignacio Guzmán Ph.D. (Boamine, CEO), y en general a todos los profesores y coordinadores del programa.

## TABLA DE CONTENIDO.

TABLA DE CONTENIDO. ....	iii
INDICE DE TABLAS. ....	iv
INDICE DE ILUSTRACIONES. ....	v
1. INTRODUCCIÓN. ....	1
2. OBJETIVO. ....	7
2.1. Objetivo General .....	7
2.2. Objetivos Específicos .....	7
2.3. RESULTADOS ESPERADOS.....	7
3. MARCO CONCEPTUAL .....	8
3.1. METODOLOGÍAS TRADICIONALES DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS.....	8
3.2. Evaluación por Opciones Reales .....	12
3.3. Tipos de Opciones .....	17
3.3.1. Opción de Diferir: .....	17
3.3.2. Opción de Cerrar y Abandonar: .....	18
3.3.3. Opción de Expandir:.....	18
3.3.4. Opción de Contraer:.....	18
3.3.5. Opción de Crecer: .....	18
3.3.6. Opciones de barrera:.....	19
3.3.7. Opción de separar en Fases:.....	19
3.3.8. Opciones tipo Arcoíris: .....	19
3.4. Variables en Opciones Reales .....	19
3.5. RIESGO Y Estimación de la volatilidad.....	20
3.6. Metodologías de evaluación de Opciones Reales .....	22
3.6.1. Ecuaciones Diferenciales Parciales .....	23
3.6.2. Simulaciones.....	25
3.6.3. Árboles Binomiales.....	26
3.7. Aplicaciones de Opciones Reales.....	28
3.7.1. Aplicaciones de Opciones Reales en Proyectos Mineros .....	28
4. . EVALUACIÓN POR OPCIONES REALES – APLICACIÓN PRÁCTICA .....	31
4.1. METODOLOGÍA SELECCIONADA.....	31
5. CONTEXTO DEL PROYECTO A ANALIZAR .....	35
5.1. breve reseña de la compañía.....	35
5.2. proyecto seleccionado para análisis de opciones reales.....	35
5.2.1. RESULTADOS PRELIMINARES DE EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	40
6. ANÁLISIS DE OPCIONES REALES APLICADO AL PROYECTO SELECCIONADO.....	41

7.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES. ....	49
8.	GLOSARIO .....	53
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	55

## INDICE DE TABLAS.

FIGURA 1. PRECIO DE COBRE EFECTIVO VERSUS LARGO PLAZO.....	3
FIGURA 2. EVOLUCIÓN DE PRECIOS DE LARGO DE LARGO PLAZO Y PROYECCIONES 2013. CODELCO, CRU COPPER CONFERENCE 2013.....	4
FIGURA 3. FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN PROYECTOS MINEROS (L. MARTINEZ – 2013).....	11
FIGURA 4. FLEXIBILIDAD OPERACIONALES Y DE ADMINISTRACIÓN (L. MARTINEZ – 2013) .....	15
FIGURA 5. CREACIÓN DE VALOR A TRAVÉS DE LAS FLEXIBILIDADES DE UN PROYECTO (L. MARTINEZ- 2013).....	15
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIONES. CONO DE INCERTIDUMBRE (FELICIANO GARCÍA – RODRIGO ROMERO, 2009) .....	25
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA METODOLOGÍA ÁRBOLES BINOMIALES (FELICIANO GARCÍA – RODRIGO ROMERO, 2009).....	27
FIGURA 8. DE EVALUACIÓN POR OPCIONES REALES PROYECTO OYU TOLGOY.....	29
FIGURA 9. LAYOUT PRELIMINAR PROYECTO – ALTERNATIVA 2A.....	37
FIGURA 10 DIAGRAMA GENERAL DE PROCESOS – ALTERNATIVA 2A .....	38
FIGURA 11. LAYOUT PRELIMINAR PROYECTO – ALTERNATIVA 2B.....	38
FIGURA 12. DIAGRAMA GENERAL DE PROCESOS – ALTERNATIVA 2B .....	39
FIGURA 13. DIAGRAMA GENERAL DE PROCESOS – ALTERNATIVA 2A .....	39
FIGURA 14. CRONOGRAMA MAESTRO DEL PROYECTO .....	40
FIGURA 15. GRÁFICO DE TRAYECTORIAS (SIMULACIÓN) DE PRECIO DE COBRE .....	44

## INDICE DE ILUSTRACIONES.

TABLA 1. INVERSIÓN PROYECTADA EN LA MINERÍA CHILENA (MILLONES DE DÓLARES). FUENTE COCHILCO, AGO-2013.....	1
TABLA 2. CAMBIOS EN CARTERA DE PROYECTOS 2013 RESPECTO DE 2012. FUENTE: COCHILCO, AGO-13.....	2
TABLA 3. PARÁMETROS DE VALOR EN UNA OPCIÓN FINANCIERA VS OPCIÓN REAL.....	20
TABLA 4. RESULTADOS EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO.....	40
TABLA 5. SIMULACIÓN DE TRAYECTORIAS DE PRECIO.....	43
TABLA 6. PROBABILIDADES PARA TRAYECTORIAS DE PRECIO.....	44
TABLA 7. FLUJOS PROYECTADOS PARA PRECIOS SIMULADOS (CASO BASE).....	45
TABLA 8. FLUJOS PROYECTADOS PARA PRECIOS SIMULADOS (CASO CON PROYECTO).....	45
TABLA 9. FLUJOS ACTUALIZADOS A VALOR PRESENTE POR INDUCCIÓN INVERSA (CASO BASE).....	46
TABLA 10. FLUJOS ACTUALIZADOS A VALOR PRESENTE POR INDUCCIÓN INVERSA (CASO CON PROYECTO).....	46

## 1. INTRODUCCIÓN.

En escenarios de menores precios para el cobre que los vistos en la cúspide del reciente “súper ciclo”, los esfuerzos de las grandes compañías mineras se han reorientado gradualmente a mejorar su productividad enfocándose en la gestión y disminución de costos de producción.

Es así como grandes proyectos, que en sus etapas de estudio alcanzaron altos montos estimados de inversión, alimentaron una proyección de inversión minera hacia el año 2020 superior a los MUSD 100.000. Sin embargo, esta cifra ha ido siendo ajustada consecutivamente a la baja por una serie de factores, entre los cuales están el alza de los costos de energía, costo de mano de obra, la disponibilidad de agua, baja productividad y perspectivas de precios de largo plazo de cobre inferiores a los actuales. Hoy se estima que al menos un 35% de los proyectos de inversión anunciados para el periodo 2012-2020 se encuentran en revisión o definitivamente postergados<sup>1</sup>. Lo anterior muestra que la gran minería en Chile está mirando el futuro con menos optimismo en relación a los grandes proyectos. A su vez, el foco se ha reorientado a controlar y ajustar los costos de producción para mejorar los niveles de productividad de las operaciones vigentes

SECTOR	Anterior a 2013	2013	2014	2015	2016	2017	Subtotal 2013 - 2017	Posterior a 2017	TOTAL	% Partic. En Total
<b>1) Minería del Cobre (1.1 + 1.2 + 1.3)</b>	<b>10.386</b>	<b>7.701</b>	<b>10.401</b>	<b>10.977</b>	<b>12.805</b>	<b>13.024</b>	<b>54.908</b>	<b>21.425</b>	<b>86.718</b>	<b>77,0</b>
De los cuales:										
1.1) CODELCO	3.397	3.969	4.623	4.757	4.552	4.565	22.466	4.683	30.546	27,1
1.2) Gran Minería Privada	6.765	3.613	5.390	5.586	7.454	7.735	29.778	16.357	52.899	47,0
1.3) Mediana Minería	224	119	388	634	799	724	2.664	385	3.273	2,9
<b>2) Minería del Oro y Plata</b>	<b>3.394</b>	<b>813</b>	<b>1.529</b>	<b>2.825</b>	<b>4.125</b>	<b>4.052</b>	<b>13.344</b>	<b>5.050</b>	<b>21.788</b>	<b>19,4</b>
<b>3) Minería del Hierro y Min. Industriales</b>	<b>673</b>	<b>1.069</b>	<b>925</b>	<b>553</b>	<b>318</b>	<b>183</b>	<b>3.049</b>	<b>329</b>	<b>4.050</b>	<b>3,6</b>
<b>Inversión Total (1+2+3)</b>	<b>14.452</b>	<b>9.583</b>	<b>12.855</b>	<b>14.355</b>	<b>17.249</b>	<b>17.259</b>	<b>71.301</b>	<b>26.803</b>	<b>112.556</b>	<b>100,0</b>

Tabla 1. Inversión proyectada en la minería chilena (Millones de dólares). Fuente Cochilco, Ago-2013

En un escenario como el actual, donde se suman incertidumbres, necesariamente primará la medida en los planes de inversión. Una visión más conservadora a la hora de evaluar los proyectos de inversión hará que muchas opciones no sobrepasen las condiciones de aprobación definidas por los directorios y accionistas, medidos en términos de indicadores de análisis estándar de la industria como VAN, TIR, Payback Period, etc.

---

<sup>1</sup> Alberto Salas, Presidente de la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), Revista “Nueva Minería y Energía”, Jun-2013

Puesta en marcha según cartera 2012	Puesta en marcha según cartera 2013	Región	Proyecto	Inversión a Junio 2012 (MMUS\$)	Inversión a Julio 2013 (MMUS\$)	Diferencia 2013 - 2012 (MMUS\$)
<b>5 PROYECTOS QUE ENTRARON EN OPERACIÓN</b>				<b>1.744</b>	<b>---</b>	<b>-1.744</b>
2012	2012	Antofagasta	ESCONDIDA RELOCALIZACIÓN CHANCADORES	554	---	-554
2012	2012	Antofagasta	LOMAS BAYAS II EXTENSIÓN	293	---	-293
2012	2012	Atacama	MINA CARMEN	70	---	-70
2013	2012	Antofagasta	AMPLIACIÓN PRODUCCIÓN KCL	527	---	-527
2013	2013	Tarapacá	COLLAHUASI EXPANSIÓN FASE II (*)	300	---	-300
<b>1 PROYECTO DESISTIDO</b>				<b>963</b>	<b>---</b>	<b>-963</b>
2015	---	Atacama	SAN ANTONIO ÓXIDOS	963	---	-963
<b>9 PROYECTOS NUEVOS QUE SE INCORPORAN A LA CARTERA 2013</b>				<b>---</b>	<b>3.603</b>	<b>3.603</b>
---	2014	Atacama	OSO NEGRO	---	90	90
---	2014	Coquimbo	ROMERAL FASE V	---	196	196
---	2015	Atacama	LA COIRA FASE 7	---	200	200
---	2015	Antofagasta	ACTUALIZACIÓN ESPERANZA	---	550	550
---	2015	O'Higgins	VALLE CENTRAL EXPANSIÓN	---	152	152
---	2016	Antofagasta	ENCUENTRO ÓXIDOS	---	600	600
---	2017	Atacama	CERRO MARICUNGA	---	515	515
---	2018	Antofagasta	TOVAKU	---	600	600
---	2018	Atacama	PRODUCTORA	---	700	700
<b>10 PROYECTOS SIN MODIFICACIONES</b>				<b>20.212</b>	<b>20.212</b>	<b>0</b>
2013	2013	Atacama	CASERONES	3.000	3.000	0
2014	2014	Antofagasta	PLANTA NITRATO POTASIO (NPT4) COYA SUR	250	250	0
2014	2014	Antofagasta	ESCONDIDA NUEVA PELA LIXIVIACIÓN ÓXIDOS	721	721	0
2014	2014	Tarapacá	PAMPA HERMOSA	1.033	1.033	0
2015	2015	Antofagasta	SIERRA GORDA	3.900	3.900	0
2015	2015	Antofagasta	AMPLIAC. PAMPA BLANCA	665	665	0
2015	2015	Atacama	BELLAVISTA	143	143	0
2017	2017	Antofagasta	LOMAS BAYAS III SULFUROS	1.600	1.600	0
2018	2018	Antofagasta	EL ABRA MILL PROJECT	5.000	5.000	0
2018	2018	Atacama	EL MORRO	3.900	3.900	0
<b>7 PROYECTOS QUE SOLO CAMBIAN DE VALOR</b>				<b>16.701</b>	<b>19.796</b>	<b>3.094</b>
2013	2013	Antofagasta	MINA MINISTRO HALES	2.513	3.435	922
2015	2015	Antofagasta	ESCONDIDA OGP I	3.800	3.838	38
2015	2015	Atacama	DIEGO DE ALMAGRO (**)	227	597	370
2017	2017	Antofagasta	ESPERANZA SUR (Ex TELÉGRAFO)	2.700	3.500	800
2017	2017	O'Higgins	NUÉVU NIVEL MINA	3.095	3.505	410
2018	2018	Valparaíso	TRASPASO MINA-PLANTA	1.066	1.420	354
2020	2020	Antofagasta	ENCUENTRO SULFUROS (Ex GARACULES)	3.300	3.500	200
<b>8 PROYECTOS QUE SOLO SUFREN RETRASO EN EL PLAZO</b>				<b>30.690</b>	<b>30.690</b>	<b>0</b>
2013	2015	Atacama	NUEVA ESPERANZA - ARQUEROS	300	300	0
2014	2017	Atacama	INCA DE ORO	600	600	0
2015	2017	Atacama	LOBO - MARTE	800	800	0
2016	2019	Tarapacá	QUEBRADA BLANCA HEPÓGENO	5.590	5.590	0
2018	2019	Tarapacá	COLLAHUASI EXPANSIÓN FASE III	6.500	6.500	0
2018	2019	Atacama	RELINCHO	3.900	3.900	0
2018	2020	Atacama	CERRO CASALE	6.000	6.000	0
2019	2021	Coquimbo	AMPLIACIÓN LOS PELAMBRES II	7.000	7.000	0
<b>13 PROYECTOS QUE SE REDEFINEN CAMBIANDO VALOR Y PLAZOS</b>				<b>28.403</b>	<b>32.329</b>	<b>3.926</b>
2013	2014	Atacama	CERRO NEGRO NORTE	798	880	82
2013	2014	Atacama	LOS COLORADOS EXPANSIÓN	364	413	49
2014	2015	Atacama	JERÓNIMO	300	423	123
2014	2015	Antofagasta	ANTUCOYA	1.700	1.900	200
2013	2016	Atacama	PASCUA	3.000	4.250	1.250
2015	2016	Atacama	CERRO BLANCO	191	380	189
2016	2017	Atacama	VOLCÁN	750	800	50
2016	2017	Atacama	CASPICHE	4.800	4.600	-200
2016	2017	Coquimbo	EL ESPINO	600	624	24
2016	2017	Atacama	SANTO DOMINGO	1.242	1.800	558
2016	2018	Antofagasta	SULFUROS RT FASE II	4.482	5.430	948
2019	2018	Antofagasta	CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA	3.735	4.080	345
2019	2021	Valparaíso	NUEVA ANDINA FASE II	6.441	6.749	308
<b>OTRAS INVERSIONES DE CODELCO</b>				<b>5.587</b>	<b>5.927</b>	<b>340</b>
2012 - 2016	2013 - 2017	Varias	OTROS PROYECTOS DE DESARROLLO	3.877	4.370	493
2012 - 2016	2013 - 2017	Varias	PROYECTOS DE INFORMACIÓN	1.710	1.557	-153
<b>TOTAL CARTERA DE INVERSIONES MINERAS MMUS\$</b>				<b>104.300</b>	<b>112.556</b>	<b>8.256</b>

(\*) Puesta en marcha 1er trimestre de 2013

(\*\*) Diego de Almagro es ahora un solo proyecto, refundiéndose el proyecto de Códodos ExEw y el de Concentrados

Tabla 2. Cambios en cartera de proyectos 2013 respecto de 2012. Fuente: Cochilco, Ago-13

Ante mayor incertidumbre y restricciones se hace especialmente necesario contar con herramientas de análisis que logren capturar de la mejor forma posible el aporte de valor de los proyectos, considerando sus características propias y la flexibilidad con que cuenta cada compañía para enfrentar las incertidumbres. La evaluación de proyectos mineros de cobre enfrenta hoy en día un escenario complejo, debido no sólo a la incertidumbre de corto plazo, sino que en mayor medida a la que rodea las perspectivas de largo plazo<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Erik Heimlich, "Incorporación de Riesgo a la Evaluación de Proyectos Mineros", Cochilco Nov-2009



## Evaluación Tradicional de Proyectos y la Incertidumbre

En general las compañías mineras utilizan herramientas estándar para la evaluación de sus proyectos. La medida de valor económico de un proyecto más frecuentemente usada es el Valor Actual Neto (VAN), que considera todos los gastos de inversión y los flujos operacionales de caja, en tanto el procedimiento más habitual de estimación de dicho valor es el cálculo de los Flujos de Caja Descontados (FCD), en el que los flujos de caja se estiman en base a valores medios esperados, ajustados por el momento en que ocurren en el tiempo y su nivel de riesgo. El valor de un proyecto equivale a los flujos de caja esperados en el futuro, descontados por una medida del valor de tiempo del dinero y del riesgo del proyecto, que generalmente son la tasa de interés libre de riesgo, y el costo de capital promedio ponderado (CCPP), respectivamente. Esta metodología funciona bien cuando las incertidumbres asociadas al proyecto se encuentran acotadas y las proyecciones futuras de precio se mantienen dentro de un rango que resulte en beneficios sustanciales para el proyecto

Es común que, en la evaluación de proyectos mineros, el principal factor de riesgo sea el precio de largo plazo. Los valores estimados de largo plazo se ajustan dinámicamente, generalmente influenciados por ciclos macroeconómicos y no necesariamente responden un consenso entre los actores del mercado. Los montos de inversión para un proyecto son determinados y precisados en la medida que se avanza en los estudios de ingeniería, por otro lado, los costos de operación en su mayor parte son proyectados en base a parámetros operacionales determinados, sin embargo, la estimación del precio de largo plazo sufrir variaciones bruscas en 5 o 10 años.

La incertidumbre en la estimación del parámetro de precio de largo plazo es transmitida directamente al VPN del proyecto. También agregan incertidumbre las características geológicas, geotécnicas, metalúrgicas, etc., propias de cada proyecto. Las estimaciones de precio de largo plazo en sí, dependen de características dinámicas del precio. Más allá de las alternativas estocásticas en la modelación del precio empleadas en un escenario determinado, las compañías ajustan sus proyecciones de acuerdo a una base metodológica (no única) y muchas veces, a los acuerdos o restricciones que impongan sus accionistas.



