



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**MINERA GABRIELA MISTRAL:
¿UNA BUENA OPCIÓN DE INVERSIÓN PARA
CHILE?**

ANÁLISIS EX-ANTE Y EX-POST

FRANCISCA ANDREA PINO ACEVEDO

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
GUSTAVO LAGOS
JOHN TILTON

Santiago de Chile, (Agosto, 2011)

© 2011, Francisca Pino



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MINERA GABRIELA MISTRAL: ¿UNA BUENA OPCIÓN DE INVERSIÓN PARA CHILE?

ANÁLISIS EX-ANTE Y EX-POST

FRANCISCA ANDREA PINO ACEVEDO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

GUSTAVO LAGOS

JOHN TILTON

JUAN IGNACIO GUZMÁN

EDUARDO ZAMANILLO

GONZALO CORTAZAR

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencia de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Agosto, 2011)

A mis Padres Marta y Efraín, por la educación que me han brindado y su apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia por el apoyo y cariño en todo momento durante el desarrollo de este proyecto y a lo largo de toda la carrera, gracias a su comprensión y motivación, es posible hoy presentar esta tesis.

En segundo lugar agradecer de forma especial a mis profesores guías, John Tilton y Gustavo Lagos. Gracias al profesor Tilton por su dirección y colaboración en este trabajo, además de destacar sus amplios conocimientos, su disposición y humildad como persona, lo que me ha impulsado a considerar que la búsqueda del conocimiento debe llevar de la mano un crecimiento personal en el emprendimiento de nuevos desafíos. A su vez, muchas gracias al profesor Gustavo Lagos por su disponibilidad y valiosos comentarios acerca de cómo mejorar los resultados expuestos en esta tesis.

Además quiero agradecer en especial a Michael Schott y Carlos Deck por sus consejos y ayuda a lo largo del desarrollo de esta tesis. Además hacer una especial mención a Rolando Lay, Luis Alvarado y Andrea Valle, por sus comentarios, su disposición a responder preguntas y su aporte en lo relativo a mejorar la calidad de este trabajo.

También, me gustaría destacar los valiosos comentarios del resto de los profesores de mi comisión de defensa de Tesis. En especial la colaboración de Juan Ignacio Guzmán, durante el desarrollo de este proyecto, por su disposición a responder de forma clara y certera las preguntas e inquietudes. Además, destacar que su búsqueda del conocimiento inspira a desarrollar nuevos desafíos tanto en lo académico como laboral.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
1. Introducción.....	1
2. Técnicas de evaluación	8
2.1 Valor Presente Neto	15
2.2 Opciones Reales	18
3. Mercado del cobre	26
4. Proyecto GABY.....	37
4.1 Objetivos de la negociación.....	37
4.2 Sociedad Codelco-MINMETALS: Contrato a largo plazo.....	39
4.3 Precio de venta implícito en el contrato.....	41
4.4 Riesgos y ventajas para Codelco.....	47
5. Análisis <i>ex-ante</i> y <i>ex-post</i> mediante la metodología de las opciones reales.....	50
5.1 Cuantificación de incertidumbres.....	58
5.2 Cuantificación de las opciones mediante simulación de Monte Carlo.....	85
5.3 Otras consideraciones.....	97
5.4 Resultados	101
5.5 Implicancias	105
6. Conclusiones y futuros estudios	108
BIBLIOGRAFIA.....	112

A N E X O S.....	115
Anexo A: Opciones de inversión estocástica en tiempo continuo	116
Anexo B : Principales usos del cobre a nivel industrial	121
Anexo C: lineamientos estratégicos de MINMETALS	122
Anexo D: Análisis <i>ex-ante</i> y <i>ex-post</i> mediante la metodología de flujos de caja descontados	

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4-1: Parámetros de la valorización del precio implícito en el contrato.....	43
Tabla 4-2: Estimación del precio implícito en el contrato	45
Tabla 5-1: Comparación de parámetros en el modelo AR (1), de acuerdo al periodo de precios del cobre considerado	62

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Volatilidad del precio de los <i>commodities</i> minerales (2001-2010).....	10
Figura 2-2: Evaluación mediante VPN y análisis de sensibilidad de las variables.....	17
Figura 2-3: Estados posibles del precio, producción de un cátodo de cobre	21
Figura 3-1: Producción de cobre refinado, 1995-2005	27
Figura 3-2: Principales países productores de cobre mina, 2005.....	28
Figura 3-3: Consumo de cobre refinado, 1995-2005.....	29
Figura 3-4: Principales países consumidores de cobre mina, 2005.	30
Figura 3-5: Evolución del consumo de cobre per cápita por poder adquisitivo, 1980- 2005.....	31
Figura3-6: Precios históricos del cobre- Moneda real US\$2010	36
Figura 4-1: Representación de las transacciones entre Codelco y MINMETALS	41
Figura 4-2: Estructura del saldo del precio implícito y premio establecido por Codelco.	42
Figura 4-3: Precio esperado del cobre en el largo plazo	47
Figura 5-1: Pirámide de jerarquía de las decisiones.....	53
Figura 5-2: Decisiones y procesos que implican las decisiones en Minera Gabriela Mistral	54
Figura 5-3: Árbol de decisión dinámico <i>ex-ante</i>	56
Figura 5-4: Árbol de decisión estático <i>ex-ante</i>	56
Figura 5-5: Árbol de decisión estático <i>ex-post</i>	58
Figura 5-6: Simulación del comportamiento del precio del cobre <i>ex-ante</i>	63
Figura 5-7: Simulación del comportamiento del precio del cobre <i>ex-post</i>	64
Figura 5-8: Precio del cobre y costos de la industria del cobre entre 1950-2010	66
Figura 5-9: Precio del cobre y C1 de la industria del cobre y de Codelco.....	67
Figura 5-10: Costos C1 de Minera Gabriela Mistral.....	68
Figura 5-11: Ajuste de distribución de los costos <i>ex-ante</i> de Minera Gabriela Mistral...	71
Figura 5-12: Ajuste de distribución de los costos <i>ex-post</i> de Minera Gabriela Mistral ...	72

Figura 5-13: Histograma de la inversión de los 42 proyectos analizados.....	75
Figura 5-14: Ajuste de la distribución de la razón de inversión (I_f/I_i)	76
Figura 5-15: Movimiento de material del plan minero metalúrgico	77
Figura 5-16: Histogramas de la concentración de leyes en cada una de las UGM	79
Figura 5-17: Ajuste de distribución de probabilidad de las leyes geológicas.	80
Figura 5-18: Histogramas de recuperación metalúrgica para cada una de las UGM.....	81
Figura 5-19: Diagrama de dispersión: recuperación metalúrgica – ley de cobre.....	82
Figura 5-20: Ajuste de distribución de probabilidad de la recuperación metalúrgica.	84
Figura 5-21: Opción de postergar (tasa de descuento 8%)	91
Figura 5-22: Opción de postergar (tasa de descuento 3,2%)	92
Figura 5-23: Valor esperado del VPN dinámico del proyecto <i>ex-ante</i>	94
Figura 5-24: Valor esperado del VPN dinámico del proyecto <i>ex-post</i>	95
Figura 5-25: Valor esperado del VPN estático del proyecto <i>ex-ante</i>	96
Figura 5-26: Valor esperado del VPN estático del proyecto <i>ex-post</i>	96
Figura 5-27: Curva de oferta de la industria del cobre (2003)	98
Figura 5-28: Valor esperado del VPN dinámico (MUS\$2010) asociado al contrato con MINMETALS mediante 3 tasas exógenas	102
Figura 5-29: Valor esperado del VPN dinámico (MUS\$2010) mediante emisión de deuda para 3 tasas exógenas	103
Figura 5-30: Distribución de probabilidad del cobre fino recuperado el año 2010	106
Figura D-1: Bandas de precios de acuerdo a 3 posibles escenarios equiprobables (2006- 2017)	127
Figura D-2: Bandas de precios de acuerdo a 3 posibles escenarios equiprobables (2011- 2022)	128

RESUMEN

Las técnicas tradicionales utilizadas para evaluar nuevos proyectos mineros se basan en la metodología de Flujos de Caja Descontados. Sin embargo, este enfoque no toma en cuenta el hecho de que las decisiones pueden ser tomadas de forma dinámica, una vez que las incertidumbres relevantes se han despejado parcialmente. Estas consideraciones necesariamente cambian el valor de un proyecto.

Reconociendo los problemas de la metodología de Flujos de Caja Descontados, esta tesis evalúa el proyecto Minera Gabriela Mistral utilizando la metodología de las Opciones Reales, considerando para la evaluación un análisis *ex-ante* y un análisis *ex-post*. Como resultado, esta tesis muestra un valor esperado del valor del proyecto obtenido a través de una evaluación dinámica, que considera incertidumbres de mercado y técnicas. Esta evaluación considera, que dados los niveles de incertidumbre presentes en los años de evaluación del proyecto, años 2004-2005, ésta debió haber considerado la opción de postergar el desarrollo del proyecto hasta el año 2007.

Al final, los resultados de esta tesis sugieren que el contrato a largo plazo entre Codelco y MINMETALS para desarrollar el depósito de Gabriela Mistral fue una decisión óptima *ex-ante*. Sin embargo, esta decisión no fue la óptima para el análisis *ex-post* en términos del valor esperado del VPN, debido a los altos precios del cobre visto en los años 2008, 2009 y 2010. Sin embargo, esta tesis considera que existen factores estratégicos – asociado a restricciones de inversión – que indican que esta decisión *ex-post* fue igualmente correcta, debido al rol que desempeña Codelco en la sociedad chilena como la empresa de cobre más importante de propiedad estatal, la cual traspasa el 100% de sus utilidades al fisco.

ABSTRACT

The traditional techniques used to evaluate new mining projects are based on the Discounted Cash Flow (DCF) methodology. However, this approach does not take into account the fact that decisions can be dynamically, once relevant uncertainties have become partially cleared. This mindset must necessarily change the value of the project.

Recognizing the problems with the DCF approach, this thesis evaluates the Minera Gabriela Mistral project using Real Options, considering both an *ex-ante* and *ex-post* analysis. As a result, an estimate of the project's value is reached in a dynamic fashion, considering both market and technical uncertainties. This evaluation comes to prove that, given the high levels of uncertainty present during the evaluation period, the evaluation should have considered to postpone the development decision until the year 2007.

At the end, the results of this thesis suggests that the long term contract between Codelco and MINMETALS for developing the Gabriela Mistral deposit was an optimal decision *ex-ante*. However, this decision was not optimal for the *ex-post* analysis in terms of NPV, due to the high copper prices seen in the last three years. However, this thesis considers that there are strategic factors, associated with investment restrictions, that indicate that this decision *ex-post* was still accurate, owing to the role Codelco plays in the Chilean society as a major state-owned copper company, which gives 100% of their profits to the Chilean state.

Real Options, Mina Gabriela Mistral, *ex-ante* evaluation, *ex-post* evaluation.

1. INTRODUCCIÓN

Minera Gabriela Mistral comenzó su desarrollo en el año 2006 mediante una alianza estratégica entre Codelco y MINMETALS. El contrato establecía la alianza entre ambas entidades mediante un *joint venture*. Copper Partners Investment Company Ltd. (CuPIC) se denominó a la sociedad constituida por estas dos compañías. Además, en este contrato se estableció que CuPIC pagaría inicialmente 550 MUS\$ para la inversión de Minera Gabriela Mistral. De éstos, Codelco y MINMETALS aportarían por partes iguales 110 MUS\$, y además MINMETALS adquiriría una deuda con el Banco de China por 330 MUS\$.¹ De acuerdo a lo anterior, los 550 MUS\$ que invertiría CuPIC para el desarrollo de Minera Gabriela Mistral implicarían un precio de venta del cobre implícito en el contrato de entre 1,03 y 1,05 US\$/lb. En el capítulo 4 se explica en detalle el cálculo asociado a la determinación del precio de venta implícito.

Es en respuesta al precio de venta del cobre implícito que la materialización del proyecto GABY ha causado gran revuelo en la opinión pública.² En efecto, continuos cuestionamientos asociados a si la asociación establecida con MINMETALS fue una buena decisión para el país han estado latentes. De hecho, desde que este proyecto fue materializado y se entregaron los embarques de cobre a MINMETALS la continua oposición se ha hecho presente. Lo anterior no es extraño, dado los altos precios que ha

¹ Se estableció que frente a aumentos en la inversión esta sería dividida en partes iguales para ambas entidades. De acuerdo a esto el precio implícito está sujeto a cambios relativos a la inversión finalmente materializada.

² En esta tesis se hablará indistintamente de Minera Gabriela Mistral o proyecto GABY.

registrado el cobre desde el año 2006, muy por sobre el precio de venta implícito en el contrato.

A modo de ejemplo, Jorge Schaulsohn, y Esteban Valenzuela – políticos chilenos – en abril del año 2008 hicieron públicas fuertes acusaciones, indicando que en el contrato entre Codelco y MINMETALS existían graves irregularidades, y a su vez dejaron en claro que este acuerdo representaba un daño a la industria nacional del Cobre, siendo un pésimo negocio para Chile.

“El convenio MINMETALS-Codelco es una venta de un porcentaje de “GABY”, disfrazado como contrato de la venta de cobre a largo plazo. Desde el punto de vista legal podría hablarse de un contrato simulado, esta empresa extranjera recibe cobre barato y usa el contrato para enterar capital del *joint venture* Codelco-MINMETALS. Codelco obtiene el financiamiento más caro de la historia y MINMETALS adquiere un porcentaje de una gigante mina a precio vil. Por esta vía los extranjeros adquieren el 24% de GABY y una extensión de compra por un 25% de compra adicional.”

Jorge Schaulsohn y Esteban Valenzuela. Conferencia de prensa. Santiago, Abril, 2008

En esta misma línea de oposición, en EXPOMIN 2008 el descontento volvió a hacerse presente. En este caso Francisco Costabal, presidente del Consejo Minero, y Carlos Mena, vicepresidente ejecutivo del Comité de Inversiones Extranjeras de la época, manifestaron su descontento asociado al establecimiento de la opción de venta de un porcentaje de la propiedad minera y al precio implícito en el contrato, respectivamente. El primero destacó una falta del directorio de Codelco al vender parte del yacimiento y el segundo hizo notar la brecha entre el precio de venta implícito pactado y el precio de registro en la Bolsa de Metales de Londres a la fecha de entrega de los cátodos.

"Es un problema político, no minero, la propiedad de la minería la deciden los dueños y los dueños somos todos los chilenos."

Francisco Costabal. EXPOMIN. Santiago, Abril, 2008

"No es lo mismo negociar la venta de una mina con el cobre a 1 US\$/lb que con un cobre a más de 4 US\$/lb. Hoy tiene un valor diferente al adoptado en un momento determinado y, según mis informaciones, se va a buscar un entendimiento con el gobierno chino para ver qué solución se le da al tema."

Carlos Mena. EXPOMIN. Santiago, Abril, 2008

La oposición al contrato no sólo fue reflejada en entidades externas a Codelco. De hecho, los propios trabajadores de la corporación indicaban que el proyecto GABY no debió haber involucrado una alianza estratégica. En esta línea, el Sindicato de Supervisores de División Codelco Norte, expone en junio del año 2008 que la decisión de Codelco de venta de largo plazo de cobre con el consecuente precio implícito no era un buen acuerdo, y en consecuencia todos los chilenos como dueños de la estatal habíamos sido afectados.

"El Directorio de Codelco no tenía ni tiene facultades para vender o enajenar yacimientos de expansión – al tenor de la ley N° 19.137 – como lo es la Mina Gaby."

"Escasa e incompleta es la información relacionada con la entrega de un crédito a Codelco por 550 MUS\$, en el marco del Acuerdo con MINMETALS. Se habla de complicados mecanismos, de estimaciones de precios, de compartir con MINMETALS, las pérdidas y las ganancias la operación."

"¿Por qué Codelco no contrató un crédito por 550 MUS\$ de la manera usual, en el mercado financiero internacional?"

SINDICATO DE SUPERVISORES CODELCO NORTE. Calama, Junio, 2008

Pero dentro de este acuerdo existe un factor fundamental que no se ha mencionado por parte de la oposición al acuerdo, y ésta corresponde a las restricciones de inversión asociadas a la empresa estatal Codelco. Codelco no puede invertir un porcentaje de sus utilidades con el fin de autofinanciar sus proyectos de inversión. En efecto el 100% de sus utilidades son repartidas como dividendos al estado de Chile. Luego, de acuerdo a lo

anterior, es el Estado quien decide cuál será el presupuesto asociado a inversión de esta empresa.³ En este sentido, la falta de libertad de acción de Codelco en su financiamiento hace que éste no pueda actuar como una empresa privada, que es capaz, por ejemplo, de emitir acciones en búsqueda de financiamiento ó someterse a tasas de endeudamiento competitivas en la industria, entre otras opciones de financiamiento.

Bajo el contexto anterior se enmarca el supuesto de esta tesis, la cual plantea que el acuerdo entre Codelco y MINMETALS por el desarrollo del proyecto GABY no fue un mal negocio para el país, y de hecho se espera que los retornos del mismo sean positivos. Además, se estima que si el acuerdo no se hubiese materializado, Minera Gabriela Mistral posiblemente no se hubiese desarrollado en lo absoluto. Luego, ciertamente si se quiere que los excedentes de Codelco sigan siendo destinados a fines públicos (educación, infraestructura, transporte y salud, entre otros) se deben sacrificar ciertos excedentes – en este caso los que recibió MINMETALS – por recibir año a año como país las utilidades que Codelco genera.

Esta tesis tiene por objetivo mostrar si Minera Gabriela Mistral fue una buena inversión para Chile. Para estos efectos, el estudio analiza de manera *ex-ante* y *ex-post* el contrato establecido ente Codelco y MINMETALS. La evaluación se realiza mediante la

³ Codelco utiliza como políticas de inversión la depreciación, la venta de activos (como pertenencias mineras) y el endeudamiento, el cual se encuentra acotado debido a un largo periodo de limitada capitalización estatal (Lüders, 2011).

Por otro lado es importante destacar el actual cambio de la política de inversión de Codelco. A las fuentes de financiamiento actuales se sumaría la capitalización ó reinversión de utilidades. Esta opción de financiamiento fue resuelta el 24 de junio del 2011 por el Poder Ejecutivo de Chile, donde se indicó que Codelco podrá Capitalizar el 20% de las utilidades del año 2010 (Larraín, 2011).

metodología de opciones reales para analizar el contrato asociado al desarrollo del proyecto GABY establecido entre Codelco y MINMETALS. En esta línea, Codelco, dueño de los derechos de explotación, antes de desarrollar el yacimiento, tuvo la opción pero no la obligación de llevar a cabo este proyecto de manera individual o mediante una alianza estratégica con MINMETALS. Si la opción de desarrollo del proyecto con inversión propia se hubiese ejecutado, Codelco debiese haber cubierto el 100% de la inversión, pero en este caso se tiene a su vez la flexibilidad de postergar la inversión.⁴ Por otro lado, la opción ejecutada de desarrollar el yacimiento mediante una alianza estratégica implicó la cobertura de un porcentaje de la inversión, con el consecuente acuerdo de asegurar una producción y precio implícito a CuPIC, además de que en este caso una vez pactado el acuerdo se renuncia a la flexibilidad de poder postergar el desarrollo del proyecto.

Es importante destacar que dentro de la aplicación de las opciones reales éstas toman mayor importancia en la valorización de proyectos marginales como es el caso de Minera Gabriela Mistral, ya que estos son más sensibles a cambios en las variables inciertas, ya sea leyes de cobre, recuperación metalúrgica, precios del cobre, costos de insumos o inversión. Estos proyectos, al ser evaluados mediante la metodología de Flujos de Caja Descontados, subvaloran el valor del proyecto ya que ignoran un importante hecho práctico: las decisiones de negocios pueden ser tomadas flexiblemente a medida que el proyecto avanza y la información se hace menos incierta. Luego, esta

⁴ Dado el carácter de entidad estatal de Codelco esto no es completamente cierto. Por esto, se discutirá en detalle este punto en capítulo 5.

tesis, al evaluar las incertidumbres no sólo de mercado sino que a su vez las propias de la operación, considera la tasa de descuento propia del inversionista. Y, a su vez, presenta los resultados considerando otras tasas de descuento. De acuerdo a lo anterior, la primera tasa de descuento corresponde a la tasa libre de riesgo, la segunda corresponde al *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) con que Codelco evalúa sus proyectos de inversión y, finalmente, la tercera se refiere a la tasa correspondiente a la posición de Minera Gabriela Mistral en la curva de oferta del año asociado a la evaluación del proyecto (2005).⁵ Es importante destacar que dentro de los alcances de la evaluación esta tesis no incluye la consideración de opciones asociadas a la capacidad óptima, restricciones ambientales y aumentos de capacidad, ya que la inclusión de estas opciones no permitiría el alineamiento con el análisis *ex-post*.

El análisis *ex-post* a su vez es complementado con la metodología tradicional de flujos de caja descontados. En esta línea esta tesis postula que una vez ejecutadas las decisiones los proyectos debiesen ser evaluados mediante la metodología de Flujos de Caja Descontados ya que en el caso de Minera Gabriela Mistral, Codelco ya ejerció la opción de establecer la alianza estratégica con MINMETALS, por lo que una vez pactado éste se renuncia a la flexibilidad de poder postergar el desarrollo del proyecto. Luego, esta tesis analiza el valor esperado de los flujos remanentes de Minera Gabriela

⁵ Debido a la falta de información de la curva de oferta correspondiente al año 2005 la curva utilizada es la del año 2003. La utilización de la curva de oferta del año 2003 no altera los resultados debido a que comparando los *cash cost* promedios de la industria (C1) durante los años 2003-2005 estos son del orden de 10 cUS\$2010/lb, a diferencia de lo que sucedió el año 2006, donde los costos promedios aumentaron respecto al año 2005 en 20 cUS\$2010/lb.

Mistral, notando si el proyecto fue una decisión acertada para Codelco y para MINMETALS, analizando de esta manera si la alianza estratégica fue valiosa para ambas empresas, y en esta línea se extiende el análisis a si fue una buena decisión a nivel país.

La estructura de esta tesis es la que se detalla a continuación. En el capítulo 2 se exponen las técnicas de evaluación para proyectos de inversión, donde se presenta por un lado la metodología de Valor Presente Neto más otros indicadores en esta línea, y por otro, la evaluación mediante opciones reales y su aplicación en la toma de decisiones en minería. En el capítulo 3 se describe el Mercado del cobre previo al establecimiento del contrato entre Codelco y MINMETALS. El capítulo 4 presenta las consideraciones establecidas en el contrato entre Codelco y MINMETALS de acuerdo a los objetivos que perseguían ambas entidades. El capítulo 5 en tanto, presenta el análisis *ex-ante* y *ex-post* asociado al desarrollo de Minera Gabriela Mistral por parte de Codelco, mediante la metodología de opciones reales, además de presentar el contexto en el cual están inmersas las decisiones de inversión de esta empresa estatal – lo que ciertamente impacta en la flexibilidad de los proyectos de inversión de esta compañía. Además en este capítulo se presenta el análisis *ex-post* mediante la metodología tradicional de Flujos de Caja Descontados, una vez establecido el contrato entre Codelco y MINMETALS. Finalmente el capítulo 6 contiene las conclusiones de la evaluación contrastando el análisis *ex-ante* y *ex-post*.

2. TÉCNICAS DE EVALUACIÓN

La valorización de proyectos es un tema clave en cualquier empresa y su análisis repercute en las decisiones que se toman en éstas. La creación de valor y el asegurar flujos positivos en el futuro requiere conocer en detalle hoy los sucesos en un futuro que es por naturaleza incierto. No se puede predecir el futuro, pero ciertamente el pasado sí representa tendencias históricas que nos permiten realizar aproximaciones de lo que podría pasar. En este contexto incierto la mayoría de evaluaciones y decisiones que toman los *senior managers* utilizan criterios determinísticos. En este sentido, el criterio más utilizado de evaluación dentro del proceso de la toma de decisiones es la regla de Flujos de Caja Descontados (DFC, de acuerdo a su sigla en inglés *Discounted Cash Flow*) o Valor Presente Neto (VPN). Estas reglas consideran que un proyecto debe ser materializado sólo si sus flujos de caja futuros descontados a la tasa de riesgo del proyecto poseen valor positivo. Esta técnica, sin embargo, no captura de forma efectiva y dinámica el valor de la flexibilidad asociada a adaptarse y reformular las decisiones a medida que el proyecto avanza y la información se hace menos incierta (Dixit y Pindyck, 1994).

El VPN nos muestra un escenario estático, donde la estructura de evaluación fija todos los parámetros asociados a la operación del proyecto, tales como precios, costos, tasa de descuento y, en definitiva, la proyección de los flujos. Luego, en este sentido, se ignora una importante realidad: las decisiones estratégicas en muchas industrias y situaciones pueden incluir la flexibilidad a través de postergación, abandono, expansión o

materialización secuencial, que en efecto constituyen opciones reales que deben considerarse en la evaluación.

Los mercados actuales distan de ser estáticos, lo que es particularmente cierto en los mercados de *commodities* minerales. De hecho, tal como muestra la Figura 2-1, la tendencia en los precios de 6 *commodities* minerales – cobre, estaño, aluminio, níquel, oro y plata – en los últimos 10 años dista de ser constante. Luego, el dinamismo de los mercados es un hecho, y por tanto, los flujos de caja descontados determinísticos que se utilizaron en la evaluación de los activos mineros difieren de lo que inicialmente fue previsto. Reconocer el uso de opciones reales puede ayudar significativamente a los responsables de tomar las decisiones, dado que esta metodología captura de mejor manera el valor de un proyecto, al incluir funciones de probabilidad asociadas a los parámetros inciertos y la flexibilidad presente en cualquier proyecto al ser evaluado e incluso después de haber sido puesto en marcha.

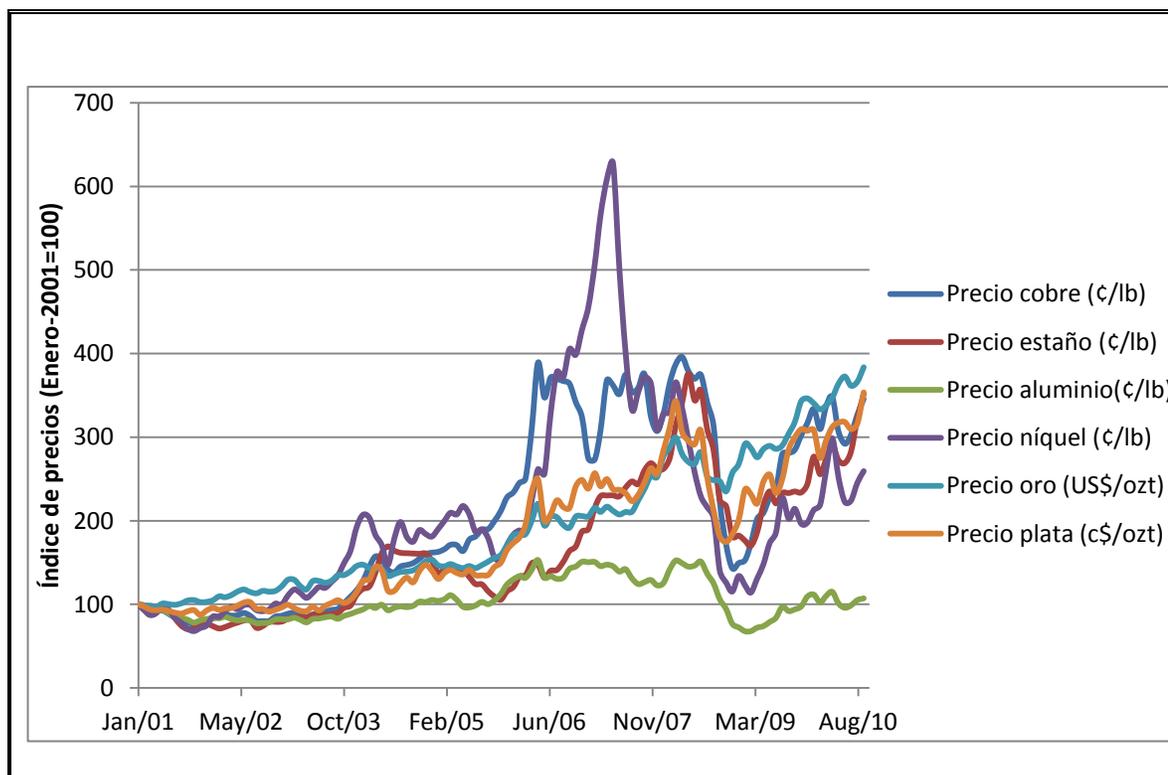


Figura 2-1: Volatilidad del precio de los *commodities* minerales (2001-2010)

Fuente: Elaboración propia en base a datos de precio de Cochilco

Las opciones reales son especialmente importantes de considerar en proyectos con alto grado de incertidumbre.⁶ Luego, a medida que la información se conoce y la incertidumbre acerca de las condiciones de mercado y de los futuros flujos de caja es parcial o totalmente resuelta, se pueden considerar otras alternativas de operación en orden de aumentar las ganancias y minimizar las pérdidas (McDonald y Siegel, 1986).

⁶ Una de las mayores incertidumbres en los yacimientos de cobre es la incertidumbre geológica, el grado de conocimiento que se tenga sobre ésta es un *input* estratégico en el proceso de evaluación de la explotación del yacimiento cuprífero. En efecto, la estimación de recursos asociados a compósitos no sondeados utiliza como medida de estimación la media de *Kriging* Simple, lo cual cambia una vez que el yacimiento es explotado y se tiene acceso a mayor profundidad para la realización de los sondeos.

Luego, es en el momento de la toma de las nuevas decisiones que las alternativas se hacen presentes.

Si bien la metodología de las opciones reales es una metodología más adecuada que la metodología de flujos de caja descontados, esta metodología – más allá de basarse en la construcción de un *portfolio* libre de riesgo a través de derivados financieros – debe considerar la inclusión de características específicas asociadas al proyecto en particular. Las posibles leyes del yacimiento, la recuperación metalúrgica del mineral, la capacidad óptima de procesamiento, las restricciones ambientales y/o gubernamentales, entre otras incertidumbres, son factores que impactan en la evaluación y por tanto deben ser considerados e incorporados (Babajide, 2007).

Las opciones confieren a los tomadores de decisiones el derecho a comprar o vender un activo a un precio determinado en una ocasión, la cual puede estar restringida por una fecha de caducidad en particular (*expiry date*). Dado que las opciones dependen de la incertidumbre asociada al activo subyacente adquirido, el dueño debe decidir ejercer la opción de acuerdo a cómo ésta ha evolucionado desde que fue adquirida. En esta tesis en particular se hace referencia a cómo al considerar una opción automáticamente se captura el valor de la flexibilidad (Brennan y Schwartz, 1985), y a su vez abre las puertas a nuevas opciones que deben ser consideradas. Es importante destacar que existen variados estudios de cómo la consideración de una opción involucra nuevos escenarios con nuevas opciones (McDonald & Siegel, 1986, Pindyck, 1988 y Trigeorgis,

1991, entre otros). En general, las opciones compuestas involucran inversiones por etapas secuenciales, es decir, la realización de la primera inversión da el derecho, pero no la obligación, de realizar una segunda inversión, la cual a su vez confiere el derecho de hacer una tercera, generándose un proceso iterativo.