Figura 1. Precio de cobre efectivo versus Largo Plazo

## Pronósticos del precio de largo plazo

c/lb, moneda 2014

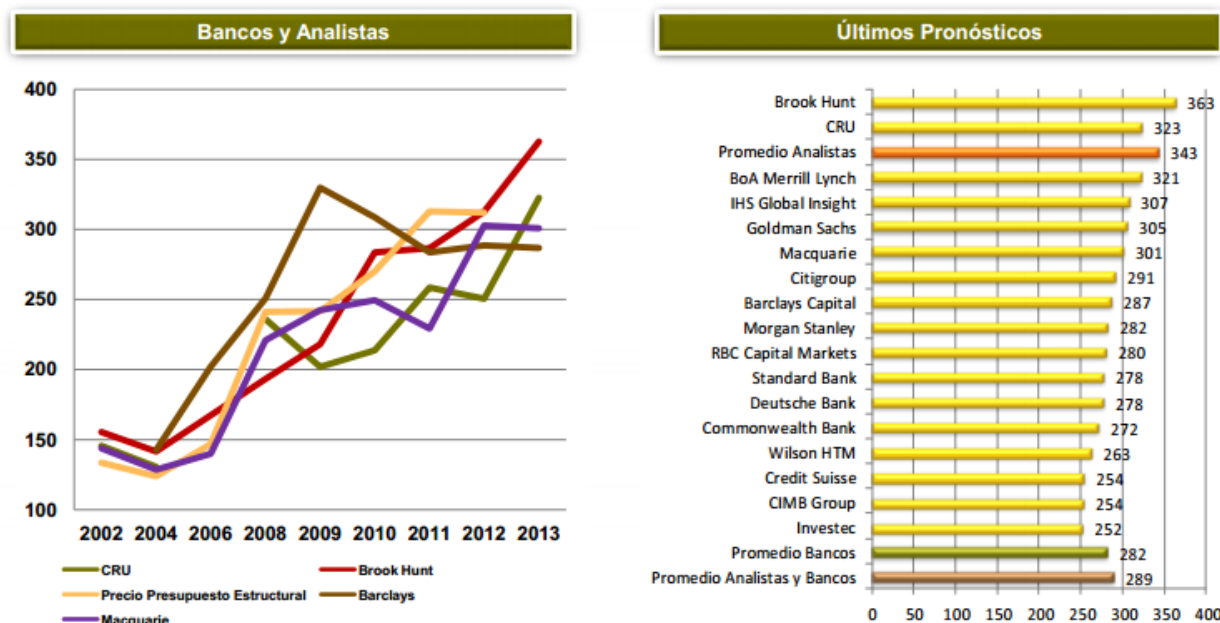


Figura 2. Evolución de precios de largo de largo plazo y proyecciones 2013. Codelco, CRU Copper Conference 2013

Por su parte, la tasa de descuento empleada en la evaluación también es componente central. A través de ella se incorporan preferencias temporales y preferencias a nivel de mercado ante el riesgo (no a nivel individual). Usualmente se emplea el costo de capital promedio ponderado que dependerá del riesgo sistemático al que esté expuesta la compañía. Esto supone implícitamente que el proyecto evaluado es un proyecto “promedio”, en el sentido de que sus características de riesgo son similares a las del conjunto de la compañía. Es también común, en escenarios de mayor incertidumbre, el ajuste de la tasa de descuento. En resumen, la tasa de descuento apropiada para un proyecto minero es difícil de determinar y no permite discriminar entre proyectos con perfiles de riesgo diferentes dentro de una misma compañía.

Según J.I. Guzmán (GEM Consultores), “Hoy en día la mayoría de las empresas mineras evalúan sus decisiones de inversión referidas a proyectos como si éstas fuesen realizadas en un ambiente de certidumbre, reemplazando la incertidumbre de los parámetros principales de la evaluación por pronósticos de los mismos”

### Evaluación por Opciones Reales

Cada proyecto minero tiene su propio escenario de desarrollo, nivel de inversión específico, costos operacionales y vida útil. Adicional a lo anterior, si se consideran flexibilidades como: postergación de la inversión, ajustes en los planes mineros, ampliaciones, el cierre temporal de la operación minera, su reapertura o su abandono definitivo, la estimación del VPN se vuelve más compleja.

Para abordar estas limitaciones de los métodos tradicionales de evaluación de proyectos se han desarrollado metodologías como la Evaluación de Opciones Reales

aplicadas a proyectos mineros (adaptada desde la teoría financiera). Esta metodología busca abordar la flexibilidad y riesgo específico de cada componente de los flujos de caja de proyecto. Permite determinar el valor de un proyecto en función de los factores de riesgo involucrados, apropiadamente ajustados por riesgo según parámetros de mercado. La definición de las características dinámicas y estocásticas del valor del proyecto permite valorar “opciones reales”, esto es, las alternativas que permite la flexibilidad inherente a un proyecto, de la misma manera en que se valoran opciones de tipo financiero. En este tipo de evaluación se considera tanto las flexibilidades propias del proyecto como las habilidades de la administración de la compañía para tomar decisiones en la medida que las incertidumbres se reducen (adaptabilidad de la estrategia). No sólo la oportunidad de inversión misma es importante por sí sola, sino también la capacidad de los administradores para explotar las oportunidades de forma eficiente <sup>3</sup>

Esta metodología ha permitido abordar de mejor manera las opciones de postergación de inversiones, cierres temporales y abandonos que en escenarios de incertidumbre cobran especial relevancia. Además, como ya ha sido mencionado, provee una herramienta alternativa para evaluaciones y valoraciones de proyectos “marginales” o inviábiles según los métodos tradicionales de evaluación que pueden aportar valor real a las compañías.

Sin embargo, las ventajas de la Evaluación por Opciones reales se han visto en cierta forma ensombrecidas a la hora de masificar su uso en la industria debido a la mayor dificultad conceptual y la complejidad de implementación de modelos prácticos y fáciles de comunicar. Es por esto que, aunque se registra su uso en proyectos como Oyu Tolgoi y desarrollos en compañías como Codelco y BHP Billiton, su uso todavía no es masivo a nivel de la industria.

### **“Greenfield” vs “Brownfield”**

Por otro lado, en el caso de la industria minera, la Evaluación por Opciones Reales ha encontrado mayor desarrollo en aplicaciones en proyectos tipo “Greenfield”, encontrándose una gran cantidad de ensayos, ejemplos y cursos cuyo foco es la aplicación de Opciones Reales desde el desarrollo de un plan maximizando el valor en base a las flexibilidades e incertidumbres desde una etapa temprana de estudio.

En el marco de las incertidumbres actuales de corto y largo plazo, las compañías mineras a nivel nacional han privilegiado una estrategia de optimización operacional y crecimiento vía proyectos de tipo “Brownfield”. Según actores relevantes de la industria

---

<sup>3</sup> “Caracterización y Análisis de Modelos de Evaluación Económica de Proyectos de Inversión bajo Incertidumbre”, Feliciano García y Edgardo Romero Mar-2009

nacional, es en las operaciones actuales donde se centra la atención para oportunidades de crecimiento<sup>4</sup>.

El presente trabajo de tesis se avocará a estudiar la aplicación de una Evaluación por Opciones Reales en un proyecto de tipo Brownfield en una compañía minera con operaciones en la primera región. El objetivo es estudiar una metodología que se adapte a las particularidades de un proyecto de aumento de capacidad o tipo “Stay in Business”, ofreciendo un enfoque práctico y fácil de comunicar y que establezca los beneficios de la Evaluación de Opciones Reales como una herramienta complementaria a los procedimientos estándar de evaluación de proyectos.

---

<sup>4</sup>“Los proyectos brownfield requieren menos inversión y una intensidad de capital menor, y en un periodo como el actual es ahí donde hay que orientarse. Nosotros tenemos en cartera ya tres proyectos de este tipo que son rentables”, Diego Hernandez , Revista Pulso, 10-Sep-2013

## **2. OBJETIVO.**

### **2.1.OBJETIVO GENERAL**

Seleccionar una metodología práctica de aplicación de Evaluación por Opciones Reales y realizar un análisis de la viabilidad y beneficios de su aplicación para la evaluación de proyectos de inversión en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi en el marco de sus oportunidades de inversión.

Se buscará determinar la viabilidad de esta herramienta complementaria para capturar de mejor forma el valor de los proyectos de tipo “Brownfield” y/o “Stay in business”

### **2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la disposición de la Compañía de desarrollar herramientas complementarias para el análisis económico de los proyectos
- Maximizar el uso de información y avances en aplicaciones reales disponibles en la industria en este trabajo de tesis
- En base al desarrollo teórico vigente en la materia de Opciones Reales, establecer una metodología de valoración que pueda diferenciar proyectos por las características únicas de los riesgos de su flujo de caja, pero que a su vez permita compararlos en resultados de análisis
- Transmitir a la organización cómo elementos importantes de la estructura del proyecto como la dirección, administración, flexibilidad y costos de operación influyen en la toma de decisiones bajo riesgo
- Ejecutar una aplicación piloto a un proyecto de la compañía, evaluando los resultados y discutiendo las oportunidades de implementar la evaluación de opciones reales como una herramienta complementaria

### **2.3.RESULTADOS ESPERADOS**

Se espera como resultado obtener un acercamiento práctico a la aplicación de valoración de opciones reales en evaluación de proyectos de la compañía minera indicada. A través de la selección de un modelo de aplicación simple y práctico, debidamente apoyado por software estándar de análisis numérico, se buscará analizar las ventajas de la aplicación de esta metodología a modo de herramienta complementaria de los actuales procedimientos de evaluación y análisis económicos de la compañía.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

#### 3.1. METODOLOGÍAS TRADICIONALES DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Una inversión es el compromiso de fondos con la expectativa de recibir suficientes retornos en un futuro determinado, no solo para repagar el capital inicial sino que además para generar un aceptable nivel de beneficio. Para los gerentes de proyectos mineros, es por lo tanto un objetivo primordial el maximizar el valor agrado a los dueños/accionistas de la compañía

El objetivo de la evaluación de proyectos no sólo busca evaluar un proyecto por su propio mérito, sino también comparar cómo se prioriza o no frente a otros proyectos que compiten por recursos inversión limitados. La evaluación de un proyecto es probablemente la parte más importante del proceso de selección, ya que traduce a una moneda común el valor del proyecto. Este valor queda expresado como la diferencia neta entre los ingresos y los costos del proyecto durante todo su ciclo de vida.

Las evaluaciones financieras de proyectos mineros se pueden clasificar esencialmente en tres categorías<sup>5</sup>:

- Basadas en el mercado
- Basadas en costo
- Basadas en ingresos

Las dos primeras son más frecuentemente empleadas en etapas tempranas de exploración. La tercera es usada luego de tener recursos indicados y alguna conceptualización de la forma en que serán explotados y procesados, incluyendo los costos asociados (estimación preliminar)<sup>6</sup>. El enfoque de mercado considera que el precio en el mercado de activos comparables moverá el precio del activo a un nivel de equilibrio. Se supone que el precio de mercado es el valor justo de mercado. El enfoque basado en ingresos proyecta y descuenta los flujos de caja de los activos a un valor actual. El costo de desarrollo o de adquisición se deduce generar un VPN

Varias herramientas están disponibles para el cálculo del valor del proyecto, y la calidad de la evaluación está relacionada con la validez de las herramientas y con la eficacia con que representan al menos dos factores fundamentales:

1. Flujos de caja netos (costos de inversión y costos de la fase de producción e ingresos) a través de todo el ciclo de vida del proyecto.

---

<sup>5</sup> Lawrence. MJ, 2001. Mineral Asset Valuation Issues for the Next Millenium, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne

<sup>6</sup> "Mineral Project Evaluation – An Introduction", Pietro Guj

2. Tasa de descuento utilizada para descontar los flujos de efectivo futuros para dar cuenta de su incertidumbre y del costo de oportunidad de la inversión.

El estándar de la industria minera, ampliamente aceptado, es utilizar el método Flujo de Caja Descontado (DCF por sus siglas en inglés) y aplicar la regla del VAN (o NPV por sus siglas en inglés) con el fin de determinar si procede o no con la ejecución de un proyecto específico. Los flujos de efectivo evaluados por el método DCF comprenden flujos de ingresos y de costos, operativos y de capital, cuya interacción influye en el valor del proyecto.

Más formalmente, la técnica NPV consiste en restar la inversión inicial incurrida para el proyecto, **CapInv** (que se supone incurrido en T0), del valor actualizado de todos los flujos netos de efectivo esperados, generado en toda la vida de la mina,  $t = 1, 2, \dots, T$ . Estos flujos se descuentan a razón de  $(1 + R)^t$ , donde **R** es la tasa de descuento. Esto puede ser expresado como:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{E\{CF_t\}}{(1 + R)^t} - CapInv$$

En la práctica, los flujos de efectivo esperados generados en cada período de producción de un proyecto minero pueden ser definidos, en términos muy generales como:

$$CF_t = Tonnes \times grade_t \times Recovery \times S_t - ProdCost_t$$

Donde **S(t)**, **ProdCost(t)** y **grade(t)** son los precios esperados del metal, los costos de producción y las leyes de mineral para cada periodo  $t=1, \dots, T$  respectivamente.

Como se observa en última ecuación, el método DCF se basa en una proyección de las variables de entrada y una tasa de retorno apropiada para el proyecto sobre la totalidad de su vida económica. Los flujos de efectivo derivados y descontados (incluida la inversión de capital inicial) se suman y si el importe final es positivo, la regla del VPN recomienda debe llevarse a cabo el proyecto. La regla del VPN se utiliza ampliamente en la industria minera, ya que reconoce el valor tiempo del dinero y representa el riesgo a través de una tasa de interés ajustable, **R**. Esto proporciona los dueños y accionistas una herramienta potente y simple para la toma de decisiones de inversión financiera.

Una característica importante de la técnica DCF-NPV es que una sola tasa de interés ajustada, **R**, se aplica a todos los flujos de efectivo futuros para tener en cuenta todas las fuentes de riesgo y costo de oportunidad. Esto puede incluir tanto los riesgos económicos y técnicos, como el precio de los metales, las expectativas

de retorno de los accionistas, toneladas de mineral, y las cantidades de metales, entre otros<sup>7</sup>. Normalmente, este tipo de interés ajustado, **R**, se calcula como costo de capital promedio ponderado de la compañía (WACC). Si la empresa minera tiene patrimonio y de deuda, la tasa de interés WACC, **R<sub>WACC</sub>**, se determina como el promedio ponderado costo de deuda y capital, es decir,

$$R_{WACC} = (D/V)(1-T_c)r_d + (E/V)r_e$$

Donde el valor de mercado de la empresa minera es la suma de la deuda de la empresa con intereses, **D**, y el valor de mercado del patrimonio, **E**; **T<sub>c</sub>** es la tasa de descuento corporativa, **r<sub>d</sub>** es el rendimiento antes de impuestos sobre la deuda de la empresa, y **r<sub>e</sub>** es el retorno esperado de la compañía sobre el capital que determine el modelo Capital Asset Pricing Model (CAPM). En este caso, se define como **r<sub>e</sub>** como:

$$r_e = r_f + r_{premium}$$

Donde **r<sub>f</sub>** es la tasa libre de riesgo, y **r<sub>premium</sub> = (r<sub>m</sub> - r<sub>f</sub>) β** es la prima de riesgo compuesto por el rendimiento esperado del portafolio de mercado **r<sub>m</sub>**, y **β**, es una medida de la volatilidad de las acciones de la compañía en comparación con la totalidad del mercado. Si la empresa no mantiene ninguna deuda con intereses, ya que se supone normalmente en la mayoría de las evaluaciones de los proyectos mineros, entonces **D = 0** en la ecuación previa. En estas condiciones, la tasa de interés ajustada por riesgo, **R**, es igual al rendimiento esperado de la compañía sobre el patrimonio, es decir, **R = r<sub>f</sub> + r<sub>premium</sub>**.

La tendencia de la industria es descontar los ingresos y los costos a la misma tasa de descuento ajustada por riesgo de mercado, lo que a priori implica un error dada la distinta naturaleza de riesgo de costos y de ingresos. Más aún, el riesgo de distintos tipos de proyectos al interior de una misma compañía minera no debiese ser resumido en una única tasa de descuento. Esto puede dar lugar a una percepción errónea del riesgo cuando se aplican a proyectos que son significativamente diferentes de la empresa en su conjunto. Este puede ser el caso de muchos proyectos de minería, como la incertidumbre geológica asociada con cada depósito mineral difiere entre las minas (es decir, la distribución de grado de metal y otras propiedades geológicas, geotécnicas y geometalúrgicas son diferentes).

Como es sabido, hay muchos factores que pueden influir en el valor de un proyecto minero, como técnicos (leyes, geometalurgia, recuperaciones, etc), geopolítico, jurídico, financiación, precio de las materias primas y elementos de

---

<sup>7</sup> Luis Martinez, Joseph McKibben, "Understanding Real Options y Mine Project Valuation: A Simple Perspective"



mercado. Por otra parte, el nivel de riesgo del proyecto evoluciona con el tiempo, dependiendo de cómo se desarrollan las incertidumbres y como la gestión del proyecto reacciona y responde ante estas incertidumbres. Sin embargo, en un sentido práctico, la tarea de estimación de una tasa dinámica ajustado al riesgo de retorno también es muy difícil de lograr. Un mismo activo minero puede, adicionalmente, permitir diferentes escenarios de desarrollo, con diferentes niveles de inversión, costos operacionales, producción y vida útil. En este caso, el uso de una única tasa de descuento, o un ajuste cualitativo a la tasa de descuento para incorporar las características propias de cada diseño y su entorno de manera estática, no es suficiente.

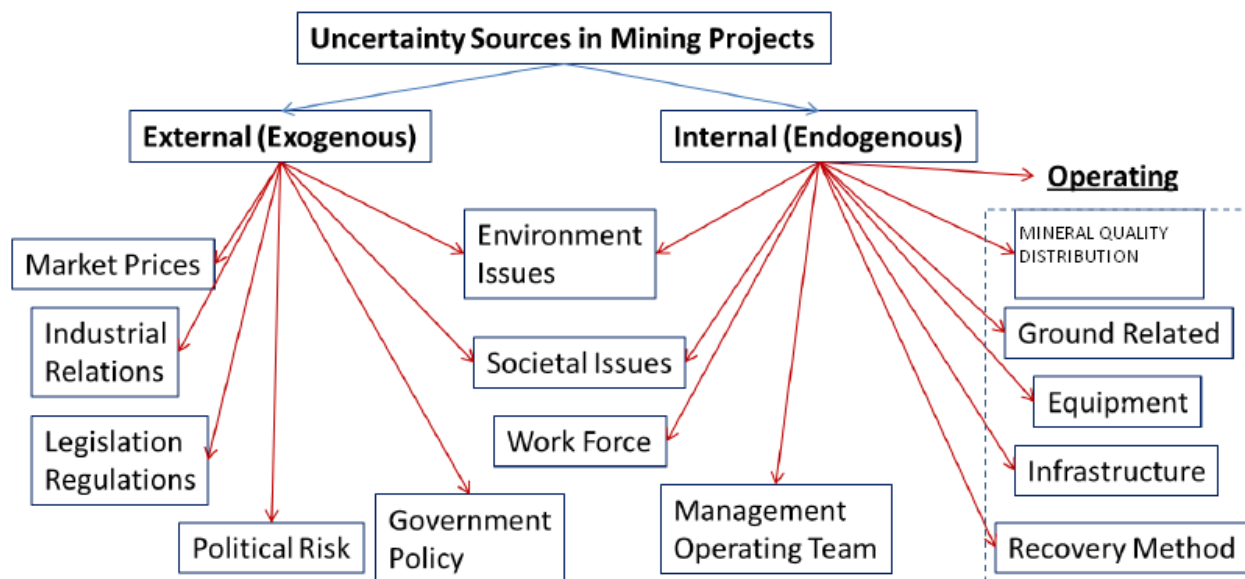


Figura 3. Fuentes de Incertidumbre en proyectos mineros (L. Martinez – 2013)

El análisis tradicional de DCF tiene la ventaja de ser explicado fácilmente explicado, es relativamente simple, ampliamente conocido y ampliamente aceptada. Utiliza criterios de decisión claros y consistentes para todos los proyectos y que produce los mismos resultados independientemente de las preferencias de riesgo de los inversores. Se tiene en cuenta el valor temporal del dinero y la estructura de riesgos. La desventaja es que el DCF sólo tiene en cuenta los resultados más representativos, y la flexibilidad que la gestión tiene es ignorada en el análisis.

Ciertamente, para los proyectos de recursos con VPN sanos y los flujos de caja estables, el análisis DCF seguirá siendo dominante en el proceso de decisión de inversión de la industria minera. Sin embargo, la validez de este enfoque es cuestionable donde hay un alto grado de incertidumbre de los flujos de efectivo futuros y donde la administración tiene la flexibilidad para responder a estas incertidumbres.

Dado lo anterior, surge la necesidad de una evaluación acabada de las oportunidades y riesgos de un proyecto, y la consideración de alternativas operacionales tomadas por la administración en un desarrollo dinámico que puedan otorgar flexibilidad en un ambiente cambiante. La posibilidad de postergar decisiones de negocios importantes para el desarrollo de un proyecto, generando alternativas de diferentes cursos de acción, en la medida en que el paso del tiempo reduce la incertidumbre con la llegada de nueva información, adquiere mayor valor en un escenario de incertidumbre. Sin embargo, la técnica de evaluación tradicional no se adecúa a este objetivo pues, por definición, la flexibilidad cambia la naturaleza del riesgo de un proyecto<sup>8</sup>.

Si el proyecto evaluado, incorpora flexibilidades, entre las cuales las más citadas para el caso de la minería son la postergación de la inversión, incrementos de capacidad de tratamiento, ajustes en los planes mineros, el cierre temporal de la operación minera, su reapertura o su abandono definitivo, la estimación del VPN se vuelve más compleja. Las flexibilidades pueden entenderse como la posibilidad de optar entre diferentes flujos de caja esperados, y por lo tanto, alteraciones en el perfil de riesgo del proyecto.

La flexibilidad en un proyecto minero es especialmente relevante, en el sentido de que puede agregar valor frente a un proyecto considerado como inflexible, cuando la rentabilidad del proyecto es menos pronunciada, vale decir, cuando el VPN correctamente estimado es levemente superior o inferior a cero

En el largo plazo, donde se presentan las oportunidades estratégicas, un enfoque más adecuado deberá incorporar nuevos análisis avanzados, incluyendo entre estos: Opciones Reales, Simulaciones Monte Carlo y Optimización de Portafolio<sup>9</sup>.

### **3.2. EVALUACIÓN POR OPCIONES REALES**

Una alternativa para la evaluación de proyectos mineros que permite lidiar con los problemas señalados (diferente perfil de riesgo de los diferentes proyectos y de los diferentes diseños para un mismo proyecto; consideración de la flexibilidad inherente al proyecto; descuento apropiado al riesgo de los diferentes componentes de los flujos de caja) es la técnica de Evaluación por Opciones Reales.

La Evaluación de Opciones Reales, una adaptación de la teoría financiera a la evaluación de proyectos de inversión, permite lidiar, al menos en teoría, con varios de los problemas que se enfrentan: un ajuste apropiado al riesgo de cada componente de los flujos de caja de un proyecto, y ante la flexibilidad operacional.

---

<sup>8</sup> Erik Heimlich , “Incorporación de Riesgo a la Evaluación de Proyectos Mineros”, Nov-2009, Cochilco

<sup>9</sup> Johnathan Mun, “Real Options: Tools and Techniques for Valuating Strategic Investments and Decisions”, 2006

Una diferencia importante entre las opciones financieras y reales es que el dueño de una opción financiera no puede influir en el valor de la variable subyacente (que es el precio de la participación), mientras que el valor de la opción real puede ser elevado por la dirección a lo largo de mejores decisiones y flexibilidad. Las opciones reales tienen en cuenta la incertidumbre sobre la evolución futura del activo subyacente, junto con la capacidad de gestión para reaccionar a los factores que pueden influir negativamente en el valor.

Las opciones de tipo financiero se pueden clasificar de la siguiente forma:

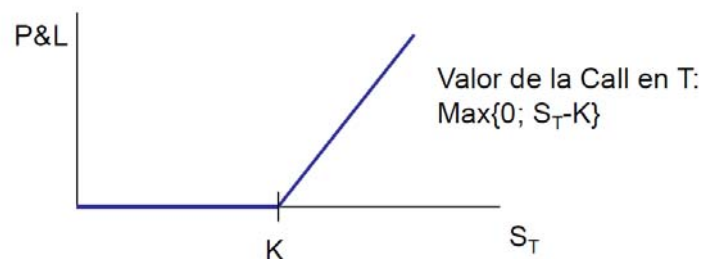
- Tipo “Call”: derecho pero no la obligación de comprar un activo a un precio determinado
- Tipo “Put”: derecho pero no la obligación de vender un activo a un precio determinado.
- Opción Europea: Se ejerce en la fecha de vencimiento solamente
- Opción Americana: Se ejerce en cualquier fecha antes de la expiración

Estas opciones financieras pueden ejecutarse sobre acciones, monedas, índices, futuros, tasas de interés, bonos u otros instrumentos financieros. Si consideramos **K** como el valor de la opción (precio de ejercicio o “strike price”) y **S<sub>T</sub>** como el valor del activo subyacente en el tiempo T de una opción de tipo europea, entonces los flujos quedan como se muestra a continuación:

Opcion “Call” Europea

– Si **S<sub>T</sub> > K** Compro en **K** algo que vale **S<sub>T</sub>**, gano **S<sub>T</sub> - K**

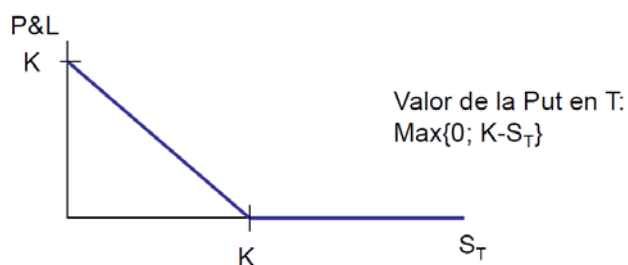
– Si **S<sub>T</sub> ≤ K** No ejerzo la opción Flujo: 0



Opcion “Put” Europea

– Si **S<sub>T</sub> < K** Vendo en **K** algo que vale **S<sub>T</sub>**, gano **K - S<sub>T</sub>**

– Si **S<sub>T</sub> ≥ K** No ejerzo la opción Flujo: 0



Una opción real es el derecho que una empresa tiene, pero sin la obligación, para llevar a cabo ciertas decisiones de negocio, tales como el aplazamiento, el abandono, la ampliación, puesta en escena o de contraer una inversión a un costo predeterminado llamado precio de ejercicio, por un período de tiempo predeterminado llamado la vida de la opción<sup>10</sup>. Las decisiones de negocio involucradas en una Opción Real pueden corresponder a realizar una inversión de capital (desarrollar un proyecto) o la posibilidad de modificar en el futuro un aspecto de la operación del proyecto (expansión, contracción, abandono, entre otras).

El análisis de Opciones Reales se basa en la metodología tradicional de flujos de caja descontados pero incluye el valor agregado del activo proceso de toma de decisiones a lo largo de la vida de un proyecto. Apunta principalmente a considerar las flexibilidades inherentes en un proyecto al momento de su evaluación, y determinar el valor que agrega a un proyecto la consideración de esta flexibilidad. Este enfoque de evaluación considera múltiples caminos de decisión que surgen debido a la incertidumbre y la capacidad de gestión en la elección de las estrategias óptimas una vez se obtiene nueva información.

En lugar de tratar el riesgo como algo que debe evitarse, el enfoque de opciones reales anima a los directivos para ver la volatilidad como una fuente potencial de valor, con profundas implicaciones para el diseño de proyectos y la estrategia corporativa<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Tom Copeland, "Real Options, A Practitioner's Guide", 2005

<sup>11</sup> Alex Triantis, "Real Options: state of practice", 2005

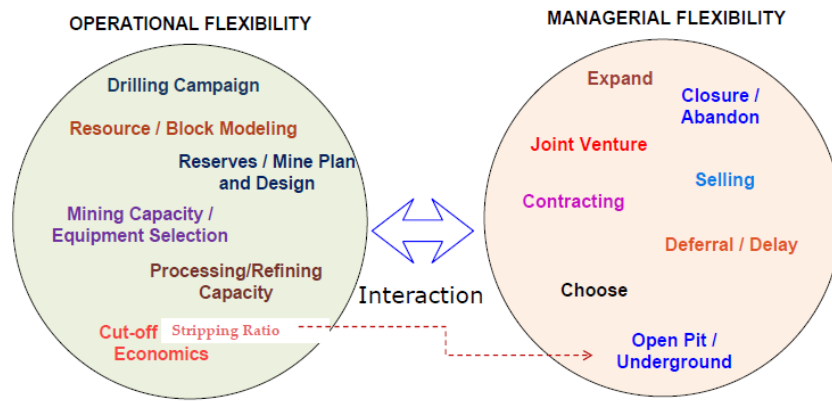


Figura 4. Flexibilidad Operacionales y de administración (L. Martinez – 2013)

En otras palabras, si el proyecto admite algún grado de flexibilidad, el valor total del proyecto será el VPN sin flexibilidad más el valor de las opciones consideradas:

$$V_{proyecto} = VPN + V_{flexibilidad}$$

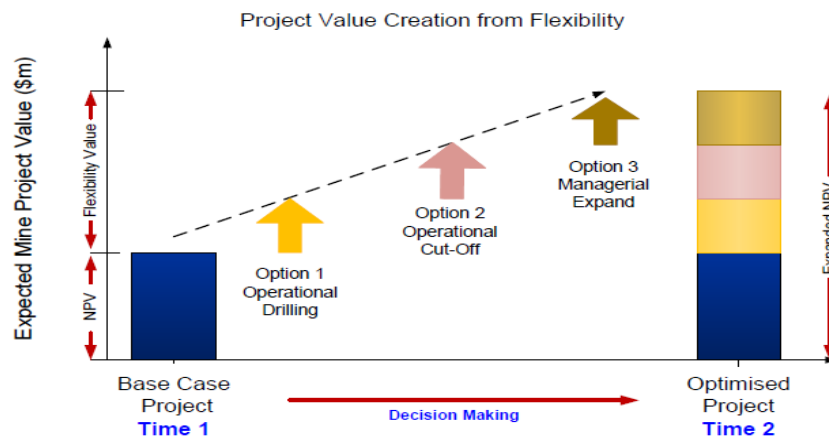


Figura 5. Creación de valor a través de las flexibilidades de un proyecto (L. Martinez- 2013)

Como el valor de la flexibilidad es siempre positivo (es un derecho pero no una obligación y por lo tanto su valor no puede ser menor que cero), el VPN sin flexibilidad tiende a subestimar el valor del proyecto, cuando esta flexibilidad es importante, esto es, cuando la probabilidad de que se ejerza la opción de negocios es significativa. Un proyecto de alta rentabilidad es poco probable que cierre temporalmente, y por lo tanto el valor de la opción de cerrar no contribuye a aumentar el VPN del proyecto, pero en caso inverso, el valor de la flexibilidad puede ser importante.

En general los proyectos de inversión minera susceptibles de ser estudiados con opciones reales presentan características similares. Requieren grandes cantidades de capital inicial, mientras que los ingresos se suelen demorar por

un largo período y están sujetos a incertidumbre. En caso de fracaso, los proyectos suelen tener altos costos hundidos. También existe una alta incertidumbre en la cantidad de la producción potencial, especialmente en la industria de los recursos naturales. Los proyectos suelen tener etapas en las que la inversión puede extenderse bien definido y existen numerosas alternativas técnicas en las distintas etapas del proyecto.

El análisis de Opciones Reales intenta resolver el mismo problema económico que el cálculo de los DCF, esto es, la maximización del valor económico de mercado, pero con un procedimiento diferente. Para tal efecto, se vale de un modelo de valoración de los flujos de caja que reconoce el impacto que tienen las decisiones de negocios en su riesgo, y en principio, ajusta esta valoración a mercado. En términos generales puede decirse el ajuste por riesgo se realiza directamente a los componentes del flujo de caja y la tasa de descuento es la tasa libre de riesgo

A pesar de las diferencias, la técnica de los DCF puede verse como un caso particular y simplificado del análisis de Opciones Reales

$$VP_0 = \sum_{t=0}^T \frac{E[FC_t]}{(1+E[TD])^t}$$

Vale decir, los flujos de caja esperados para cada periodo son descontados al presente por medio de una tasa de descuento “esperada” constante, de acuerdo a un modelo de valorización de activos como el CAPM. Esto se puede reescribir en forma recursiva como:

$$VP_t = E[FC_t] + \frac{VP_{t+1}}{1+E[TD]} \quad \forall t = T - 1, \dots, 0$$

En el caso de las opciones reales la ecuación anterior se generaliza del siguiente modo:

$$VP_t(X_t, m, t) = FC_t(X_t, m, t) + \frac{E^*[VP_{t+1}(X_{t+1}, m, t+1)]}{e^{rf\Delta t}}$$

Donde **rf** es la tasa libre de riesgo; el valor y los flujos de caja dependen del precio del cobre y otros factores de riesgo representados por **Xt**, el modo de operación **m**, que define la flexibilidad del proyecto para cambiar de un estado a otro, y el tiempo; y **E\*[VP]** corresponde a la esperanza del valor del proyecto en el próximo periodo, ajustada por riesgo, de acuerdo a los factores de riesgo que inciden en los flujos de caja y que componen **Xt**. En cada momento del tiempo se puede alterar el modo de operación a un costo determinado, cambiando o alternando los flujos de caja futuros, buscando maximizar el valor.

Un aspecto de la valorización de un proyecto en su sentido más general, que no se aprecia directamente en la ecuación anterior, es que al escoger entre modos de operación, la elección debe ser óptima con respecto a la posibilidad de futuros cambios en el modo de operación, y no sólo comparando los retornos de cada

opción en un punto del tiempo. Esto implica que cualquier estimación basada en la intuición de la última ecuación se resolverá retrocediendo en el tiempo desde un nodo terminal.

En cuanto al ajuste por riesgo de los factores de riesgo subyacentes (principalmente el precio del cobre), este está basado en argumentos de ausencia de oportunidades de arbitraje.

Al comparar las últimas dos ecuaciones puede observarse que el caso de los DCF la estimación de la tasa de descuento es en cierto modo independiente del problema en cuestión, y en particular de la proyección de los flujos de caja. Adicionalmente, la penúltima ecuación implica la mantención del mismo modo de operación a lo largo de la vida útil del proyecto. En cambio, en el AOR el ajuste por riesgo es específico al proyecto, afectando directamente los flujos de caja, y se considera la posibilidad de cambiar el estado operacional  $m$  en el desarrollo del proyecto

### **3.3. TIPOS DE OPCIONES**

Las opciones se pueden agrupar en dos categorías básicas: Opciones simples y Opciones de compuestas.

Las Opciones simples son las siguientes:

#### **3.3.1. Opción de Diferir:**

La oportunidad de esperar hasta reducir la incertidumbre de mercado o de tipo técnico (Opción tipo "Call" americana). Esta es una de las opciones más conocidas y usadas por la dirección de proyectos. Esta flexibilidad de "esperar y ver" es importante en la evaluación de proyectos de inversión en condiciones de incertidumbre. Al retrasar una decisión de inversión, la nueva información se puede revelar que pueda afectar a la conveniencia de la inversión a lo largo del camino. Su precio de ejercicio es la cantidad de dinero invertido en retrasar el inicio del proyecto. Se utiliza con frecuencia por las empresas de exploración de recursos naturales en los que una empresa puede retrasar el desarrollo de un proyecto hasta que las condiciones del mercado se vuelvan favorables o se disponga de mayor información con respecto a los recursos disponibles. Un proyecto debe diferirse siempre que el valor de la opción supere el VPN.

Vale la pena mencionar que, desde un punto de vista estratégico, no siempre es conveniente retrasar una inversión, ya que la dirección puede perder la oportunidad de una competitiva ventaja del primer. Un compromiso de inversión inicial puede tener ventajas estratégicas que deben sopesarse contra el

componente de valor flexibilidad perdida. Estos beneficios estratégicos pueden ser capturados combinando la teoría de juegos con la valoración opción<sup>12</sup>

### **3.3.2. Opción de Cerrar y Abandonar:**

Da a compañías la posibilidad de cesar proyectos no rentables (Opción tipo “Put” americana). Opciones de abandono se ejercen cuando el valor presente de los flujos de efectivo restantes queda por debajo del valor de residual de activos y este acto es efectivamente el ejercicio de una opción “Put”. Al ejercer la opción de cierre se renuncia a la opción de esperar por mejores condiciones. Se considera el cierre o abandono como una inversión cuyo retorno es la reducción de pérdidas futuras.

### **3.3.3. Opción de Expandir:**

Aumentar la capacidad productiva en función de las condiciones del mercado, operacionales y/o técnicas incorporando nuevas inversiones (Opción tipo “Call” americana). Una empresa tiene la opción de expandir cuando el proyecto se construye de una manera tal que pueda acomodar los repentinos aumentos de la demanda o ajustes al alza en planes de producción. La inversión tiene esta opción cuando se crea capacidad en exceso de la demanda esperada para que pueda producir más adelante a un ritmo mayor si es necesario. Mientras que el exceso de capacidad tendrá un costo mayor inicial, el proyecto con la opción de ampliar vale más que el proyecto sin esta posibilidad. La administración tiene el derecho, pero no la obligación de ampliar si las condiciones resultan ser favorables.

### **3.3.4. Opción de Contraer:**

Disminuir la capacidad productiva en función de las condiciones del mercado, operacionales y/o técnicas. Los proyectos de inversión pueden construirse de manera que son objeto de contracción en el futuro mediante la venta de una parte de ellos a un precio fijo. Renunciando a los costos futuros mediante la contratación de un proyecto es análogo a ejercer una opción de “Put” americana. Dado que esta opción tiene valor, un proyecto con una opción de contraer es mayor que un proyecto sin la posibilidad de contracción.

### **3.3.5. Opción de Crecer:**

Mantener opciones de crecimientos futuros (Opción tipo “Call” americana)

---

<sup>12</sup> “Strategic Investment: Real Options and Games”, Han T. J. Smit & Lenos Trigeorgis



### 3.3.6. Opciones de barrera:

Opción de tipo "Call" / "Put" americana dependiendo del un determinado precio de barrera o umbral del activo subyacente

Las Opciones compuestas son las siguientes

### 3.3.7. Opción de separar en Fases:

Opción de separar la inversión en fases (secuenciales o paralelas) en cada una de las cuales se puede abandonar, diferir o continuar con el desarrollo. Cada fase se convierte a su vez en una opción que depende del ejercicio de la opción inmediatamente anterior. También se conoce como Opción aprendizaje.

### 3.3.8. Opciones tipo Arcoíris:

Opción de analizar más de una incertidumbre de impacto significativo en el valor del activo subyacente (requiere uso de análisis cuadrinomiales)

**Otras:** Volatilidad variable, "Switching Options", Opciones de salida, Opciones compuestas complejas, etc<sup>13</sup>

## 3.4. VARIABLES EN OPCIONES REALES

La aplicación de evaluaciones por Opciones Reales involucran al menos las siguientes variables:

- El valor del activo subyacente, es decir, el valor del proyecto (valor presente de los flujos de caja esperados del proyecto de inversión. El activo subyacente en las opciones financieras es el precio de spot, en comparación con otras variables de negocio para opciones reales, tales como el valor presente de los flujos estimados de efectivo libre, la demanda del mercado y los precios de los commodities. Es fundamental distinguir a qué variable subyacente se debe la medida de volatilidad.
- El precio de ejercicio, es decir, el valor de inversión para la opción tipo "Call" o el valor residual o venta en opciones tipo "Put"
- Tiempo de expiración de la Opción (T), en este caso, el tiempo de espera mientras la opción es válida

---

<sup>13</sup> Un completo detalle e ilustraciones se puede encontrar en "Project Valuation Using Real Options: A Practitioners Guide", Prasad Kodukula, 2006.