Las inversiones por etapas dan a sus dueños la opción de abandonar o aumentar la escala del proyecto. Dentro de este mismo contexto, en industrias cíclicas, mantener la rentabilidad de las inversiones es importante saber en qué punto del ciclo económico ejercer las opciones de inversión, luego una pregunta es cómo se puede determinar *ex-ante* cuál es el momento preciso de concretar la inversión y saber en qué momento del ciclo se está. Luego, dentro de un ciclo económico, el momento adecuado para iniciar la explotación de un yacimiento de cobre, plata u oro, ó de cualquier otro metal transado globalmente, varía a causa de diferencias de la duración de los ciclos económicos en los cuales estos *commodities* están insertos. Dadas estas condiciones cíclicas es que la flexibilidad toma una mayor importancia, generando opcionalidad en la toma de decisiones a través de inversiones secuenciales, o restringiendo estas mismas para luego, una vez que la incertidumbre es resuelta, extenderlas.

Los activos mineros en particular poseen diferentes opciones dentro de su evaluación, pues se tiene que decidir cuándo llevar a cabo el desarrollo de estos y su respectiva capacidad de producción, además de considerar que el desarrollo de una operación puede implicar dejar de desarrollar otra. La presencia de estas opciones implica que se

tiene una serie de decisiones anidadas y que ejecutar una de estas opciones implica dejar de llevar a cabo otra, ó abrir nuevas opciones. A modo de ejemplo, considérese la opción de realizar nuevos sondajes para estimar de mejor manera el tamaño del recurso y la opción de iniciar el desarrollo del yacimiento, dado que se estima que los precios tenderían a subir en el futuro. Luego, estas dos opciones son contrapuestas, debido a que si se desea continuar con la prospección geológica, ciertamente no se puede iniciar el desarrollo del yacimiento. En este sentido, por un lado la primera opción permite a la empresa tener una mayor certeza sobre la calidad del mineral *in-situ*, despejando en cierto grado la incertidumbre geológica, pero, por el otro lado, incapacita ejecutar la segunda opción. Luego, se podría entrar al mercado en un ciclo económico de menores precios y dejando de ganar los primeros años – lo que causa un mayor impacto en los flujos del proyecto. De aquí, la teoría de las opciones reales se puede utilizar para conocer cuál opción debiese ser ejercida, además del *timing* óptimo de entrada.

Ciertamente, como estos ejemplos existen muchas otras opciones asociadas a la inversión en minería, donde destacan la opción de detener un proyecto, disminuir la capacidad de procesamiento, aumentar la capacidad de procesamiento, reabrir un yacimiento o abandonarlo. Estas últimas dos opciones fueron estudiadas por Brennan, & Schwartz, 1985, pero estas consideraron que la replicación dinámica de *portfolios* mediante opciones financieras en proyectos minero se puede realizar. Si bien este parece un supuesto válido, esta tesis considera que dista de ser real, ya que para capturar el verdadero valor de una opción real asociada a un activo subyacente minero se deben

incorporar todos los riesgos asociados a las opciones del negocio minero, y por tanto no puede ser replicada mediante un *portfolio* de un mercado completo ni tampoco ser descontada a la tasa de libre riesgo (Smit y Trigeorgis, 2004). Sumado a lo anterior, no existen transacciones en el mercado financiero por periodos tan amplios como lo que consideran en su evaluación ciertos proyectos mineros.⁷

Dadas las condiciones anteriores, esta tesis evalúa si la opción de inversión en Minera Gabriela Mistral fue una buena decisión considerando la metodología de las opciones reales en la línea de la programación dinámica (Dixit y Pindyck, 1994), la cual se basa en que el valor de un activo es calculado a través de *backward induction* y una tasa exógena. En este sentido, Dixit y Pindyck (1994), postulan que la tasa de descuento a ser utilizada puede estar alineada de acuerdo al criterio del inversionista, ya que ésta refleja el costo de oportunidad del capital para las inversiones de riesgo similar. En línea con lo anterior, esta tesis considera la respectiva evaluación mediante una tasa exógena correspondiente al *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) con que Codelco evalúa sus proyectos de inversión,⁸ y a su vez se extiende el análisis mediante una segunda tasa exógena asociada al posicionamiento de Minera Gabriela Mistral en la curva de costos de la industria.

⁷Cortázar *et al*, 2008 proponen un modelo multicommodity de precios futuros para explicar el comportamiento estocástico de más de un *commodity*. La modelación conjunta de más de un *commodity* tiene la ventaja de ser capaz de utilizar los precios futuros de largo plazo de un *commodity* para la estimación de los precios de otro *commodity* con precios futuros de corto plazo. Aún así, para el caso particular el cobre, es este *commodity* el que posee los contratos de largo plazo con mayores periodos de transacción (123 meses) dentro de la bolsa de metales de Londres.

⁸El WACC mide el promedio ponderado de las diferentes fuentes de financiamiento de una empresa, tanto de deuda (D) como capital (E), permitiendo establecer la cantidad de interés que la compañía tiene que pagar por cada dólar que financia. La ecuación del WACC que pondera las diferentes fuentes de financiamiento es la siguiente: $WACC = \frac{D}{E+D} \cdot (1 - \tau) \cdot r_D + \frac{E}{E+D} \cdot r_E$ (Ezzell y Miles, 1980).

Las técnicas de evaluación asociadas a proyectos de inversión analizadas en esta tesis son dos. La primera corresponde al método tradicional del análisis de proyectos mineros, es decir, la metodología de flujos de caja descontados. La segunda, en tanto, corresponde a la evaluación mediante la metodología de opciones reales. Ambas técnicas son presentadas a continuación, y serán claves en el análisis *ex-ante* y *ex-post* asociado a la inversión en Mina Gabriela Mistral.

2.1 Valor Presente Neto

La técnica del Valor Presente Neto (VPN), considera en primer lugar el valor de los flujos del proyecto – ingresos ($Ingresos_t$) menos costos ($Costos_t$) – para cada periodo considerado en la evaluación; luego, trae a valor presente estos flujos a través de una tasa de descuento propia del proyecto, donde se replica el riesgo de llevarlo a cabo. Finalmente, se descuentan a estos flujos la inversión actualizada del proyecto ($Inversión_T$). Si estos flujos descontados menos la inversión son mayores que cero ($VPN > 0$) el proyecto es atractivo y por tanto debiese ser materializado, en caso contrario ($VPN < 0$) el proyecto no debiese realizarse. La fórmula (2.1), a continuación, presenta la estructura del valor presente neto.

$$VPN = \sum_{t=0}^T \frac{Ingresos_t - Costos_t}{(1+r)^t} - Inversión_T \quad (2.1)$$

Donde T corresponde a todo el periodo de evaluación del proyecto, t en tanto corresponde a cada periodo a ser evaluado (años). Por otro lado, los ingresos menos los costos: $Ingresos_t - Costos_t$ corresponden al flujo de caja estimado para cada periodo, r es la tasa de descuento del proyecto y finalmente el término $Inversión_T$ es la

inversión asociada a la materialización del proyecto. El valor positivo de este índice indica que el proyecto debe ser ejecutado; en efecto, según esta metodología, a mayor VPN más atractivo es el proyecto. En esta línea, las consideraciones en las que se basa el valor estimado de los flujos descontados cobra relevancia, es decir, cuál es la tasa a la que se debe descontar, cuál ó cuáles serán las variables críticas de los ingresos y de los costos.

En línea con lo anterior, en los proyectos mineros las variables críticas de mercado son los precios del (o los) *commodity* (es) mineral (es) a ser extraído (s), el costo operacional dado que refleja la competitividad del yacimiento frente a la industria (Tilton, 1977), la inversión que debe ser ejecutada para realizar el proyecto y la tasa de descuento que el inversionista considera para el proyecto.

Dentro del análisis tradicional de evaluación económica, la Tasa Interna de Retorno (TIR) es otro de los indicadores más usados. Este indicador determina la tasa a la cual el VPN del proyecto adquiere un valor nulo. Luego, a una mayor TIR mejor es el proyecto. La fórmula 2.2 presenta la ecuación asociada a este indicador y su relación con los flujos de caja descontados.

$$\sum_{t=0}^T \frac{\text{Ingresos}_t - \text{Costos}_t}{(1+r)^t} - \text{Inversión}_T = 0 \quad (2.2)$$

Finalmente, un tercer indicador utilizado dentro de la evaluación económica tradicional corresponde al Índice del Valor Actual Neto (IVAN), el cual corresponde a la razón

entre VPN y la inversión, indicando así el retorno que genera cada peso invertido (véase fórmula 2.3).

$$IVAN = \frac{VPN}{I} \quad (2.3)$$

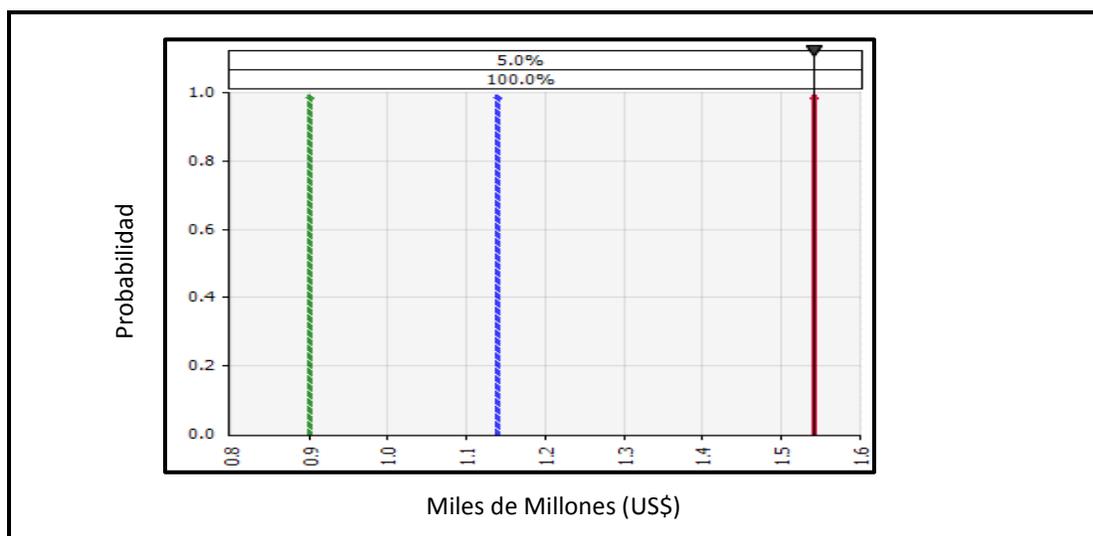


Figura 2-2: Evaluación mediante VPN y análisis de sensibilidad de las variables

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Figura 2-2 muestra a modo de ejemplo el Valor Presente Neto de un proyecto minero. En este caso el VPN estimado de forma determinística es de 900 MUS\$, 1.134 MUS\$ y 1.550 MUS\$, para tasas de descuento de 10%, 8% y 4%. De esta forma, la evaluación de proyectos considera que si un proyecto es rentable – evaluado a través del indicador TIR – éste debiese ser materializado.

2.2 Opciones Reales

Uno de los mayores problemas para los modelos existentes en la evaluación de proyectos es que ignoran tres características vitales en la evaluación de inversiones (Dixit y Pindyck, 1994; Smit y Trigeorgis, 2004).⁹ La primera de ellas se refiere a que los gastos de inversión son irreversibles, ya que la mayoría de ellos tiene asociados un costo hundido que no se puede recuperar. La segunda se relaciona a que las inversiones pueden ser postergadas, abriendo la posibilidad a los inversionistas esperar a nueva información acerca de los precios, costos u otras condiciones de mercado. Finalmente, la tercera se refiere a que las inversiones son opcionales, ya que se tiene el derecho pero no la obligación de materializarlas. En esta línea, la literatura (Dixit y Pindyck, 1994) ha demostrado que la capacidad de postergar una inversión irreversible impacta en la decisión de invertir, lo que conlleva a que la metodología de flujos descontados no sea la más útil para evaluar proyectos de inversión dado que esta considera que la inversión debe materializarse si el valor presente de los flujos de caja es mayor a cero.

El hecho de que los proyectos de inversión sean irreversibles hace que estos sean susceptibles al contexto incierto en el cual se desarrollan. La incertidumbre por tanto es un factor crítico que debe ser considerado en la evaluación (incertidumbre en los precios, costos, tasas de interés y variables técnicas del proyecto) ya que permite tomar

⁹ En la línea de análisis mediante la metodología de opciones reales preguntas como: ¿Cuándo es mejor "esperar y ver" para beneficiarse de la resolución de la incertidumbre del mercado?, ¿Cuándo la empresa debe proceder por etapas?, ¿Debe la firma competir en I&D ó considerar una búsqueda conjunta con otras compañías de la industria? y/o ¿Es una la alianza estratégica la forma más adecuada de realizar un proyecto? (Smit y Trigeorgis, 2004) pueden ser resueltas ya que considera la incertidumbre y la flexibilidad de las decisiones.

las decisiones de forma flexible. Una oportunidad de inversión irreversible es como una opción financiera *call*, ya que este instrumento financiero da al dueño la opción, pero no la obligación, por un periodo de tiempo, de pagar a un precio de ejercicio (K) y a cambio recibir un activo que tiene un valor dado (S).

En el caso de una firma en particular, si ésta tiene una oportunidad de inversión puede invertir cierta cantidad de dinero (precio de ejercicio) ahora o en el futuro, y en retorno recibir un proyecto (activo) de cierto valor. Tal como la opción financiera, esta opción real es valiosa porque el valor futuro del activo obtenido a través de la inversión es incierto. Si el activo sube de precio, el pago neto asociado a la inversión aumenta. En caso contrario, si el precio del activo baja la firma no debe llevar a cabo la inversión y por tanto sólo perderá lo que gastó en obtener la oportunidad de inversión.

Cuando una firma realiza un gasto en una inversión irreversible, ejerce su opción de invertir, renunciando por tanto a la posibilidad de esperar nueva información afectando la conveniencia o el *timing* de realizar el gasto. En este caso ya no se puede retroceder (o retirar el capital invertido) a pesar de que las condiciones de mercado cambien repentinamente. Este hecho cambia por tanto el planteamiento de cómo se debe valorizar un proyecto, ya que el valor de la opción perdida es un costo de oportunidad que debe ser incluido como parte del costo de inversión (valor de la *call*). Luego, la forma de valorizar un proyecto debe ser calculada tal que el valor esperado del VPN menos el valor de mantener viva la opción de inversión sea mayor o igual a cero (Dixit y Pindyck,

1994). Es en esta condición donde radica el mayor valor de considerar a los proyectos como una opción real, ya que el mantener la opción viva permite incluir la incertidumbre a la cual están expuestos los mercados.

De acuerdo a lo anterior, el valor esperado del VPN debe ser tal que se considera el dinamismo de los mercados, pasando a ser un VPN dinámico, el cuál es igual al valor esperado del VPN estático (o pasivo) más el valor de la flexibilidad reflejada en la opción (véase fórmula 2.4)

$$E(VPN_{dinámico}) = E(VPN_{estático}) + \text{valor opción} \quad (2.4)$$

De forma de evaluar la relación anterior considérese un ejemplo de dos periodos:

Sea una mina de cobre cuyo costo de inversión (I) es (6.000 US\$), la mina puede ser construida de forma inmediata, con la respectiva producción de un cátodo de cobre al año. Actualmente, el precio de un cátodo de cobre es de 600 US\$, pero el próximo año este precio puede cambiar. Con probabilidad q (0,5) este precio puede aumentar a 700 US\$ y con probabilidad $1 - q$ (0,5) puede disminuir a 500 US\$, quedándose en el último estado a perpetuidad (véase Figura 2-3). Asumiendo que el riesgo es completamente diversificable, el proyecto se puede descontar a la tasa libre de riesgo, que será en este ejemplo 10%.

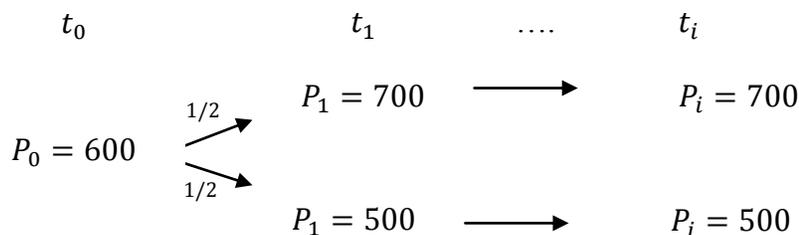


Figura 2-3: Estados posibles del precio, producción de un cátodo de cobre

Fuente: Elaboración propia

Luego, ¿es ésta una buena opción de inversión?, ¿es conveniente invertir ahora o es mejor esperar y ver el comportamiento de los precios? Para responder a estas dos preguntas considérese que la inversión se realiza hoy por lo que la estructura de cálculo es la siguiente:

$$VPN_1 = -6.000 + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{600}{1,1^t} = 600 \text{ US\$} \quad (2.5)$$

Dado que el valor presente es positivo convendría invertir hoy. Pero este cálculo ignora la opción de postergar la inversión hacia el próximo año donde se mitigaría la incertidumbre de los precios. Luego considérese que la inversión se materializa el año 1 sólo si los precios suben, obteniéndose la siguiente estructura:

$$VPN_2 = 0,5 \cdot \left[-\frac{6.000}{1,1} + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{700}{1,1^t} \right] = 773 \text{ US\$} \quad (2.6)$$

El resultado anterior indica que es mejor esperar a resolver la incertidumbre de los precios antes de invertir.¹⁰ Pero, ¿cuánto vale tener la flexibilidad de realizar la inversión

¹⁰ Nótese que si no existiese la opción de esperar convendría realizar la inversión hoy, lo que no invalida la ecuación 2.4 ya que el valor de la opción se hace cero y el VPN dinámico es igual al estático haciéndose presente la regla del VPN si la opción es cero. En línea con la opción de postergar se destaca que los años 2004-2005 en el mercado del cobre estuvieron caracterizados por una fuerte incertidumbre en el

el próximo año en vez de hoy? Nótese que el VPN_1 no considera la opción de postergar el proyecto, luego éste es un VPN estático – a diferencia del VPN_2 que sí considera la opción de postergar la inversión. Por lo tanto, el valor de la flexibilidad es el valor que la ecuación 2.6 representa a través de la opción. Luego restando VPN_2 con VPN_1 se puede calcular el valor de la opción – y por tanto de la flexibilidad – el cual es de 173 US\$.

La opción de inversión es análoga a una opción financiera *call*. Tal como se describió previamente, el poseer una *call* da al dueño el derecho, pero no la obligación, por un periodo de tiempo, de realizar una inversión (precio de ejercicio de la opción) y a cambio recibir un proyecto (activo subyacente) cuyo valor varia de forma estocástica. De acuerdo al ejemplo anterior, si los precios en t_1 aumentan se ejerce la opción pagando 6.000 US\$ y recibiendo a cambio un activo cuyo valor en t_1 será de 7.700 US\$, en el caso de que el precio disminuyera la opción no se ejercería.

La replicación del *portfolio* libre de riesgo a través de activos financieros es la primera aproximación a la toma de decisiones de inversiones mediante la metodología de las opciones reales. Luego, el ejercicio anterior se puede evaluar a través de la metodología estándar de opciones financieras; este cálculo se presenta a continuación:

crecimiento esperado de la demanda y por tanto del valor esperado de los precios, los cuales tendían al alza a comienzos del año 2006, de acuerdo a esto Minera Gabriela Mistral se podría considerar sensible a la opción de postergar.

Sea F_0 el valor hoy de la oportunidad de inversión, es decir, cuánto estaría dispuesto hoy para tener la opción de invertir en una mina de cátodos de cobre. De forma análoga F_1 corresponde a esta opción el próximo año. F_1 es una variable aleatoria, ya que su valor depende de lo que ocurra con el precio del cátodo de cobre. Luego, si el precio aumenta esta variable adquiriría el valor de 1.700 US\$.¹¹ En caso contrario, si el precio disminuye, F_1 adquiriría el valor de cero ya que no se pagaría por el derecho de tener la opción de inversión. Para cuantificar el valor de F_0 es necesario crear un *portfolio*, el cual debe considerar la opción de inversión y cierto número de cátodos de cobre. Se escoge un número n de cátodos de cobre tal que el *portfolio* sea libre de riesgo, es decir el valor de éste en t_1 es independiente del precio del cátodo, luego se obvia la volatilidad del precio (aumento o disminución); dada esta condición la tasa de retorno corresponde a la tasa libre de riesgo.

Luego, considérese un *portfolio* en el cual se sostiene la oportunidad de inversión, y se está corto por n cátodos en el mercado de futuros. El valor de este *portfolio* hoy es de $\phi_0 = F_0 - n \cdot P_0$. Por otro lado, el valor en tanto para el próximo año es de $\phi_1 = F_1 - n \cdot P_1$. En el caso de que el precio suba (700 US\$) el valor de $\phi_1 = 1.700 - 700 \cdot n$. Si el precio baja (500 US\$) el valor de $\phi_1 = -500 \cdot n$, dado que $F_1 = 0$. Como n debe ser tal que el *portfolio* sea libre del riesgo de la volatilidad de los precios, entonces se debe cumplir que ϕ_1 debe tener el mismo valor tanto para un escenario de precios altos como bajos ($\phi_1 = 1.700 - 700 \cdot n = -500 \cdot n$). Luego n

¹¹ La obtención de este cálculo es la perpetuidad de la venta del cátodo de cobre menos la inversión que se tuvo que realizar para su obtención de acuerdo a la siguiente relación $\sum_0^{\infty} \frac{700}{1.1} = 6.000$.

debiese ser equivalente a 8,5, con lo que ϕ_1 adquiere un valor de -4.250 US\$, independiente si el precio sube o baja. Ahora bien, el tener el *portfolio* libre de riesgo tiene asociado un retorno, este corresponde a la ganancia de capital ($\phi_1 - \phi_0$), menos el pago que se debió efectuar para obtener la posición corta ($n \cdot P_0 \cdot r$). Dado que el valor esperado del precio del cátodo de cobre es 600 US\$ ($E(P_0) = E(P_1)/(1+r) = (700 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 500)/1,1$),¹² la tasa de retorno sobre el capital debe ser cero, ya que de no ser cero, no se tendría la contraparte de posición corta. Por lo tanto vender una posición corta de cátodos de cobre requerirá un pago de 60 US\$ ($P_0 = 600 \cdot 0,1$). Luego, como se compraron 8,5 cátodos de cobre, entonces la posición corta tiene un costo de 510 US\$.

En línea con lo anterior, el mantener el *portfolio* por el año corresponde al retorno dado por: $\phi_1 - \phi_0 - 510$, lo que equivalente a: $\phi_1 - (F_0 - n \cdot P_0) - 510$, con $\phi_1 = -4.250$ US\$, $n = 8,5$ y $P_0 = 600$, evaluando se obtiene que el retorno es $340 - F_0$.

Dado que este retorno es libre de riesgo, ϕ_0 debe retornar a esta tasa, $((F_0 - 5100) \cdot 0,1 = 340 - F_0)$, lo que implica que F_0 tenga un valor de 773 US\$. Lo que es análogo a lo previamente presentado en el cálculo de VPN_2 .

¹²Nótese que en este cálculo las probabilidades utilizadas, no son las probabilidades ajustadas por riesgo, las que se obtiene sabiendo que el activo subyacente en el año 1 debe retornar a la tasa libre de riesgo. Luego la relación es tal que: $\frac{E(P_1)}{1+r} = E(P_0)$, reemplazando en los valores del ejemplo $\frac{700q+500(1-q)}{1+0,1} = 600$, donde $p = 0,8$ y $(1-p) = 0,2$.

El ejemplo anterior muestra que existe un valor asociado a una oportunidad de inversión cuando esta es irreversible y los retornos son estocásticos en el tiempo. Pero ciertamente este es un ejercicio simplificado que difiere significativamente de la realidad.¹³ Una evaluación real debe considerar diferentes variables sujetas a incertidumbres, no sólo el precio del cobre, sino que debe considerar además la incertidumbre en los costos operacionales, las leyes del yacimiento, la recuperación metalúrgica y la inversión, entre otras.¹⁴ Es importante destacar en la línea de replicación de *portfolios* que existen incertidumbres propias del yacimiento que difícilmente pueden ser replicadas, dada las características particulares del yacimiento y la imposibilidad de replicar el riesgo en el mercado.

¹³ Los supuestos utilizados no corresponden a la evaluación real de los proyectos mineros. El ejemplo consideró que el precio se mantenía constante desde el año 1, eliminando la incertidumbre precio a partir de ese periodo. De acuerdo a esto el Anexo 1 detalla la opción de inversión en tiempo continuo. Por otro lado el ejemplo presentado consideró una producción unitaria e inmediata.

¹⁴ Esta tesis considera que la inversión no es fija y sigue una distribución de probabilidades, esto se debe a que ésta está directamente relacionada al instante de tiempo en el cual fue estimada y realmente materializada (ingeniería de factibilidad y fin de la construcción) el cual depende del ciclo económico en el cual se hicieron ambas evaluaciones.

3. MERCADO DEL COBRE

El contrato establecido entre Codelco y MINMETALS fue materializado el 22 de febrero de 2006. Luego, es importante considerar el contexto del mercado del cobre – oferta, demanda y precios – en el cual este contrato fue evaluado. Esta tesis considera como base del análisis el periodo 1995-2005, ya que de esta manera se contextualiza que sucedía en el mercado del cobre durante la última década antes de ser materializado el contrato.

La producción mundial de cobre refinado durante el periodo 1995-2005 creció a una tasa compuesta anual de 3,5%, pasando de 11,83 millones de toneladas de cobre refinado al inicio del periodo (1995) a 16,61 millones de toneladas al cierre de éste (2005). Esta producción durante todo el periodo de análisis provino principalmente de la producción de cobre mina, la cual mantuvo su cuota de participación de la producción de cobre refinado entre 84,5% y 92,7%. La Figura 3-1 muestra la producción de cobre mina y producción secundaria, las cuales conforman la oferta de cobre refinado a nivel mundial. Se destaca que los años 2002 y 2003 fueron decrecientes en producción y el año 2002 en particular fue un año crítico en cuanto a precios se refiere, registrando un mínimo histórico de 85,6 cUS\$2010/lb.¹⁵ Los 10 principales países productores de cobre mina en el año 2005 constituían el 83% de esta producción, y Chile presentaba más de 1/3 de ésta (véase Figura 3-2), donde Codelco se posicionaba como la principal compañía

¹⁵ Este mínimo histórico considera como referencia los precios registrados entre 1950-2010.

productora – en cuanto a producción equivalente se refiere – con una producción de 1,83 millones de toneladas de cobre fino.¹⁶

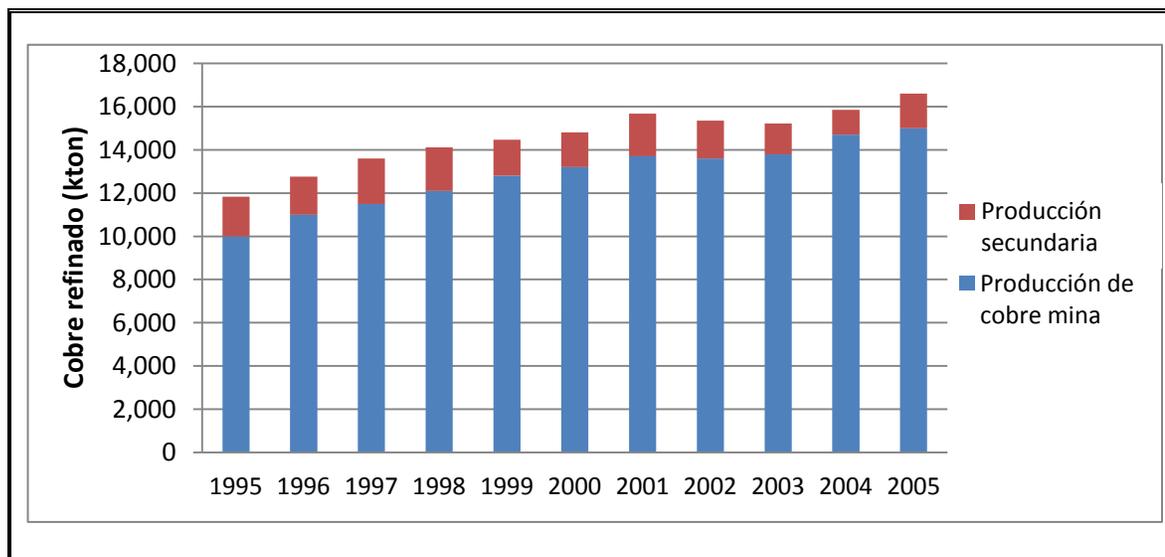


Figura 3-1: Producción de cobre refinado, 1995-2005

Fuente: World Bureau of Metal Statistics (WBMS), Cochilco

¹⁶ Si se consideran las principales compañías productoras de cobre para el año 2005 como compañías controladoras, Codelco ocupa el segundo lugar después de BHP Billiton, debido principalmente a que esta última adquiere el porcentaje de participación de Río Tinto y Mitsubishi Corporation en Mina Escondida Ltda. y, por otro lado, Codelco pierde su participación de 49% de la mina El Abra.

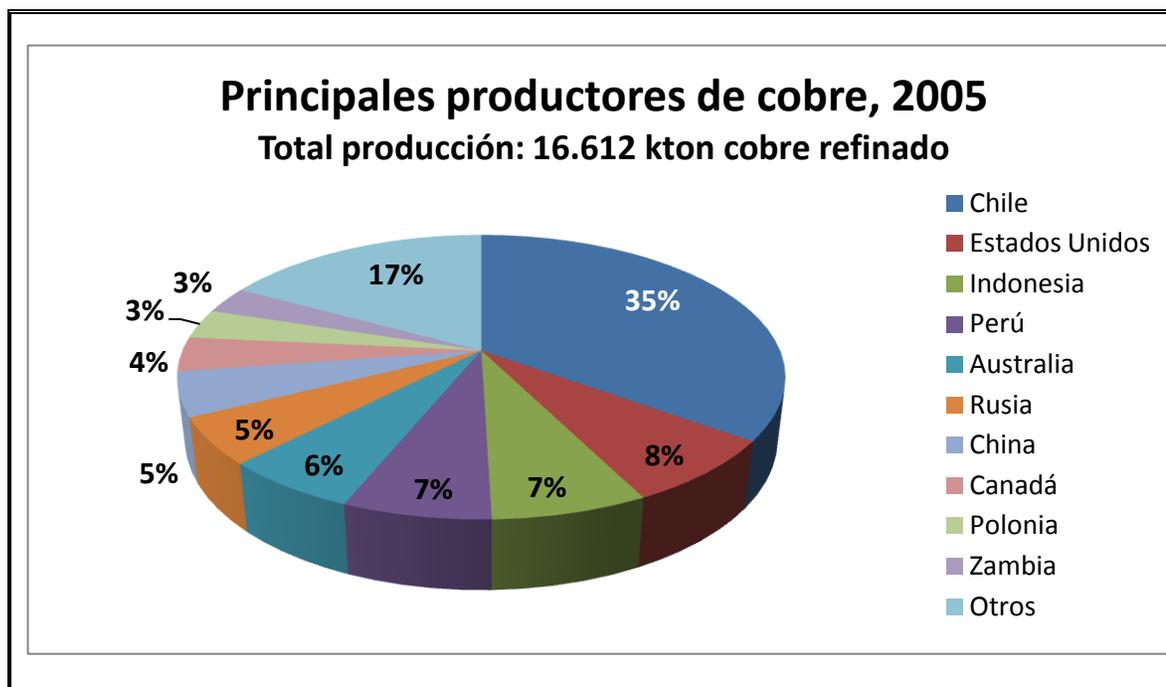


Figura 3-2: Principales países productores de cobre mina, 2005.

Fuente: World Bureau of Metal Statistics, Cochilco

En cuanto a demanda mundial se refiere, durante el periodo 1995-2005 ésta registro una tasa de crecimiento compuesto anual de 3,1%, pasando de un consumo de 12,15 millones de toneladas de cobre refinado en 1995 a 16,77 millones de toneladas en año 2005. En este periodo es importante destacar que los años 2000 y 2004 fueron los que registraron mayores tasas de crecimiento respecto al año que los anteceden, registrando tasas de crecimiento de 8,1% y 8,8%, respectivamente. La Figura 3-3 presenta el comportamiento del consumo de cobre para el periodo 1995-2005.