- La volatilidad del activo subyacente. Mide la incertidumbre sobre los valores futuros del flujo de caja de un proyecto. El valor de la opción aumenta a mayor volatilidad (el valor de la opción "Call" depende del exceso del precio del activo sobre el precio de ejercicio y la probabilidad de dicho evento crece al aumentar la volatilidad del activo subyacente).
- La tasa de interés libre de riesgo. Usualmente se usa la tasa spot de retorno del tesoro de Estados Unidos.
- Los flujos de caja durante la vida de la opción

OPCION FINANCIERA	OPCION REAL
Precio de la acción	Valor esperado de los flujos
Precio de ejercicio	Coste de la inversión
Interés sin riesgo	Tasa de descuento con riesgo
Volatilidad	Volatilidad de los flujos esperados
Tiempo hasta el ejercicio	Tiempo hasta el ejercicio
Dividendos	Mantenimiento de la opción
Su valor <i>no</i> depende de la revalorización esperada del subyacente	Su valor <i>depende</i> de la revalorización esperada del subyacente
El ejercicio de la opción es instantáneo	El ejercicio de la opción <i>no</i> sucede en un instante

Tabla 3. Parámetros de valor en una opción financiera vs opción real

### 3.5. RIESGO Y ESTIMACIÓN DE LA VOLATILIDAD

El concepto de riesgo y el de incertidumbre se encuentran estrechamente relacionados pero no representa lo mismo para un proyecto. La incertidumbre involucra variables que son indeterminadas y cambiantes, pero que se revelan y son resueltas durante la vida del proyecto. La Real Academia de la Lengua Española define el riesgo como la Contingencia o proximidad de un daño. En sentido estricto, el riesgo implica solamente la posibilidad de sufrir daño o pérdida. En el contexto del proyecto, la identificación del riesgo también se refiere a las oportunidades (resultados positivos) así como las amenazas (resultados negativos).

Según Michael Samis (2010) un proyecto minero está expuesto a numerosas fuentes de incertidumbres: como económicas y financieras (que involucran precios de los metales y las tasas), de tipo técnico o físico (que están relacionados con los leyes de mineral, las reservas o las recuperaciones), o las incertidumbres políticas (tales como: la cancelación de las licencias mineras debido a la presión social).

En finanzas, riesgos se pueden clasificar como "riesgo de mercado" y "riesgos privados".

- Riesgos de Mercado: Los riesgos pueden ser capturados en el valor de un activo transable. En el caso de un proyecto minero, estos riesgos se reflejan en la actividad de la compañía en el mercado. También se reflejan en el precio de los commodities transados en el mercado.
- Riesgos privados: todos los riesgos no reflejados en el mercado, por ejemplo, riesgos geológicos (leyes, toneladas, etc), geotécnicos, metalúrgicos, políticos, medioambientales, comunidades, entre otros.

En la evaluación de proyectos es importante reconocer la diferencia entre riesgo de mercado y riesgo privado. Los modelos de evaluación por Opciones Reales están basados en la premisa que el riesgo del activo subyacente es capturado por un activo transable (commodities en el caso de proyectos mineros).

En cuanto a los riesgos definidos como privados, estos también deben ser incorporados en la evaluación de proyectos mineros. Estos pueden integrarse mediante análisis de flujo de caja dinámicos una vez que estos son caracterizados como distribuciones de probabilidades. Por ejemplo, en la industria minera los ingresos se calculan por las cantidades de metal producido por el precio de venta del commodity (riesgo de mercado), mientras que el costo está determinado por la cantidad de mineral extraído y procesado. Ambos (ingreso y costo) están relacionados directamente a través de la ley de mineral (entre otros, como dureza, granulometría, recuperaciones, disponibilidad de planta, etc). El tamaño y la ley de la reserva se estiman a partir de un número limitado de muestras obtenidas durante la exploración, del total del depósito de mineral. Por lo tanto existe un grado de incertidumbre en esta estimación (incertidumbre como resultado del riesgo privado).

Como se ha mencionado previamente en este documento, es fundamental establecer cuál es la variable subyacente con mayor incidencia en la incertidumbre de los retornos futuros que afectan los flujos de caja de un proyecto<sup>14</sup>.

Algunos enfoques buscan determinar la volatilidad de los flujos como conjunto, otras se basan en la experiencia de los evaluadores. A continuación se enumera una lista de aproximaciones a la estimación de la volatilidad

- Método de flujo del logaritmo de los retornos: usado para estimar la volatilidad de activos líquidos y transable, como acciones o bien como activos (commodities, energía, etc).

---

<sup>14</sup> Al respecto, en el curso “Dirección de Finanzas” dictado en la 2da versión del MBA Industria Minera por el profesor J. Miguel Cruz se estableció que en un proyecto minero de cobre, la variable precio es la que genera mayor volatilidad en el VPN, pero la que a su vez otorga mayor flexibilidad al proyecto, dado que las compañías no están obligadas a mantener operaciones en escenarios de precios bajos que generen flujos negativos (Opción de Cierre)

- Método de logaritmo de valor presente de los retornos: usado cuando se calcula la volatilidad de los activos con flujo de caja. Puede usarse en flujos negativos y proporciona un análisis riguroso
- Estimaciones de la administración: usado en opciones financieras y opciones reales, basado en la experiencia, sin respaldo de análisis objetivos.
- “Market Proxy”: usado para comparar activos líquidos y no líquidos en base a información disponible en el mercado, usado precios de acciones de compañías que transan en bolsa con perfiles de riesgo comparables al proyecto analizado.

### 3.6. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE OPCIONES REALES

Existen diferencias significativas al evaluar una opción real, dependiendo de si esta es de tipo europea o americana. La primera tiene un tiempo de madurez finito y establecido, al final del cual la opción puede ser ejercida (no antes ni después). La evaluación de este tipo de opciones es relativamente sencilla y se basa en simulaciones con variables de estado. En cambio, las opciones de tipo americano requieren una metodología más compleja que debe garantizar el ejercicio de la opción cuando se maximice su valor.

El trabajo de diversos investigadores se ha sucedido a lo largo de los años para los distintos tipos de opciones, resultando en metodologías de diversa complejidad.

**Black & Scholes (1973):** desarrollo de soluciones analíticas para la evaluación de opciones europeas.

**Geske & Johnson (1984):** aproximación polinomial para evaluar una opción americana de venta

**Barone-Adesi & Whaley (1987):** proponen una aproximación cuadrática.

**Cox (1979):** introdujo los árboles binomiales, han permitido un enfoque simple e intuitivo para la resolución de opciones europeas y americanas

**Trigeorgis (1991):** extiende el método binomial realizando una transformación logarítmica,

**Boyle (1988):** extiende la metodología binomial para evaluar opciones con dos variables de estado.

**Brennan & Schwartz (1977):** introducen la metodología de diferencias finitas implícitas y explícitas para evaluar opciones europeas y americanas considera la discretización directa de la ecuación diferencial parcial que satisface el valor de la

opción. Las condiciones de borde definidas en cada etapa de la resolución determinan si la opción es europea o americana.

En árboles binomiales como el método de diferencias finitas la complejidad de resolución aumenta exponencialmente con el número de dimensiones del problema. Debido a lo anterior, las investigaciones han derivado a métodos como la simulación Monte Carlo, introducida por Boyle (1977), para evitar el explosivo crecimiento del tamaño del problema.

La simulación de Monte Carlo presenta variadas ventajas con respecto a los algoritmos tradicionales de valorización. Una de sus ventajas corresponde a la posibilidad de valorizar adecuadamente opciones europeas, independiente del número de variables de estado del problema. Para la valorización de opciones americanas es necesario estimar una estrategia óptima de ejercicio, la que se obtiene de manera recursiva desde el instante final al inicial. Sin embargo, la simulación de Monte Carlo avanza hacia adelante, por lo que inicialmente no se consideró para la evaluación de opciones americanas.<sup>15</sup>

A continuación se describen las principales metodologías desarrolladas y en uso a la fecha:

### **3.6.1. Ecuaciones Diferenciales Parciales**

Este método consiste en la solución de una ecuación de derivadas parciales con condiciones de borde específicas (como el tipo de opción, los valores de opción en puntos conocidos y extremos, etc) que describen el cambio en el valor de la opción con respecto a cambios medibles de ciertas variables en el. Los modelos financieros como el de Black-Scholes se pueden utilizar para calcular el valor de las opciones reales utilizando ecuaciones que pueden resolverse mediante una serie de supuestos de entrada. Son fáciles de aplicar y exactas pero tienden a utilizar el cálculo técnico matemático y ofrecen flexibilidad limitada en la modelación. Además, son exactos para las opciones europeas, pero sólo ofrecen una aproximación para opciones americanas<sup>16</sup>. Tales aproximaciones son computacionalmente complejas y difíciles de explicar. El método de las diferencias finitas es uno de los métodos más usado pero la desventaja de este método es la complejidad computacional y su incapacidad para lidiar con múltiples fuentes de incertidumbre relacionadas al valor del activo subyacente.

El valor de la opción “call” europea puede ser calculado utilizando el modelo generalizado Black-Scholes el cual se consideran los pagos de dividendos:

---

<sup>15</sup> Feliciano García – Rodrigo Romero, “Caracterización y Análisis de Modelos de Evaluación Económica de Proyectos de Inversión Bajo Incertidumbre”, Marzo-2009

<sup>16</sup> Johnathan Mun, “Real Options: Tools and Techniques for Valuating Strategic Investments and Decisions”, 2006

## Ecuación de Black-Scholes

$$C = N(d_1)S_0 - N(d_2)X \exp(-rT)$$

Donde:

**C** = Valor de la Opción Call

**So** = Valor Actual del activo Subyacente

**X** = Costo de Inversión o "Strike Price"

**r** = Tasa de Descuento Libre de Riesgo

**T** = Tiempo de Expiración

**d1** =  $[\ln(S_0/X) + (r + 0.5\sigma^2)T] / \sigma\sqrt{T}$

**d2** =  $d1 - \sigma\sqrt{T}$

**$\sigma$**  = Volatilidad Anual de los Flujos de Caja Futuros del Activo Subyacente.

**N (d1) y N (d2)** = Valores de la distribución normal estándar de d1 y d2.

La hipótesis principal es que la estructura de precios del activo subyacente sigue un Movimiento Geométrico Browniano con parámetros de "drift" y volatilidad estáticas y que este movimiento sigue un proceso estocástico Markov-Weiner.

$$\frac{\partial S}{S} = \mu(\delta t) + \sigma\varepsilon\sqrt{\delta t}$$

Con:

$\mu$  = drift que se incrementa con  $\delta t$

$\sigma$  = volatilidad creciente a una tasa de la raíz cuadrada de  $\delta t$

$\varepsilon$  = variable simulada con distribución normal de media 0 y varianza 1

Los supuestos de esta metodología son difíciles de satisfacer en opciones reales (ausencia de arbitraje en activos no líquidos, ausencias de costos de transacción, etc) sin embargo sus resultados se consideran aproximaciones razonables.

Las dificultades de este modelo surgen del hecho de que utiliza una ecuación de cálculo estocástico que es difícil de explicar en la dirección de una compañía y es difícil de deducir de manera de adaptarse a múltiples fuentes de incertidumbre relacionadas con el valor del activo subyacente. Otra limitación es que las opciones reales son por lo general de estilo americano que se puede ejercer en cualquier momento en el tiempo, mientras que el modelo de forma cerrada descrita anteriormente sólo tiene en cuenta una fecha de ejercicio (opción tipo europea). Además esta metodología permite sólo un precio de ejercicio en el modelo, mientras que esto puede cambiar en una opción real durante toda su vida

útil. Según Copeland, (2004), el uso del modelo Black-Scholes para la evaluación de opciones reales compuestas puede resultar "equivocada e inadecuada"<sup>17</sup>

### 3.6.2. Simulaciones

El método de simulación para resolver problemas de opciones reales emplea el método de Monte Carlo en el análisis de flujo de caja descontado. Para tal efecto, se simulan múltiples trayectorias que el valor del activo subyacente puede tomar durante la vida de la opción, dados los límites del cono de incertidumbre definido por la volatilidad del valor del activo.

En el tiempo 0, la simulación se inicia a partir del valor del activo subyacente ( $S_0$ ). El siguiente paso se calcula como el uso de la siguiente ecuación con una función de variable aleatoria:

$$S_t = S_{t-1} + S_{t-1}(r\delta t + \sigma\varepsilon\sqrt{\delta t})$$

Con  $S_t$  y  $S_{t-1}$  como los valores del activo subyacente en los tiempos  $t$  y  $t-1$ . Además,  $\sigma$  representa la volatilidad del activo y  $\varepsilon$  es una variable aleatoria con distribución normal de media 0 y varianza 1.

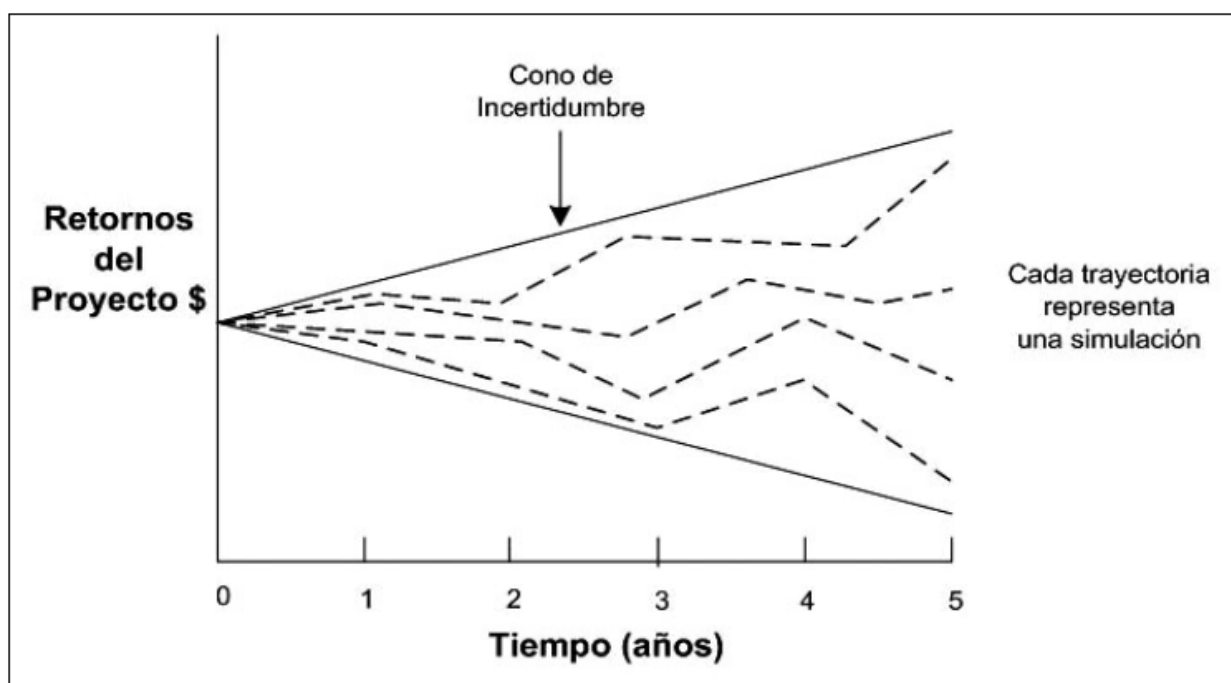


Figura 6. Representación esquemática de la metodología de simulaciones. Cono de Incertidumbre (Feliciano García – Rodrigo Romero, 2009)

<sup>17</sup> Ivan Matei-Dragos, "Real Option Valuation Method - Case of Oyu Tolgoi Copper and Gold Mine"

La regla de decisión consiste en comparar el valor resultante con el precio de ejercicio. Opciones europeas se pueden calcular fácilmente usando simulaciones, mientras que el cálculo de opciones americanas puede ser una tarea de enormes proporciones, ya que pueden ser ejercidas en cualquier fecha, por lo que las simulaciones tienen que llevarse a cabo para ajustar la vida de la opción para todos los días de ejercicio posible. Esto hace que sea muy complejo aplicar la simulación sobre opciones secuenciales, porque cada decisión posible lleva a una nueva trayectoria, y la simulación deberá ser ajustada para cada nueva trayectoria.

En comparación con los otros métodos, las simulaciones pueden trabajar con problemas de múltiples dimensiones.<sup>18</sup>

### **3.6.3. Árboles Binomiales**

La evolución de valores posibles del activo subyacente durante la vida de la opción se representa en una estructura de árbol, en el cual se representan valores discretos en cada “paso” de tiempo y cada nodo representa los posibles valores en un tiempo dado. Se obtiene una solución óptima al problema general optimizando las decisiones futuras en varios puntos de decisión, para luego volver en forma recursiva hasta los puntos de decisión actuales.

La exactitud de los resultados aumenta con un aumento en el número de pasos de tiempo y el valor calculado se aproxima a la solución de forma cerrada. Los árboles binomiales son simples de usar y explicar, y utilizan sólo álgebra simple. También se pueden ajustar fácilmente para adaptarse a la mayoría de los tipos de opciones reales.

La solución se puede obtener ya sea por las probabilidades de riesgo neutro o portafolios de replicación de mercado. En el caso de la primera alternativa, la metodología requerirá descontar los flujos de caja a través de la maya a una tasa de riesgo neutral

El enfoque de árboles binomiales es más fácil de aplicar en la práctica, ya que utiliza sólo álgebra simple y se puede aplicar a todo tipo de opciones. Son más fáciles de entender y más fáciles de explicar lo que son los preferidos en el ejercicio de evaluación por opciones reales. Modelos binomiales se pueden personalizar para tener en cuenta la volatilidad cambiante, además este enfoque puede valorar múltiples opciones que interactúan, con diversos precios de ejercicio y distintos tiempos de ejercicio.

---

<sup>18</sup> Ivan Matei-Drăgoș, “Real Option Valuation Method - Case of Oyu Tolgoi Copper and Gold Mine”



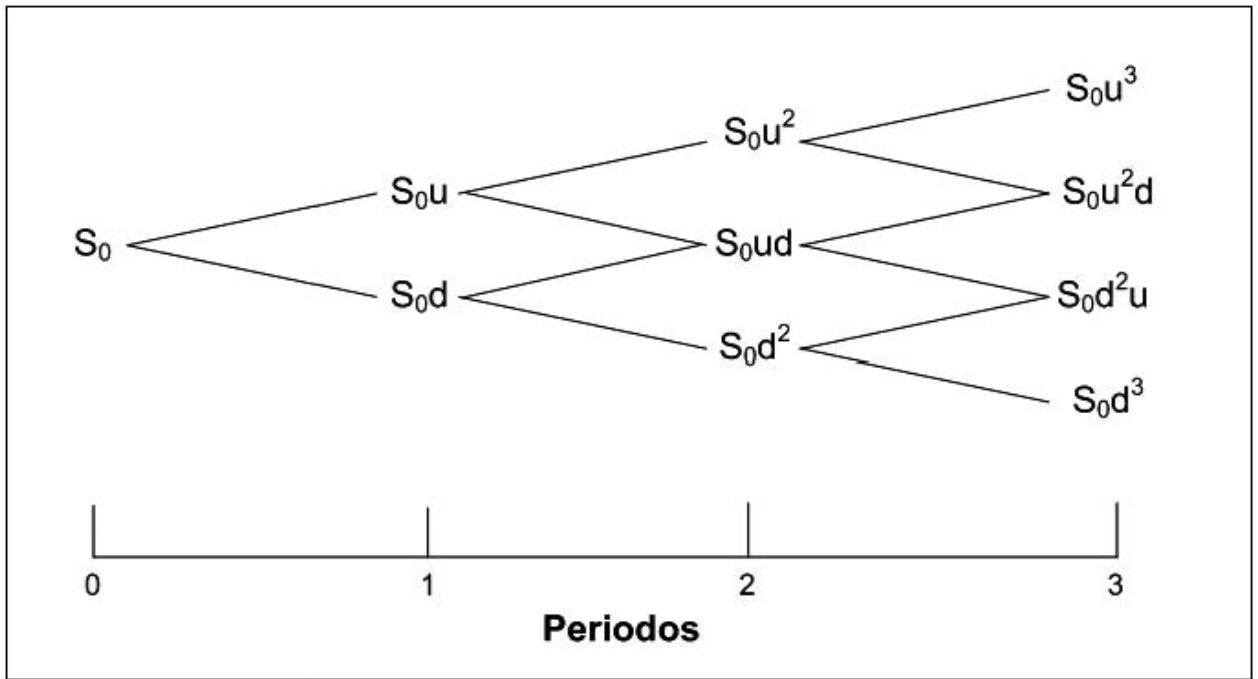


Figura 7. Representación esquemática de la metodología Árboles Binomiales (Feliciano García – Rodrigo Romero, 2009)

La metodología básica del enfoque de probabilidades neutrales al riesgo introduce el riesgo ajustando los flujos de caja a través de la malla con probabilidades neutrales al riesgo y descontándolos a una tasa libre de riesgo. Independiente de la opción a evaluar, la malla binomial que representa el valor del activo subyacente tiene las mismas propiedades y puede ser descrita por las ecuaciones que se presentan a continuación.