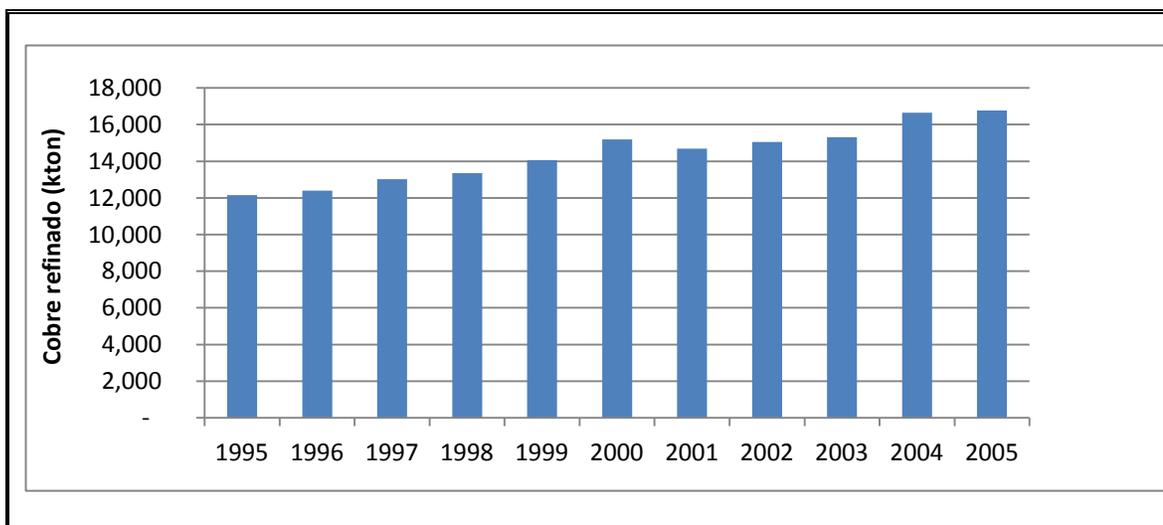


Figura 3-3: Consumo de cobre refinado, 1995-2005.

Fuente: World Bureau of Metal Statistics, Cochilco

De forma de visualizar el año 2005 en particular y ver las futuras tendencias en la demanda, la Figura 3-4 muestra quiénes fueron los principales países consumidores para el año 2005. Esta figura es de suma relevancia, ya que permite establecer que economías pueden estimular, mantener o disminuir el consumo mundial.

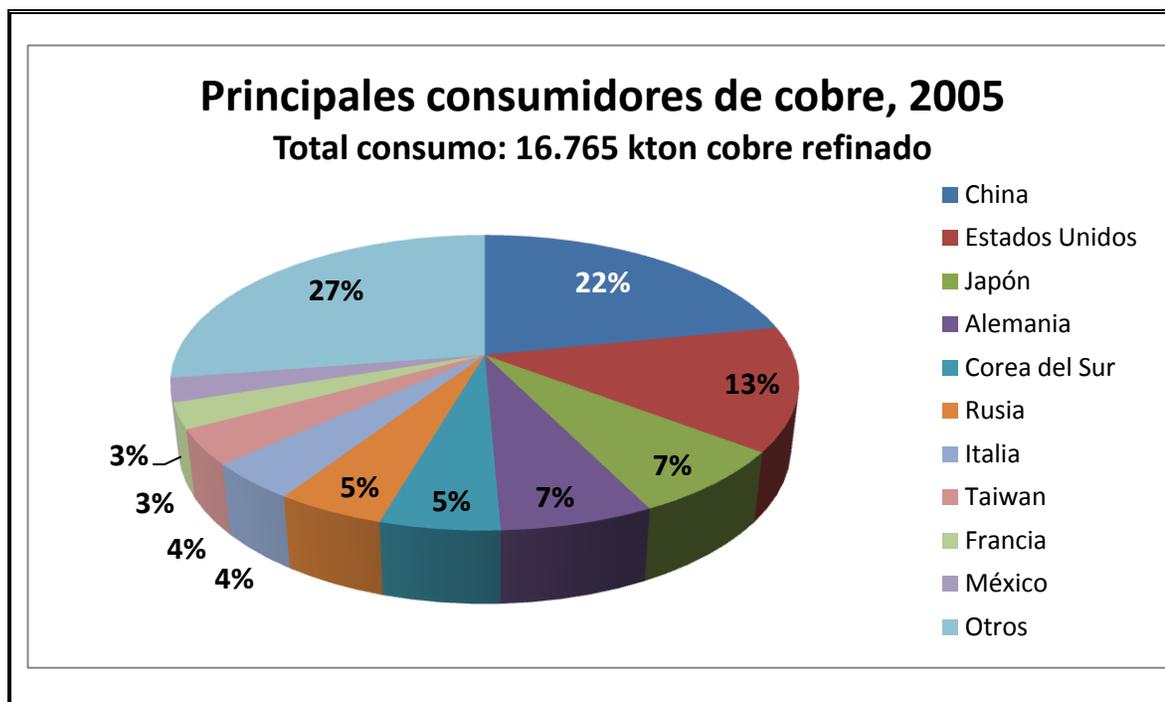


Figura 3-4: Principales países consumidores de cobre mina, 2005.

Fuente: World Bureau of Metal Statistics, Cochilco

De acuerdo con la identificación de los principales consumidores de cobre para el año 2005, es importante notar cómo ha sido el comportamiento histórico de estos, de tal manera de conocer cómo podría ser la trayectoria del comportamiento del consumo de cobre. En este sentido la hipótesis de la intensidad de uso se convierte en un indicador útil (Guzmán *et al.*, 2005). Esta hipótesis explica la trayectoria de la intensidad de uso del cobre como función de los cambios que experimentan las economías. Luego, se espera que inicialmente cuando las economías comienzan su desarrollo tiendan a urbanizarse, trasladando la mano de obra agrícola al sector industrial, gatillando el incremento de industrias como la construcción, transporte e infraestructura, entre otros. De esta manera se hace más intensivo el uso de cobre y

de otros insumos metálicos asociados al crecimiento de las industrias mencionadas previamente. Una vez alcanzado un determinado nivel de desarrollo, los países tienden a mantener o decrecer su consumo de dichos insumos, ya que su orientación se traspa a otros sectores económicos menos intensivos en uso de cobre y otros metales, como los servicios. En esta línea la Figura 3-5 presenta la trayectoria del índice asociado a la hipótesis de la intensidad de uso, pero ajustado de acuerdo a la población (Kg de cobre per cápita versus el PIB per cápita) de los principales consumidores.

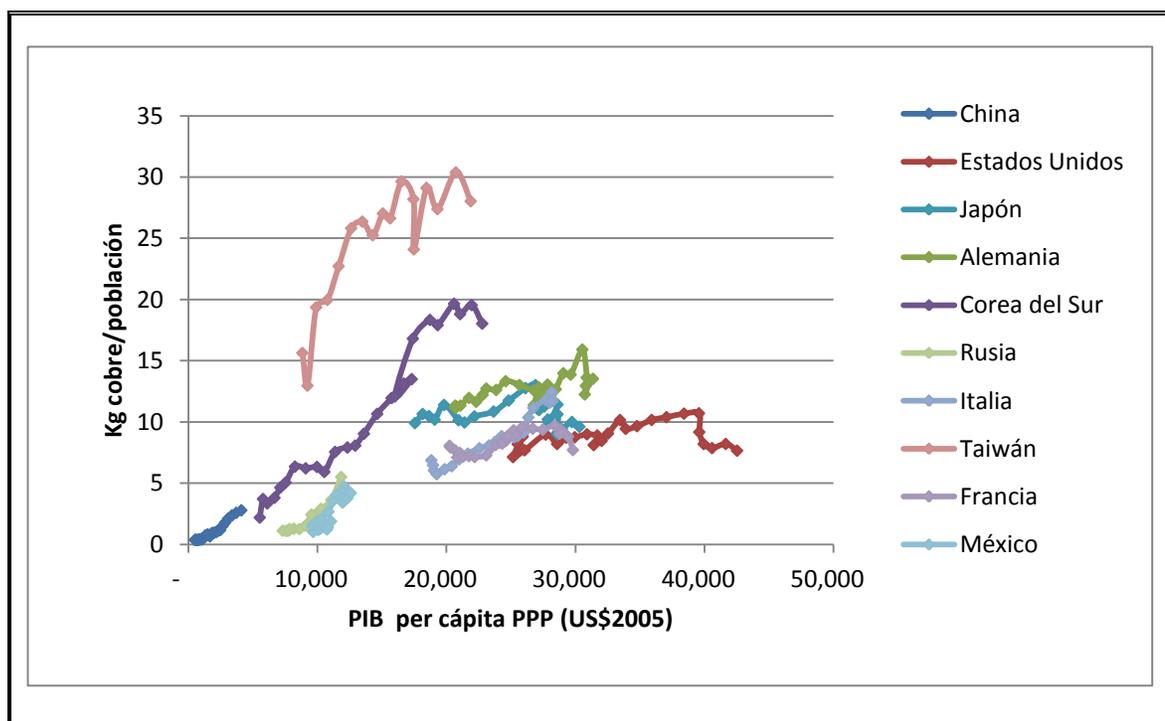


Figura 3-5: Evolución del consumo de cobre per cápita por poder adquisitivo, 1980-2005.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del WBMS, Cochilco y The World Bank

De acuerdo a la figura anterior es sumamente complejo determinar las posibles trayectorias de consumo de los países que han aumentado su cuota de participación en el consumo, como China, Rusia y México. Sumado a lo anterior las economías desarrolladas como Estados Unidos, Japón, Alemania, Corea del Sur, Italia, Taiwán y Francia, se encuentran en un descenso en el consumo, por lo que es incierto si esta tendencia al descenso se mantendría o el consumo se mantendría estable a los niveles del 2004-2005. Luego en esta línea las tendencias de demanda y oferta son muy complejas de predecir.

Esta tesis se detiene en el análisis del precio del cobre y sus tendencias históricas, esto debido a que el análisis de estas tendencias será clave en la modelación del comportamiento *ex-ante* y *ex-post* de la evaluación económica de Minera Gabriela Mistral.

Los precios de los *commodities* minerales a lo largo del tiempo han experimentado diferentes tendencias. El precio del cobre no ha estado exento de un comportamiento estocástico proveniente de las fluctuaciones del mercado. Hasta finales de los años 70 el precio de este *commodity* era referido a los productores de Estados Unidos (EE.UU), los cuales fijaban los precios de acuerdo a contratos anuales y ajustándolos de forma trimestral. En esta línea de determinación de precios los productores minimizaban la volatilidad del precio del cobre; en efecto, durante los periodos de alta demanda el precio fijado en bolsa era mayor al determinado por los productores de EE.UU. y menor

en periodos de baja demanda. Este hecho se considera en esta tesis de vital importancia ya que la estructura de fijación de los precios no es la misma hoy que hace 40 años. A continuación se presentan los hitos históricos del precio del cobre desde 1950 al año 2010, denotando que estos definirán las tendencias históricas que ha experimentado el precio del cobre.

En los primeros años de la década de los 50 el consumo del cobre se vio potenciado por políticas de reconstrucción de Europa, como el plan Marshall implementado por EE.UU. sumado a este hecho la guerra de Corea incentivó aún más el consumo de cobre. En esta línea durante toda la década de los 50 EE.UU. se destacó por ser el principal consumidor de cobre, en efecto durante los años 50 representó – en promedio – 36% del consumo mundial.

Durante los años 1960-1980 EE.UU siguió siendo el mayor consumidor de cobre, aunque redujo su cuota de participación a un 25% del consumo mundial, los países que seguían a EE.UU en el consumo de cobre eran la ex Unión Soviética y Japón. El mercado estaba concentrado en las transacciones que ocurrían en este sector, ya que estos tres países concentran cerca del 50% del consumo mundial. En este contexto es en 1966 que se registra un precio del cobre de 467,5 cUS\$2010/lb potenciado por la guerra de Vietnam.

Entre fines de los 60 y comienzos de los 70 otro factor que se hizo presente fue la Nacionalización de yacimientos mineros tanto en África como en Chile, este último factor fue el principal debilitador de la influencia de los productores de EE.UU y desde ese momento el precio registrado en bolsa fue una mejor referencia de las transacciones del mercado.¹⁷ En línea con lo anterior el mejor reflejo de que la disminución de control de precios fue el traspaso de los productores al sistema COMEX.¹⁸

En 1975 el Consejo Intergubernamental de Países Exportadores de Cobre (CIPEC),¹⁹ se unió con otros 4 países: Australia, Indonesia, Papúa Nueva Guinea y Yugoslavia, con el fin de aumentar los precios del cobre, para este fin se redujo la oferta de los países aliados en un 10% sumado al 15% de reducción de los países que conformaban la CIPEC. La alianza no fue exitosa (Mikesell, 1979), en efecto los precios siguieron su tendencia a la baja hasta 1986. Un aumento de los precios se vio reflejado entre los años 1986-1989 – gatillado por la contracción de la oferta debido al cierre de minas principalmente en USA,²⁰ para luego decaer bruscamente en el año 1992. Dada la

¹⁷ Otro factor fundamental fue la diversificación de compañías petroleras hacia la industria del cobre lo que descentralizó más aun el poder de mercado de las compañías productoras de cobre de Estados Unidos. La crisis del petróleo de 1973 gatilló que las compañías petroleras aumentaron su gama de productos principalmente para resguardarse de los posibles cambios del precio de este *commodity*; se destacan dentro de éstas adquisiciones las de empresas como British Petroleum, Arco y Exxon.

¹⁸ El coeficiente de correlación simple (Pearson) entre los precios del cobre registrados de forma diaria por la Bolsa de metales de Londres y la Bolsa Mercantil de Nueva York (COMEX) es de un 99,74% por lo que esta tesis considera que cualquiera de las dos puede ser tomada como referencia en la estructura de los precios de este *commodity*.

¹⁹ Cartel de cobre creado en 1967 por Chile, Perú, Zambia y Zaire. Éste concentraba el 30% de la producción de la época y 50% de las reservas registradas. El CIPEC fue disuelto en 1988.

²⁰ Empresas estadounidenses, tales como Minerales Amoco, Arco/Anaconda, Cities Service, Tierra Louisiana y compañías de exploración dejaron la industria, vendiendo sus yacimientos a otras compañías, o simplemente cerrando sus faenas. Esta situación gatilló lo que algunos denominaron “la muerte de la

inestabilidad de los precios registrados durante la década de 1980 y comienzos de la década de 1990, los productores comenzaron a enfocarse en mega-yacimientos de bajos costos operaciones, registrando un importante aumento de la oferta.

En 1995 los precios aumentaron – debido un aumento en el consumo de EE.UU y Asia y la significativa disminución de los inventarios – llegando a 190,58 cUS\$2010/lb, luego de esto los precios volvieron a caer dada la crisis asiática y la burbuja especulativa de los países occidentales a comienzo de la década del 2000. En línea con lo anterior, el año 2002 registró el menor precio del cobre – considerando una estadística de precios desde el año 1935 – correspondiente a un valor 85,63 cUS\$2010/lb. Luego de esto, la reactivación de la economía, especialmente de los países asiáticos los cuales aumentaron su consumo a una tasa compuesta anual de 7,4%, impulso el aumento de los precios del cobre llegando éste a 339,95 cUS\$2010/lb el año 2007.²¹

Finalmente la recesión mundial gatillada por la crisis de la burbuja crediticia “*Global credit bubbles*” hizo disminuir los precios del cobre el año 2009 a 238,06 cUS\$2010/lb lo cual no fue mantenido por mucho tiempo ya que el precio promedio del año 2010 fue de 341,98 cUS\$2010/lb. La Figura3-6 resume los hitos previamente señalados, destacando la relación entre los puntos máximos y mínimos del cobre con los sucesos históricos.

minería en Estados Unidos”, de acuerdo a un artículo publicado por Business Week a mediados de la década de 1980 (Tilton, 2003).

²¹ Nótese que este precio en valor real (US\$2010) no supera el registrado en 1966.

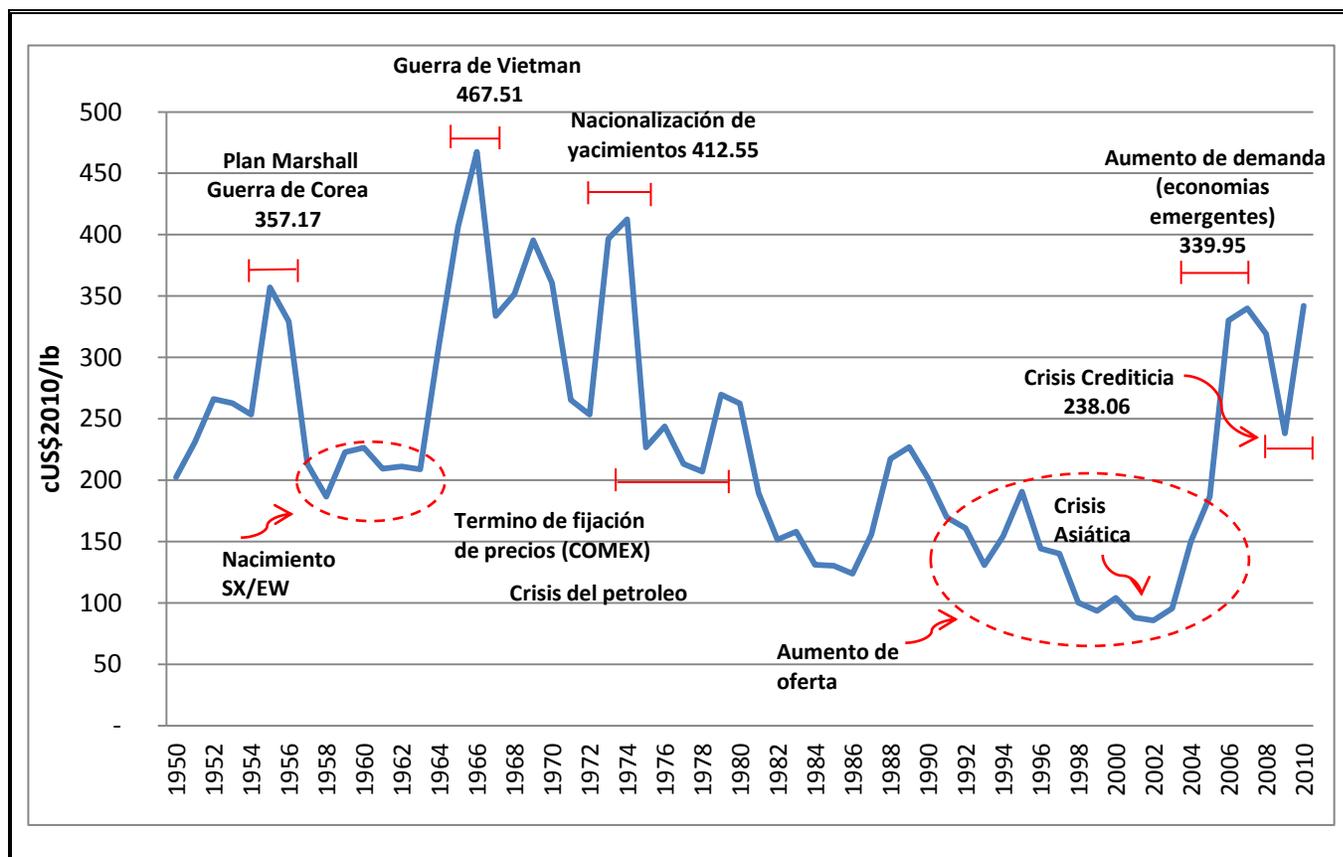


Figura3-6: Precios históricos del cobre- Moneda real US\$2010

Fuente: Elaboración propia en base a LME y USGS

4. PROYECTO GABY

4.1 Objetivos de la negociación

Las opciones de inversión en Codelco están sujetas a restricciones de gobierno y en particular de hacienda, ya que al tratarse de un organismo público cualquier inversión debe ser regulada a nivel estatal. Pero las inversiones en exploración y explotación pueden ser realizadas en asociación con terceros en el caso de que las existencias pertenezcan a la Republica de Chile y no sean explotadas en la actualidad (Moguillansky, 1998).²² En este contexto, en el año 2005 comenzó la negociación entre Codelco y MINMETALS (China MINMETALS Non-ferrous Metals Co. Ltd) por la explotación de Minera Gabriela Mistral (GABY).

El objetivo principal de esta negociación para Codelco se sustenta en aprovechar las oportunidades que ofrece el mercado Chino dada su creciente demanda por Cobre.²³ Además, dado que en el mercado del cobre Codelco es el principal productor, el mantener su liderazgo depende de una tasa continua de crecimiento en la producción, de esta manera puede seguir manteniendo su participación en la industria. A nivel estratégico este foco es de consideración, ya que el posicionamiento de liderazgo en el mercado y de mantención de los ingresos al fisco que Codelco ha materializado a lo largo de la historia, llevan consigo el aumento en la producción de cobre refinado, ya sea

²² La Ley 19.137, aprobada en 1992, estipula que Codelco puede establecer asociaciones con terceros. De esta manera esta institución pública está habilitada para asociarse estratégicamente con inversionistas extranjeros.

²³ China, es un mercado con gran potencial de crecimiento, y uno de los mayores consumidores de cobre en el mundo. En efecto, mientras que en el año 2005 este país representó el 22% de la demanda mundial de cobre, en el año 2010 se estima que representaba aproximadamente el 40% de ésta.

a través de expansiones de los proyectos actuales o a través del desarrollo de nuevos proyectos (denominados “proyectos estructurales”).

Por otro lado, MINMETALS tenía y tiene actualmente un particular interés por la obtención de un abastecimiento de cobre en el largo plazo.²⁴ En efecto, está dentro de los principales objetivos de esta empresa asegurar un flujo continuo de insumos metálicos y minerales a nivel nacional. En este sentido MINMETALS ha sido encargado por el gobierno chino de ser el principal proveedor de metales y minerales. Luego, MINMETALS estaba dispuesto a pagar un precio por tener acceso a un abastecimiento de largo plazo de cobre,²⁵ y Codelco estaba interesado en abrir una fuente de financiamiento como alternativa a lo que podría haber sido un aumento de capital o financiamiento bancario.

²⁴ Esta es una preocupación latente de las economías de los países asiáticos, particularmente de China, dado el crecimiento que han experimentado impulsa la obtención de materias primas para la construcción, infraestructura, transporte entre otros, lo que se alinea directamente con la hipótesis de intensidad de uso previamente señala, que indica en este caso la urbanización de este país. En línea con la urbanización en el Anexo B se especifican los mayores *drivers* del mercado del cobre. Se denotan que la mayor utilización del cobre es en la industria de la construcción específicamente en el cableado eléctrico.

²⁵ Como una de las compañías Fortune 500 global, MINMETALS ha fortalecido la cooperación estratégica tanto con empresas nacionales como extranjeras buscando así el desarrollo mutuo. MINMETALS juega un papel importante en la promoción de los intercambios y la cooperación entre empresas de China y otros países. A modo de ejemplo este Grupo ocupa el puesto de presidente que representa a China en el Consejo de Negocios China-Brasil y China-Chile. (Véase el Anexo C).

En línea con lo anterior, se destaca por tanto que el contrato extiende una orientación estratégica de largo plazo para ambas partes, potenciando así para Codelco otra fuente de financiamiento para sus planes de inversión.²⁶

4.2 Sociedad Codelco-MINMETALS: Contrato a largo plazo

Codelco y MINMETALS concluyeron las negociaciones con el fin de formar una alianza estratégica, cuyo objetivo descansa en asegurar el abastecimiento en el largo plazo de cobre refinado al mercado Chino, y en un primer acercamiento para el desarrollo de nuevas fuentes de producción mediante el establecimiento del crecimiento conjunto en el desarrollo tecnológico e innovación. En línea con lo anterior se estableció, el 22 de febrero del 2006 en Beijing, la sociedad Copper Partners Investment Company Ltd. (CuPIC). CuPIC considera a Codelco y MINMETALS como socios por partes iguales. En esta línea se establece que cada socio aporta un capital inicial de 110 MUS\$ para el desarrollo del proyecto GABY, además MINMETALS asume una deuda por 330 MUS\$ con el Banco de Desarrollo de China (*China Development Bank*).

Se establece que en la sociedad se repartirá como dividendos el 100% de la utilidad después de impuestos, salvo durante los primeros 5 años en que se reinvertirán íntegramente. De acuerdo a lo anterior se establece como acuerdo entre ambas partes que

²⁶ Dado que Codelco es una empresa a estatal, no posee la libertad de financiar sus proyectos de inversión a través de sus utilidades, a diferencia de las empresas privadas las cuales destinan un porcentaje de sus utilidades a inversión.

esta modalidad de financiamiento podría alcanzar hasta un máximo de 2.000 MUS\$.²⁷ En una primera etapa la sociedad destinará 550 MUS\$ al financiamiento del pago anticipado a Codelco de parte del precio de un contrato de largo plazo de abastecimiento de cobre. Las necesidades de financiamiento de la sociedad serán cubiertas por El Banco de Desarrollo de China, que actuará como su agente financiero de la sociedad. La sociedad formada por las dos compañías hace dos contratos, los cuales se detallan a continuación.

- i) Un primer contrato con Codelco de compra de cobre en un período de 15 años. En este caso, Codelco se compromete a entregar a esa sociedad 55.750 toneladas de cobre fino al año durante 15 años, (aproximadamente 836 mil toneladas). A cambio la sociedad le paga de forma anticipada parte del precio de ese contrato, correspondientes a los 550 MUS\$.²⁸ El porcentaje de pago restante el resto se paga a medida que se va despachando el cobre.
- ii) Un segundo contrato entre CuPIC y MINMETALS. La sociedad tiene un contrato para vender a MINMETALS ese mismo cobre a precio de mercado en el momento en que se hace la transacción; o sea cada año, en los mismos términos en que Codelco hace sus contratos regulares con China, al precio del mercado de la Bolsa de Metales de Londres más el premio China.²⁹

²⁷ Este punto es estratégico y da cuenta de un flujo de ingresos seguros a nivel anual que será directo para cubrir las inversiones del yacimiento que podrían no haber sido cubiertas previamente. A su vez posibilita las oportunidades de expansión de la operación dado que esta utilidad no es ingreso directo al gobierno de Chile.

²⁸ Aquí existe una consideración fundamental, éste es el pago inicial relativo a solventar una primera parte de la inversión, el precio implícito del contrato de cobre a largo plazo está sujeto a la inversión final asociada al yacimiento, ya que frente a aumentos de ésta, la sociedad por acuerdo solventará hasta 2.000 MUS\$.

²⁹ Para la evaluación *ex-ante* y *ex-post* no se considera el premio China como valor agregado a la evaluación del contrato, esto en línea a que es altamente probable que Codelco hubiese destinado estas exportaciones de cobre refinado a China, independiente si este metal proviene del proyecto mediante el desarrollo de una alianza establecida ente Codelco y MINMETALS o de Codelco como productor individual.

El esquema de la organización contractual se detalla en la Figura 4-1, donde se establece la sociedad conformada por los dos socios estratégico (Codelco y MINMETALS).

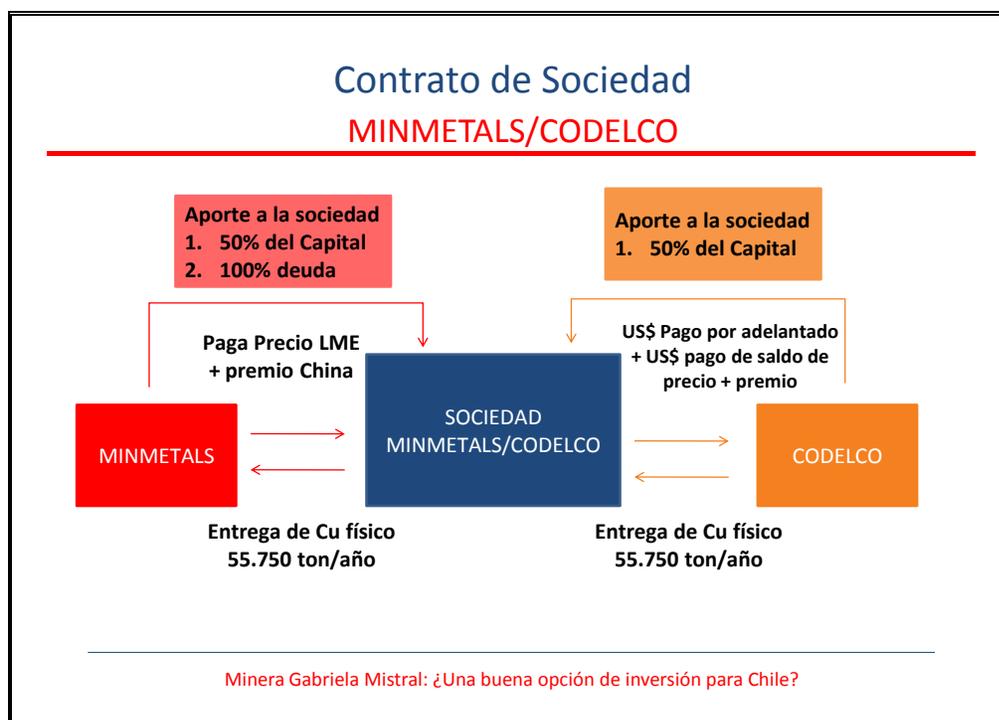


Figura 4-1: Representación de las transacciones entre Codelco y MINMETALS

Fuente: Presentación a Directorio de Codelco – jun. 2005

4.3 Precio de venta implícito en el contrato

Es importante dejar claro que el contrato establece un acuerdo por una cierta cantidad de tonelaje, a cambio de los 550 MUS\$ destinados a la inversión del proyecto, los cuales están sujetos a posibles cambios una vez materializada la inversión. Sumado a la inversión se establece un saldo de precio que se cancela a medida que se entrega el tonelaje. Luego existen dos variables críticas a ser evaluadas, en primer lugar el precio

implícito asociado a la inversión y en segundo lugar, el saldo del precio considerado por Codelco, ambas variables están relacionadas de acuerdo a las estimaciones de precio de largo plazo de la estatal. La Figura 4-2 presenta el cálculo de ambas variables.

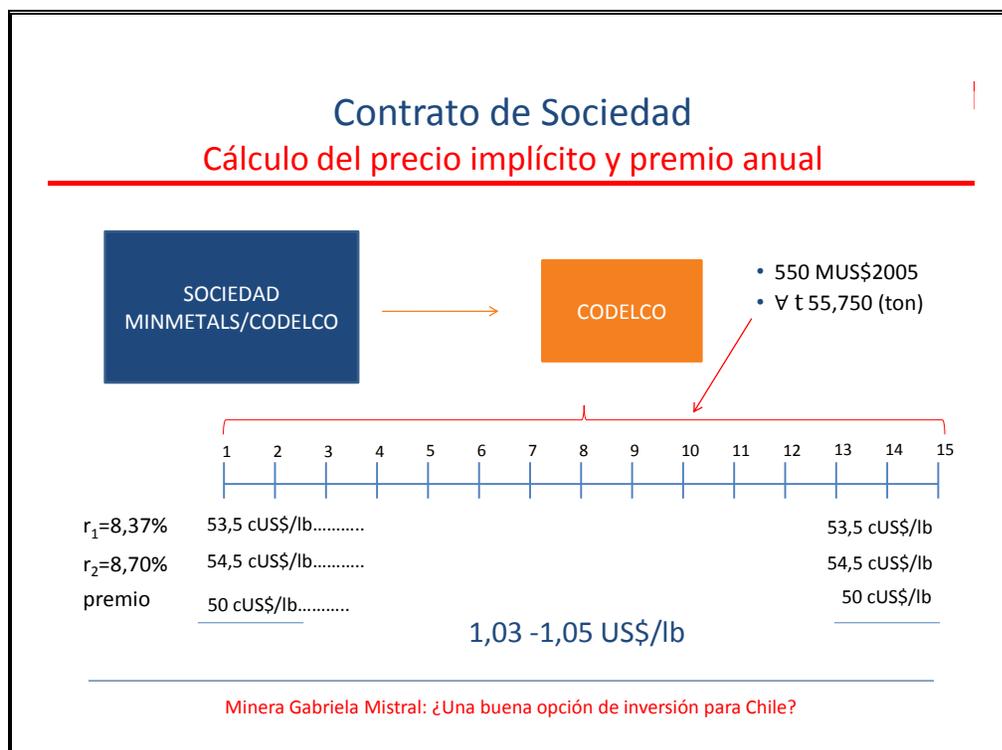


Figura 4-2: Estructura del saldo del precio implícito y premio establecido por Codelco.