Los factores de subida y bajada,  $u$  y  $d$ , son función de la volatilidad del activo subyacente:

$$u = \exp(\sigma\sqrt{\delta t})$$

$$d = \exp(-\sigma\sqrt{\delta t})$$

Donde  $\sigma$  es la volatilidad (%) representada por la desviación estándar del logaritmo natural de los retornos de los flujos de caja subyacentes, y  $\delta t$  es el tiempo asociado con cada periodo del árbol binomial. La ecuación para  $d$  puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$d = \frac{1}{u}$$

La probabilidad neutral al riesgo,  $p$ , se define como sigue:

$$p = \frac{\exp(r\delta t) - d}{u - d}$$

Donde  $r$  es la tasa de interés libre de riesgo durante la vida de la opción. La probabilidad neutral al riesgo es sólo un intermediario matemático que nos permite descontar los flujos de caja, usando una tasa de interés libre de riesgo

Los parámetros necesarios para construir el árbol binomial y calcular el valor de la opción son:  $\sigma$ ,  $r$ ,  $S_0$ ,  $X$ ,  $T$ , y  $\delta t$ , donde  $\sigma$  es el factor de volatilidad,  $r$  la tasa libre de riesgo,  $S_0$  el valor presente del activo subyacente,  $X$  el costo de ejercer la opción,  $T$  la vida de la opción, y  $\delta t$  el tamaño de período de tiempo elegida para los cálculos<sup>19</sup>.

Un caso particular de este método es empleado para simular trayectorias de precios de commodities en un proceso de “random walk”. Al incorporar la tasa libre de riesgo, la trayectoria neta se rige por un “drift” equivalente al % de la tasa libre de riesgo.

### **3.7. APLICACIONES DE OPCIONES REALES**

#### **3.7.1. Aplicaciones de Opciones Reales en Proyectos Mineros**

La metodología de opciones reales ha sido ampliamente aceptada en la evaluación de proyectos mineros, dado que este tipo de proyectos se ven afectados por las fluctuaciones aleatorias en los precios de los recursos naturales por lo tanto tienen que ser gestionados de manera activa. Debido al aumento de la volatilidad de los precios, estas empresas tienen ganancias altamente impredecibles y flujos de en largos períodos de tiempo. Los proyectos requieren un alto nivel de inversión inicial y tienen un alto grado de riesgo con respecto a los precios de los commodities, la cantidad de recursos que pueden ser recuperados, el método de recuperación óptima y las impurezas que pueden afectar el proceso.

Según Baurens (2010), las variables más importantes que afectan el valor de proyectos mineros son los precios de los productos básicos minerales, el tamaño de la reserva, y la estrategia operacional de la mina. La estrategia de explotación de minas demuestra las opciones en la minería para abrir, aplazar, ampliar, reducir o abandonar el proyecto de diversas maneras en diferentes etapas, a partir de la nueva información. En la valoración de las compañías mineras, sus ingresos y flujos de efectivo siguen de cerca los precios de los commodities<sup>20</sup>.

En la actualidad, la evaluación de proyectos mineros usando Opciones Reales ha sido reconocida en Canadá como herramienta profesionalmente aceptable en

---

<sup>19</sup> Feliciano García – Rodrigo Romero, “Caracterización y Análisis de Modelos de Evaluación Económica de Proyectos de Inversión Bajo Incertidumbre”, Marzo-2009

<sup>20</sup> “Project Valuation Using Real Options: A Practitioners Guide”, Prasad Kodukula, 2006

el análisis de proyectos mineros en el reporte técnico NI43-10. El proyecto Oyu Tolgoi en Mongolia (Ivanhoe Mines Ltd) incorporó este tipo de análisis en la presentación del mencionado reporte<sup>21</sup>

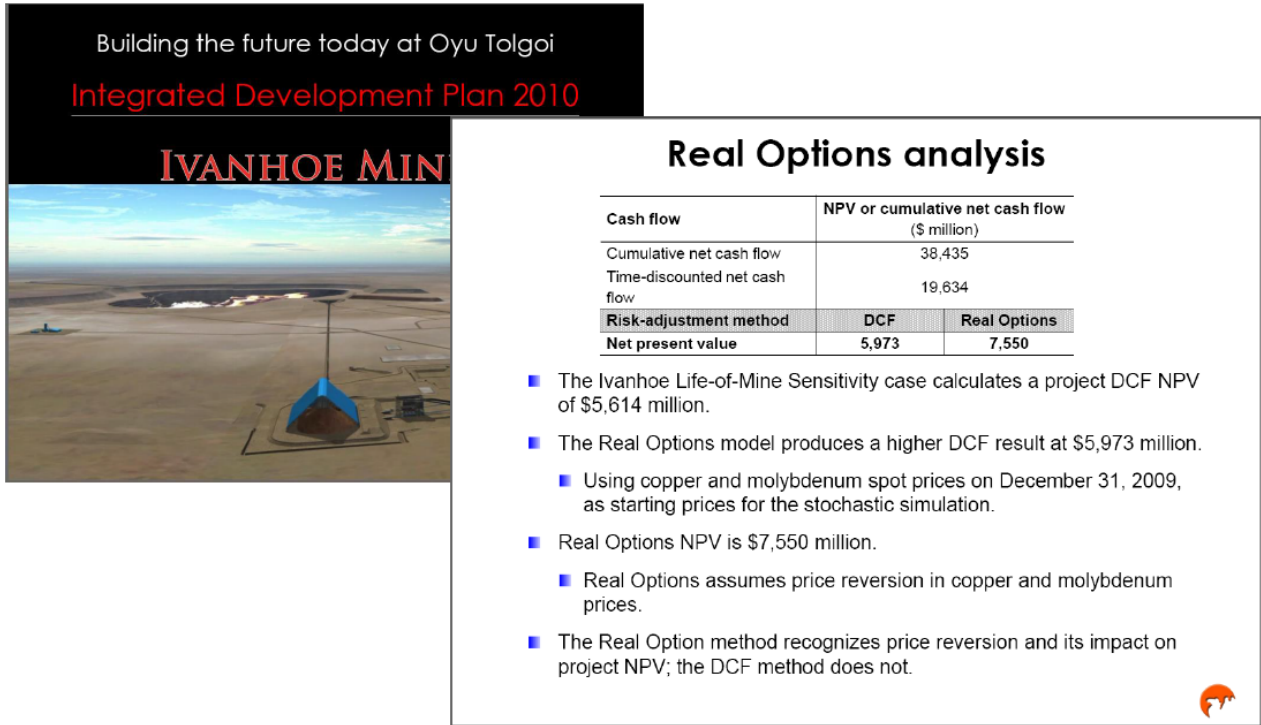


Figura 8. de Evaluación por Opciones Reales Proyecto Oyu Tolgoi

### Caso BHP Billiton.

En la conferencia de ACCC (Australian Competition & Consumer Commission) de 2007, el Vicepresidente de la división de mineral de hierro de BHP-Billiton, Peter Monkhouse atacó el uso del enfoque de valor presente neto (VPN) en la regulación económica, sugiriendo que sistemáticamente subestima rendimientos de las inversiones, hasta la mitad de su valor real, proporcionando incentivos pobres para nuevas inversiones. En su lugar propuso una alternativa, el uso de opciones reales para valorar los activos de infraestructura.

El gigante de las materias primas actualmente desarrolla evaluaciones por Opciones Reales en sus proyectos, con un grupo base de análisis ubicado en

<sup>21</sup> "Using Dynamic DCF and Real Options Method for Economic Analysis in NI43-101 Technical Reports", M. Samis, 2006

Australia y ha desplegado programas de capacitación en el uso de esta metodología en sus operaciones locales

### **Caso Codelco.**

A nivel nacional, Codelco ha desarrollado e implementado un procedimiento de evaluación por Opciones Reales, aunque no se dispone de algún registro de uso efectivo.

El procedimiento mencionado se denomina “Procedimiento de Evaluación por Opciones Reales” (SIC-P-106 - 2007) y tiene carácter de provisorio y como soporte de una marcha blanca en Evaluación por Opciones Reales en proyectos dado que no está validado ni soportado por una institucionalidad dentro de la corporación.

En este procedimiento se define la metodología que se usará en los proyectos de Codelco, como complemento a la evaluación de proyectos tradicional. El rango de aplicación, condicionada por la aprobación de la Gerencia de Evaluación de Inversiones y Control de Proyectos, es:

- Fases tempranas de proyectos de exploración
- Fases tempranas de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico.
- Proyectos Estructurales

## 4. . EVALUACIÓN POR OPCIONES REALES – APLICACIÓN PRÁCTICA

### 4.1. METODOLOGÍA SELECCIONADA

Durante el desarrollo de este trabajo se ha contado con la guía y sugerencias de reconocidos profesionales de la industria, dedicados a la evaluación de proyectos, análisis de riesgo, y desarrollo de análisis de opciones reales, con experiencia en Chile, Canadá y Australia.

En base a la información recopilada y analizada, se ha tratado de dar un enfoque sencillo y comunicable al ejercicio práctico, de manera evitar la percepción de “caja negra” que muchos profesionales y gerentes aún tienen sobre la metodología de Opciones Reales. Se ha optado por utilizar la metodología más práctica, intuitiva y sencilla de explicar a la administración, evitando en esta primera etapa el uso de modelos matemáticos complejos. De esta forma, se busca facilitar su uso más allá de este trabajo de tesis, dentro de los proyectos de la compañía patrocinante.

#### Metodología

La metodología de evaluación por Opciones Reales seleccionada para el ejercicio práctico de este trabajo es la de los **Árboles Binomiales** con flujos descontados a tasa libre de riesgo ya que son simples de usar y explicar, y utilizan un manejo matemático sencillo. También se consideró su adaptabilidad a la mayoría de los tipos de opciones reales aplicables a proyectos mineros, según lo descrito en la sección 3.3.

Como se indicó previamente, el uso de árboles binomiales es sencillo mientras se modele sólo una variable de incertidumbre. Para la modelación de incertidumbre de otros parámetros que afecten los flujos de caja queda abierta la opción de usar simulaciones tipo Montecarlo, con el apoyo de software apropiado (por ejemplo Crystal Ball).

En el uso de los Árboles Binomiales se genera una modelación tipo “random walk” para la variable de mayor incertidumbre. Esta modelación también se ajustó para eliminar el “drift” a largo plazo y buscar de acercar a modelación a un Movimiento Geométrico Browniano (MGM) con reversión a la media, tal como lo sugieren importantes expertos en la materia.

Como punto de partida se dispone de la evaluación financiera del proyecto que será modificada de acuerdo a la modelación de los flujos de caja.

#### Riesgos e Incertidumbre

En línea con lo ya expuesto en la sección 3.5, se considera que la principal variable que afecta la incertidumbre de los flujos futuros del proyecto corresponde al precio de producto principal, en este caso cobre.

La compañía minera que alberga el proyecto sobre el cual se realiza la aplicación práctica produce principalmente cobre y secundariamente molibdeno. Actualmente sus evaluaciones de proyectos consideran precios de largo plazo determinados por acuerdo con sus accionistas. Adicionalmente, se realizan análisis de sensibilidad discreta para la variable precio de largo plazo.

Para la aplicación de evaluación por Opciones Reales en la metodología seleccionada se realizó una estimación de la volatilidad de la variable precio, tomando en cuenta el registro histórico de precios mensuales. La volatilidad se calculará en base a la desviación estándar de los logaritmos de los retornos.

En esta primera aplicación no se aplicarán modelos para incertidumbres en parámetros mineros, geometalúrgicos, de recuperaciones o granulometría. Sin embargo se deja planteada la ventaja para en análisis global de los riesgos e incertidumbres del proyecto que reviste para la incorporación de éstas de manera de complementar el ejercicio de opciones reales con Flujos de Caja Descontados Dinámicos (“Dynamic DCF”)

### **Aplicación Piloto**

Se realiza una aplicación práctica a un proyecto tipo “Bronwfield” que se encuentra en etapa de ingeniería de perfil y que cuenta con un Capex, Opex y Evaluación Financiera preliminar

Una vez obtenidos los resultados, se establecen las comparaciones con la metodología convencional de análisis para explorar la conveniencia de aplicación en tipos de proyectos específicos y también la validez de los resultados y el nivel de dificultad para obtener dichos resultados. Especial énfasis tendrá la valoración de opciones de postergación y cierre del proyecto.

Se seguirá el modelo de los 6 pasos sugerido por P. Kodukula y Ch. Papudesu<sup>22</sup>

Paso 1 – Encuadrar la Aplicación:

La elaboración de una opción real es más difícil que la elaboración de una opción financiera. Se trata de describir el problema con palabras sencillas e imágenes, la identificación de la opción, e indicando con claridad la decisión contingente y la regla de decisión. Algunas aplicaciones requerirán más de una opción o decisión.

Paso 2- Identificar los parámetros de entrada.

---

<sup>22</sup> “Project Valuation Using Real Options: A Practitioner’s Guide”, P.Kodukula . Ch. Papudesu, 2006.

Los parámetros básicos de entrada para el método de árbol binomial para evaluar cualquier tipo de opción incluye el valor del activo subyacente, el precio de ejercicio, vida de la opción, el factor de la volatilidad, la tasa de interés libre de riesgo, y los incrementos de tiempo que se utilizará en el árbol binomial.

Paso 3 – Cálculo de los parámetros de la opción.

Los parámetros de opciones son intermedios a los cálculos finales de valor de la opción y se calculan a partir de las variables de entrada. Estos son los arriba (u) y hacia abajo (d) factores y la probabilidad neutral al riesgo (p) requerida para la solución binomial.

Paso 4 – Construir el árbol binomial y calcular el valor del activo subyacente en cada nodo con los factores u y d.

Paso 5 - Calcular el valor de la opción en cada nodo del árbol por inducción reversa

Comenzando en el extremo derecho del árbol binomial, la regla de decisión se aplica en cada nodo y la decisión óptima seleccionada. El valor de esta opción se identifica como el valor de los activos que refleja la decisión óptima. Avanzar hacia la izquierda del árbol, los valores de las opciones en cada nodo se calculan doblando los valores de las opciones de los nodos sucesores mediante el descuento de ellos por una tasa libre de riesgo y utilizando el factor de probabilidad neutral al riesgo.

Paso 6 – Análisis de Resultados

Después de que el valor de las opciones se ha calculado, el primer paso apropiado es comparar el valor presente neto derivado del método DCF frente al análisis de Opciones Reales y evaluar el valor añadido como resultado de la flexibilidad creada por la o las opciones.

### **Caso Proyectos Tipo Brownfield**

La principal propuesta de valor de este estudio constituye el análisis de la aplicación de evaluaciones por Opciones Reales a un tipo específico de proyectos, los proyectos “Brownfield”.

Por definición, estos proyectos son aquellos que se desarrollan en un sector de un yacimiento en operación o en un sector contiguo pero relacionado. Igualmente, se define en forma similar cuando el proyecto está asociado a un yacimiento antiguo que se encuentre cerrado<sup>23</sup>.

Actualmente es posible encontrar extensa documentación teórica y evidencias de aplicación de Opciones Reales a proyectos mineros, sin embargo su foco es los proyectos tipo Greenfield (aquellos que se desarrollan en yacimientos nuevos) y su aplicación considera desde la generación del plan minero hasta la operación.

---

<sup>23</sup> Cochilco, 2007

Para este trabajo de tesis se ha determinado evaluar el incremento de valor del proyecto comparando la situación base (LOM sin proyecto) con la evaluación con proyecto. Se aplicará la modelación de los flujos para los casos señalados y se determinará el valor del proyecto como la diferencia de ambos.



## **5. CONTEXTO DEL PROYECTO A ANALIZAR**

### **5.1. BREVE RESEÑA DE LA COMPAÑÍA**

La operación de Collahuasi está localizada en la primera región de Chile, a 230 Km. al sureste de la ciudad de Iquique, 15 Km. al oeste del Límite con Bolivia, en el altiplano chileno. El rango de elevación del lugar oscila entre los 3.859 metros sobre el nivel del mar (msnm) en el Salar de Coposa, lugar de ubicación del Campamento. El rajo Ujina se encuentra junto a las Plantas de Concentrado y Lixiviación a una altitud de 4.400 msnm y a 14 Km. al oeste se encuentra el rajo Rosario a 4.600 msnm.

El Complejo Minero CMDIC es accesible a través de un camino pavimentado, construido durante la etapa de desarrollo de las diferentes instalaciones. A 185 Km., desde la intersección del camino a la localidad de Pozo Almonte y la carretera Panamericana (Ruta 5) y a 230 Km. desde Iquique, el viaje por vehículo toma aproximadamente 3 horas. Una pista de aterrizaje pavimentada de 3.100 metros de largo construida en las cercanías del salar de Coposa, se suma a los servicios desarrollados en el área.

Después de realizar una profunda reestructuración en su gestión, la compañía minera ha podido normalizar su producción a niveles previos a los desastrosos resultados del año 2012, cuando vio mermada su producción de cobre en 38%. Es así como, según las estimaciones dadas a conocer por la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), la compañía minera ha liderado los incrementos de producción en el país durante el 2013.

### **5.2. PROYECTO SELECCIONADO PARA ANÁLISIS DE OPCIONES REALES**

Para la aplicación piloto de Evaluación con Opciones Reales se ha considerado un proyecto de tamaño medio, actualmente en etapa de Ingeniería de perfil.

#### **PROYECTO 5TO MOLINO DE BOLAS PLANTA CONCENTRADORA UJINA**

El Proyecto 5° Molino de Bolas (5MB) consiste en la instalación de un nuevo molino de bolas en la molienda secundaria de la planta concentradora Ujina. Este nuevo molino permitirá eliminar el cuello de capacidad de tratamiento en molienda secundaria y adelantar los pebbles a la molienda secundaria, con lo cual se liberará capacidad de tratamiento en la molienda primaria. Adicionalmente, la operación de este nuevo molino ayudará a mitigar la pérdida de producción que ocurrirá durante las intervenciones mayores de los molinos de bolas existentes.

Esto último genera una sinergia importante del 5° Molino con el cambio de estatores de los molinos de bolas 1012 y 1013 de la Línea 3. Es por esto que la estrategia de ejecución propone postergar el cambio de estatores hasta una vez que el 5° Molino haya entrado en operación.

Actualmente la Planta Concentradora de Ujina experimenta una limitación en su sistema de molienda debido al cuello de botella por la potencia instalada en molienda secundaria. La potencia instalada de los molinos de bolas existentes no permite a la molienda SAG desarrollar todo su potencial durante la operación, lo que finalmente se traduce en un potencial de tratamiento no aprovechado de la molienda primaria.

Para superar esta restricción del sistema de molienda, Collahuasi tiene considerado en su portafolio de proyectos la intervención de los molinos de bolas 1012 y 1013 con el fin de cambiar sus estatores y repotenciar su sistema GMD en un 10% aproximadamente. Sin embargo, esta acción no resolverá el problema por completo y es necesario tomar acciones adicionales. Con este objetivo la VP de Proyecto desarrolló un Estudio Tradeoff sobre la implementación de un 5° Molino de Bolas en molienda secundaria. Este estudio aborda el impacto del 5° Molino en la capacidad de tratamiento a un nivel de Ingeniería de Perfil y analiza los beneficios del Caso de Negocio.