Fuente: Elaboración propia en base a la presentación a Directorio de Codelco – jun. 2005

La determinación del precio implícito del contrato considera los flujos asociados a los 15 años en los cuales deben ser entregadas las 55.750 (ton) de cobre fino (véase Figura 4-2). Luego, el cálculo del precio implícito se elabora a través de la metodología de flujos de caja descontados, de acuerdo a dos posibles tasas de descuento: 8,37% y 8,70%, obteniéndose así un intervalo para este precio. La

metodología obedece la ecuación 4.1 y los parámetros de esta ecuación se presentan en la Tabla 4-1.

$$VPN = P \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{(1+r)^{-n}}{r} \right) \cdot Q \text{ \$} \quad (4.1)$$

Tabla 4-1: Parámetros de la valorización del precio implícito en el contrato

Factores ecuación (4.1)	Valor de los factores para contrato GABY
VPN (MUS\$)	550
n (periodo en años)	15
r₁ (tasa de descuento)	8,37%
r₂ (tasa de descuento)	8,70%
Q (toneladas de cobre anual)	55.750

La aplicación de la fórmula 4.1, considerando los parámetros indicados en la Tabla 4-1, indican un precio implícito entre 53,5 cUS\$/lb y 54,5 cUS\$/lb.³⁰ Luego la determinación del saldo depende de las estimaciones de precios de largo plazo de Codelco, las cuales estimaban que éste sería cercano a 1 US\$/lb.³¹ En línea con lo anterior, el premio debe ser tal que el precio implícito más éste satisfaga las expectativas de largo plazo de la estatal. Luego, el premio se estableció en 50

³⁰Estableciendo como valor determinado el VPN del proyecto correspondiente a los 550 MUS\$ se establecen los flujos anuales esperados del proyecto. Se espera que los flujos de caja correspondan a 65,72 MUS\$ a una tasa de 8,37% y a 67,03 MUS\$ a una tasa de 8,7%. Es decir este valor es el que se debería recibir en cada periodo. Dado que los valores anteriores corresponden al valor total recibido, se debe calcular el valor unitario por libra dividiendo por el tonelaje pactado en la negociación.

³¹El largo plazo consideraba como año de referencia el año 2008, lo que coincide con el inicio de la producción de Minera Gabriela Mistral.

cUS\$/lb, lo que indica un precio de venta implícito entre 1,03 a 1,05 US\$/lb.³² Y una tasa de descuento entre 8,37% y 8,70%.

La Tabla 4-2 muestra la obtención de los precios de largo plazo para una inversión de 550 MUS\$. Es interesante ver como es el precio sensible a la inversión total efectivamente materializada por Codelco. De acuerdo a las publicaciones realizadas por Codelco en el año 2006 y en el año 2008, se esperaba en el año 2006 que la inversión de Mina Gabriela Mistral alcanzara la cifra de 898 MUS\$2006 y de acuerdo a la memoria del 2008 la inversión real ascendió a 1.268 MUS\$2008. Luego, realizando el mismo sistema de estimación para el precio implícito en el contrato para una inversión de 550 MUS\$2005 se realizó la estimación para una inversión de 898 MUS\$2006 y 1.268 MUS\$2008. La Tabla 4-2 presenta en su tercera y cuarta columna los precios de venta esperados bajo estas nuevas condiciones de inversión.³³

³² Dadas las estimaciones por parte de Codelco, se estableció que el pago anticipado se haría a un precio por libra fluctuante, el cual debiese pertenecer a un rango entre 1,03 a 1,05 US\$/lb. Esta estimación se consideró favorable dado que las estimaciones de largo plazo determinaban que las mejores proyecciones apuntan a un precio de 1 US\$/lb a largo plazo. Es importante destacar que Codelco incluyó dentro del contrato posibles ajustes en caso que la cotización de mercado fuese superior a la estimada, dejando en claro que la cotización futura del precio era el indicador efectivo de lo acertado o no de la venta. En esta línea, el año 2008 se abolió la compra del 24% de Mina Gabriela Mistral por parte de MINMETALS, razón por la que no se discute este tópico a lo largo de esta tesis.

³³La evaluación considera que el saldo es constante e igual a 50 cUS\$/lb. Esto de acuerdo a que en el contrato se estipulaba que la inversión iba a ser conjunta sí no superaba los 2.000 MUS\$.

Tabla 4-2: Estimación del precio implícito en el contrato

Precios de Venta de LP	I= US\$550 MUS\$2005 (registro 2005)	I= US\$830 MUS\$2005 (registro 2006) ²	I= 1.136 MUS\$2005 (registro 2008)
P_1 (US\$/lb)	0,535	0,807	1,104
P_2 (US\$/lb)	0,545	0,823	1,126
Saldo (US\$/lb)	0,5	0,5	0,5
Precio de Venta ₁ (US\$/lb)	1,03	1,31	1,60
Precio de Venta ₁ (US\$/lb)	1,05	1,32	1,63

²La publicación de esta información fue realizada el 10/01/2006 previo al contrato efectuado el 22/02 del mismo año. Fuente: Superintendencia de Valores y Seguros - Cochilco.

Luego, considerando que el proyecto terminó su construcción el año 2008 se espera que el precio de venta implícito actual este en el rango de 1,60 US\$2005/lb y 1,63 US\$2005/lb.

Es importante destacar que para Codelco el contrato es una forma de generar financiamiento sin endeudarse, obteniendo recursos para su proceso de expansión, que contemplaban inversiones por 17.000 MUS\$2004 para el periodo 2005-2012.³⁴ En este sentido y dado que los planes de inversión estimados para el año 2005 ascendían a 1.800 MUS\$2005 (la cifra real de la inversión para el año 2005 ascendió a 1.845 MUS\$2005, de acuerdo a la memoria anual de la corporación) el financiamiento de Mina Gabriela Mistral por parte de CuPIC podría representar la cobertura del 31% de los planes de inversión. De forma adicional, el precio de largo plazo estimado como precio de venta del cobre para MINMETALS si bien distaba de los valores de registro del cobre entre el periodo 2006-20010 era el esperado por la industria el año 2005 para el largo plazo; en

³⁴ Nicolás Eyzaguirre – ministro de Hacienda entre los años 2000-2006 – expresó que los proyectos de expansión a ser realizados por Codelco necesitaría un capital de 17.000 MUS\$2004.

efecto, de acuerdo a diferentes estudios de renombrados consultores se esperaba que el precio para el año 2006 fuese entorno a 1,26 US\$2005/lb, y para el largo plazo en torno a 0,96 US\$2005/lb.³⁵

Finalmente, no sólo consultores independientes consideraban las expectativas de precios cercanas a 1 US\$2005/lb; de hecho, el Ministerio de Hacienda en julio del año 2005 a través de la estimación de precios del Comité Consultivo del Precio de Referencia del Cobre,³⁶ estableció que el Precio de Referencia que se utilizaría para la operación del Fondo de Compensación del Cobre y para estimar el Balance Estructural de Sector Público en el año 2006, correspondía a 0,99 US\$2006/lb.

³⁵ Estos estudios fueron realizados a fines del año 2004 y principio del año 2005.

³⁶ El Precio de Referencia considera la proyección de 8 expertos para el precio promedio del cobre registrado en la Bolsa de Metales de Londres para el período 2006-2015.

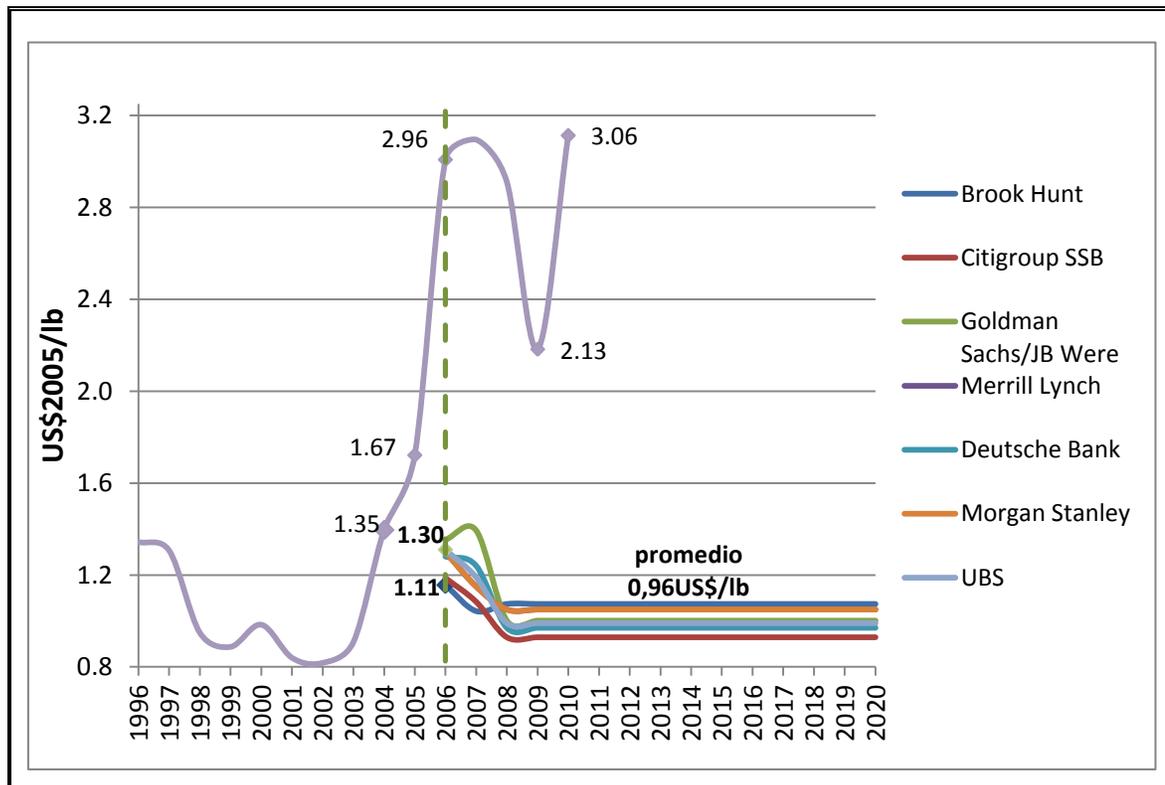


Figura 4-3: Precio esperado del cobre en el largo plazo

Fuente: Confidencial

4.4 Riesgos y ventajas para Codelco

Dentro del contrato se estipula que uno de los principales riesgos para la corporación es la posible diferencia que puede existir entre el precio del cobre pactado como precio de venta implícito (precio implícito más premio) y el precio de mercado en el momento de realizar el traspaso de material, ya que ciertamente un aumento en el precio traería complicaciones gubernamentales y se dejaría de ganar significativo porcentaje por la venta de cobre. Sin embargo, si es que el precio disminuyese, el excedente ciertamente

sería favorable. Sumado a esto, se debe considerar también la posibilidad de haber contado con la liquidez suficiente para el desarrollo del proyecto.

Finalmente, es importante destacar que dado que Codelco es parte de la sociedad que compra el cobre de acuerdo al precio de venta implícito y lo vende al precio *spot*, esta entidad participa en las utilidades o pérdidas asociadas a la volatilidad del precio *spot*. Luego, si el precio fuera mucho más alto de lo que se ha estimado, Codelco participa en la diferencia a través del 50% de la utilidad de la sociedad, minimizando lo que se podría haber dejado de ganar, lo cual es ciertamente un factor clave dada la volatilidad del precio del cobre.

El análisis anterior permitió capturar el contexto del proyecto GABY, y analizar cuáles fueron los alineamientos de la negociación. Con el fin de analizar en el próximo capítulo las incertidumbres y riesgos de este contrato es importante destacar que existe otro riesgo fundamental que no fue considerado en la negociación, el cual corresponde a los costos de operación. Los costos están correlacionados con el precio del cobre, y en efecto, al analizar los costos históricos de la industria desde 1950 al año 2005 y el precio del cobre para el mismo periodo se detecta una correlación simple de 0,81.³⁷ Luego, si la cobertura asociada a la utilidad en un contrato de largo plazo está sólo basada en la volatilidad de los precios del cobre, ésta dista de ser completa, dado que así como el proyecto se debe resguardar de la volatilidad de los precios, se debe necesariamente

³⁷ Dentro de las variables inciertas serán analizados en detalle los costos de la industria y su correlación con los precios del cobre.

resguardar también los costos. En este caso, este hecho es de suma relevancia ya que lo que recibe Codelco directamente es sólo el saldo de la negociación, dado que CuPIC es el que materializa la inversión y obtiene la ganancia base.

5. ANÁLISIS *EX-ANTE* Y *EX-POST* MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE LAS OPCIONES REALES

La evaluación mediante opciones reales considera que las decisiones que se tomen en un proceso de evaluación económica deben considerar todas las alternativas posibles del proyecto, y algunas de éstas a su vez pueden ser tomadas en el camino sin perder la flexibilidad. En el caso de los proyectos mineros (Minera Gabriela Mistral), la mayoría de ellos efectivamente se alinea con la evaluación mediante opciones reales, ya que cumplen con los tres criterios fundamentales, dados por:

- Son proyectos irreversibles: al ejecutarse la inversión no se puede recuperar el dinero invertido.
- Son proyectos con variables inciertas: dependen de parámetros económicos y geo-metalúrgicos inciertos tales como el precio del *commodity* a ser extraído, posición de la mina en la curva de costos de la industria, distribución de leyes del mineral en el yacimiento a lo largo de su vida útil y recuperación metalúrgica del mineral *in-situ*, entre otros.³⁸
- Son opcionales: el inversionista tiene la opción pero no la obligación de invertir en cierto yacimiento; en efecto, en general se tiene una cartera de proyectos de inversión

³⁸ Es importante destacar que las incertidumbres económicas pueden ser similares para todos los yacimientos, pero cada uno de estos posee características geo-metalúrgicas únicas. Luego, frente a estas características propias los sondeos de los compósitos hacen referencias a la distribución esperada de ley real del yacimiento, sin embargo el valor del material *in-situ* una vez extraído difiere significativamente de las primeras estimaciones consideradas en la evaluación del proyecto. El caso es similar en la recuperación metalúrgica de estos mismos, la cual en general está directamente relacionada al tipo de Unidad GeoMetalúrgica (UGM) presente en el yacimiento y, al igual que en el caso de la ley, es estimada a partir de los mismos compósitos.

y se escoge aquel que maximice el VPN del inversionista, siempre que este sea positivo, en caso contrario siempre se tiene la opción de no llevar a cabo el proyecto.

Esta tesis plantea que existen 5 pasos que se deben considerar en la resolución de proyectos mineros evaluados mediante opciones reales:

1. Identificación de parámetros inciertos del proyecto
2. Jerarquía de las decisiones y espacio temporal en las que se tendrá la opción de materializarlas
3. Diseño de árbol de decisión dinámico donde se incluyen el valor de las opciones y por tanto de la flexibilidad que tiene el inversionista al tomar la decisión de inversión. A partir de éste se obtiene el valor esperado del VPN dinámico ($E[VPN_{dinámico}]$).
4. Diseño de árbol de decisión estático donde no se incluye el valor de las opciones y por tanto de la flexibilidad que tiene el inversionista al tomar la decisión de inversión. A partir de éste se obtiene el valor esperado del VPN estático ($E[VPN_{estático}]$).
5. Cálculo de la inclusión de la flexibilidad en la evaluación económica a través de la comparación de los árboles dinámico y estático (la diferencia entre el punto 3 y 4 indica el valor de la inclusión de la flexibilidad, véase en esta línea fórmula 2.4).

Las incertidumbres identificadas para Minera Gabriela Mistral se pueden estructurar en dos grandes grupos: económicas y propias al yacimiento, las que se revisan a continuación:

a) Económicas

- i) Incertidumbre en los precios del cobre
- ii) Incertidumbre en los costos operacionales³⁹
- iii) Incertidumbre en la inversión

b) Propias al yacimiento

- i) Incertidumbre geológica
- ii) Incertidumbre en la recuperación metalúrgica

La jerarquía de las decisiones que se tomen es clave en el proceso de evaluación. Se deben considerar siempre en primer lugar las decisiones estratégicas en un comienzo hasta llegar a las relativas al mecanismo de producción, ya que la jerarquía de las decisiones determinara el grado de reversibilidad que tiene las inversiones. En esta tesis se propone la siguiente estructura piramidal para la jerarquía de las decisiones:

³⁹ La segunda incertidumbre económica está correlacionada con la primera, la estimación de esta correlación se presenta en el capítulo 5.



Figura 5-1: Pirámide de jerarquía de las decisiones

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de Minera Gabriela Mistral se consideró la inclusión de las variables estratégicas y tácticas en el plan minero base de la evaluación económica.⁴⁰ La estructura de la pirámide de jerarquía de las decisiones de Minera Gabriela Mistral se ilustra en la Figura 5-2.

⁴⁰ La Planificación minera no considera en la evaluación económica que los precios son estocásticos y la correlación de los costos con estos precios, luego el *pit* óptimo puede ser subvalorado, lo que indica que si bien un proyecto puede tener $VPN > 0$ este puede no estar siendo evaluado considerando su valor potencial. Sumando a lo anterior las variables económicas no son las únicas variables que se consideran determinísticas. En efecto, las variables geo-metalúrgicas también se consideran de esta forma. En esta línea, si bien la evaluación económica mediante *pits* anidados considera diferentes parámetros en su sensibilización, finalmente en la evaluación económica se obtiene un único plan factible con variables estáticas, que en la práctica distan de serlo. El mejor ejemplo de lo anterior es el precio del cobre el cual es de alto impacto, dada la sensibilidad de la planificación minera a este parámetro (Dagdelen, 2001).

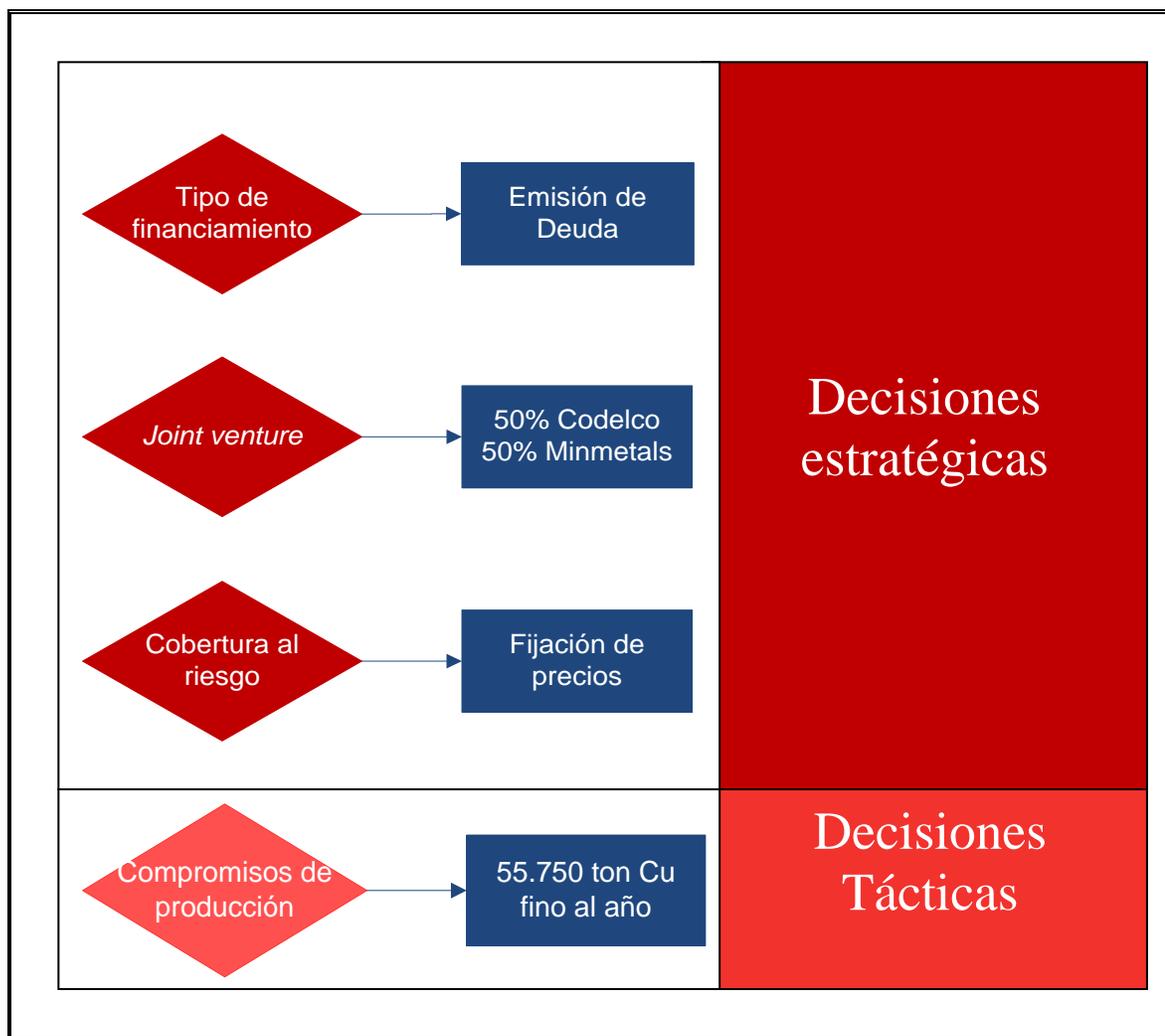


Figura 5-2: Decisiones y procesos que implican las decisiones en Minera Gabriela Mistral

Fuente: Elaboración propia

Los árboles de decisión, tanto el dinámico como el estático, se presentan en la Figura 5-3 y Figura 5-4, respectivamente. La construcción del árbol dinámico considera que Codelco, dueño de los derechos de explotación, antes de desarrollar el yacimiento, tuvo la opción (véase en la Figura 5-3 la opción 1) pero no la obligación de llevar a cabo este

proyecto, en el caso de que su decisión sea desarrollarlo se encontraría con las incertidumbres propias al yacimiento (incertidumbre geológica e incertidumbre en la recuperación metalúrgica). En caso de que no decida desarrollar el proyecto el VPN sería cero. Luego, una vez tomada la decisión de desarrollo tiene la opción (véase en la Figura 5-3 la opción 2), de materializar el proyecto de manera individual o mediante una alianza estratégica con MINMETALS.

Si la opción de ir sólo se hubiese ejecutado (rama superior de la opción 2) Codelco debiese se hubiese enfrentado de manera individual las incertidumbres económicas (precios, costos e inversión.⁴¹ En este caso a su vez Codelco tiene la flexibilidad de postergar la inversión (véase en la Figura 5-3 la opción 3). Por otro lado, si la opción se hubiese ejecutado mediante una alianza estratégica (rama inferior de la opción 2) esto hubiese implicado cobertura completa de la inversión por parte de CuPIC (lo que a su vez determina una cobertura del 65% de la inversión por parte de MINMETALS). Sumado a lo anterior, Codelco recibe el premio que considera correcto de acuerdo a sus expectativas de largo plazo del precio del cobre por la producción comprometida en el acuerdo (55.750 ton), en este sentido es importante destacar que la producción no comprometida en el acuerdo si posee el riesgo de la volatilidad del precio del cobre. Por otro lado, lo anterior implica un precio implícito a CuPIC y responder como Codelco frente a la producción pactada independiente de las incertidumbres propias al yacimiento o posibles contingencias que se generen en éste. Finalmente, se destaca que en este caso

⁴¹ La inversión es un tema fundamental debido a la falta de liquidez que posee la empresa estatal para la ejecución de sus proyectos de inversión. (Lüders, 2011; Moguillansky, 1998).

una vez pactado el acuerdo la flexibilidad de poder postergar el desarrollo del yacimiento no está presente.

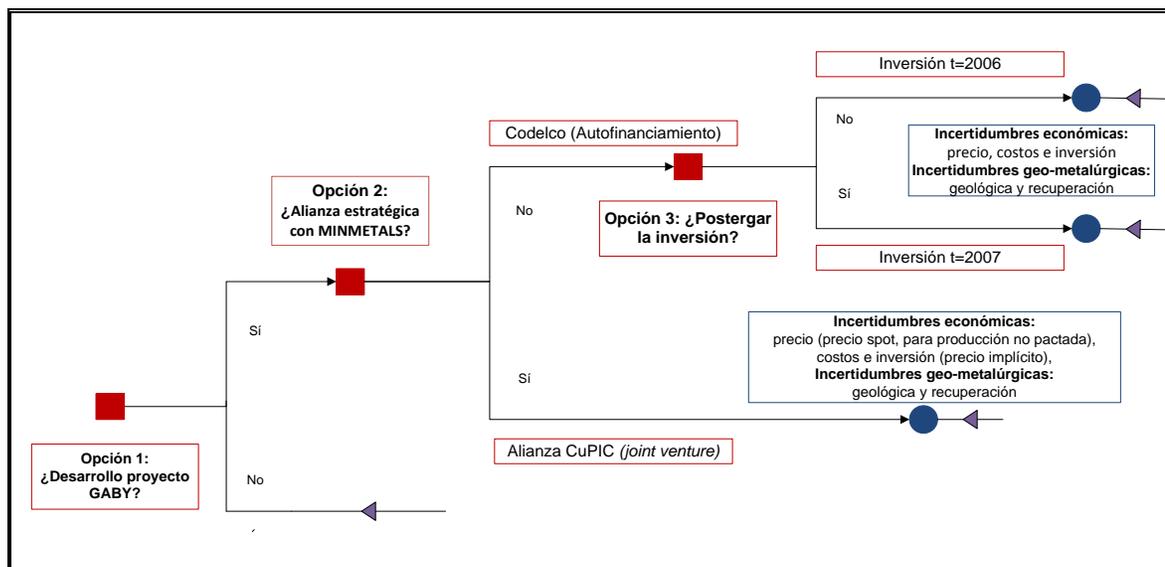


Figura 5-3: Árbol de decisión dinámico *ex-ante*

Fuente: Elaboración propia

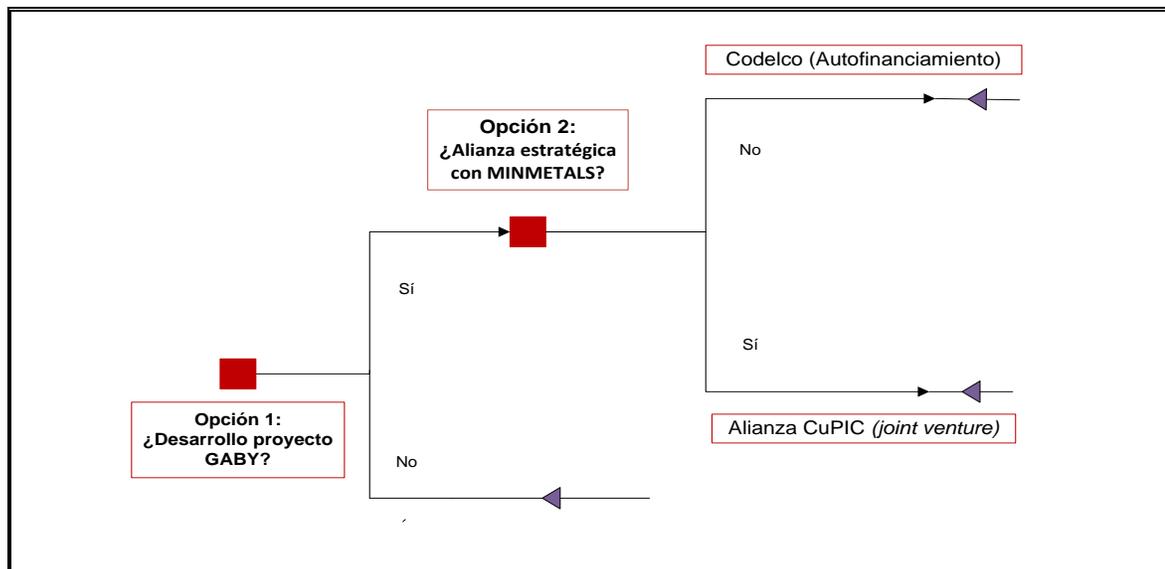


Figura 5-4: Árbol de decisión estático *ex-ante*

Fuente: Elaboración propia

La construcción del árbol estático considera la opción 1 (véase en la Figura 5-4 la opción 1) y la opción 2 del árbol dinámico, correspondiente a la materializar el proyecto de manera individual o mediante una alianza estratégica con MINMETALS. Es importante destacar en esta línea que en la época de evaluación del proyecto (año 2005) se pudo haber considerado a esta opción como no válida, esto de acuerdo a lo informado por el ministro de Hacienda de la época, Nicolás Eyzaguirre, el que indicó que en el momento no existía la opción de endeudamiento (Eyzaguirre, 2005).

En línea con lo anterior aquí podría existir un hecho social clave: Codelco al endeudarse, con el fin de autofinanciar sus proyectos de inversión, debe pagar su deuda con dinero proveniente de las arcas fiscales, luego la inversión en un yacimiento podría impactar en el corto plazo en menores ingresos al fisco, destinados ya sea a educación, transporte, desarrollo, entre otros, surgiendo así una pregunta clave: ¿A nivel país estamos dispuestos a sacrificar anualmente menos ingresos al fisco con el fin de desarrollar los nuevos yacimientos que Codelco necesita para mantener su producción actual? Si la respuesta a la pregunta anterior es no, se debiesen entonces considerar alternativas de desarrollo mediante *joint ventures*, lo que implicaría las consecuentes pérdidas de los excedentes que exige la contraparte, en este caso el excedente recibido por MINMETALS.

Es importante destacar que el análisis *ex-post* no considera la alternativa de postergación de la inversión, ya que el acuerdo ya fue materializado y se toman conocidos tanto los

precios como los costos de los 3 primeros años de operación de Minera Gabriela Mistral. La Figura 5-5 presenta la estructura del árbol de decisión dinámico para el análisis *ex-post*. Por otro lado, el árbol de decisión estático para la evaluación *ex-post* permanece sin variaciones respecto al análisis *ex-ante*. Luego, se toma referencia la misma Figura 5-4.

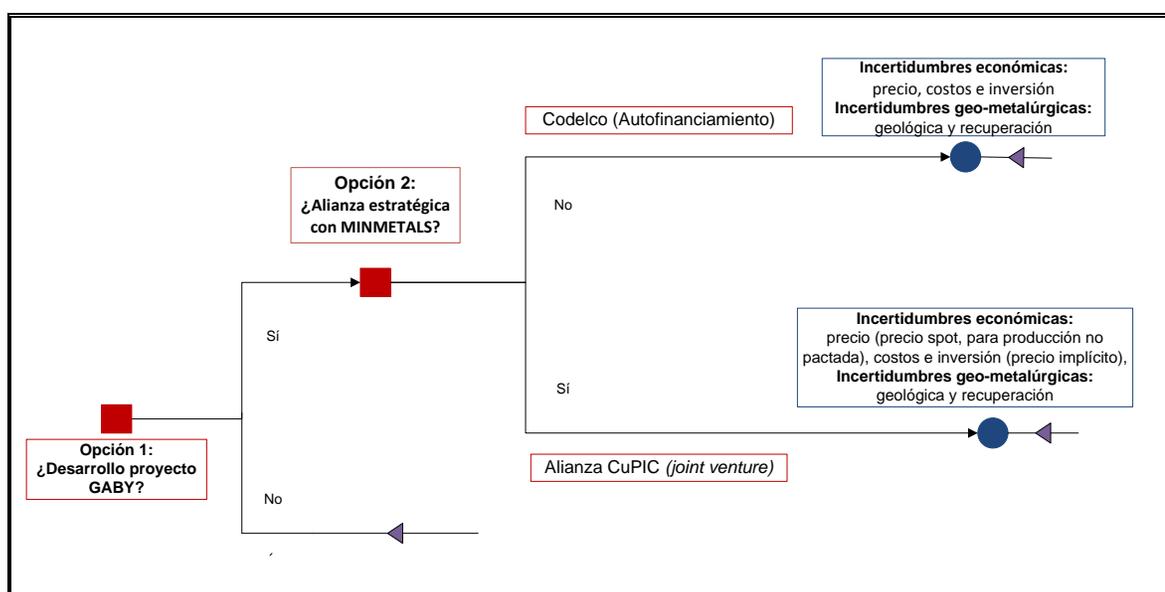


Figura 5-5: Árbol de decisión estático *ex-post*

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para la ejecución del contraste entre el árbol dinámico y estático se deben cuantificar las variables inciertas e ingresarlas al plan minero de Minera Gabriela Mistral. Esto se presenta en la sección a continuación.

5.1 Cuantificación de incertidumbres

La evaluación económica mediante opciones reales involucra la identificación de incertidumbres críticas en el proyecto de inversión que se quiere llevar a cabo. Como se

mencionó en el capítulo anterior las incertidumbres presentes en la decisión de inversión de Minera Gabriela Mistral se resumen en dos grupos: económicas (incertidumbre en los precios del cobre, incertidumbre en los costos operacionales e incertidumbre en la inversión) y propias al yacimiento (incertidumbre geológica e incertidumbre en la recuperación metalúrgica). A continuación se cuantifican cada una de estas incertidumbres.

a) Económicas

i) Incertidumbre en los precios del cobre

El precio de algunos *commodities* como el cobre y el petróleo no debe ser modelado como un proceso Browniano, ya que de esta manera se obtendrían tendencias que se alejan del punto inicial (Dixit y Pindyck, 1994). En línea con lo anterior, el asumir tendencias que se alejan del punto inicial no consideraría un supuesto fundamental que corresponde a que los precios se relacionan con la curva de oferta marginal de largo plazo. Luego, si bien el precio en el corto plazo fluctúa de forma aleatoria de acuerdo a noticias, informaciones, huelgas, entre otros, en el largo plazo se espera que tienda a los costos de producción de la firma marginal presente en la industria (Tilton, 1977).

De acuerdo a lo anterior, se puede argumentar que el precio del cobre debiese ser modelado de acuerdo a un proceso con reversión a la media, el cual es conocido como el proceso Ornstein-Uhlenbeck. El problema de esta modelación es que este proceso no tiene cota inferior, lo que indica que los precios del cobre pudiesen adquirir un valor

negativo (Tvedt, 1995), debido a la distribución normal de este proceso en torno a la media. Luego, para efectos de esta tesis se considera la modelación del precio del cobre (P_t) como un proceso geométrico Browniano con reversión a la media (GMR, de acuerdo a sus siglas en inglés *Geometric Mean Reversion*) el cual está acotado inferiormente, lo que despeja la posibilidad de que el precio adquiriera un valor negativo. Los incrementos del proceso son los que obedecen a la fórmula 5.1, dado que la evaluación se realiza en tiempo discreto los parámetros de la fórmula 5.1 pueden ser obtenidos a través de un proceso auto-regresivo de primer orden AR (1). La fórmula 5.1 describe el proceso GMR y la fórmula 5.2 (Tvedt, 1995) el proceso AR (1).

$$dP_t = \eta \cdot (\bar{x} - \ln(P_t)) \cdot P_t \cdot dt + \sigma \cdot P_t \cdot dZ_t \quad (5.1)$$

Los parámetros \bar{x} y η corresponden a la media y la velocidad de reversión a la media, un aumento en el segundo parámetro indica que la reversión a la media (\bar{x}) es más fuerte. Por otro lado, σ corresponde a la desviación estándar instantánea de los retornos registrados en cada dt y Z_t es una variable que sigue un proceso con movimiento Browniano estándar, donde dZ_t distribuye de acuerdo a una distribución normal de media 0 y varianza dt ($dZ_t \sim N[0, dt]$).

$$\ln P_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln P_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5.2)$$

La fórmula 5.2 indica que el precio del año t es función del precio del año anterior, y los parámetros de este proceso pueden ser estimados a través de una regresión lineal. Conociendo los parámetros β_0 , β_1 y ε_t se pueden relacionar las fórmulas 5.1 y 5.2 de acuerdo a las fórmulas 5.3 y 5.4

$$\beta_1 = e^{-\eta} \quad (5.3)$$

$$\beta_0 = \left(\bar{x} - \frac{\sigma^2}{2\eta} \right) \cdot (1 - e^{-\eta}) \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_t \sim N \left[0, \frac{\sigma^2}{2\eta} \cdot (1 - e^{-2\eta}) \right] \quad (5.5)$$

Luego, aplicando logaritmo natural a la fórmula 5.3 se obtiene el cálculo de la velocidad de reversión a la media (η). Por otro lado, la desviación estándar (σ) se obtiene de la suma de los cuadrados del error del proceso AR (1).⁴² Finalmente, el valor de la media (\bar{x}) se obtiene una vez conocidos la velocidad de reversión a la media y la desviación estándar. Las fórmulas 5.6, 5.7 y 5.8 a continuación muestran en detalle lo anterior:

$$\eta = -\ln(\beta_1) \quad (5.6)$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum \varepsilon_t^2}{N-1} \right) \cdot \frac{2\eta}{(1-e^{-2\eta})}} \quad (5.7)$$

$$\bar{x} = \left(\frac{\beta_0}{1-e^{-\eta}} \right) + \frac{\sigma^2}{2\eta} \quad (5.8)$$

Tal como se destacó en el capítulo 3 existen cambios estructurales en el precio del cobre. Estos cambios han determinado diferentes tendencias en el precio de este *commodity*. Este análisis es de suma importancia ya que determina cual será el *input* del proceso AR (1). En esta tesis se consideraron para la determinación de los parámetros del proceso AR (1) diferentes años de inicio y término, los cuales determinaron el valor

⁴²De acuerdo a Markov la varianza del error insesgada se calcula como la suma de los cuadrados del error de la estimación dividido por el numero de muestras menos 1: $\left(\frac{\sum \varepsilon_t^2}{N-1} \right)$

de β_0 , β_1 y ε_t y de forma consecuente las estimaciones de η , \bar{x} y σ . La tabla a continuación resumen los parámetros obtenidos:

Tabla 5-1: Comparación de parámetros en el modelo AR (1), de acuerdo al periodo de precios del cobre considerado

Periodo considerado	β_0	β_1	η	σ	\bar{x}
1935-2005	0,78	0,85	0,16	0,22	235
1950-2005	0,69	0,87	0,14	0,23	242
1970-2005	1,00	0,80	0,22	0,24	178
1975-2005	0,96	0,81	0,21	0,21	166
1950-2010	0,74	0,86	0,15	0,24	271
1975-2010	0,67	0,87	0,14	0,23	224

*Mediante el Test estadístico F Fisher, se comprueba para los 6 periodos analizados que tanto β_0 como β_1 son diferentes de 0 al 5% de confianza.

Dado que la bolsa de metales de Londres pasó a ser el mejor referente de los precios en la década del 70 se consideró que el año 1975 es el año de inicio que mejor determina la estructura de precios del cobre.⁴³ De acuerdo a lo anterior y sumando al hecho de que el contrato de Minera Gabriela Mistral fue firmado el 22 de febrero del 2006, para el análisis *ex-ante* interesa estimar el comportamiento del precio futuro durante los 15 años de vida útil de este proyecto. Los parámetros del proceso se muestran en la fórmula 5.9 y la Figura 5-6 muestra la proyección para los próximos 15 años a partir del año (2006), nótese de esta figura la volatilidad de los precios.

⁴³ De acuerdo a lo presentado en el capítulo 3, se destaca que en el año 1975 ya los productores de Estados Unidos no eran la referencia en cuanto a precios de cobre se refiere.

$$\ln P_t = 0,96 + 0,81 \cdot \ln P_{t-1} + \varepsilon_t \sim N[0; 0,034] \quad (5.9)$$

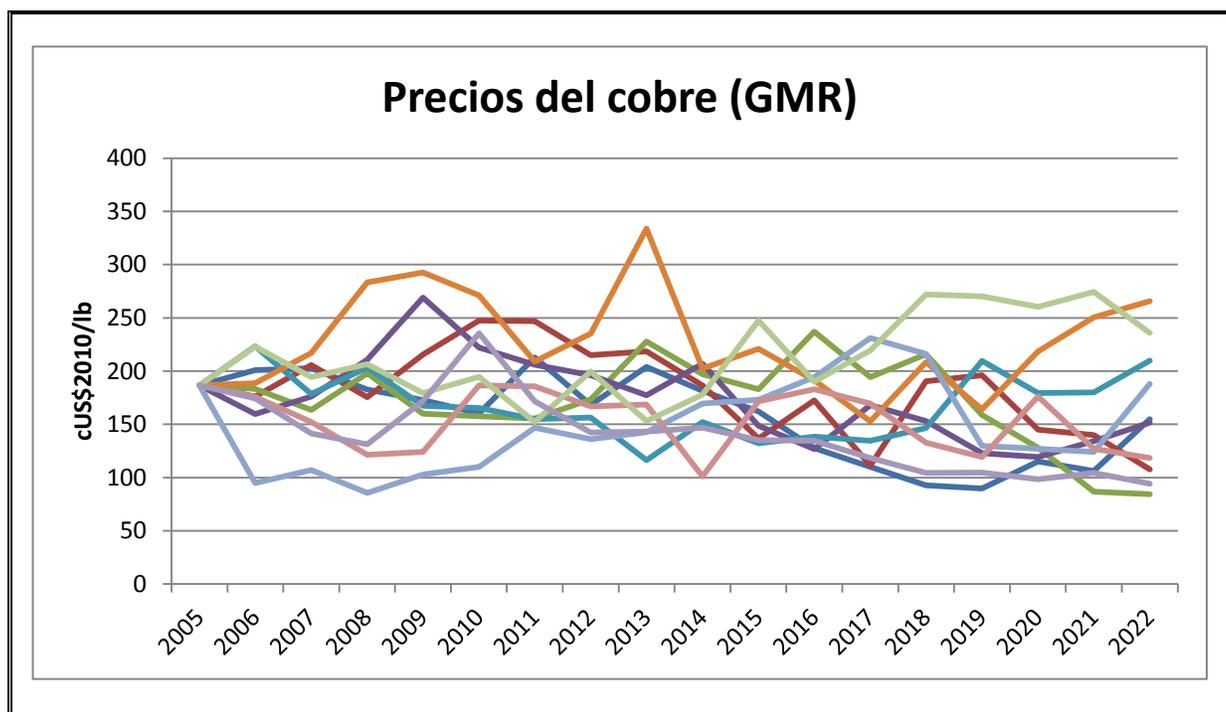


Figura 5-6: Simulación del comportamiento del precio del cobre *ex-ante*

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el análisis *ex-post* considera la estimación de los precios incluyendo los 5 años posteriores a la firma del contrato. Luego, el periodo a ser utilizado para la estimación de precios corresponde a 1975-2010, de acuerdo a esto se estiman los precios para los 12 años restantes de operación de Minera Gabriela Mistral y se consideran los precios registrados durante los 3 años – 2008, 2009 y 2010 – en que esta mina ya ha estado en operación.⁴⁴ El proceso utilizado es análogo al utilizado para el análisis *ex-*

⁴⁴ Minera Gabriela Mistral actualmente está expandiendo su capacidad, de forma de llegar a 170.000 ton de cobre fino al año, este análisis no se incluye en el análisis de esta tesis, debido a que al ser incluido no sería comparable el análisis *ex-ante* con el análisis *ex-post*.

ante, luego, los parámetros del proceso se muestra en la fórmula 5.10 y la Figura 5-7 muestra la proyección para los próximos 12 años a partir del año (2006).

$$\ln P_t = 0,67 + 0,87 \cdot \ln P_{t-1} + \varepsilon_t \sim N[0; 0,046] \quad (5.10)$$

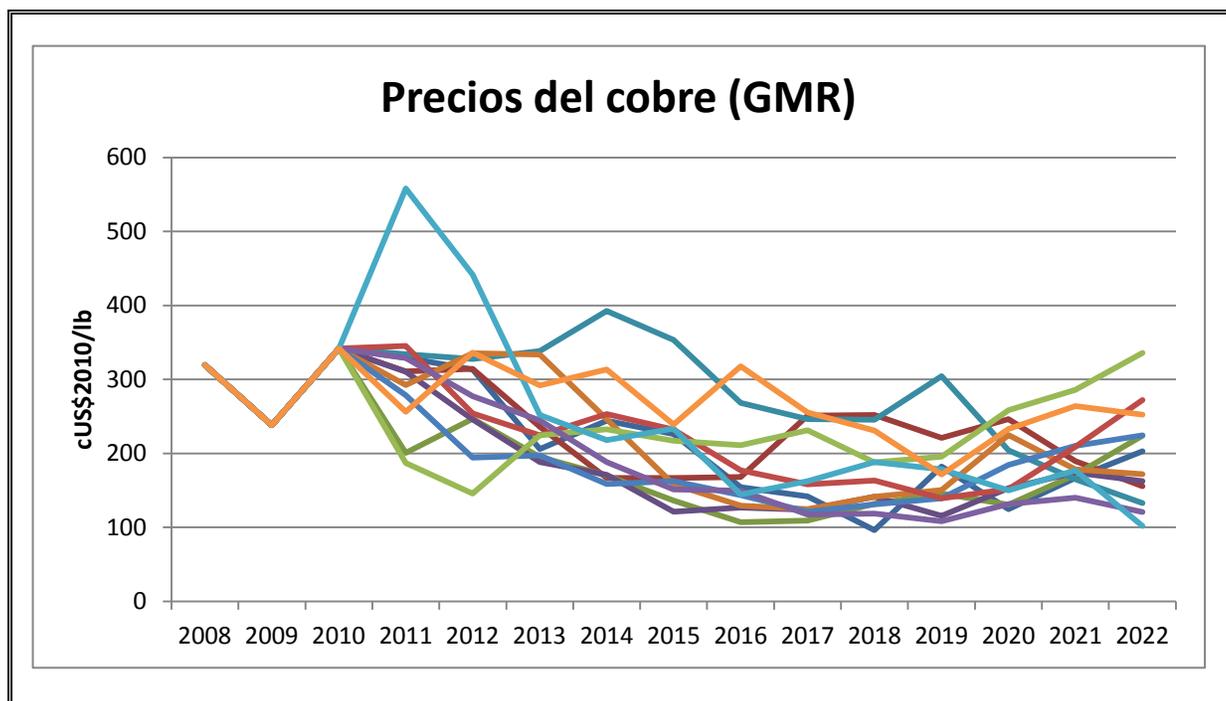


Figura 5-7: Simulación del comportamiento del precio del cobre *ex-post*

Fuente: Elaboración propia

ii) Incertidumbre en los costos operacionales

Una forma de cubrir el riesgo de la volatilidad de los precios del cobre, es estableciendo contratos de largo plazo, es decir, establecer una transacción de cierto tonelaje de cobre por un precio fijo, de acuerdo a la percepción del comportamiento de los precios del ofertante como del demandante. Si bien la cobertura de precios permite al inversionista tener una cuantificación mucho más certera de sus flujos por ventas, existe otro factor

preponderante en los flujos totales del proyecto que la cobertura en precios no incluye, estos son los costos operacionales asociados al proyecto. La teoría económica indica que antes de impuestos y la inclusión de la inversión se deben considerar los precios y los costos de la cantidad que será producida. Con la certeza en sólo uno de estos factores es difícil cubrirse del riesgo del proyecto. Dada esta condición esta tesis propone que es de suma importancia en proyectos de evaluación minera considerar el comportamiento de los costos de la industria y en específico de Codelco, ya que estos serán un factor determinante en la evaluación.

El estudio de los costos de la industria se llevo a cabo desde el año 1950 al año 2010,⁴⁵ para el caso de Codelco se consideraron los costos C1 desde el año 1990 al año 2010,⁴⁶ la Figura 5-8 muestra el comportamiento de los costos de la industria versus los precios del cobre (1950-2010), la Figura 5-9 en tanto, muestra el comportamiento de los costos de Codelco, la industria y los precios del cobre (periodo 1990-2010). Ambas figuras muestran que las tendencias de los precios y costos están correlacionadas, es decir a mayores precios, mayores costos. Se destaca además dentro de la Figura 5-9 la similar tendencia de los costos de Codelco frente a los de la industria, lo que nos indica que los costos a nivel de industria del cobre son influenciados por factores macroeconómicos.⁴⁷

⁴⁵ Se consideraron los costos operacionales como los costos C1, ya que este es el tipo de costo que emplea la industria minera mundial para comparar niveles de eficiencia entre las distintas compañías, indicando a su vez en qué posición (cuartil) se encuentra cada compañía.

⁴⁶ No se cuenta con los datos anteriores para la corporación pero como se verá en esta sección este comportamiento es similar al de la industria.

⁴⁷ Los factores macroeconómicos impactan directamente en los costos de los insumos de la industria, ya sea ácido, petróleo y energía.

De acuerdo a lo anterior, esta tesis considera para el análisis *ex-ante* y *ex-post* la correlación que existe a entre los costos de la industria y precios.⁴⁸ El coeficiente entre ambas variables – de acuerdo al precio de registro en t y el costo en $t + 1$ – para el caso *ex-ante* considera el periodo 1950-2005. Luego, de acuerdo a esto el coeficiente de correlación de Pearson corresponde a 0,81. Por otro lado, para el caso *ex-post* el cual considera el periodo 1950-2010, el coeficiente de correlación de Pearson es de 0,75. Lo anterior de acuerdo al aumento sistemático de los precios durante el periodo 2004-2007.

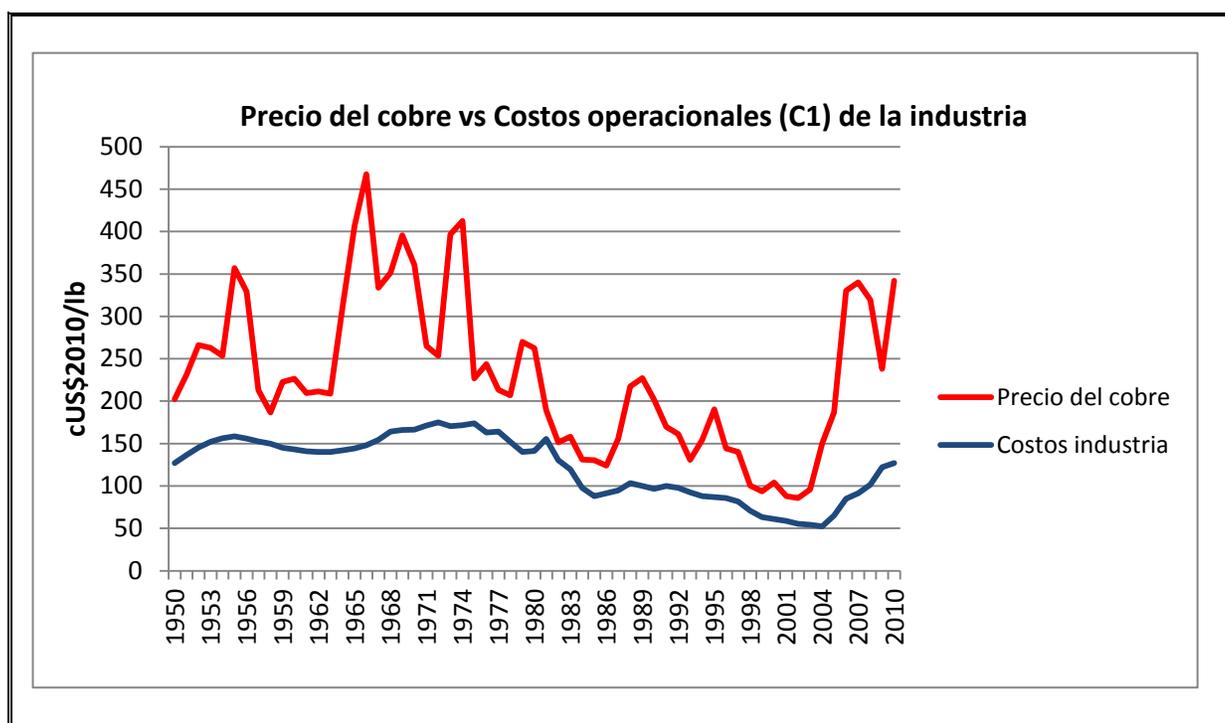


Figura 5-8: Precio del cobre y costos de la industria del cobre entre 1950-2010

Fuente: LME, Richard Schodde (2010 MEMS Conference Mineral and Metal Markets)

⁴⁸Se detectó que una mejor estimación de la correlación entre los costos de la industria y el precio del cobre estaba dada entre el precio registrado en el año t y el costo registrado en $t + 1$.

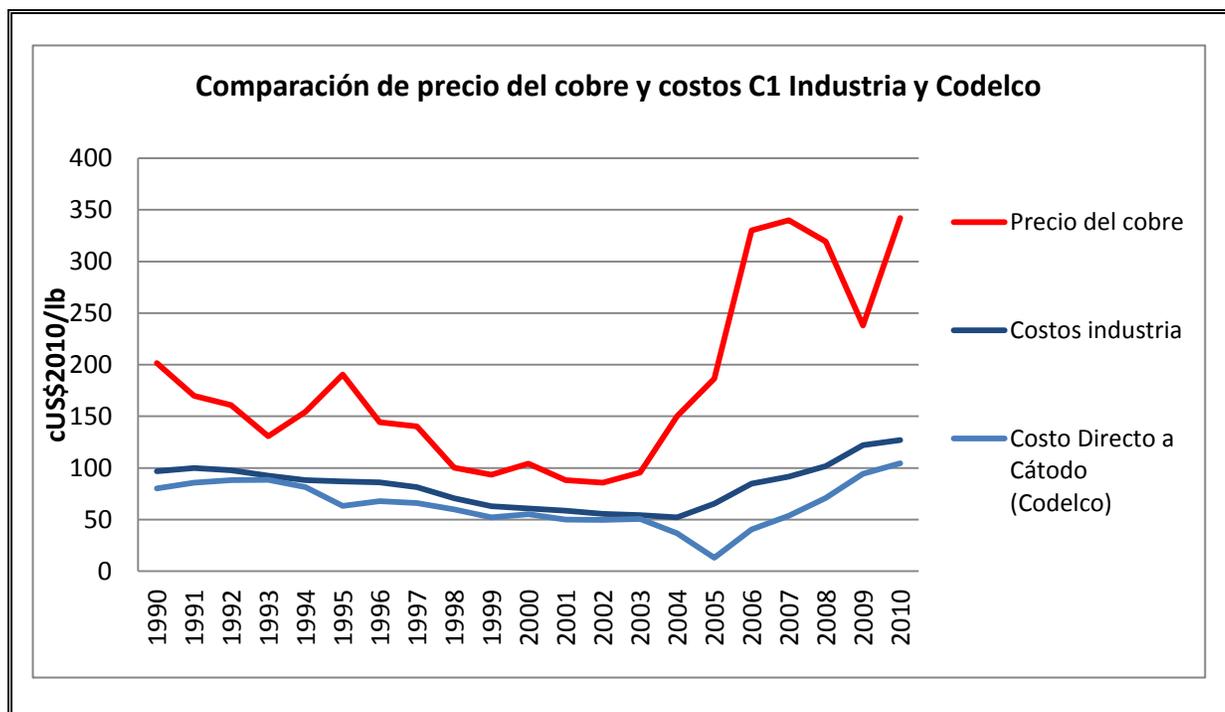


Figura 5-9: Precio del cobre y C1 de la industria del cobre y de Codelco

Fuente: LME, Richard Schodde, Cochilco

Los costos estimados para Minera Gabriela Mistral se presentan en la Figura 5-10. Si se considera que las estimaciones fueron realizadas en el año 2005 a precios esperados de largo plazo correspondientes a 1,0 US\$2005/lb, la estimación permite la operación de la mina considerando que este yacimiento es marginal.⁴⁹ Al analizar *ex-post* lo sucedido los precios del cobre para los años 2008, 2009 y 2010 fueron de 3,19, 2,38 y 3,42 US\$2010/lb muy por sobre lo esperado en la evaluación y los costos C1 de Minera Gabriela Mistral fueron de 1,13, 0,95 y 1,30 US\$2010/lb al igual que en el caso de los precios muy por sobre lo estimado en la evaluación de 78,0, 74,6 y 70,4 US\$2010/lb. Luego, el asumir una correlación entre el precio y los costos debe ser considerado en la

⁴⁹ La marginalidad de la operación se presentará en la cuantificación de la incertidumbre de la inversión.

evaluación de un proyecto minero, sobre todo si estos son evaluados en casos optimistas de precios de cobre, escenarios de precios medios y escenarios de precios bajos.

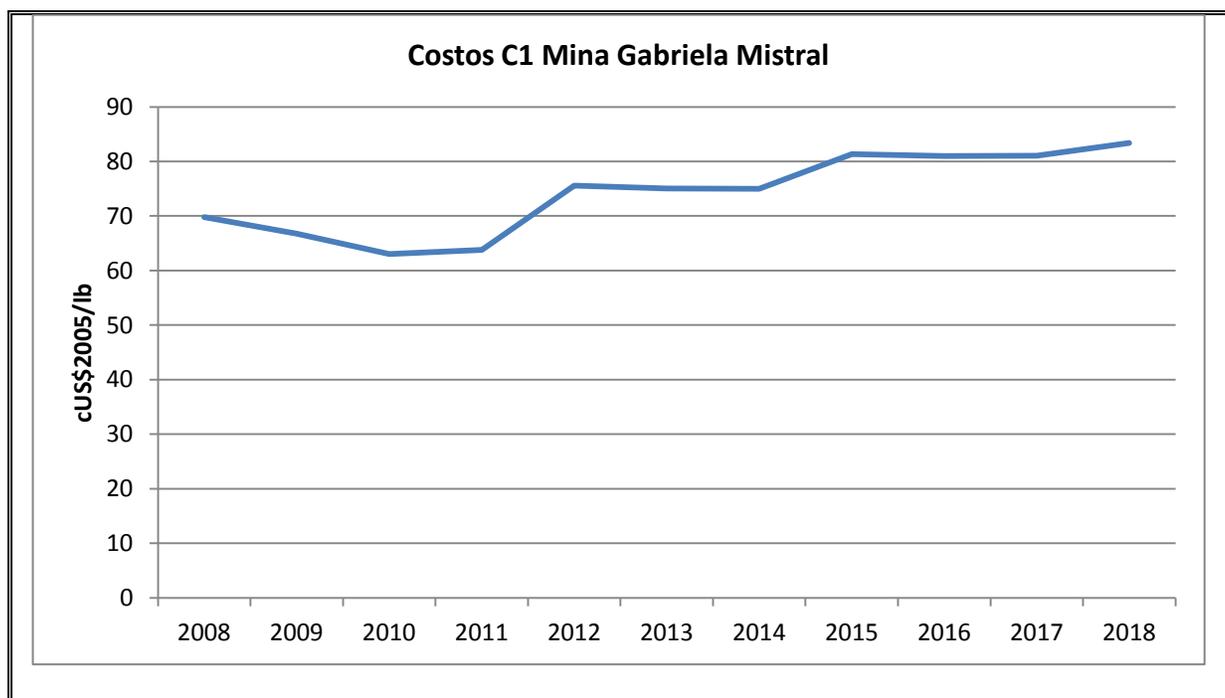


Figura 5-10: Costos C1 de Minera Gabriela Mistral

Fuente: Brook Hunt

De acuerdo a lo anterior, se detecta por tanto que una cobertura en los precios debe llevar asociada una cobertura en los costos. Esta tesis considera en su modelo mediante opciones reales que la correlación entre los precios del cobre y los costos del proyecto Gabriela Mistral debe ser incluida como una componente en la simulación. Luego, la componente de correlación entre el precio en t y el costo en $t + 1$ será de 0,81 para el caso *ex-ante* y 0,75 para el caso *ex-post*, de acuerdo a lo presentado anteriormente.

En línea con lo anterior esta tesis propone un modelo que considera dos grandes *inputs* a nivel de costos:

1. Ajuste de distribución de probabilidades del *cash cost* promedio de la industria considerando para el caso *ex-ante* el periodo 1975-2005 y para el caso *ex-post* el periodo 1975-2010
2. Inclusión de la correlación del precio del cobre con el *cash cost* promedio de la industria del cobre

El ajuste de distribución de probabilidades del *cash cost* promedio de la industria incorpora en su estructura factores operativos de los yacimientos que han estado en operación durante los periodos considerados como representativos del análisis, 1975-2005 y 1975-2010. Dentro de estos se incluyen: la disminución de las leyes, el aumento de la razón estéril mineral (*stripping ratios*), y con esto el aumento de costos debido a la mantención de equipos e insumos (neumáticos, petróleo), además de los costos asociados a mano de obra. Lo anterior está directamente relacionado con la tendencia de la curva de costos de la Figura 5-10.

Por otro lado, la inclusión de la correlación del precio del cobre con el *cash cost* promedio de la industria del cobre, incluye el factor determinante de la cobertura al riesgo en los ingresos, y por tanto en la maximización del VPN, ya que se espera que en una economía emergente la demanda por los ítems mencionados anteriormente aumente

y por lo tanto las minas deben pagar más por estos insumos encareciendo sus costos operacionales.

Esta tesis por tanto considera para los costos – en la evaluación *ex-ante* y *ex-post* – una distribución de probabilidad asociada a estos. Luego, los costos correspondientes al plan minero son ajustados de acuerdo a una distribución de probabilidades mediante el *software* EasyFit. La distribución ajustada mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para el análisis *ex-ante* corresponde a la distribución triangular de parámetros (41,76; 76,37; 174,00).⁵⁰ Por otro lado, los costos para el análisis *ex-post* consideran los costos registrados en los 3 primeros años de operación de Minera Gabriela Mistral. En tanto, los 12 años de operación restantes del yacimiento son ajustados mediante una distribución de probabilidades triangular de parámetros (41,76; 78,44; 174,00). La Figura 5-11 y la Figura 5-12 presentan el ajuste de distribuciones de probabilidades para el análisis *ex-ante* y *ex-post*.

⁵⁰ La notación utilizada corresponde al valor mínimo, al valor de la moda y al valor máximo (Mínimo, Moda, Máximo).