Este 5° Molino de Bolas no sólo aumentará la capacidad del sistema de molienda mediante la eliminación del mencionado cuello de botella, sino que también permitirá adelantar los pebbles a molienda secundaria, liberando capacidad de tratamiento de mineral fresco en molienda primaria, y flexibilizará la molienda secundaria mediante una alimentación que le permita recibir mineral desde los tres molinos SAG existentes. Esta última característica permitirá obtener el beneficio adicional de mitigar las pérdidas de producción derivadas de las intervenciones mayores programadas para los molinos de bolas existentes - Cambio de Estatores de Molinos 1012 y 1013; Cambio de Shell de Molino 003; y Cambio de Corona de Molino 004 -.

### **Objetivos de Negocio**

El Objetivo de Negocio al que apunta este Proyecto es el aumento de capacidad de tratamiento de la molienda de la Planta Concentradora hasta los 172 ktpd promedio.

### **Objetivos del Proyecto**

Instalación de un nuevo molino de bolas que libere las restricciones de potencia en el circuito de molienda secundaria, que procese los pebbles adelantados – lo cual liberará capacidad de tratamiento en molienda primaria – y que flexibilice el manejo de mineral en molienda secundaria. Esta última característica permitirá mitigar las pérdidas de producción generadas por las detenciones, debido a mantenimiento, de los molinos de bolas existentes.

			Alternativa 1 Caso Base	5° Molino de Bolas		
				Alternativa 2A	Alternativa 2B	
Mantenimiento CMDIC	Molino Bolas 3 de Línea 1	Reemplazo de Shell	○	○	○	
	Molino Bolas 4 de Línea 2	Reemplazo de Corona	○	○	○	
Proyectos CMDIC	Molinos Bolas 1012 y 1013 de Línea 3	Reparación Fundaciones	○	○	○	
		Cambio de Estator	○	○	○	
		Repotenciamiento Sistema GMD	○	○	○	
	5° Molino de Bolas	Molienda	Obras Civiles y Edificio para albergar el 5° Molino de Bolas		○	○
			Instalación de Molino y Sistemas Eléctrico		○	○
			Sistema de Hidrociclones		○	○
	Sistema de Pebbles	Repotenciamiento de Chancador de Pebbles		○		
Nueva Planta de Chancado, Lavado y Harnero para Pebbles				○		
Obras Adicionales en Otras Áreas	Filtro y Estanque en Puerto Patache		○	○		
	Equipo Adicional en Mina		○	○		

### Alternativa 2<sup>a</sup>

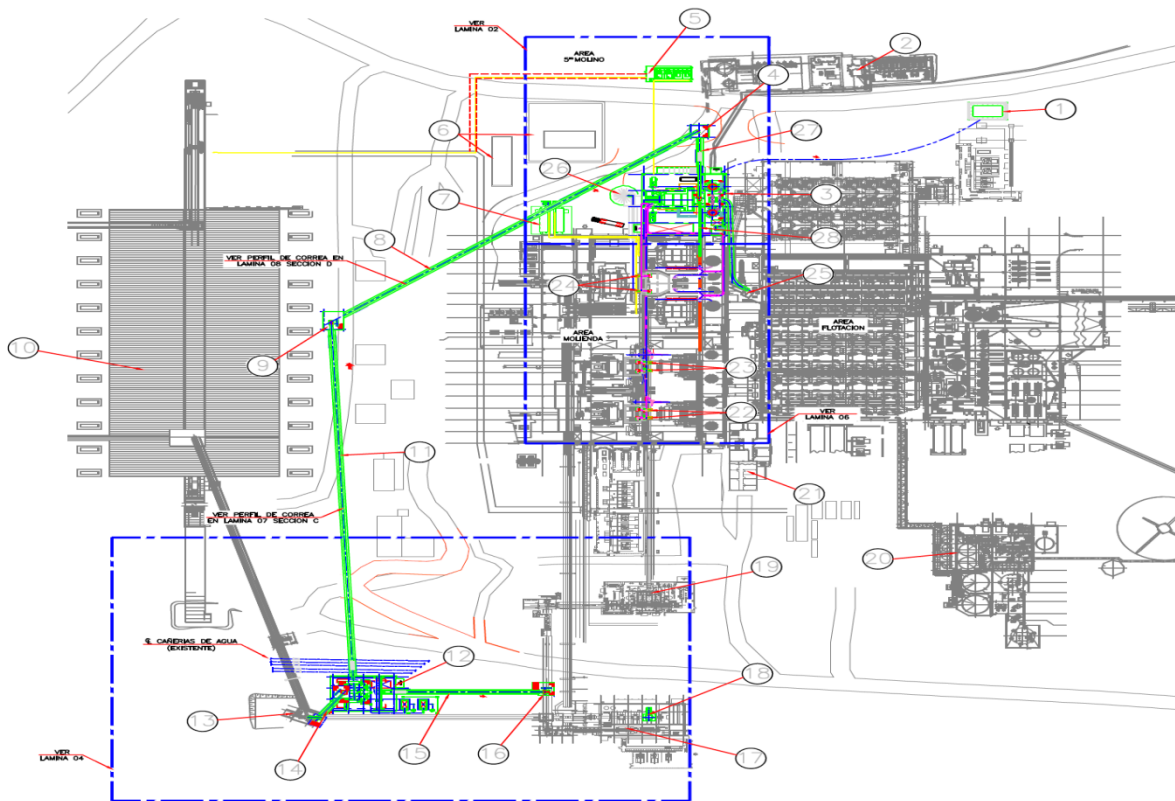


Figura 9. Layout Preliminar Proyecto – Alternativa 2A

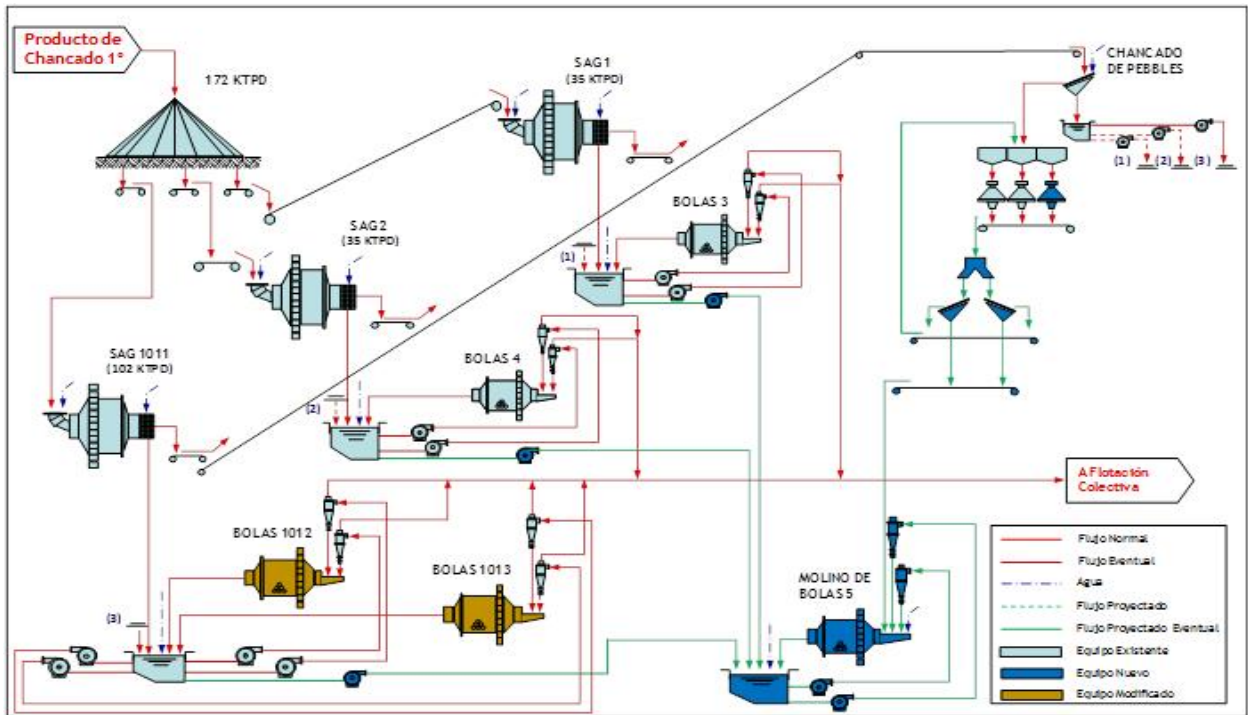


Figura 10 Diagrama General de Procesos – Alternativa 2A

### Alternativa 2B

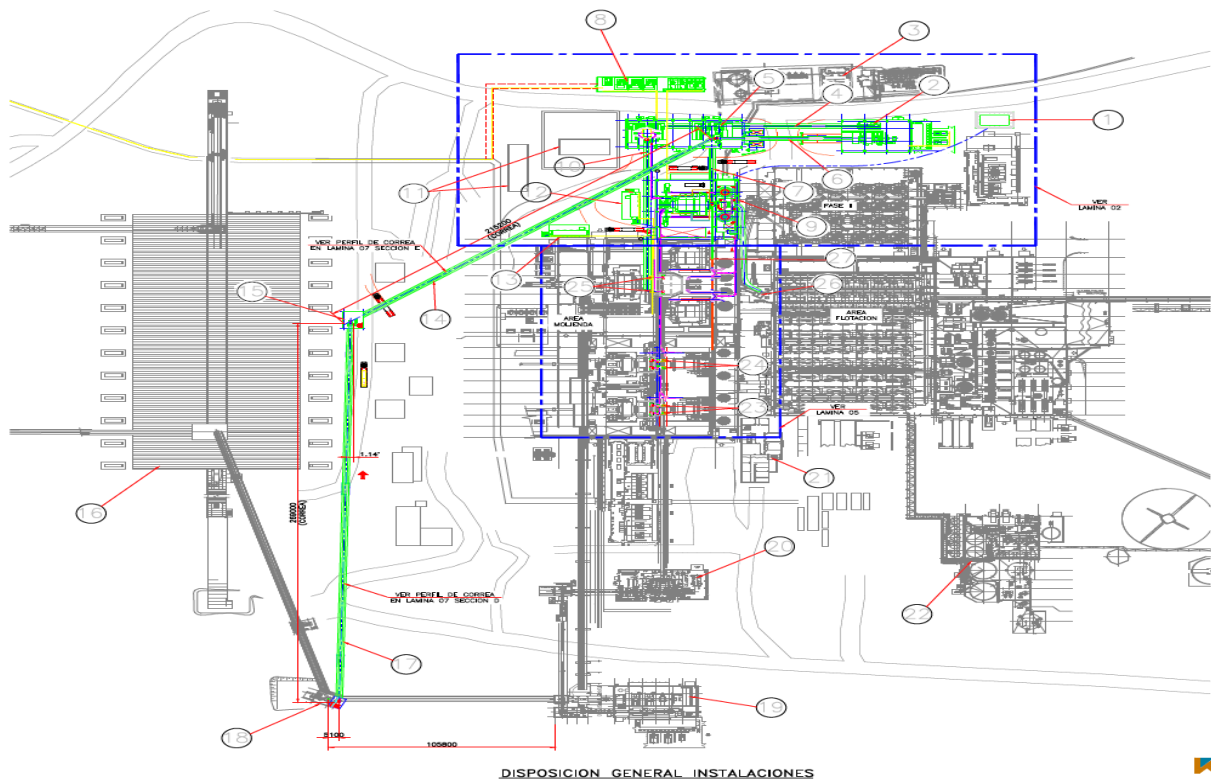


Figura 11. Layout Preliminar Proyecto – Alternativa 2B

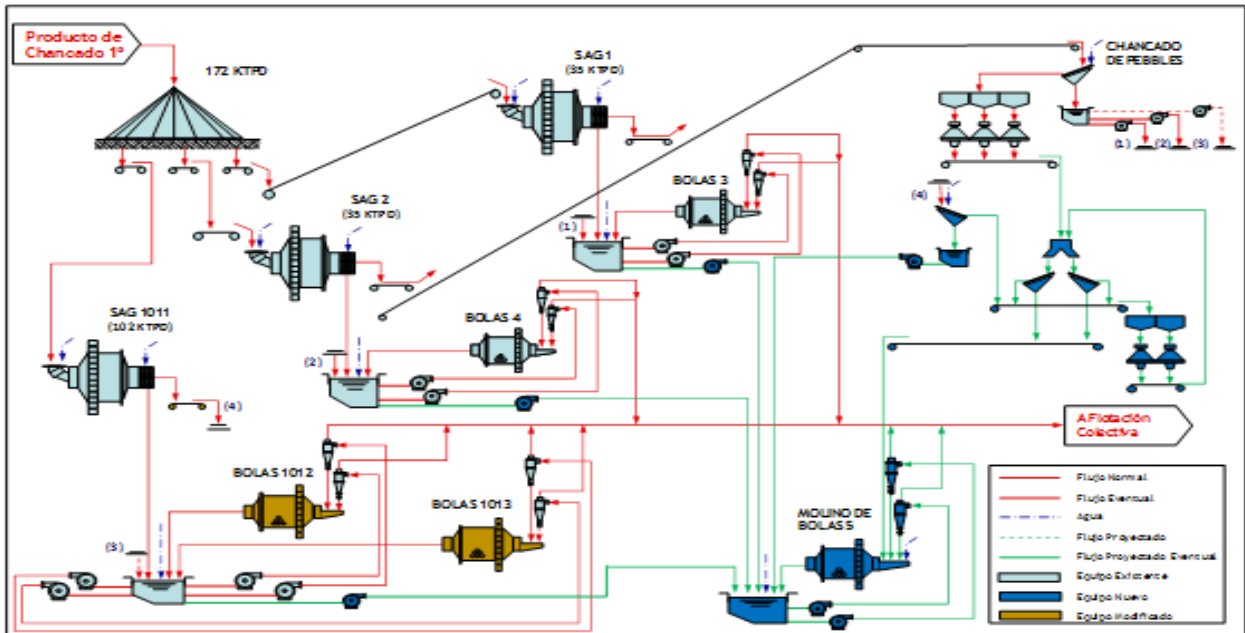


Figura 12. Diagrama General de Procesos – Alternativa 2B

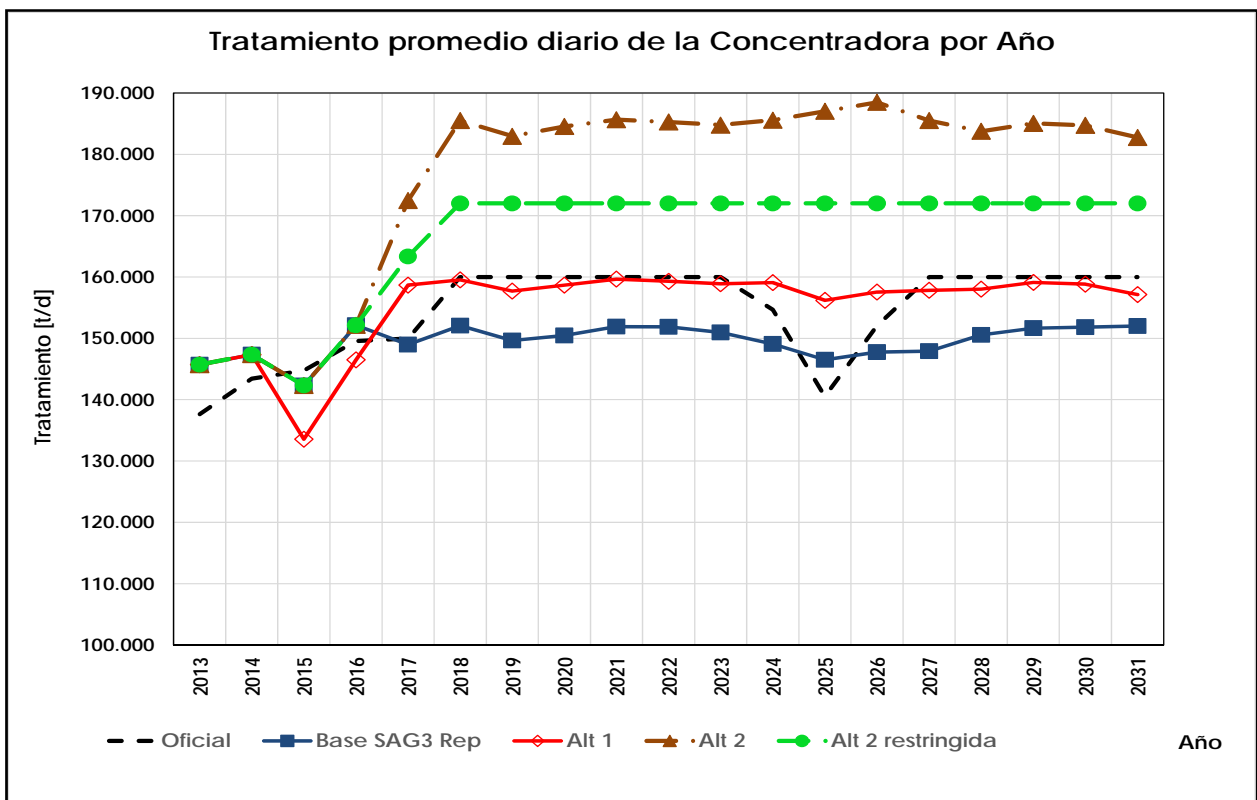


Figura 13. Diagrama General de Procesos – Alternativa 2A

## Cronograma del Proyecto

En el caso de negocio estudiado se consideró el siguiente cronograma de trabajo:

	2014				2015				2016				2017				2018				2019			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
<b>5to Molino de Bolas</b>																								
FEL1																								
FEL3																								
FEL3																								
Ejecución																								
Intervención Molinos de Bolas L3																								
Intervención Molino de Bolas 3																								
Intervención Molino de Bolas 4																								

Figura 14. Cronograma Maestro del Proyecto

## 5.2.1. RESULTADOS PRELIMINARES DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

<i>Resultados Evaluación Financiera</i>		<i>5º Molino de Bolas</i>		
		<i>Alternativa 1 ó Caso Base</i>	<i>Alternativa 2A</i>	<i>Alternativa 2B</i>
<b>Inputs</b>				
<b>CAPEX</b>	US\$M	240,8 (*)	391,6 +240,8 (*)	441,3 +240,8 (*)
<b>OPEX</b>	US\$M/año	0,90	42,5	43,3
<b>Producción</b>				
<i>Capacidad de Tratamiento</i>	<i>ktpd</i>	160	172	172
<i>Cu Filtrado sobre Caso Base</i>	<i>kton</i>	-	356	356
<b>Resultados</b>				
<i>VAN sobre Caso Base</i>	US\$M	-	529 (250) (**)	487 (215) (**)
<i>TIR</i>	%	-	N/A (20%) (**)	N/A (17%) (**)

### Supuestos:

Precio del Cobre de Largo Plazo: 2,8 \$/lb  
Tasa de Descuento: 8%  
Período de Evaluación: 2016 a 2030

### Notas:

(\*): Incluye costos hundidos que beneficiarían Caso de Negocio  
(\*\*): Comparación contra MBS L3 ejecutados antes del 5MB

Tabla 4. Resultados Evaluación Financiera del Proyecto

### Supuestos del análisis

- Precio de Largo Plazo fijo: 2.8 \$/lb
- Tasa de descuento (fijada por accionistas): 8%
- Capacidad de Tratamiento máxima: 172 ktpd
- Horizonte de análisis: al año 2030

## 6. ANÁLISIS DE OPCIONES REALES APLICADO AL PROYECTO SELECCIONADO.

Para el objeto de estudio de este trabajo de tesis, se considera el análisis del caso base y la situación con proyecto según la descripción de la alternativa denominada 2B descrita previamente.

Se considera que la mayor fuente de volatilidad de los flujos de caja corresponde a la incertidumbre por el precio del cobre. Otras fuentes de incertidumbre como la recuperación, disponibilidad de planta, etc. no serán incluidas en el análisis de opciones reales por simplificación pero se sugerirá su inclusión para un análisis futuro de Flujos de Caja Dinámicos.

A continuación se muestran los resultados de la aplicación de la metodología propuesta:

### Paso 1 - Encuadrar la Aplicación:

Inicialmente se consideró evaluar el proyecto elegido como un proyecto aislado, esto es, considerando solo los beneficios y costos incrementales generados por el aumento de capacidad y compararlos con la situación base, que a su vez incluye la intervención de los restantes molinos de bolas existentes en la planta concentradora.

Esta opción fue desechada dada la dificultad de separar por completo el proyecto "Brownfield" del nuevo molino de bolas en el modelo financiero y en las estimaciones del LOM. Adicionalmente se consideró la sugerencia del profesor A. Kettlun en relación a realizar un análisis de opciones reales al caso base y a la situación con proyecto y luego establecer los beneficios incrementales al comparar ambos análisis.

Para ambos casos se considerará un  $\delta t$  (periodo del "paso" en el árbol binomial) igual a 1 año y tasa libre de riesgo de 4%.

Se ha calculado la volatilidad del precio cobre con series de valores promedio mensuales desde Feb-89 a Feb-14, obteniéndose un valor de 22.52% para la volatilidad anual. Sin embargo se considera reducir el rango de datos, acotándolo a los diez últimos años de manera de obtener una volatilidad más representativa de los últimos ciclos de precios del cobre. Con esto, la volatilidad del precio del commodity es 27.95%

Teniendo en cuenta lo anterior, para el **Caso base** se realiza un análisis de opciones reales, considerando la Opción de Cierre o Abandono durante el periodo en evaluación. Esta será la única flexibilidad considerada para el análisis. Se suponen similares condiciones de cierre y valor residual que en la evaluación tradicional del caso de negocio.

Para el caso **con Proyecto**, éste será en si mismo considerado como una Opción de Expandir sobre el Caso Base, pero separado en Fases (Opción compuesta). En este

punto puede interpretarse que el proyecto es en realidad una Opción en sí misma para el caso base de negocio (LOM). Este punto se discute más adelante en esta tesis.

Se considerará el Proyecto separado en Fases de acuerdo a la secuencia de estudios, evaluándose al final de cada una de las fases la opción de seguir adelante con la fase siguiente o abandonar el proyecto.

Para efectos de la evaluación se considerará que como máximo, el proyecto debe estar ejecutado al año 2017 de manera de internalizar los beneficios de mitigación de pérdidas de producción asociadas a los trabajos de reemplazo de estatores y repotenciamiento de los molinos de bolas de la línea 3 de molienda. La fecha de intervenciones de estos molinos se considera fija para efectos de la evaluación (condición de borde).

Las etapas del proyecto 5to molino se consideran anuales de acuerdo a cronograma incorporado previamente.

Los montos de inversión considerados son: FEL1 12 MUSD; FEL2 6MUSD; FEL3 12MUSD; Construcción 361.62MUSD (FEL2 y FEL3 para efectos de la evaluación se consideran ejecutados dentro del mismo periodo)

## **Paso 2- Identificar los parámetros de entrada.**

### **Caso Base**

So (valor del activo subyacente en $t=0$ ):	3.46 C\$/lb (precio cobre promedio 2013)
X ("strike Price"):	\$0
T (tiempo de vida de la opción):	17 años
r (tasa libre de riesgo):	4%
$\sigma$ (volatilidad de activo subyacente)	27.95%

### **Caso con Proyecto**

So (valor del activo subyacente en $t=0$ ):	3.46 C\$/lb (precio cobre promedio 2013)
X1 ("strike Price"):	12MUSD (costo avanzar a FEL1)
X2 ("strike Price"):	18MUSD (costo avanzar a FEL2+FEL3)
X3 ("strike Price"):	361.62MUSD (costo Implementación)
T (tiempo de vida de la opción):	3 años



r (tasa libre de riesgo): 4%

$\sigma$  (volatilidad de activo subyacente) 27.95%

### Paso 3 – Cálculo de los parámetros de la opción.

#### Caso con y sin proyecto

$$u = \exp(\sigma\sqrt{\delta t}) = 1.3224$$

$$d = \exp(-\sigma\sqrt{\delta t}) = 0.7562$$

$$p = \frac{\exp(r\delta t) - d}{u - d} = 0.43058$$

### Paso 4 – Construir el árbol binomial y calcular el valor del activo subyacente en cada nodo con los factores u y d.

#### Caso Base

Primero se construyó el árbol binomial para la simulación de precios (variable de mayor incertidumbre) a evaluar en el análisis:

Precio	0	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	2.8	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33	14.98	19.81	26.19	34.64	45.81	60.58	80.11	105.94	140.10	185.27	245.01	324.02
		2.12	2.80	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33	14.98	19.81	26.19	34.64	45.81	60.58	80.11	105.94	140.10	185.27
			1.60	2.12	2.80	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33	14.98	19.81	26.19	34.64	45.81	60.58	80.11	105.94
				1.21	1.60	2.12	2.80	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33	14.98	19.81	26.19	34.64	45.81	60.58
					0.92	1.21	1.60	2.12	2.80	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33	14.98	19.81	26.19	34.64
						0.69	0.92	1.21	1.60	2.12	2.80	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33	14.98	19.81
							0.52	0.69	0.92	1.21	1.60	2.12	2.80	3.70	4.90	6.48	8.56	11.33
								0.40	0.52	0.69	0.92	1.21	1.60	2.12	2.80	3.70	4.90	6.48
									0.30	0.40	0.52	0.69	0.92	1.21	1.60	2.12	2.80	3.70
										0.23	0.30	0.40	0.52	0.69	0.92	1.21	1.60	2.12
											0.17	0.23	0.30	0.40	0.52	0.69	0.92	1.21
												0.13	0.17	0.23	0.30	0.40	0.52	0.69
													0.10	0.13	0.17	0.23	0.30	0.40
														0.07	0.10	0.13	0.17	0.23
															0.06	0.07	0.10	0.13
																0.04	0.06	0.07
																	0.03	0.04
																		0.02

Tabla 5. Simulación de Trayectorias de Precio

El ejercicio anterior no incluye “drift” por tasa libre de riesgo, de manera de simular una reversión a la media de largo plazo idéntica al precio estático de largo plazo de la evaluación estándar.

A partir de la información anterior, se construyó un gráfico con las trayectorias de precios a incluir en el análisis:

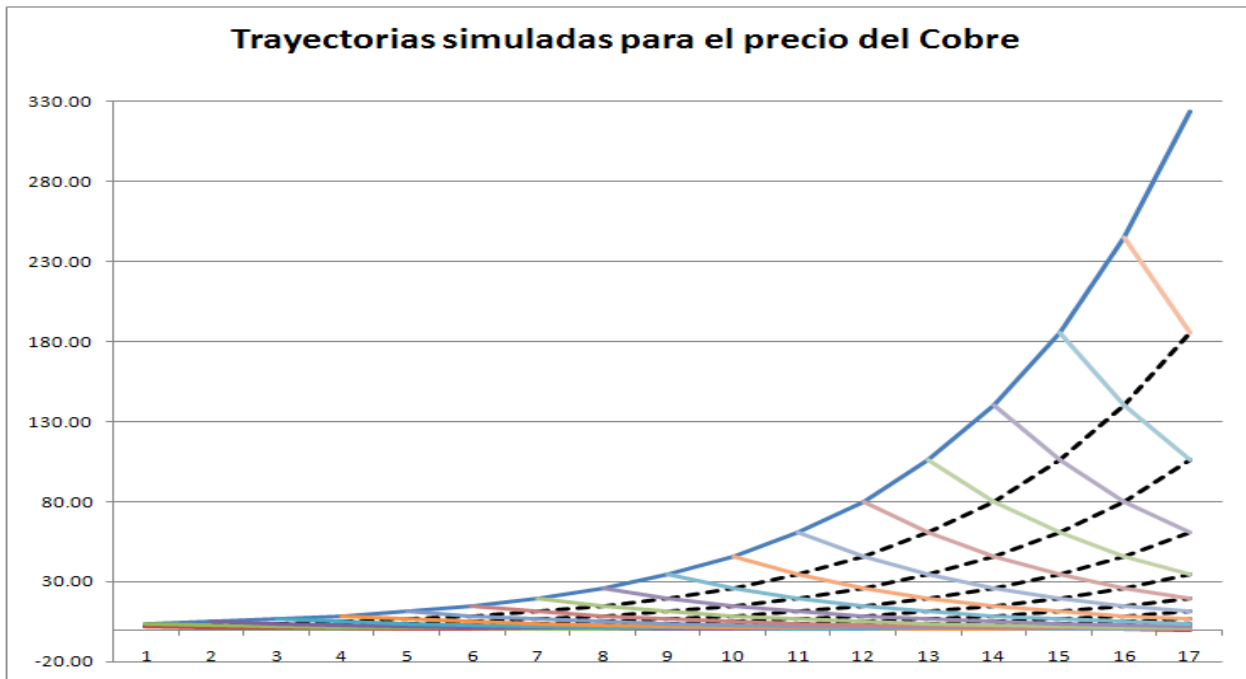


Figura 15. Gráfico de trayectorias (simulación) de precio de cobre

Como se puede apreciar, las trayectorias de precio simuladas alcanzan valores muy lejanos a los rangos históricos, sin embargo estos valores se alcanzan con probabilidades muy cercanas a cero.

En el cuadro siguiente se muestran las probabilidades de ocurrencia de las trayectorias de precio simuladas.

Probabilidades	0	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
		0.43	0.19	0.08	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.57	0.49	0.32	0.18	0.10	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			0.32	0.42	0.36	0.26	0.17	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
				0.18	0.32	0.34	0.29	0.22	0.15	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
					0.11	0.23	0.29	0.29	0.25	0.20	0.14	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
						0.06	0.15	0.23	0.27	0.26	0.22	0.18	0.13	0.09	0.06	0.04	0.02	0.02
							0.03	0.10	0.18	0.23	0.25	0.23	0.20	0.16	0.12	0.09	0.06	0.04
								0.02	0.07	0.13	0.19	0.22	0.23	0.21	0.18	0.15	0.11	0.08
									0.01	0.04	0.09	0.15	0.19	0.21	0.21	0.20	0.17	0.14
										0.01	0.03	0.06	0.11	0.15	0.19	0.20	0.20	0.18
											0.00	0.02	0.04	0.08	0.12	0.16	0.18	0.19
												0.00	0.01	0.03	0.06	0.10	0.13	0.16
													0.00	0.01	0.02	0.04	0.07	0.11
														0.00	0.00	0.01	0.03	0.05
															0.00	0.00	0.01	0.02
																0.00	0.00	0.01
																	0.00	0.00
																		0.00
Sum. De prob		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 6. Probabilidades para Trayectorias de Precio

### Paso 5 - Calcular el valor de la opción en cada nodo del árbol por inducción reversa

Con los precios simulados, se emplea el mismo modelo de la evaluación tradicional para obtener los flujos de caja de cada periodo. De esta forma se obtienen distintos valores para los flujos de caja esperados de acuerdo al precio simulado en el paso previo

Para el caso base, es decir LOM sin proyecto, se obtuvieron los siguientes flujos simulados.

Flujos	0	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	705.2811	1058.737	2033.953	3825.644	3822.647	7464.049	9650.314	13087.07	18049.9	24128.36	30137.73	39933.89	45587.84	74302.4	101271.6	139123.4	177873.3	242887.9
		2.782253	469.6056	1507.479	1474.993	3633.263	4788.048	6855.914	9750.771	13262.41	16714.01	22296.6	25424.52	41907.33	57304.31	78911.19	101129.7	138312.9
			-455.942	56.83854	108.7377	1678.833	2007.794	3292.927	5005.312	7049.233	9038.292	12211.55	13895.09	23383.77	32163.7	44481.72	57247.51	78516.73
				-605.655	-853.514	260.6063	590.9448	1441.478	2291.848	3496.525	4649.303	6444.905	7302.537	12791.95	17788.26	24794.88	32155.6	44325.14
					-994.143	-661.182	-558.246	115.6663	908.4594	1748.132	2139.669	3147.522	3532.902	6735.529	9568.342	13537.9	17807.99	24774.32
						-888.995	-1219.77	-734.753	-217.5	344.1988	849.6837	1564.318	1516.857	3272.454	4868.178	7101.14	9604.001	13595.12
							-1145.03	-1221.4	-866.257	-500.691	-187.423	200.1386	208.0146	1658.586	2573.079	3420.584	4912.94	7202.826
								-1079.04	-1237.22	-985.919	-785.364	-586.971	-682.412	213.6946	812.8693	1686.899	2778.631	3547.699
									-1022.17	-1263.37	-1127.27	-1037.72	-1193.87	-618.726	-301	162.231	856.9087	1862.811
										-980.719	-1322.72	-1295.46	-1486.32	-1096.31	-942.848	-716.052	-253.879	348.5962
											-992.664	-1442.84	-1653.55	-1369.39	-1309.86	-1219.86	-893.614	-522.445
												-1114.26	-1749.17	-1525.54	-1519.72	-1507.94	-1259.42	-1022.8
													-1383.5	-1614.82	-1639.71	-1672.66	-1468.58	-1308.9
														-1312.63	-1708.33	-1766.85	-1588.18	-1472.5
															-1282.88	-1820.71	-1656.57	-1566.04
																-1393.63	-1695.68	-1619.53
																	-1237.33	-1650.12
																		-1211.22

Tabla 7. Flujos proyectados para precios simulados (Caso Base)

Para el caso con proyecto, se utilizan las mismas trayectorias de precio indicadas para el caso base. Al incorporar los precios al modelo financiero se obtiene el siguiente árbol de flujos de caja para todo el periodo considerado en la evaluación

Flujos	0	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	712.3549	1063.391	2032.449	3474.985	4587.10074	8072.004	10151.9	13707.61	18984.54	25317.57	32149.91	42286.18	50467.52	79329.22	105931.3	144455.9	184987.3	251619.3
		10.21328	471.315	1149.531	1880.83149	3961.915	5062.509	7198.194	10273.32	13932.03	17853.24	23628.39	28190.74	44766.44	59957.22	81948.41	105183.2	143294
			-453.737	-299.426	364.77024	1795.906	2152.384	3476.096	5292.226	7421.755	9678.377	12959.82	15452.83	25003.37	33669.15	46206.49	59550.96	81353.41
				-962.088	-751.070698	349.561	671.624	1500.89	2444.026	3699.165	5003.971	6859.508	8169.26	13702.8	18637.58	25769.19	33458.37	45935.63
					-981.199726	-635.21	-530.494	159.9105	997.8293	1838.725	2331.135	3371.337	4004.502	7241.113	10042.49	14083.09	18538.57	25683.67
						-839.535	-1222.66	-728.167	-183.872	400.9966	969.0031	1701.672	1705.226	3546.306	5127.807	7400.96	10007.4	14103.55
							-1140.67	-1236.55	-864.989	-483.886	-135.808	259.214	351.5283	1830.22	2663.012	3580.101	5129.259	7482.018
								-1087.73	-1254.45	-992.253	-773.147	-572.651	-633.479	291.1154	890.393	1781.57	2871.697	3695.811
									-1030.92	-1282.94	-1137.58	-1049.26	-1199.87	-594.993	-273.373	199.0802	918.3488	1955.726
										-985.482	-1345.96	-1321.79	-1523.73	-1103.68	-944.125	-712.341	-236.65	387.4971
											-1002.36	-1477.62	-1708.92	-1394.55	-1327.66	-1235.25	-901.98	-514.437
												-1125.37	-1814.81	-1560.87	-1546.97	-1534.25	-1282.42	-1032.64
													-1431.65	-1655.97	-1672.37	-1705.22	-1499.95	-1328.94
														-1315.78	-1744.07	-1802.98	-1624.34	-1498.37
															-1292.98	-1858.88	-1695.46	-1595.25
																-1413.36	-1736.13	-1650.65
																	-1260.8	-1682.32
																		-1225.59

Tabla 8. Flujos proyectados para precios simulados (Caso con Proyecto)

El paso siguiente corresponde a actualizar los flujos modelados desde el último periodo hasta el primer periodo. Para lo anterior, se calcula el valor de la opción de cierre en cada nodo por inducción inversa. Cada nodo representa la maximización de valor de abandono frente a la continuidad de la operación.

En esta primera etapa se aplica a la opción de abandono para tener una primera comparación entre el caso base y caso con proyecto. Si está dada la opción de cerrar (incluso temporalmente) los flujos negativos por tanto son eliminables (existe flexibilidad de cierre de operación), el valor total del VAN del proyecto incluyendo el valor de la opción para el caso base es el siguiente:

## Caso Base

Flujos Ajustados	0	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
	10463.43	17465.1	27078.55	38889.21	52500.23	71130.02	91588.82	116435	145642.4	178771.1	215741.2	258054.8	302467.9	355370.6	388267.1	396014.9	354162.6	242887.9	
		4615.817	9488.808	16334.95	24341.49	35119.03	47023.73	61609.02	78625.76	97855.48	119304.8	143855.5	169662.2	200448.9	219751.1	224718.1	201383.4	138312.9	
			1250.144	4120.781	8674.787	15207.72	21948.12	30552.97	40547.43	51798.9	64287.34	78594.02	93723.59	111864.3	123393.4	126770.2	114023.9	78516.73	
				0	862.8121	4145.513	8112.84	13316.05	19127.37	25745.85	33119.28	41477.22	50370.94	61211.5	68295.82	70763.41	64071.5	44325.14	
					0	960.7481	3668.889	7224.324	11280.4	15592.67	20634.16	25894.53	32374.45	36790.91	38738.59	35508.64	24774.32		
						0	0	0	1026.827	3005.475	5619.144	8967.819	12357.17	16361	19007.12	20426.73	19176.33	13595.12	
							0	0	0	0	0	0	0	1634.111	3327.679	4863.641	5267.373	3547.699	
								0	0	0	0	0	0	77.96924	915.339	1819.013	1862.811		
									0	0	0	0	0	0	0	0	0	348.5962	
										0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
											0	0	0	0	0	0	0	0	0
												0	0	0	0	0	0	0	0
													0	0	0	0	0	0	0
														0	0	0	0	0	0
															0	0	0	0	0
																0	0	0	0
																	0	0	0
																		0	0
																			0

Tabla 9. Flujos actualizados a valor presente por inducción inversa (Caso Base)

El valor actual del caso base considerando la flexibilidad de cierre en periodo de precios adversos es de **10,463 MMUSD**. Con la evaluación tradicional, el valor actualizado del caso de negocio LOM es de **6,848MMUSD**.

Los valores anteriores reflejan una diferencia significativa en la valoración del caso base sólo como resultado de la incorporación de la flexibilidad de cierre, la que debe ser ejercida una vez que se proyecten flujos negativos por efecto de precio, es decir, cuando se disponga de la información en el futuro.

En el caso con proyecto, al considerar la flexibilidad de expandir (incrementar la producción por etapas) y además la flexibilidad de cierre de operaciones bajo el mismo criterio que el caso base anteriormente analizado, se obtiene el siguiente árbol binomial de flujos descontados, de acuerdo a las probabilidades calculadas.