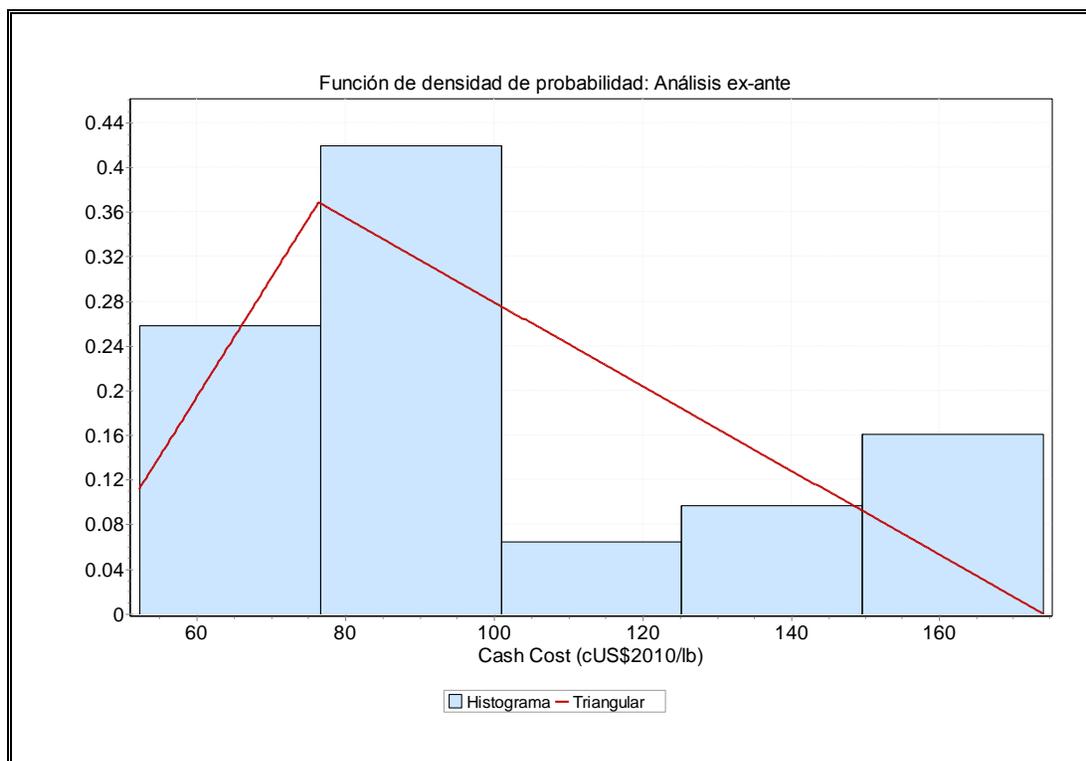


Figura 5-11: Ajuste de distribución de los costos *ex-ante* de Minera Gabriela Mistral

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de Richard Schodde

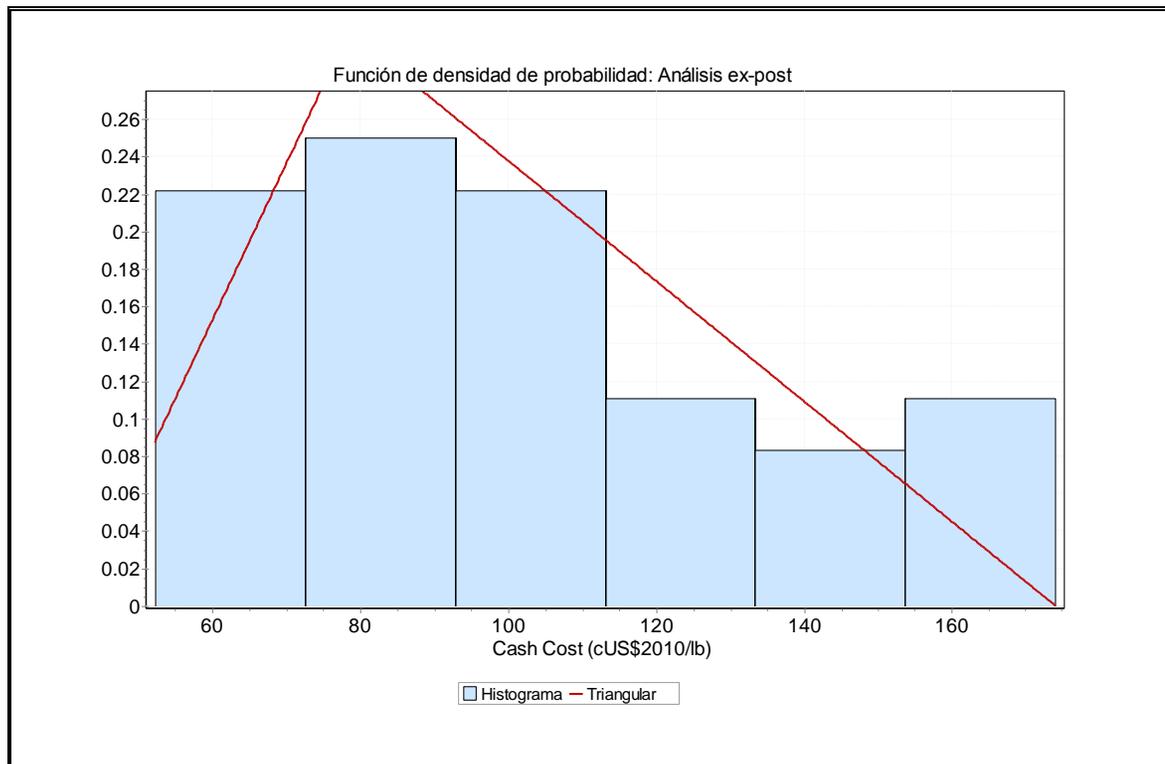


Figura 5-12: Ajuste de distribución de los costos *ex-post* de Minera Gabriela Mistral

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de Richard Schodde

iii) Incertidumbre en la inversión

La estructura de los costos de capital (CAPEX) asociada a proyectos individuales del mercado del cobre es diferente a través del tiempo, esta premisa se basa en que la información reportada por diversas empresas en las diferentes etapas del proyecto, ya sea en ingeniería de perfil, ingeniería de pre-factibilidad, ingeniería de factibilidad e ingeniería de construcción difiere. Esto se debe a que muchos de los gastos de capital inicialmente incluidos no representan el 100% de los costos finalmente materializados, y

además existe una componente de ciclicidad económica, asociada a crecimientos de la demanda y por ende de precios lo que impacta directamente en los costos de los insumos. Es importante en esta línea destacar que los cambios en la escala de los proyectos y los alcances que estos puedan tener deben ser considerados ya que ciertamente estas aristas cambian la magnitud del problema y pueden aumentar el *gap* entre lo inicialmente presupuestado para la inversión y la inversión que fue finalmente materializada.

La inversión es uno de los factores determinantes a la hora de evaluar proyectos mineros, en efecto uno de los indicadores que Codelco considera importante en la evaluación es el Índice del Valor Actual Neto (IVAN), el cual corresponde a la razón entre el VPN y la inversión, es decir el retorno que genera cada peso invertido.⁵¹ En el caso de Minera Gabriela Mistral, el plan minero indica que el IVAN es de 0,4.⁵² Luego, de acuerdo a este parámetro este proyecto está dentro del rango de los proyectos considerados marginales y por tanto es más sensible a las variables inciertas. Sumado a lo anterior existe otro atributo que lo convierte en marginal, que es el relativo a la ley de corte que se considera económica en el yacimiento, la cual corresponde a 0,2%, lo que indica la sensibilidad a la recuperación metalúrgica. En línea con lo anterior, es importante considerar que los proyectos marginales son mucho más sensibles a los

⁵¹ En el caso de Codelco un proyecto minero se considera marginal si el IVAN, pertenece a un rango entre [0,1 y 0,5]. En este sentido es importante destacar que Auger y Guzmán (2010) muestran que la mediana de 51 proyectos de cobre que entraron en producción entre 1950 y 2000 es de 0,37; lo que indica que un IVAN de 0,4 es competitivo en cuanto a los proyectos de cobre se refiere.

⁵² Este VPN considera una tasa de descuento del 8% y un precio de largo plazo de 1,0 cUS\$2005/lb.

precios, costos, inversión, y recuperación metalúrgica, por lo que estos factores juegan un rol determinante en la evaluación. Esto debido principalmente a que la brecha entre ser marginalmente positivo o negativo se acentúa, debilitando la probabilidad de ejecución del proyecto.

Esta tesis, con el fin de visualizar el comportamiento de la inversión consideró 42 proyectos mineros, los cuales consideraban el inicio de su producción entre el año 1998 y el año 2005. Luego, se evaluó la tasa existente entre diferentes inversiones de registro (I_f) y su inversión inicialmente esperada (I_i), totalizando así 53 muestras.⁵³ La conclusión es que el 10% de los proyectos analizados sobreestimaron su inversión mientras que el restante 90% la subestimó. Se detectó que la subestimación de los proyectos se debe principalmente al ciclo económico de precios al alza que impactó directamente en los costos de capital de la industria, aumentando de forma significativa las inversiones; en efecto, muchos proyectos que iniciaban su etapa de factibilidad en el año 2004 postergaron su inversión y aún están en carpeta. A modo de ejemplo, considérese el caso de este estudio, Minera Gabriela Mistral, este yacimiento inicialmente – año 2004 – contemplaba una inversión de 552 MUS\$2010, ya en el año 2006 contemplaba una inversión de 930 MUS\$2010 y finalmente la inversión materializada fue de 1.284 MUS\$2010, lo que corresponde a un aumento de 2,3 veces la inversión que inicialmente se tenía contemplada.

⁵³ Para que estos proyectos sean comparables con la evaluación del proyecto GABY se consideraron fechas de último registro de inversión hasta inicios del año 2007, además se eliminaron 3 muestras por considerarse *outliers*.

Esta tesis por tanto considera que la inversión presenta una distribución lognormal con valor mínimo 0,7 (sobrestimación del proyecto), una media de 1,5 (indicando que la tendencia es a la subestimación de los proyectos) y un valor máximo de 3,0 correspondiente a subestimar la inversión asociada a el proyecto.⁵⁴ El análisis de esta distribución se realizó ajustando la razón entre la inversión final y la inversión inicial (I_f/I_i) mediante *software @Risk* considerando como *input* los 42 proyectos analizados.⁵⁵ La Figura 5-13 muestra el histograma de la razón previamente señalada y por otro lado la Figura 5-14 muestra el ajuste de la distribución de ésta.

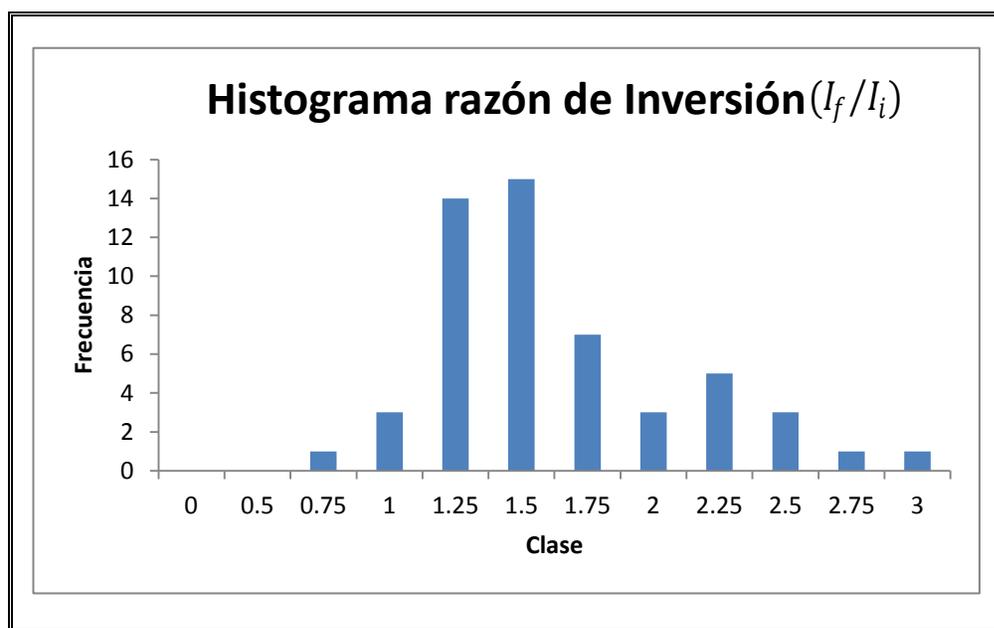


Figura 5-13: Histograma de la inversión de los 42 proyectos analizados

Fuente: Elaboración propia

⁵⁴ Si bien esta distribución no tiene una cota máxima para fines de la evaluación se considera que la restricción de ésta será 3 de acuerdo al máximo *input* que se consideró para la generación de la distribución.

⁵⁵ Se consideró que la distribución lognormal era la que mejor ajustaba los datos mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov.

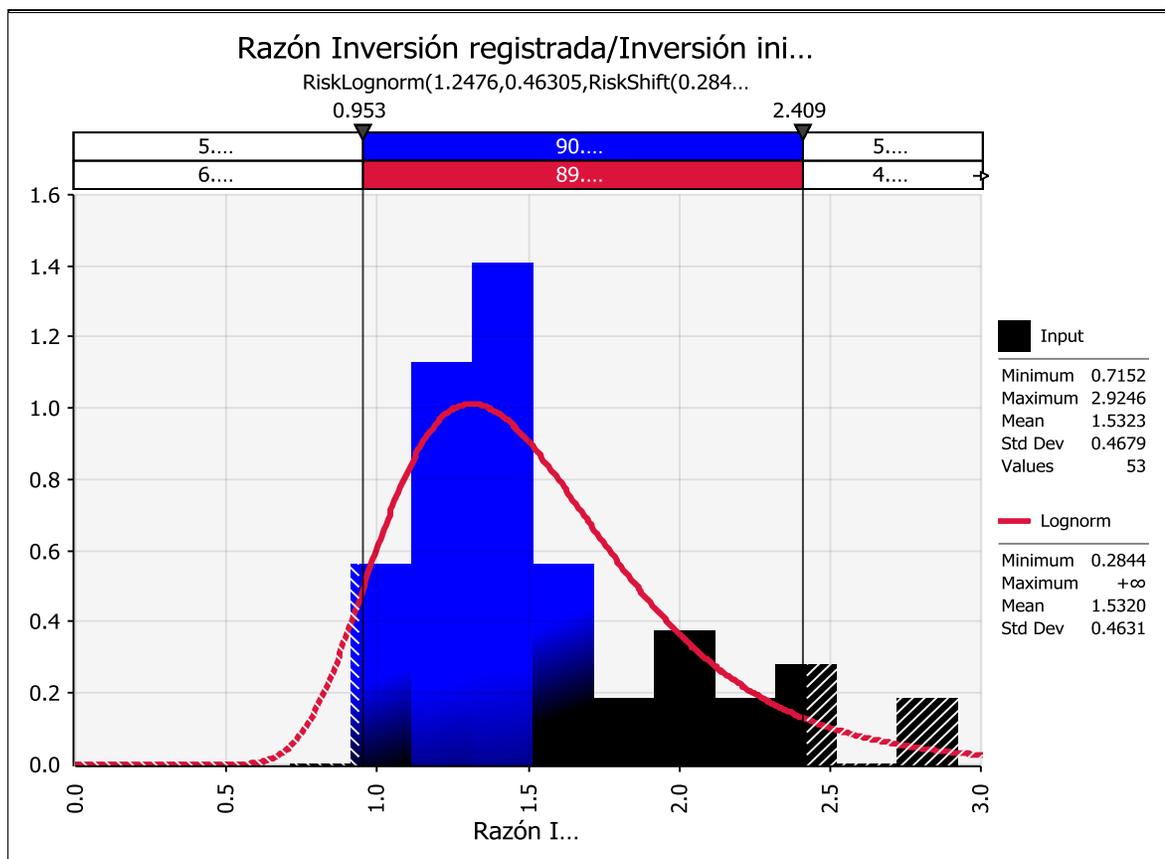


Figura 5-14: Ajuste de la distribución de la razón de inversión (I_f/I_i)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el análisis *ex-post* considera la inversión efectivamente materializada en Minera Gabriela Mistral correspondiente a los 1.284 MUS\$2010.

c) Propias al yacimiento

La evaluación de las incertidumbres propias al yacimiento se realizó de acuerdo a la información de leyes, razón de solubilidad y extracción de cobre presente en las diferentes unidades geometalúrgicas (UGM) definidas en el yacimiento de Minera Gabriela Mistral. El plan de alimentación de Minera Gabriela Mistral está asociado a la

producción de 150.000 toneladas/año de cobre fino. Para que esto se cumpla el plan minero metalúrgico considera el procesamiento de 4 de las 5 UGM presentes en el yacimiento, las cuales corresponden a 1) Alta Crisocola (AC), 2) Media Crisocola (MC), 3) Baja Crisocola (BC), 4) Baja Crisocola de Baja Solubilidad (BCBS) y 5) Óxidos Negros (OXN), esta última unidad es la que se excluye del plan minero, debido al desconocimiento de su comportamiento en la recuperación metalúrgica. La Figura 5-15 muestra el movimiento del material de Minera Gabriela Mistral durante los 15 años de extracción. De acuerdo a este plan minero-metalúrgico se establecieron los porcentajes de tipo de material a ser extraído de forma anual.

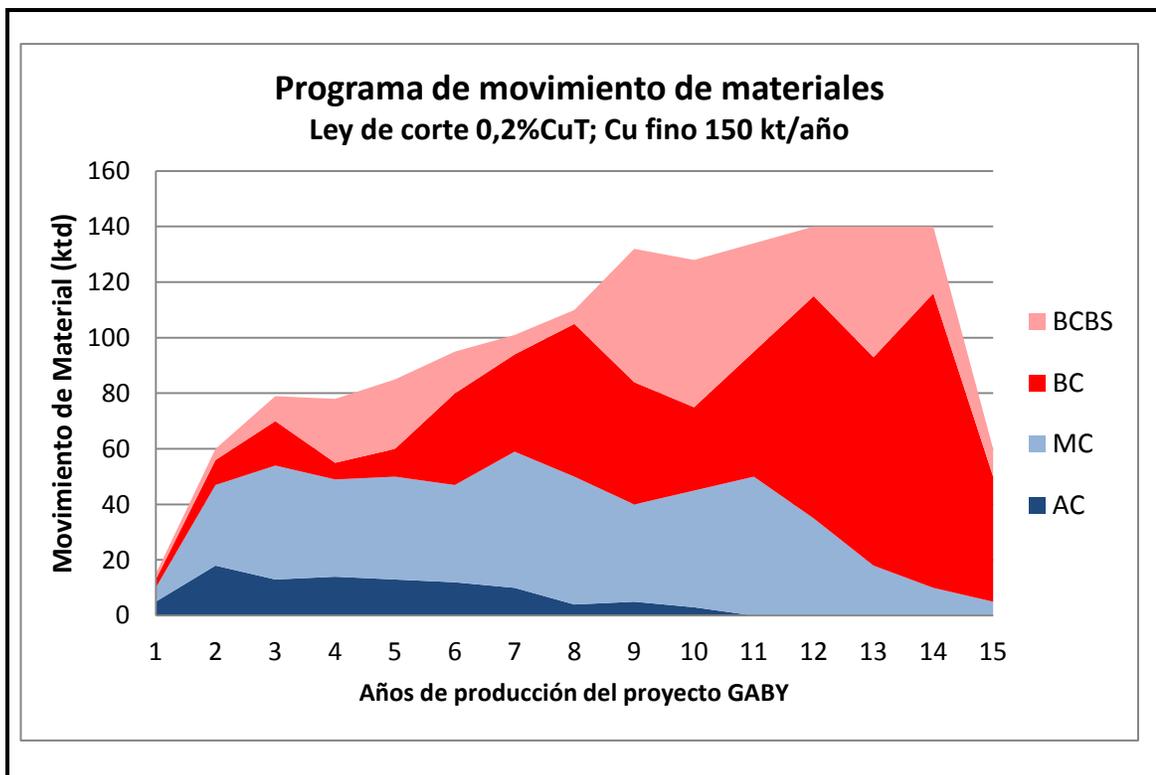


Figura 5-15: Movimiento de material del plan minero metalúrgico

Fuente: Elaboración propia en base a archivos del plan minero del proyecto Gaby

El movimiento de las UGM permitió establecer, a nivel porcentual, el movimiento de cada UGM a ser extraída a lo largo de la vida de la mina, este porcentaje es el que permitió en la simulación Monte Carlo la separación del tonelaje de extracción en las 4 UGM, pudiendo así incluir las incertidumbres propias al yacimiento.

i) Incertidumbre geológica

Esta tesis considera que la incertidumbre geológica se modela mediante las 49 muestras de las diferentes UGM a ser extraídas.⁵⁶ La modelación de la distribución de las leyes se consideró de forma separada para cada una de las UGM presentes en la extracción. De acuerdo a que la concentración de las leyes asociada a cada UGM es muy diferente. En efecto, al analizar la concentración de las leyes para cada UGM se detectó que la UGM AC concentra el mayor porcentaje de sus leyes entre 1% y 1,2%, en tanto la UGM MC concentra sus leyes entre 0,5 y 0,7% de cobre contenido, por otro lado la UGM BC concentra sus leyes entre 0,3% y 0,4%, finalmente, la UGM BCBS posee poca información para concluir pero de las dos muestras realizadas las leyes se concentran en 0,6%. La Figura 5-16 muestra los diferentes histogramas para cada una de las UGM.

⁵⁶ Se tomaron 54 muestras y se excluyen las correspondientes a los óxidos negros.

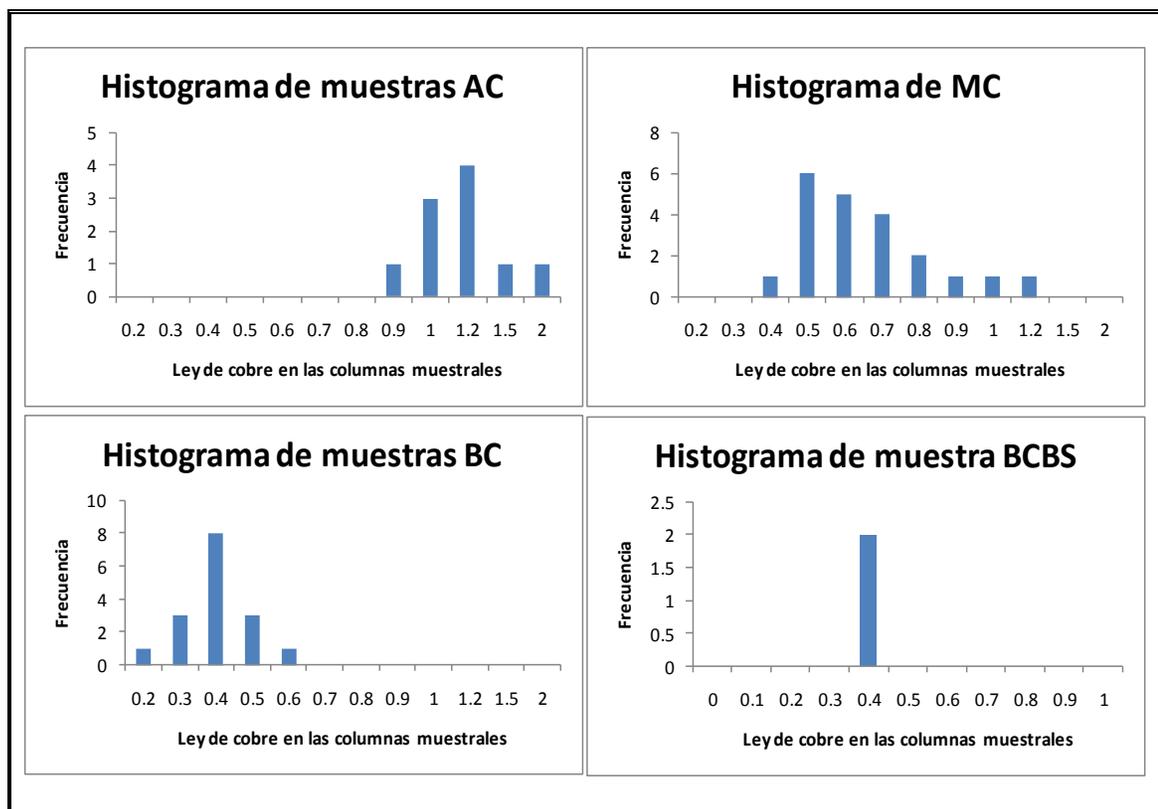


Figura 5-16: Histogramas de la concentración de leyes en cada una de las UGM

Fuente: Elaboración propia en base a archivos del plan minero del proyecto Gaby

La modelación de la distribución de probabilidad de las leyes de cobre asociada a cada una de las 4 UGM a lo largo de la vida útil del yacimiento fue realizada con el *software* @Risk. Los resultados indicaron que la modelación más robusta para las UGMs AC, MC y BC correspondían a la distribución triangular de parámetros (0,84; 0,84; 1,63), (0,38; 0,38; 1,19) y (0,15; 0,38; 0,56),⁵⁷ respectivamente; la UGM BCBS, en tanto, al no contar con una cantidad suficiente de datos que permitiesen un ajuste de distribución de probabilidades (sólo se contaba con dos muestras para su modelación) fue modelada

⁵⁷ La notación utilizada corresponde al valor mínimo, al valor de la moda y al valor máximo (Mínimo, Moda, Máximo)

mediante una distribución uniforme de parámetros (0,31; 0,39). Si bien esta forma de modelación no es la óptima es una práctica común en la industria, ya que la realización de pruebas que refinen las estimaciones son muy costosas, más aún las asociadas a sectores de mayor profundidad en el yacimiento, como es el caso del material BCBS. La Figura 5-17 presenta las distribuciones de probabilidades previamente descritas para las UGMs AC, MC y BC.

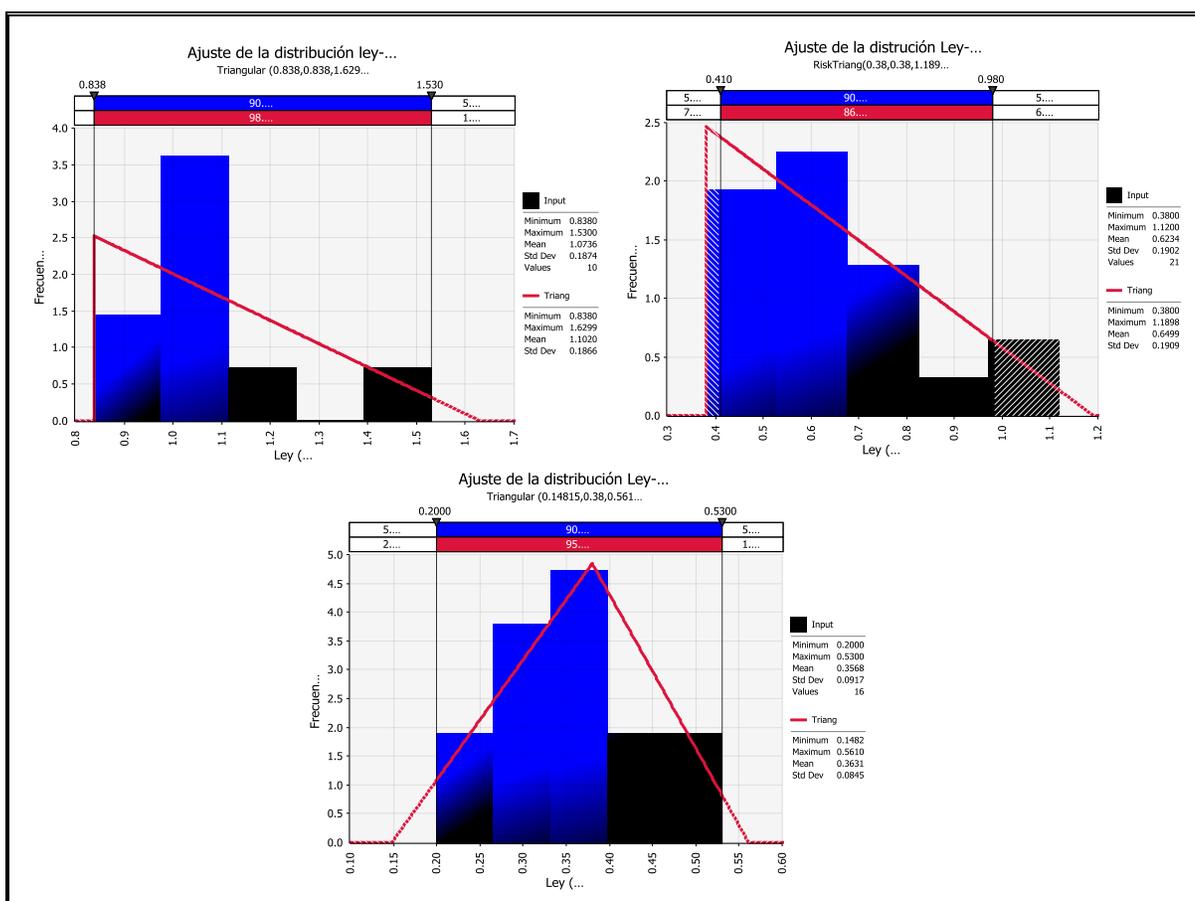


Figura 5-17: Ajuste de distribución de probabilidad de las leyes geológicas.

Fuente: Elaboración propia

ii) Incertidumbre en la recuperación metalúrgica

Para el caso de la modelación asociada a la recuperación metalúrgica, al igual que en el caso de las leyes, se consideró de forma separada cada una de las UGM presente en el yacimiento.

Esto, en línea con que la recuperación difiere para cada una de las unidades, la Figura 5-18 muestra los histogramas asociados a cada una de las UGM.

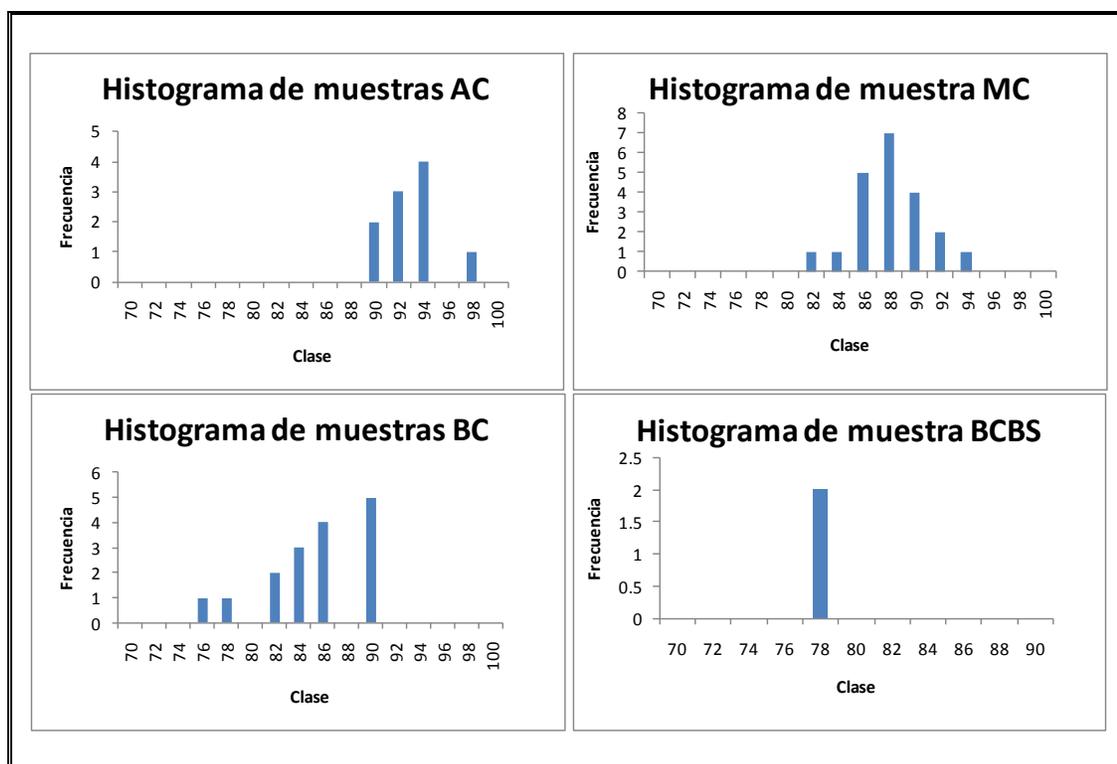


Figura 5-18: Histogramas de recuperación metalúrgica para cada una de las UGM

Fuente: Elaboración propia en base a archivos del plan minero del proyecto Gaby

La recuperación está relacionada a la ley de mineral, es decir a una mayor ley se espera una mayor recuperación.⁵⁸ En efecto, para el caso de la UGM AC la recuperación se concentra en el rango 92%-94%, en tanto, para el caso de la UGM MC la recuperación se concentra en el rango 86%-90%, para el caso de la UGM BC la recuperación es mucho mas variable, pero concentra los *picks* en 86% y 90%. Finalmente, el caso de la UGM BCBS posee poca información para concluir dado que las dos muestras analizadas registran una recuperación entre 77% y 78% (véase Figura 5-19, donde se incluyen todas las muestras y la relación con la ley).