## Caso con Proyecto

Flujos Ajustados	0	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	11012.62	18396.29	28595	41215.85	56335.0671	75465.24	96813.62	123027	153946.1	188987.4	228231.5	272535	319209.3	371729.6	403887.7	411117.5	367618.9	251619.3
		4901.818	10034.34	17348.02	26331.5672	37448.67	49880.43	65250.91	83253.06	103589.2	126347.1	152043.6	179153.3	209743.1	228636.6	233317.4	209052.3	143294
			1346.412	4347.974	9673.99903	16339.6	23442.6	32515.31	43074.86	54960.2	68211.28	83183.97	99069.05	117118.9	128427.7	131650.9	118383.5	81353.41
				0	1172.87124	4646.976	8836.206	14297.65	20465.71	27447.49	35245.58	44004.11	53345.37	64156.12	71127.95	73517.83	66538.93	45935.63
					0	1167.171	4100.441	7896.618	12160.09	16722.62	21959.12	27503.27	33997.37	38363.86	40277.2	36894.08	25683.67	
						0	0	0	1225.842	3404.942	6205.929	9679.972	13151.85	17210.7	19858.43	21270.14	19943.1	14103.55
							0	0	0	0	0	793.7003	2245.08	4626.641	7892.056	9940.497	10820.38	10250.49
								0	0	0	0	0	128.4764	1840.381	3554.71	5109.657	5472.633	3695.811
									0	0	0	0	0	0	141.6285	1002.371	1940.22	1955.726
										0	0	0	0	0	0	0	0	387.4971
											0	0	0	0	0	0	0	0
												0	0	0	0	0	0	0
													0	0	0	0	0	0
														0	0	0	0	0
															0	0	0	0
																0	0	0
																	0	0
																		0

Tabla 10. Flujos actualizados a valor presente por inducción inversa (Caso con Proyecto)

El valor actual del Proyecto considerando la flexibilidades indicadas es de **11,012 MMUSD**. Con la evaluación tradicional, el resultado del ejercicio del caso base más proyecto en el periodo estudiado es de **6,926MMUSD**.

Más allá de las cifras anteriores, y tomando en cuenta la condición de comparar las evaluaciones con flexibilidades del caso base y proyecto, se obtiene un valor incremental del proyecto de **549MMUSD**, en comparación con los **487MMUSD** obtenidos en la evaluación tradicional, es decir, el valor de la opción de expandir la capacidad de producción con el proyecto incorporando la flexibilidad de cierre aporta un valor de **62MMUSD**.

### **Opción de Abandonar en Etapas**

El proyecto se encuentra en la etapa de Estudio de Perfil, por lo tanto previo a la decisión de ejecutar el proyecto se deben cumplir las etapas FEL 1(Ing. Conceptual), FEL2 (PreFactibilidad) y FEL3 (Factibilidad). Para hacer calzar los plazos del proyecto con el periodo de tiempo definido en la evaluación, se ha supuesto que se puede abandonar el proyecto al final del FEL1 y al final de la FEL3 (el final de FEL2 cae a la mitad de un periodo).

Para evaluar se recalcula el valor de los flujos en los nodos correspondiente al punto de decisión (Go / No Go) teniendo en cuenta la inversión y los valores actualizados en dichos nodos en los casos con proyecto y sin proyecto, guardando en cada nodo el valor máximo entre ambas (teniendo en cuenta el valor de la inversión en la siguiente etapa).

Se calcula el valor de la opción predecesora (FEL2 y 3) sobre el árbol construido a partir de la opción sucesora (etapa de ejecución)

De acuerdo a los pasos explicados, se obtienen los siguientes aportes de valor por flexibilidad de abandono inter etapas:

- Valor de la flexibilidad de abandonar al final del FEL1: **17MMUSD**
- Valor de la flexibilidad de abandonar al final del FEL3: **36MMUSD**

Como resumen del ejercicio para el proyecto estudiado se obtiene:

$$\begin{aligned}\Delta\text{VPN} &= \text{Valor flexibilidad de Cierre} + \text{Valor Opción Expansión} + \text{Valor} \\ &\text{flexibilidad de abandono en etapas} \\ &= \mathbf{98\text{MMUSD}}\end{aligned}$$

Lo anterior se traduce en que la capacidad de la gerencia del proyecto para administrar las opciones y flexibilidades agrega valor en la evaluación del mismo. Nótese que no se sumó directamente la opción de abandonar en FEL1, ya que podría producirse un efecto de sobrevaluación que será discutido y analizado en etapas posteriores.

Como se recalcó en capítulos anteriores, las Opciones Reales son un derecho y no una obligación, es decir, el valor de las opciones se activa en la medida que la gerencia del proyecto reacciona a medida que se va adquiriendo más información y disminuye la incertidumbre.

**Pasos siguientes:**

Es de interés del autor de este trabajo, complementar el análisis anterior incorporando otras fuentes de incertidumbre como Toneladas de Mineral Chancado, disponibilidad de planta, leyes de corte, recuperaciones, etc.

También es deseable realizar el ejercicio sin restricción de fecha para ejecución, buscando de esta forma determinar el periodo óptimo de inversión sin la condición de borde del proyecto explicada anteriormente

Para ambas tareas sin embargo se requiere acondicionar el modelo de evaluación financiera (usado como base en este ejercicio) de manera de permitir de manera más flexible la parametrización de los flujos de caja y de esta forma incorporar modelos de distribución de probabilidades a los parámetros de incertidumbre (idealmente contando con registros históricos para determinar tipo de distribución y desviación estándar).

Por restricciones de tiempo establecidas para este trabajo de Tesis, no fue posible incluir estos análisis, sin embargo se continuará este estudio más allá del alcance de esta tesis para respaldar la aplicación de la metodología de manera más robusta al interior de la compañía.

## 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Existen dos miradas generales hacia la aplicación de Opciones Reales en la evaluación de proyectos de inversión. Quienes la apoyan ven en esta metodología una superación a las limitaciones del uso de flujos de caja estáticos. A la vez identifican en esta herramienta un puente entre la evaluación financiera y la estrategia de las compañías, que en escenarios de incertidumbre devela el potencial de maximización del valor de las alternativas de inversión. Como antecedente directo para el caso de la compañía minera que apoyó el desarrollo de este trabajo, actualmente los accionistas se han mostrado dispuestos a la aplicación de Opciones Reales para evaluar flexibilidades de proyectos.

Por otra parte, sus detractores argumentan que los inversionistas ya tienen suficiente trabajo tratando de entender la metodología tradicional de evaluación de proyectos como para prestarles atención a complejos modelos como los usados en opciones reales. Los menos pesimistas al menos concuerdan en que compañías dedicadas a recursos naturales pueden ser más entusiastas en su uso, ya que pueden vincular el valor futuro de sus activos a commodities transables, para los cuales existe mayor información disponible.

Ambas corrientes concuerdan en que la comunicación y explicación de la metodología no es una tarea sencilla. Esto ha sido posible verificarlo a lo largo del trabajo, si bien existe conocimiento sobre las potencialidades de la herramienta a nivel de la industria, gran parte de los ejecutivos lo califican como una “caja negra”. Es por esto mismo que uno de los objetivos fue determinar la metodología de aplicación más sencilla e intuitiva.

En este trabajo se han estudiado los alcances de una evaluación por Opciones Reales, estableciendo las diferencias con la metodología tradicional de evaluación. Se ha descrito el sustento teórico de la metodología y las distintas alternativas de aplicación de acuerdo a las flexibilidades de los proyectos. La conveniencia del uso de una u otra alternativa depende del tipo de proyectos y el foco de su empleo.

Si bien esta metodología está en uso activo, sobre todo en la industria minera y en particular en Australia, su penetración a nivel nacional ha sido baja. Se han registrado iniciativas tanto académicas como a nivel de compañías (Codelco cuenta incluso con un procedimiento aprobado para su uso), pero las dudas a nivel de dirección de empresas mineras aun no han sido despejadas para abrir paso a su uso amplio. Firmas de consultoría locales especializadas en este tipo de análisis hoy cumplen una función “evangelizadora” al respecto y sin duda cuentan con el personal idóneamente entrenado para aplicación de Opciones Reales a proyectos tipo “greenfield”, competencias que al día de hoy no se encuentran masificadas en los profesionales del “core team” de las compañías mineras con operaciones a nivel nacional.

En la actualidad, las principales dificultades para la aplicación de Opciones Reales a proyectos mineros son las citadas, falta de competencias a nivel interno en las compañías, percepción de la metodología como caja negra y poco énfasis en comunicación de las ventajas de su uso. Debe quedar establecido desde el principio

que esta metodología no reemplaza la metodología tradicional de evaluación de proyectos mineros, sino más bien la complementa para un proceso de toma de decisiones más preciso.

Es un tema aún por discutir si la finalidad de presentar una metodología práctica e intuitiva como los árboles binomiales, para efectos de facilitar la comunicación, implica a su vez la generación de planillas demasiado extensas en casos con periodos de evaluación de un plazo mayor, por ejemplo, la evaluación del LOM. Del trabajo de esta tesis y de las experiencias recogidas, se sugiere el uso de árboles binomiales en proyectos cuyo horizonte de evaluación sea de extensión moderada, y para proyectos de más largo aliento, usar simulaciones u otra de las metodologías señaladas.

En cuanto a las dificultades prácticas, se requerirá en futuras aplicaciones de evaluación por Opciones Reales, contar con un modelo de evaluación tradicional que permita parametrizar las distintas variables de incertidumbre en los flujos futuros y no solo el precio. Autores como L. Martinez, recomiendan complementar el análisis con simulaciones de otras variables además del precio, que afectan los flujos de caja (cantidad de mineral chancado, leyes de corte, recuperaciones, disponibilidad de planta, etc.) con esta capacidad del modelo se pueden generar flujos de caja dinámicos y determinar valores de VPN para un nivel de certeza dado. Sin embargo para lo anterior también se requiere contar con información histórica real, para evaluar tipos de distribución y parámetros de volatilidad.

Para el caso particular de estudio de este trabajo de Tesis (proyectos tipo “Brownfield”) la disponibilidad de información y aplicaciones concretas es más bien escasa. No se logró dar con evidencias discusiones y aplicación de Opciones Reales a proyectos de este tipo. La motivación para analizar estos proyectos de inversión justamente coincide con la reacción general de la industria ante la incertidumbre actual sobre los ajustes de demanda y precio provocados por la disminución en las tasas de crecimiento de China, lo que ha motivado a las compañías en reformular sus proyectos de grandes expansiones y redirigir sus inversiones hacia ampliaciones de menor tamaño en sus operaciones actuales.

Una recomendación general es comenzar su aplicación por intermedio de asesoría externa especializada, de manera de afianzar gradualmente las competencias requeridas para su uso a nivel interno. Adicionalmente se recomienda integrar a las distintas áreas de la compañía, sobretodo partiendo desde el área responsable de generar periódicamente el LOM de la compañía. Es requisito esencial que ésta área registre la información necesaria para la sensibilización de los flujos en términos de leyes de corte, producción mina, granulometría, dureza, recuperaciones y otros. Los modelos a emplear deberán estructurarse de manera transparente y simple evitando dejar la impresión de la “caja negra”, que usualmente afecta el respaldo al uso de la herramienta.

Tomando la lección aprendida de iniciativas similares de otras compañías locales se sugiere no anteponer la elaboración de un procedimiento definiendo modelos y metodologías específicas, sino más bien explorar distintos modelos hasta consensuar uno que se adapte a las necesidades y cultura propia de la compañía y que se sustente en las competencias disponibles y por desarrollar.



Otra lección aprendida tomada de la información disponible indica que el foco no debe estar en sobre analizar, sino mas bien en comunicar efectivamente la metodología y los resultados esperados. El refinamiento excesivo del modelo conducirá a resultados más precisos, pero seguramente contribuirá a aumentar las barreras para una comprensión rápida del resto del equipo. Sin embargo, la sobre simplificación debe evitarse para no afectar la credibilidad de los resultados. La clave del balance de un modelo simple pero robusto necesariamente debe resultar de una discusión interna con el apoyo de un consultor experto.

El ejercicio mostrado en este trabajo de tesis constituye un buen inicio, sin embargo debe seguir en trabajo para mostrar el potencial completo de las ventajas de uso de Opciones Reales (complemento con flujos de caja dinámicos es un trabajo por completar). En cuanto a los resultados, que no son el objetivo final de este análisis sino más bien un indicador de diagnóstico, se observa que mejoran de manera no despreciable en relación a los resultados de la evaluación tradicional, en términos de VPN. Sin embargo, como muchos autores advierten, si un proyecto obtiene buenos resultados en una evaluación tradicional (como en este caso), la aplicación de opciones reales entregará resultados similarmente buenos (sin diferencias notables).

Donde las Opciones Reales muestran más cabalmente sus ventajas es en proyectos cuya evaluación arroja VPNs muy cercanos a cero e incluso en casos donde el VPN es menor a cero. En estos casos, el valor de las flexibilidades puede hacer la diferencia en una decisión “Go-No Go”.

Si bien es posible obtener resultados de acuerdo al esquema de aplicación propuesto, es decir, comparando evaluación por Opciones Reales para caso base y caso Con Proyecto, en el avance de su aplicación se sugiere enfocarlo hacia la comparación de proyectos de incrementos marginales de producción, cuyos resultados de evaluación tradicional arrojen resultados similares. En estos casos, las incertidumbres y flexibilidades de cada iniciativa permitirán obtener una evaluación por Opciones Reales que permita discriminar la opción que aporta mayor valor a la compañía.

Al plantearlo como una herramienta comparativa de proyecto “Brownfield” será posible establecer un “ranking” de proyectos donde las flexibilidades permitan hacer la diferencia a la hora de seleccionar las alternativas de inversión.

En el caso de proyectos tipo “Stay in Business”, que no agregan producción sino más bien apuntan a mantener las condiciones de operación, se sugiere aplicar los conceptos de Opciones Reales para sensibilizar parámetros de incertidumbre. Una vez hecho esto, se sugiere aplicar flujos de caja dinámicos y luego realizar una estimación de Valor en Riesgo para sustentar la decisión Go–No Go. Es un enfoque similar a las Opciones Reales, pero aplicado a mitigación de pérdidas en vez de aumento de valor.

Este punto se menciona ya que en el transcurso del desarrollo de este trabajo se ha solicitado al autor realizar un ejercicio de Opciones Reales sobre un proyecto de mitigación. Si bien es posible tomar los mismos conceptos, no se puede determinar directamente el aumento de valor respecto del caso base, pues este último corresponde a los niveles de producción en curso y no a aquellos afectados por la falta de mitigación. Por tanto el análisis debe apuntar al valor en riesgo asociado a la (no) ejecución del

proyecto. Este tipo de aplicaciones es una extensión al trabajo iniciado en esta Tesis y que complementa la evaluación de proyectos “Stay in Business” de la misma forma que las Opciones Reales complementan la evaluación de los proyectos “Brownfield”

## 8. GLOSARIO

- Brownfield (Proyecto): estos proyectos son aquellos que se desarrollan en un sector de un yacimiento en operación o en un sector contiguo pero relacionado. Igualmente, se define en forma similar cuando el proyecto está asociado a un yacimiento antiguo que se encuentre cerrado
- Commodity: son bienes de tipo “genéricos”, es decir, no se tienen una diferenciación entre sí. Normalmente cuando se habla de commodities, se habla de materias primas o bienes primarios. En el caso de minería, hace referencia generalmente a productos metálicos / no metálicos
- Core Team: En una compañía minera corresponde al staff de profesionales de planta.
- DCF: “Discounted Cash Flow”, Flujo de Caja Descontados. En Finanzas, el método de flujo de fondos descontados, descuento de flujos de efectivo o descuento de Flujos de caja (DCF por sus siglas en inglés) es utilizado para valorar a un proyecto o a una compañía entera. Los métodos de DCF determinan el valor actual de los flujos de fondos futuros descontándolos a una tasa que refleja el coste de capital aportado. Esto es necesario porque los flujos de fondos en diversos períodos no pueden ser comparados directamente puesto que no es lo mismo contar con una cantidad de dinero ahora, que en el futuro.
- Drift: un drift, actúa como una tendencia en un proceso de random walk
- Greenfield (Proyecto): Proyectos que se desarrollan en yacimientos nuevos
- LOM: “Life Of Mine” Número de años planificados para la operación minera, tomado del plan minero. Se actualiza periódicamente e incorpora toda la información que permite cuantificar el valor de la operación de acuerdo al plan.
- Proceso estocástico estacionario: Caso particular del camino aleatorio donde su media y su varianza son constantes en el tiempo y si el valor de la covarianza entre dos períodos depende solamente de la distancia o rezago entre esos dos períodos de tiempo y no del momento en el cual se ha calculado la covarianza
- Random Walk: Un paseo aleatorio se define como un proceso en el que el valor actual de una variable se compone de el valor pasado más un término de error se define como un ruido blanco (una variable normal con media cero y varianza uno)
- Stay in Business (Proyectos): Proyectos de una compañía que apuntan a mantener niveles productivos o a optimizarlos (no a incrementar niveles de producción)
- TIR: Tasa Interna de Retorno. La tasa interna de retorno de una inversión o proyecto es la tasa efectiva anual compuesto de retorno o tasa de descuento que

hace que el valor actual neto de todos los flujos de efectivo (tanto positivos como negativos) de una determinada inversión igual a cero.

- Valor en Riesgo: define al riesgo como una pérdida potencial frente a escenarios negativos y que suceden con una probabilidad máxima de ocurrencia
- VAN: Valor Actualizado Neto. El valor actual neto, también conocido como valor actualizado neto o valor presente neto (en inglés net present value), cuyo acrónimo es VAN (en inglés, NPV), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja (en inglés cash-flow) futuros den determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial,
- VPN: Valor Presente Neto (ver definición de VAN)

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Tom Copeland / Vladimir Antikarov. "Real Options: A Practitioner's Guide"
2. Tom Copeland / Tim Koller / Jack Murrin. "Valuation: Measuring and Managing the Value of Companies"
3. Luis Martinez / Joseph McKibben. "Understanding Real Options In Mine Project Valuation: A Simple Perspective"
4. Michael Sami / Luis Martinez / Graham A. Davis / James B. White. "Using Dynamic DCF and Real Options Methods for Economic Analysis."
5. Roger Adkins / Dean Paxson. "An Analytical Model for Sequential Investment Opportunities".
6. Erick Heimlich M., 2009, Cochilco.. "Incorporación de riesgo a la evaluación de proyectos mineros"
7. Juan Pablo Garrido / Stephen X. Zhang. "A Real Options Model to Value Multiple Mining Investment Options in a Single Instant of Time"
8. Eduardo Contreras / Viviana Fernandez. Revista Ingeniería de Sistemas Volumen XVII Junio 2003. Una Nueva Metodología para la Evaluación de Proyectos de inversión: Las Opciones Reales
9. Ian Robinson, 2003, "REAL OPTIONS: The challenge and the opportunity", Institute of Actuaries of Australia, Biennial Convention.
10. Kodukula Prasad and Papulescu Chandra "Project Valuation Using Real Options: A Practitioner's Guide". - Florida : J. Ross Publishing, Inc., 2006.
11. Graeme Guthrie, 2009, "Real Options in Theory and Practice", Oxford University Press.
12. Ivan Matei-Dragos, 2012, "Real Option Valuation Method: Case of Oyu Tolgoi Copper and Gold Mine" , Tesis para optar al grado de Master of Science in Finance and International Business, Aarhus Universitet, Dinamarca,
13. Dixit & Pindyck, 1994, "Investment Under Uncertainty", Princeton University Press.
14. Jaime H. Sierra G., 2002, "Opciones Reales para las Decisiones de Inversión: Aspectos Introductorios"
15. Pablo Fernandez, 2008, "Valoración de Opciones Reales: Dificultades, Problemas y Errores", IESE Business School, Universidad de Navarra.
16. Han T.J. Smith, Lenos Trigeorgis, 2003, "Real Options: Examples and Principles of Valuation and Strategy".
17. Eduardo Schwartz, 2012, "The Real Options Approach to Valuation: Challenges and Opportunities"
18. Margaret E. Slade, 2000, "Valuing Managerial Flexibility: An Application of Real-Option Theory to Mining Investments", The University of British Columbia, Canada.
19. Thomas Keller, 2013, "La era de la atenta mirada", En: CRU Copper Conference 2013, Santiago Chile, Codelco.
20. Michael Samis, Richard Cronson, 2012, Dynamic DCF/ Real option applications– Americas Mining and Metals Forum 2012©, Mc-Lean, VA, USA.