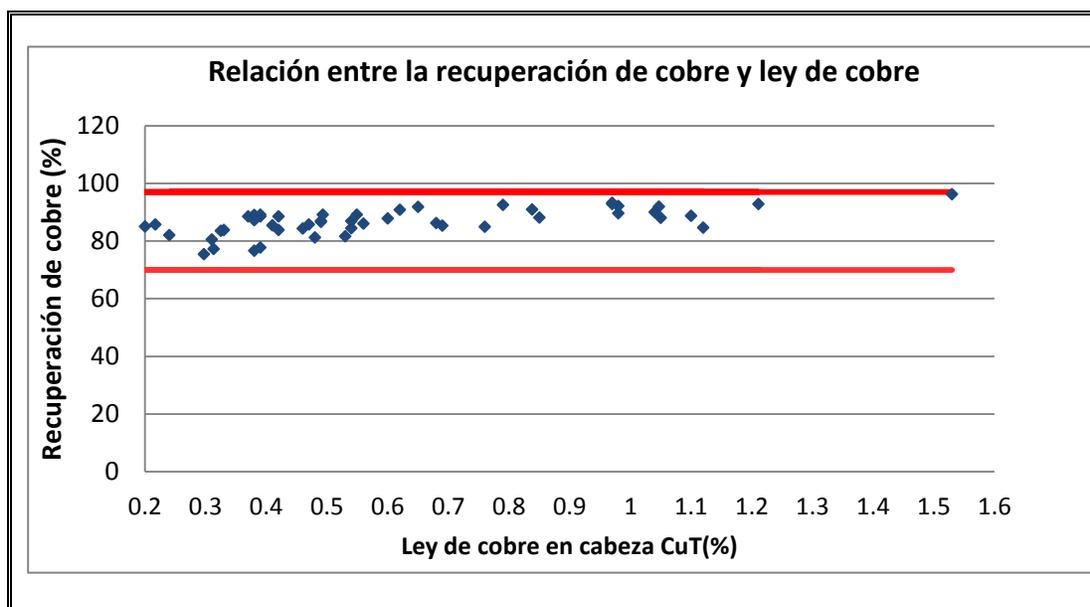


Figura 5-19: Diagrama de dispersión: recuperación metalúrgica – ley de cobre

Fuente: Elaboración propia en base a archivos del plan minero del proyecto Gaby

⁵⁸El coeficiente de Pearson entre ambas muestras es de 0,65.

Al igual que en el caso de la modelación de la distribución de probabilidad de las leyes de cobre, la recuperación metalúrgica asociada a cada una de las 4 UGM a lo largo de la vida útil del yacimiento fue realizada con el *software* @Risk. De acuerdo a esto, la UGM AC posee una distribución triangular de parámetros (88,1; 88,1; 98,0),⁵⁹ en tanto la distribución asociada a las UGMs BC y MC corresponden una distribución triangular de parámetros (80,5; 87,0; 93,8) y (73,5; 89,2; 89,2) y respectivamente; la UGM BCBS, en tanto, al no contar con una cantidad suficiente de datos que permitiesen un ajuste de distribución de probabilidades (sólo se contaba con dos muestras para su modelación) fue modelada mediante una distribución uniforme de parámetros (77,3; 77,8). La Figura 5-20 presenta las distribuciones de probabilidades previamente descritas para las UGMs AC, MC y BC.

⁵⁹ Si bien en el caso de esta variable la distribución log-normal era una mejor referencia en cuanto a ajuste se refiere, las cotas superiores e inferiores de modelación habrían adquirido valores de 63,76% e infinito. Esto implicaría restringir las cotas de acuerdo a la imposición de barreras mínimas y máxima, luego un ajuste similar a la distribución triangular se hubiese generado. Luego, en esta línea se considera como criterio y un ajuste de distribución triangular.

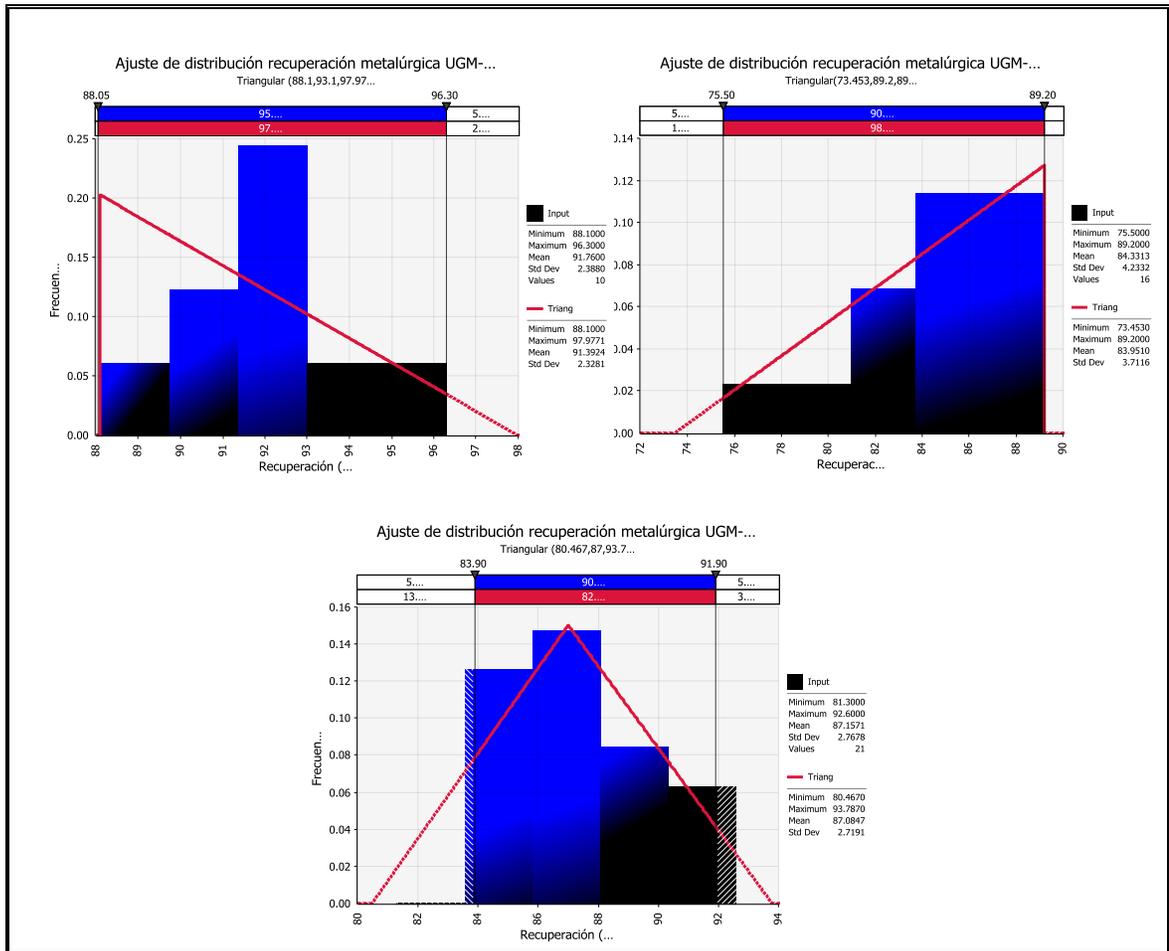


Figura 5-20: Ajuste de distribución de probabilidad de la recuperación metalúrgica.

Fuente: Elaboración propia

Una vez analizadas las incertidumbres propias al yacimiento se procede a la implementación de estas a nivel de planificación minera anual. Este análisis se realizó ponderando la ley y la recuperación de las muestras de las 4 UGM por su porcentaje en el movimiento del material a lo largo de la vida de la mina, de acuerdo a la fórmula 5.11.

$$\sum_{i=1}^4 Mineral \cdot UGM_i \cdot Ley_{UGM^i} \cdot Rec_{UGM^i}, \tag{5.11}$$

5.2 Cuantificación de las opciones mediante simulación de Monte Carlo

De acuerdo a la estructura señalada en la Figura 5-3, las opciones se pueden cuantificar una vez implementadas las incertidumbres – expuestas en la sección 5.1 – en el plan minero-metalúrgico. A través del *software* complementario a la plataforma MS Excel @Risk son ingresadas las distribuciones de probabilidad tanto de las incertidumbres económicas como de las incertidumbres propias al yacimiento. Luego, las opciones reales pueden ser cuantificadas a través de la determinación de la diferencia entre el valor esperado del VPN dinámico y el valor esperado del VPN estático ($\text{valor opción} = E(\text{VPN}_{\text{dinámico}}) - E(\text{VPN}_{\text{estático}})$, véase fórmula 2.4).

Dado que la resolución del valor de un activo es calculado a través de *backward induction*, la resolución de los árboles de decisiones es de atrás hacia adelante o de derecha a izquierda, (Hull, 2008, Smit y Trigeorgis, 2004) considerando que las opciones anteriores ya han sido ejecutadas, el análisis a continuación describe la cuantificación de las opciones partiendo desde la opción 3 a la opción 1, tanto para el caso *ex-ante* como para el caso *ex-post*.

i) Opción 3: Emisión de Bono y Postergación de la inversión

La opción 3 considera en primer lugar el financiamiento por parte de la estatal mediante las opciones de financiamiento actuales que ocupa esta institución. En segundo lugar, en tanto, considera bajo qué precio de ejercicio se debiese considerar la opción de postergar el desarrollo del yacimiento.

En este caso la alternativa de financiamiento considerada es la emisión de un bono.⁶⁰ Luego, para el caso del proyecto GABY se debe considerar un bono tal que una vez el que proyecto se encuentre en operación, se hayan generado flujos de caja tales que el proyecto sea capaz de solventar el valor del principal del bono en el vencimiento de éste y el pago del interés sobre el valor del principal cada periodo y al vencimiento de éste. Sumado a lo anterior, se debe considerar que el pago de intereses por periodo debiese ser considerado de forma anual, de tal manera que este sea comparable con el caso del contrato con MINMETALS que contempla cierta entrega de producción anual.⁶¹

Así, al analizar la estructura de un bono como opción de financiamiento, se tiene que considerar cuál es el periodo óptimo de pago. En esta línea las consideraciones se exponen a continuación.

1. Considerar una producción de 15 años
2. Considerar precios estocásticos a lo largo de la operación del yacimiento
3. Consideración de las incertidumbre propias del yacimiento

⁶⁰ Un bono es un seguro que se establece en el marco de un acuerdo prestamista. El emisor vende el bono a un comprador por cierta cantidad de dinero, el bono es el “pagaré físico” del emisor. El acuerdo obliga al emisor a realizar pagos específicos en fechas también específicas. Un bono típico obliga al emisor del bono a realizar pagos semianuales del interés hasta el vencimiento del bono. Cada uno de estos pagos son conocidos como pagos del cupón sobre el interés del bono (*coupon payments*). Por otro lado, al vencimiento del bono, el emisor debe pagar la deuda a los compradores del bono mediante el pago del valor nominal de éste, conocido como el principal (*par value*). La tasa de cupón del bono sirve para determinar el pago de intereses, en efecto, el pago anual corresponde a la tasa de cupón veces el valor nominal del bono. La tasa de cupón, fecha de vencimiento, y el valor nominal de los bonos son parte del contrato de emisión de bonos, que es el contrato entre el emisor y el comprador del bono.

⁶¹ Otra opción de financiamiento puede ser un crédito sindicado, este caso no fue considerado debido a que no se conocían las tasas de interés de la época para hacer replicable este tipo de financiamiento con la opción conjunta de inversión de Codelco con MINMETALS.

4. Fórmula de duración de un bono,⁶² tal que se asegure liquidez antes de materializar el pago del principal:

$$Duración: \frac{\sum_{t_i} \frac{E(Producción)_{t_i} \cdot E(Precio\ del\ cobre)_{t_i}}{(1+r)^{t_i}} t_i}{\sum_{t_i} \frac{E(Producción)_{t_i} \cdot E(Precio\ del\ cobre)_{t_i}}{(1+r)^{t_i}}} \quad (5.12)$$

La resolución de esta ecuación permitió encontrar una duración de 8 años. Luego, después de un periodo de 8 años en operación se debiese contemplar el pago del principal, dado que para que el proyecto inicie su operación deben pasar 2 años, a los 8 años estimados mediante la fórmula 5.12, se deben sumar los dos años de construcción. Luego, esta tesis considera que el periodo de maduración de un bono de financiamiento para esta operación debe de ser de al menos de un periodo de 10 años.

En línea con el análisis anterior, es importante realizar el contraste con los bonos emitidos por Codelco en el mercado financiero. De acuerdo a la filial de Standard & Poor's, la clasificadora de riesgo Feller-Rate, posicionaba a Codelco con una Solvencia AAA y perspectivas estables. Lo anterior de acuerdo a que la estatal chilena se posicionaba como el principal productor de cobre del mundo, con bajos niveles de costos operacionales y amplias reservas del mineral. Esta misma clasificadora de riesgos expone en su boletín de abril del año 2005 3 hechos relevantes:

“En marzo de 2005 la compañía realizó una emisión de bonos en el mercado local por UF 6,9 millones (aproximadamente US\$200 millones). Los nuevos bonos tienen una duración de 20 años y tasa de interés de 4% anual. Los fondos serán destinados a

⁶² La duración de un bono corresponde al plazo en el cual el Valor Futuro del bono es insensible ante pequeños cambios paralelos en las tasas de interés.

financiar parcialmente la adquisición de la fundición y refinería Las Ventanas de Enami, cuyo costo total asciende a US\$393 millones.”

“El 21 de octubre de 2004 la compañía colocó, en mercados internacionales, bonos por US\$500 millones. Los bonos tienen una duración de 10 años y una tasa de interés de 4,75% anual.”

“En octubre de 2003 la compañía colocó en el mercado norteamericano un bono por US\$500 millones, a una tasa de interés de 5,5% y a un plazo de 10 años.”

Luego, la fórmula 5.12 debiese tener características similares a los 2 últimos anuncios. Esto, de acuerdo al periodo de vencimiento de los bonos (10 años) y al valor nominal de estos, lo cual está en línea con la estimación realizada para la inversión inicialmente estimada en Minera Gabriela Mistral, correspondiente a 550 MUS\$2005.

De acuerdo a lo anterior, esta tesis considera un bono con pagos relativos a una tasa de interés de 4,75% y una inversión de 830 MUS\$2005, a su vez la incertidumbre asociada a la inversión se considera a ser materializada por Codelco durante los 2 años de construcción del proyecto, dado que no puede ser incluida dentro de la emisión del bono.⁶³ Si bien los montos de la inversión en este caso son mayores que los bonos emitidos en el año 2004 y año 2003, las tasas de interés de un bono con un periodo de vencimiento de 10 años no debiesen ser tan diferentes entre un año y otro, esto de

⁶³ La inversión estimada está sujeta a incertidumbre, esto es, de acuerdo a lo expuesto en el capítulo 5, sección 5.1.a: Cuantificación de incertidumbres económicas. Luego, aquí existe un punto estratégico, la Corporación debiese haber emitido un bono por la inversión estimada, y luego cubrir la inversión adicional a lo largo de la construcción del proyecto – dado que se estima que la inversión pudiese alcanzar valores 1,53 veces mayores a lo que inicialmente fue estimado. Lo que indica un valor de la inversión 1.275 MUS\$2005 ($830\text{MUS\$}2005 \cdot 1,53$), valor similar a lo que la inversión finalmente materializada resultó ser. Por otro lado, puede haber sido posible que la emisión de un bono por los valores de la inversión del proyecto no hubiesen sido posibles, luego, el Estado debiese haber incurrido en los costos de inversión.

acuerdo a la clasificación de Codelco ya era estable y AAA en el año 2004. Sumado a lo anterior, el año 2004 fue un año de altos excedentes para la corporación; en efecto la utilidad neta del ejercicio fue de 1.134 MUS\$ 2004 en contraste con la registrada el año 2003 correspondiente 91 MUS\$2004,⁶⁴ lo que indica que el bono corporativo de Codelco debiese ser considerado por parte de los compradores de éste poco riesgoso en lo que a pago de interés y pago de principal se refiere.

El análisis anterior permitió establecer el comportamiento de una inversión sujeta a ser realizada por Codelco sin la inclusión de un *joint venture*. Luego, tal como se estableció previamente, el hecho de no considerar una alianza estratégica da la opción a Codelco de postergar la inversión. Luego, en segundo lugar la resolución de la opción 3 (véase Figura 5-3) debe analizar bajo qué precio de ejercicio se debiese considerar la opción de postergar el desarrollo del yacimiento desde el año 2006 al año 2007, debido a la incertidumbre presente en los precios en el año 2005. Finalmente, una vez determinado a qué precio de ejercicio se debiese ejercer la opción de poder postergar, el valor del nodo asociado a la opción 3 corresponde al máximo valor entre el valor esperado del yacimiento iniciando su producción el año 2007 versus el año 2006.

⁶⁴ Es importante destacar que hoy la última emisión de bonos por parte de Codelco por un periodo de vencimiento de 10 años fue por un valor de 1.000 MUS\$2010 con una tasa de interés de 3,75%. Lo anterior indica por un lado, un descenso de 1% en el interés y un importante aumento en el valor emitido, y por otro, el aumento de confianza en la solvencia de Codelco, de acuerdo a los altos excedentes registrados en los últimos años.

El precio de ejercicio de la opción de postergar es evaluado de acuerdo a una opción *call* Europea, o equivalentemente a que el periodo de vencimiento de la opción es conocido. El análisis permitió establecer que Codelco tiene la opción y no la obligación de ejercer la opción de postergar si el precio del cobre el año 2006 es menor a 150 cUS\$/lb. Este valor no es calculado de forma arbitraria, sino que a través del uso de la programación dinámica. La utilización de simulación de Monte Carlo es utilizada en el cálculo del precio de ejercicio dado que esta opción es Europea (Boyle, 1977, Cortazar, 2001),⁶⁵ luego se utilizan 5.000 iteraciones mediante el *software* @Risk, para cada precio posible en el año 2006. De forma de acotar el espacio factible, precios del cobre entre 50 cUS\$/lb y 500 cUS\$/lb fueron considerados con un paso de 10 cUS\$/lb.⁶⁶ Luego, se registra para cada uno de estos posibles precios el valor esperado del VPN ($E(VPN_{dinámico})$) y se compara para qué precio la inversión debe ser postergada en un periodo. La tasa de descuento utilizada como medida de comparación corresponde al WACC, esto de acuerdo a que las incertidumbres geológicas deben ser consideradas como riesgos no mitigables; por otro lado, si la tasa libre de riesgo fuese la utilizada, entonces la opción de postergar se ejecuta al igual que en el caso anterior con precio menor a 150 cUS\$/lb, lo que podría indicar que la opción de postergación aumenta su competitividad al dar menos peso al factor del valor temporal de los flujos. La Figura

⁶⁵ Boyle (1977) propone el análisis de Monte Carlo como un método para obtención de soluciones numéricas para la evaluación de las opciones. La técnica propuesta por este autor es flexible debido principalmente a que los diferentes procesos estocásticos que rigen la modelación de las opciones pueden ser fácilmente intercambiables sin la necesidad de recurrir a complejas resoluciones de ecuaciones diferenciales y, a su vez, las diferentes trayectorias de estos procesos se puede modelar de acuerdo a cierto número de iteraciones, lo cual finalmente, establece el valor esperado de la opción.

⁶⁶ La cota mínima y máxima de los precios son similares al mínimo *cash cost* (C1) promedio de la industria registrado entre el periodo 1935-2010y al máximo precio del cobre registrado en este mismo periodo.

5-21 y Figura 5-22 presentan las curvas del valor esperado del VPN para cada posible precio de registro del año 2006, tanto para la tasa de descuento libre de riesgo y para el WACC, respectivamente. Por otro lado, los años 2008 y 2009 expuestos en la leyenda indican el año de entrada en operación de Minera Gabriela Mistral.

Finalmente, es importante destacar que esta opción no es considerada en el análisis *ex-post*, debido a que la opción de desarrollar el yacimiento ya fue ejecutada.

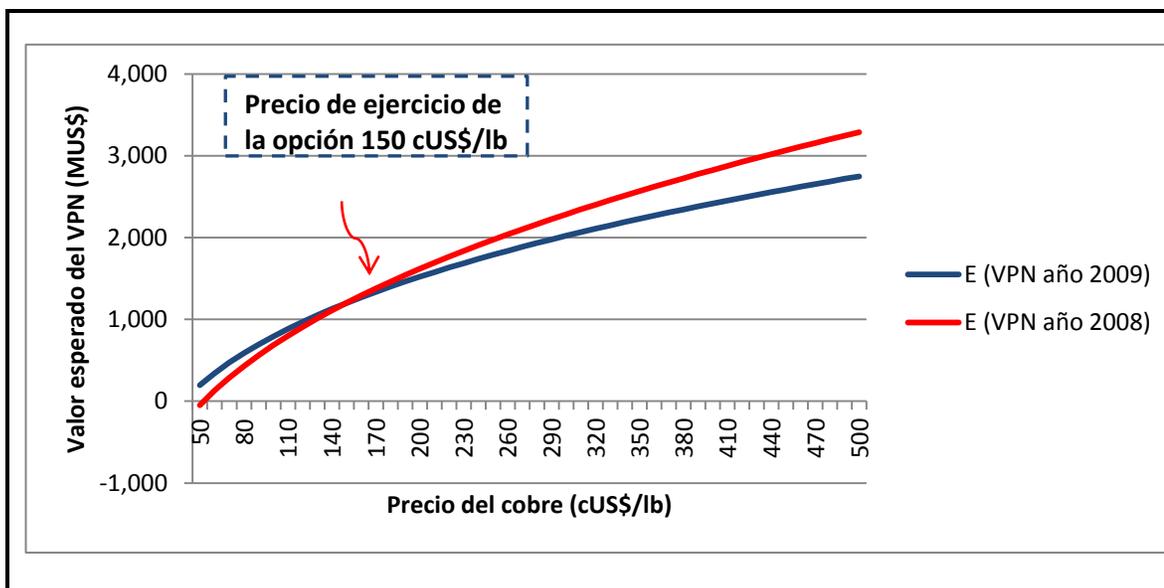


Figura 5-21: Opción de postergar (tasa de descuento 3,2%)

Fuente: Elaboración propia

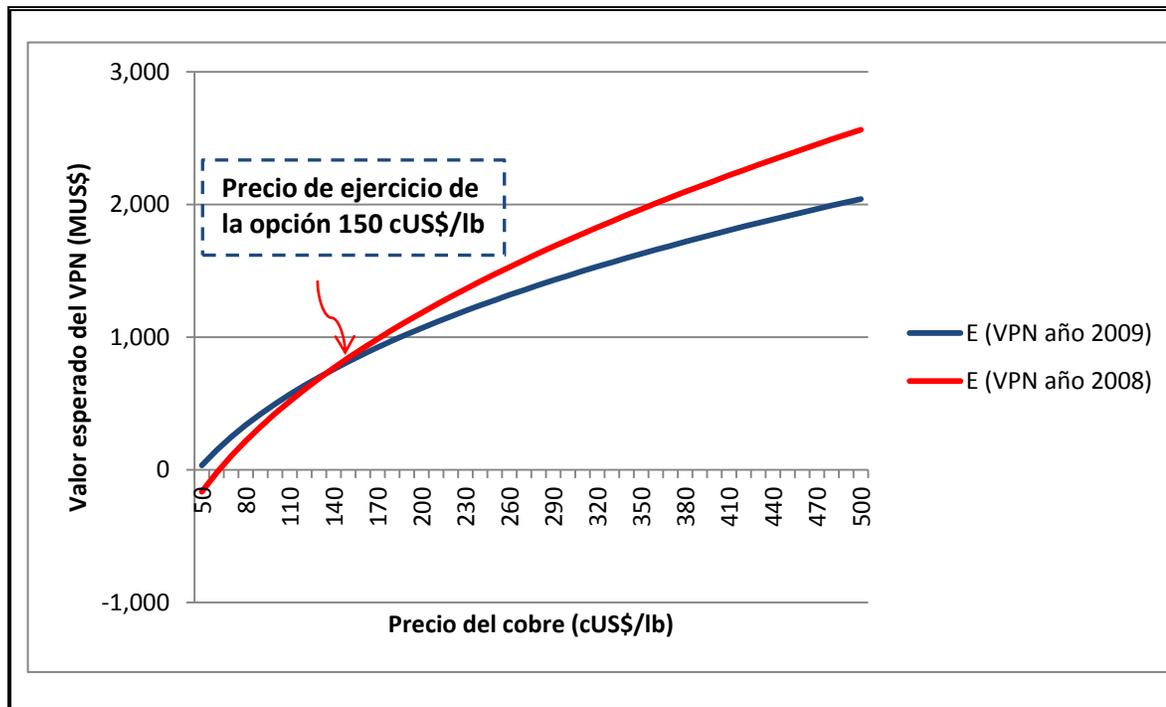


Figura 5-22: Opción de postergar (tasa de descuento 8%)

Fuente: Elaboración propia

Una vez detectado el precio de ejercicio, se debe calcular el valor de la opción 3. La cuantificación de este nodo es a través de otras 5.000 iteraciones mediante el análisis de Monte Carlo en el *software* @Risk, considerando en esta resolución la condición previamente expuesta del precio de ejercicio.

ii) Opción 2: ¿Alianza estratégica con MINMETALS?

La opción 2 considera tanto para el caso *ex-ante* como para el caso *ex-post* la opción de desarrollar el yacimiento mediante una inversión autónoma o mediante una alianza estratégica con MINMETALS. Luego esta opción adquiere el valor máximo del valor esperado del VPN entre seguir por la rama superior de la opción 2 – lo que implica el

desarrollo del yacimiento de forma individual por Codelco – o seguir por la rama inferior – lo que implica el desarrollo mediante un *joint venture*.

El análisis *ex-ante* cuantifica este nodo considerando el valor de la opción 3, ya que es necesario conocer este valor para saber cuál será la decisión que maximiza el valor esperado para la opción 2. Para el caso *ex-post*, en tanto, el valor corresponde al proyecto iniciando la producción el año 2008, dado que no existe la opción de esperar y ver. Los valores considerados corresponden a las iteraciones consideradas para la cuantificación de la opción 3 de forma de llegar a la solución óptima considerando *backward induction*.

iii) Opción 1: Desarrollo del proyecto Gaby

Cuando un proyecto es evaluado económicamente siempre se tiene la opción de llevarlo a cabo o no, esto de acuerdo a que las inversiones son opcionales, se tiene el derecho pero no la obligación de materializarlas. La opción 1 para el análisis *ex-ante* considera esto a través de la elección entre el máximo valor de la opción 2 y de no llevar a cabo el proyecto, $Max (E(VPN_{opción\ 2}, 0))$. Por otro lado el análisis *ex-post* no considera como viable esta opción, esto de acuerdo a que el proyecto ya fue desarrollado en el año 2008, lo que alude a otro punto clave dentro de la evaluación mediante la metodología de las opciones reales: Los gastos de inversión son irreversibles, ya que la mayoría de ellos tiene asociados un costo hundido que no se puede recuperar.

La Figura 5-23 y la Figura 5-24 muestra la cuantificación de las opciones consideradas en la evaluación y el valor dinámico de la inclusión de las incertidumbres y de las opciones asociadas al proyecto GABY, tanto para el análisis *ex-ante*, como para el análisis *ex-post*.⁶⁷ Las líneas rojas representan el camino seguido en la selección de las opciones, tal que se maximice el valor esperado del VPN.

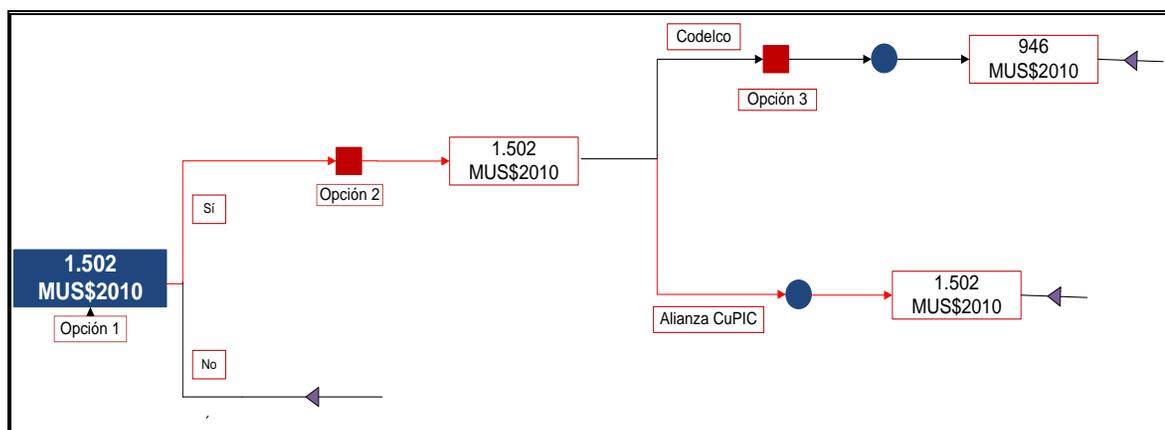


Figura 5-23: Valor esperado del VPN dinámico del proyecto *ex-ante*

Fuente: Elaboración propia

⁶⁷ Dado la exclusión de la opción 3 y la opción 1 del análisis *ex-post* debido a la entrada en producción del proyecto GABY, se tendría a pensar que la opción 2 no debiese ser considerada, dado que la decisión de desarrollo implicó la materialización mediante una alianza. En este sentido, esta decisión fue incluida en forma de determinar si dado que el proyecto fue puesto en marcha y dadas las características actuales del mercado, el proyecto *ex-post* fue desarrollado tomando en consideración la mejor opción de financiamiento.

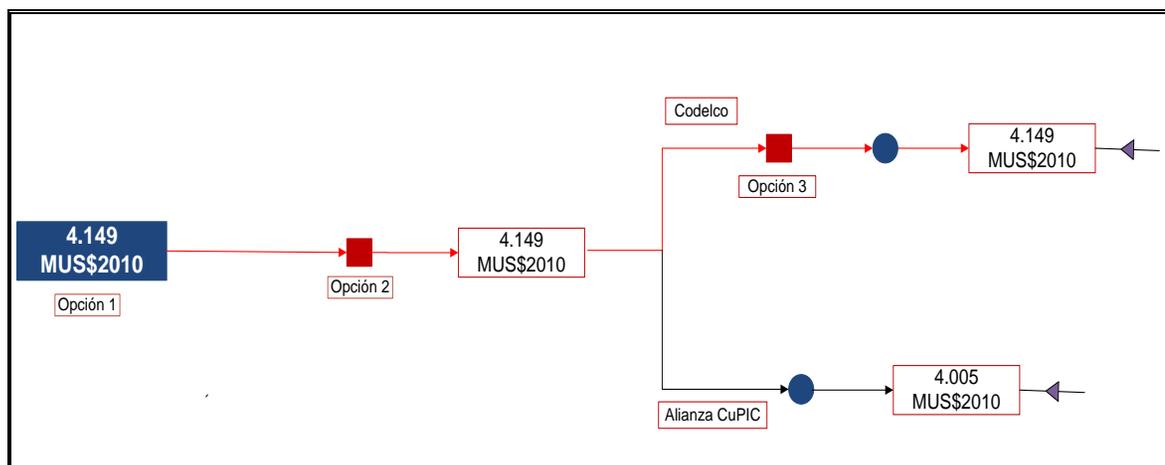


Figura 5-24: Valor esperado del VPN dinámico del proyecto *ex-post*

Fuente: Elaboración propia

La cuantificación de las opciones por otro lado considera el análisis dinámico versus el estático de tal manera de ver cuándo es el valor que se deja de ganar considerando un análisis donde se excluyen posibles alternativas. Luego, se debe comparar el VPN estático – en el cual no se considera la volatilidad de las variables inciertas ni tampoco la flexibilidad – con el VPN dinámico. La Figura 5-25 y Figura 5-26 muestran la cuantificación del VPN estático tanto para el análisis *ex-ante* como para el análisis *ex-post*.⁶⁸

⁶⁸ La explicación de los valores estáticos de los precios considerados en el caso *ex-ante* como en el caso *ex-post* se presenta en el ANEXO E.

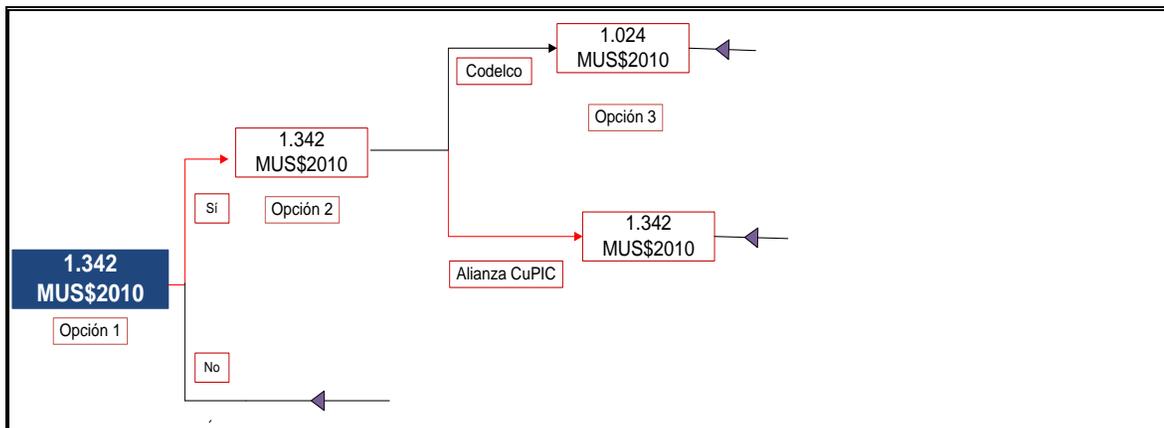


Figura 5-25: Valor esperado del VPN estático del proyecto *ex-ante*

Fuente: Elaboración propia

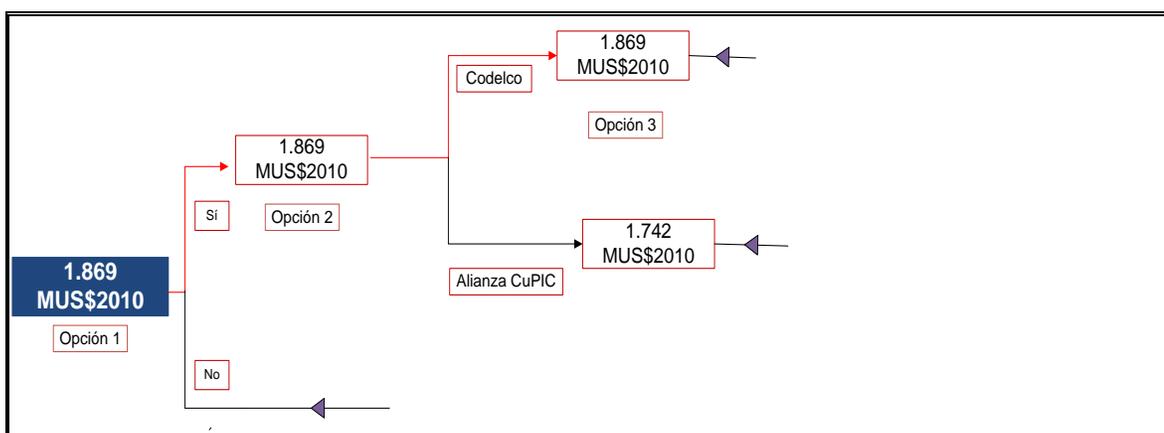


Figura 5-26: Valor esperado del VPN estático del proyecto *ex-post*

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la cuantificación del proyecto se puede calcular el valor de la inclusión de la volatilidad de las variables inciertas y de las opciones consideradas, a través de la fórmula 5.13

$$E(VPN_{dinámico}) = E(VPN_{estático}) + \text{valor opción} \quad (5.13)$$

Luego, para el caso *ex-ante* el valor de la opción es de 160 MUS\$2010, lo que implica un aumento del valor esperado de proyecto de 11%. Por otro lado, para el caso *ex-post* la diferencia es aún más significativa, esto de acuerdo a lo sensible que es la evaluación de estos proyectos a la volatilidad de los precios. Luego, la diferencia detectada corresponde a 2.314 MUS\$2010, lo que implica un aumento en el valor esperado del proyecto de 56%.

5.3 Otras consideraciones

Tal como se destacó en el capítulo introductorio, las opciones del dueño de la empresa deben ser evaluadas de tal manera que incorporen todos los riesgos presentes en la inversión y a su vez sean comparables con otros proyectos de la misma empresa, dado esto, la forma de evaluar el retorno de las opciones de inversión es a través del *Weighted Average Cost of Capital* (WACC). Si bien esta es la métrica que mide el promedio ponderado de las diferentes fuentes de financiamiento de una empresa, tanto de deuda como capital, permitiendo establecer la cantidad de interés que la compañía tiene que pagar por cada dólar que financia,⁶⁹ esta métrica no considera los riesgos propios del activo en comparación a los proyectos de similares características en la industria.

⁶⁹ El WACC corresponde al retorno total requerido por una empresa en su conjunto y es utilizado para determinar la viabilidad económica de las oportunidades de expansión y de fusiones.

De acuerdo a lo anterior, considerar el posicionamiento en la industria de un nuevo proyecto minero implica considerar en el análisis la posición competitiva en la industria actual, ya que este entrará a competir con los proyectos que actualmente están en operación. En este sentido el proyecto GABY – en cuanto a su competitividad con la industria se refiere – es analizado a través de la curva de oferta. La utilización de esta curva se basa en ésta representa un primer parámetro de comportamiento del posicionamiento competitivo de los proyectos en operación (Tilton, 2003).

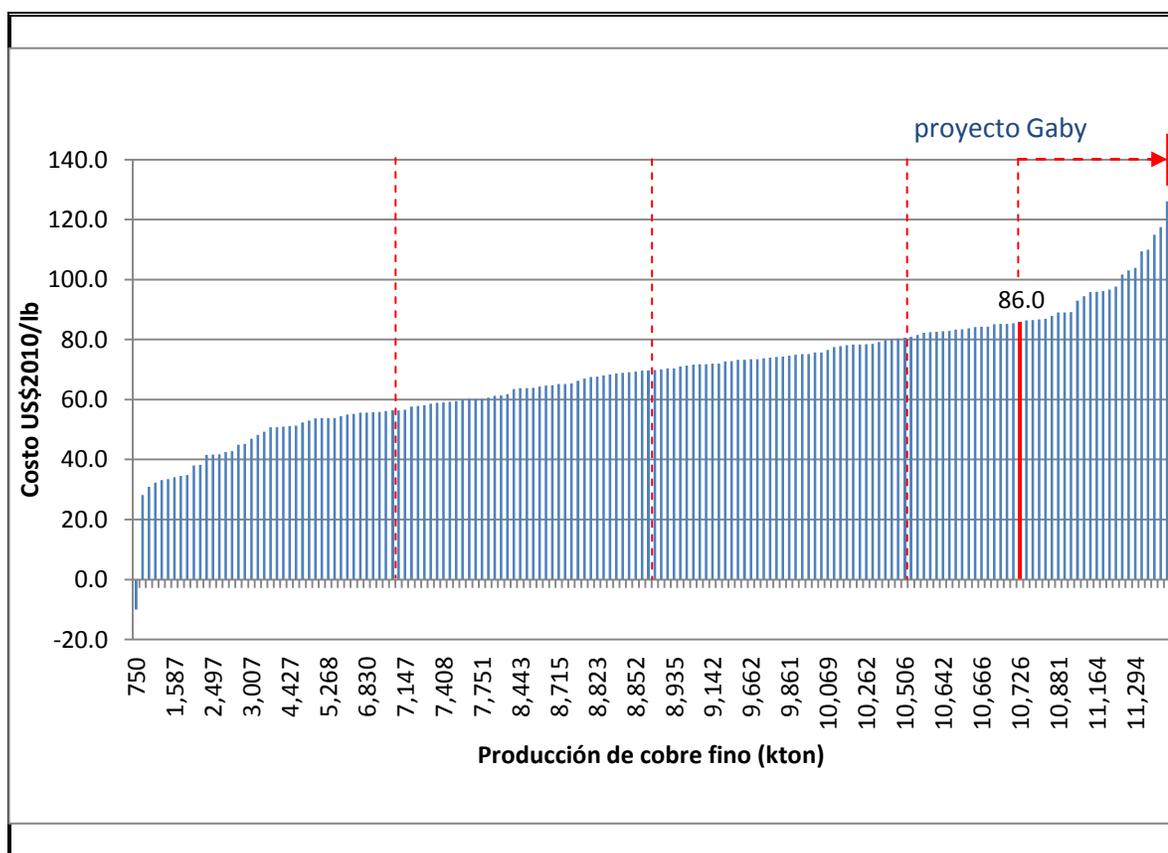


Figura 5-27: Curva de oferta de la industria del cobre (2003)

Codelco no transa en bolsa, y por tanto no se tiene una clara estimación de cómo es el riesgo de inversión en nuevos proyectos para esta compañía. Luego, la evaluación de sus nuevos proyectos debiese considerar como el resto de las compañías productoras con similares características en costos se correlacionan con el mercado, lo anterior, de acuerdo a que la factibilidad económica de un proyecto está asociada al premio que los accionistas exigen de acuerdo a los riesgos propios del yacimiento. Dado lo anterior, la tasa de descuento teórica del proyecto debiese estar dada por el Modelo de Fijación de precios de activos de Capital ó CAPM, de acuerdo a su nombre en inglés *Capital Asset Pricing Model*.⁷⁰ Esto de acuerdo a que este modelo toma en cuenta la sensibilidad del activo al riesgo no diversificable, conocido también como el riesgo del mercado o riesgo sistémico, (β), así como también el retorno esperado del mercado (r_M) y el retorno esperado de un activo teóricamente libre de riesgo (r_f). La fórmula 5.14 representa la estructura del CAPM previamente descrita.

$$CAPM = r_f + \beta_{marginales} \cdot (r_M + r_f) \quad (5.14)$$

La implementación del CAPM en el análisis del proyecto GABY considera el riesgo no diversificable mediante el análisis del comportamiento de 16 empresas las cuales

⁷⁰ Este modelo es utilizado para determinar la tasa de retorno teóricamente requerida para un cierto activo. Dentro de los supuestos que establece es que este modelo considera una cartera de productos diversificable, inversionistas aversos al riesgo y que maximizan el valor esperado de su utilidad, que los inversionistas tienen iguales expectativas, que existe en el mercado un activo libre de riesgo que se puede prestar y pedir prestado en forma ilimitada, que los activos están en cantidades fijas, se transan en el mercado y son divisibles, que no existen costos de transacción o información y, finalmente que no existen imperfecciones de mercado.

presentan costos operacionales similares o superiores al proyecto GABY.⁷¹ De esta manera el promedio de estas determina el riesgo no diversificable, ($\beta_{marginales}$) asociado a este proyecto, el cual adquiere un valor de 1,52. Por otro lado, los valores asociados a la tasa libre de riesgo (r_f), y el premio por riesgo ($r_M + r_f$) son obtenidos de acuerdo a los supuestos establecidos por Damodaran (2008). Para el caso de la tasa libre de riesgo, los bonos del tesoro (*T.Bonds*) son utilizados, lo anterior de acuerdo a que el retorno de estos bonos mide de mejor manera el riesgo de inversiones por mayores periodos de tiempo más extensos. Luego, la tasa libre de riesgo corresponde a 3,2%. Por otro lado, la asociada al premio por riesgo correspondiente a la diferencia entre la variación de las acciones y los *T.Bonds*, corresponde a 4,8% evaluando los parámetros en la fórmula 5.14 se obtiene que la tasa teórica de descuento corresponde a 10,5% ($CAPM = 10,5\%$).

Este análisis permite establecer un punto fundamental dentro del establecimiento del contrato con MINMETALS, el precio implícito de contrato. En esta línea, la tasa de descuento del CAPM fue la utilizada, obteniéndose que el precio implícito del contrato debiese haber estado entre 91,4 y 125,0 cUS\$2005/lb (sin considerar el premio de 50 cUS\$2005/lb), lo que indica que el precio de venta implícito calculado por Codelco es

⁷¹ Es este sentido la métrica de evaluación considera la curva de costos de producción del año 2003 – si bien debiese ser considerada la curva que regía el año 2005 no se tuvo acceso a esta información. En este sentido, es importante destacar que la utilización de la curva de oferta del año 2003 no altera los resultados debido a que comparando los *cash cost* promedios de la industria (C1) durante los años 2003-2005 estos son del orden de 10 cUS\$2010/lb, a diferencia de lo que sucedió el año 2006, donde los costos promedios aumentaron respecto al año 2005 en 20 cUS\$2010/lb

una buena aproximación en la medida que este cubra parte de la inversión a ser materializada por Codelco.

5.4 Resultados

La resolución de los árboles dinámicos y estáticos asociados al análisis *ex-ante* y *ex-post*, permitió determinar el valor del proyecto de acuerdo a la programación dinámica. La programación dinámica, tal como se describió previamente, considera una tasa exógena en la evaluación. En este sentido se evaluaron los resultados presentados en la Figura 5-22, Figura 5-23, Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26 para 3 tasas de descuento: tasa libre de riesgo, *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) y *Capital Asset Pricing Model* (CAPM), con valores de 3,2%, 8,0% y 10,5%, respectivamente.

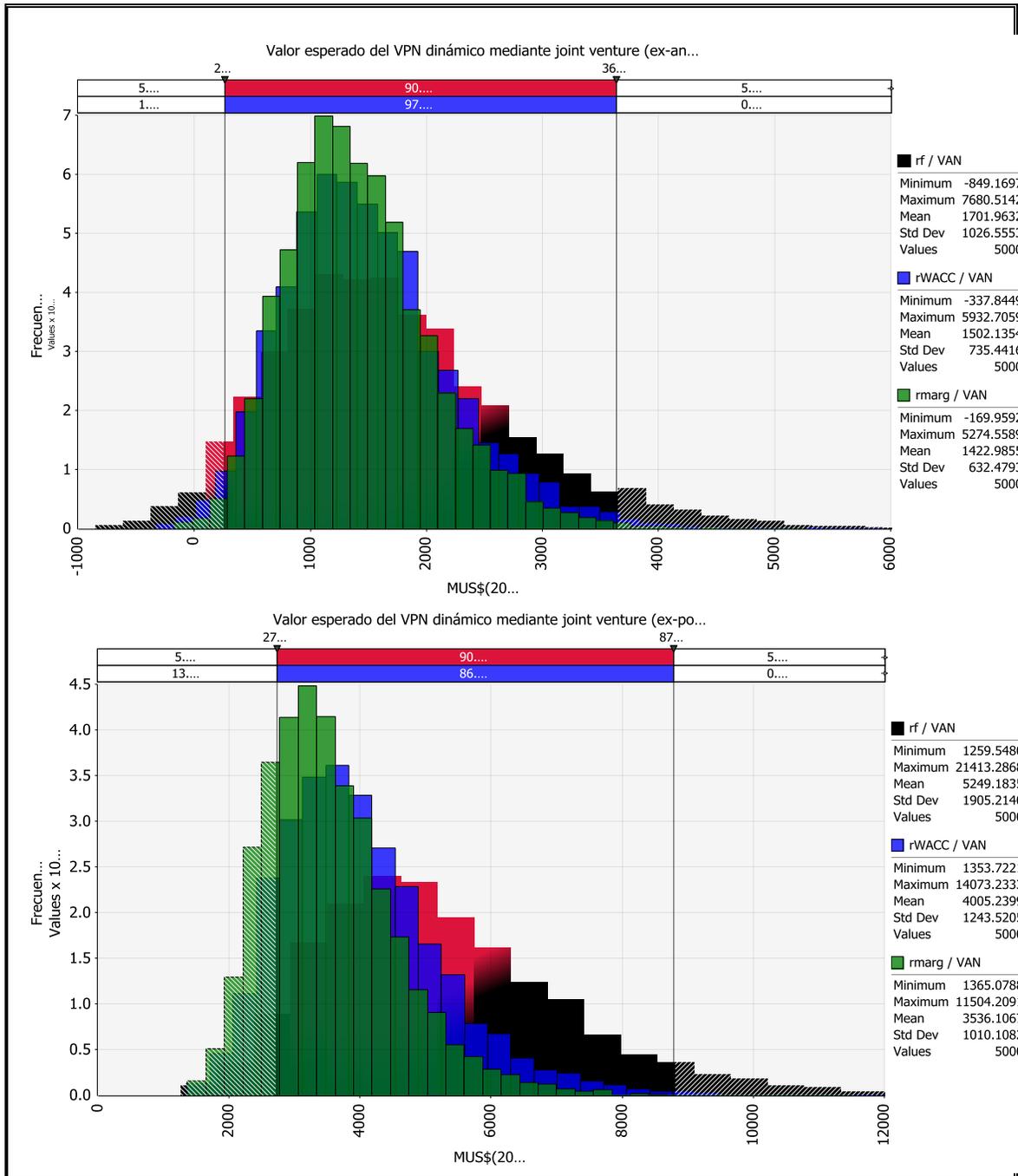


Figura 5-28: Valor esperado del VPN dinámico (MUS\$2010) asociado al contrato con MINMETALS mediante 3 tasas de descuento exógenas

Fuente: Elaboración propia

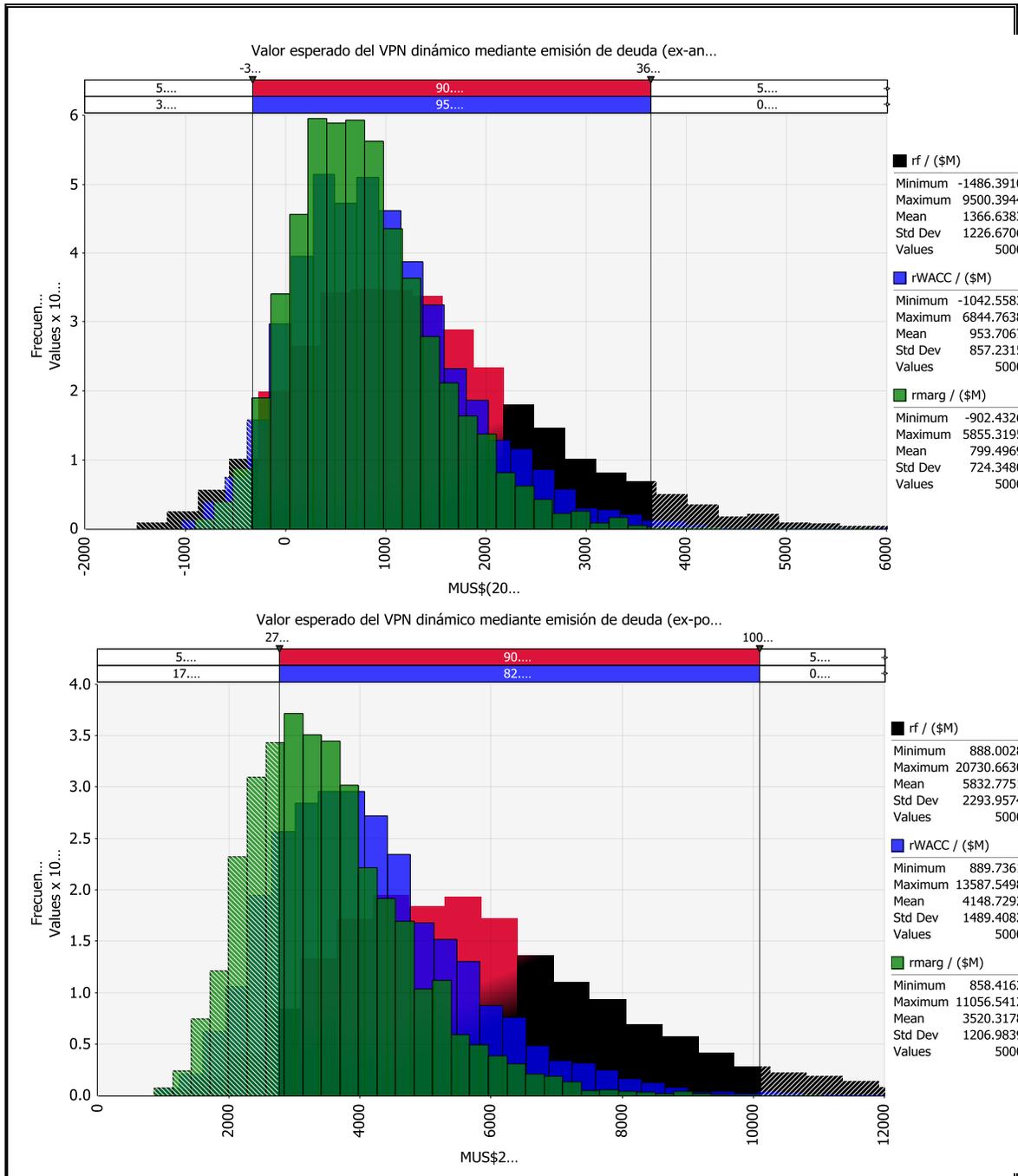


Figura 5-29: Valor esperado del VPN dinámico (MUS\$2010) mediante emisión de deuda para 3 tasas de descuento exógenas

Fuente: Elaboración propia

Los resultados expuestos indican que la decisión tomada por Codelco *ex-ante* fue la decisión correcta, dada la incertidumbre del mercado presente en la evaluación del proyecto. *Ex-post* la situación se estima diferente, ya que dado los altos precios del cobre registrados se han dejado de ganar excedentes debido al acuerdo. Aunque, en este sentido es importante destacar que si bien este análisis *ex-post* indica que la mejor decisión por parte de Codelco debió haber sido el desarrollo de Minera Gabriela Mistral mediante la opción de endeudamiento, la diferencia del valor esperado entre la opción de endeudamiento y la opción de *joint venture* es modesta y de sólo 144 MUS\$2010 lo que corresponde a menos del 4% del valor esperado del proyecto. Por otro lado, existe un punto clave referente a las conclusiones del análisis *ex-post*, en el año 2005, tal como indicó el ministro ministro de Hacienda de la época, Nicolás Eyzaguirre, no existía la opción de endeudamiento por parte de Codelco. Luego, el desarrollo del proyecto Gaby mediante la emisión de deuda no hubiese sido factible. En este sentido, el cambio de política actual de las opciones de financiamiento de la estatal mediante la opción de capitalización, permite que los proyectos de inversión puedan ser llevados a cabo sin necesariamente materializar *joint ventures*.

Finalmente, se destaca que la evaluación *ex-post* sólo considera 3 años como conocidos. Luego, si los precios del cobre mantienen valores similares a los actualmente registrados el excedente de MINMETALS podría ser mayor a la diferencia calculada entre el establecimiento de un *joint venture* y emisión de deuda correspondiente a 127 MUS\$2010 (véase Figura 5-26). En efecto, al evaluar a un vector de precios de 242

cUS\$2010/lb desde el año 2011 – con el consecuente incremento en costos – se obtiene que la diferencia entre el financiamiento mediante *joint venture* y la emisión de deuda aumenta en aproximadamente a 152 MUS\$2010.

5.5 Implicancias

El análisis anterior, mediante la metodología de las opciones reales, indicó que los proyectos al considerar parámetros determinístico en las variables inciertas subvaloran el valor del proyecto. Lo anterior se debe a que el VPN estático implica una evaluación económica del proyecto asumiendo que las decisiones se tomarán rígidamente (por medio de compromisos innecesarios).

Luego, se puede establecer una implicancia fundamental: La inclusión de las incertidumbres permite abrir nuevas opciones a medida que el proyecto avanza. Esto, debido a que las decisiones de inversión pueden ser tomadas flexiblemente a medida que la información se hace menos incierta. En efecto, dentro de la evaluación del proyecto GABY se encontró que las incertidumbres propias del yacimiento (ley y recuperación metalúrgica) impactaban aumentando el valor esperado del mineral a ser extraído obteniendo así el año 2010 un valor esperado de 165.000 kton/año de cobre fino (véase Figura 5-30). Sumado a lo anterior durante el periodo 2012-2019 los valores esperados del cobre fino recuperado superaban las 180.000 kton/año de cobre fino.

Luego, la inclusión de las incertidumbres propias al yacimiento abre una opción, correspondiente a la posibilidad de expansión de la capacidad de 150.0000 kton/año de

cobre fino a una capacidad entre 165.000 kton/año y 200.000 kton/año. En este sentido, al analizar las decisiones tomadas *ex-post* en el proyecto, se destaca que éste aumentó su capacidad a 170.000 kton en respuesta a el conocimiento que se tuvo del yacimiento una vez puesta en marcha la operación.⁷²

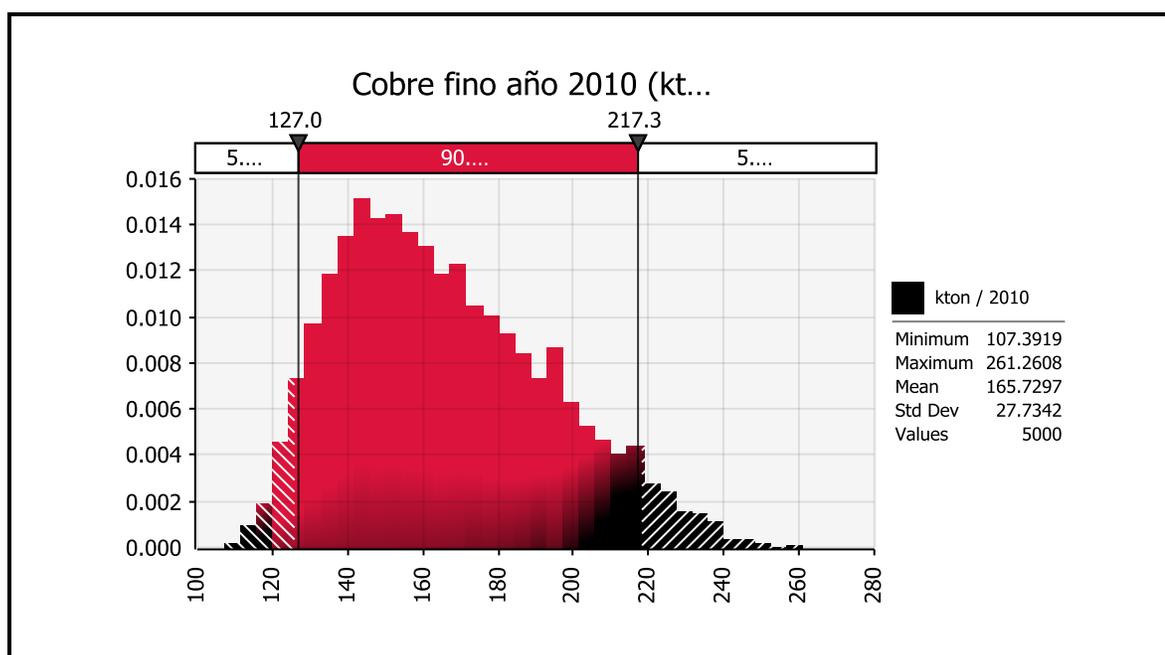


Figura 5-30: Distribución de probabilidad del cobre fino recuperado el año 2010

Finalmente, es importante destacar que la producción de Mina Gabriela Mistral el año 2010 fue de 117.052 kton de cobre fino, lo que indica que los riesgos propios del yacimiento deben ser considerados en la cuantificación del VPN dinámico. En efecto, la

⁷² Es importante destacar que la producción de Minera Gabriela Mistral el año 2010 fue de 117.052 toneladas métricas de cobre fino. Lo anterior debido a problemas operacionales en el diseño minero, además de los conflictos generados por los camiones autónomos, los cuales no trabajaron el año 2010 a toda su capacidad. Sumado a lo anterior, el chancador primario también presentó fallas que disminuyeron la eficiencia del proceso.

Figura 5-30 incluye dentro de los posibles valores de producción el valor real de la producción del cobre fino del año 2010.

6. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS

La metodología de las opciones reales permitió detectar 2 grandes resultados asociados a la evaluación de este proyecto. El primero de ellos está asociado al valor no detectado del proyecto al ser evaluado de forma determinística, obviando de esta manera la volatilidad del mercado y la flexibilidad que se puede presentar en el desarrollo de los proyectos. El segundo está asociado al precio de venta implícito del contrato establecido con MINMETALS, el cual no ha estado exento de controversia.

La cuantificación del valor esperado del VPN dinámico del proyecto GABY indicó que la inclusión de las incertidumbres de mercado y propias al yacimiento permiten determinar valores del proyecto significativamente mayores que los estimados de forma determinística. En efecto, para el caso *ex-ante* la inclusión de las variables inciertas aumentó el valor esperado del proyecto en 11%. Por otro lado, para el caso *ex-post* la diferencia fue aún más significativa, alcanzando un incremento del valor esperado del VPN de 56%. Luego, este análisis indicó que la materialización del proyecto generaba mucho más valor agregado que el inicialmente considerado. En este sentido, la generación de un valor esperado del VPN llevó consigo la consideración de la modelación de diferentes comportamientos de las variables inciertas. Luego, aquí existe un hecho fundamental el considerar las incertidumbre del mercado y la propia al yacimiento permite determinar consideraciones que optimizan las decisiones asociadas al desarrollo de los proyectos, y a su vez la forma de cuantificar las incertidumbres es fundamental, es por esto que en el desarrollo de esta tesis considero en detalle la forma

de considerar las incertidumbres de mercado a través de una estructura piramidal de jerarquía de las decisiones, partiendo de las decisiones estratégicas, tácticas y operacionales. De acuerdo a lo anterior una extensión del estudio es modificar la cuantificación de las incertidumbres reflejando como esta impacta en el resultado final del valor esperado del VPN dinámico.

El segundo resultado está asociado al valor del precio de venta implícito calculado por Codelco, frente a esto se considera que el valor esperado de éste estaba dentro del contexto de una industria que no se pensaba iba a crecer de la forma en que creció desde el año 2006. Sumado a lo anterior, al considerar precios de 1,0 US\$2005/lb el proyecto no era económicamente factible sin el establecimiento de un *joint venture*. En este sentido, el valor determinístico del proyecto mediante una alianza estratégica habría sido de 400 MUS\$2010, en cambio sin una alianza este valor hubiese sido de -165 MUS\$2010. Este análisis es de especial relevancia ya que de forma determinística no se contemplaba ni siquiera la posibilidad de otra forma de llevar a cabo el proyecto que no fuese por un *joint venture*. Caso contrapuesto a la evaluación mediante la metodología de las opciones reales la cual si considera como válido el llevar a cabo el proyecto con financiamiento propio de Codelco, dado el valor esperado de esta opción – si bien no era la optima *ex-ante*.

En línea con lo anterior se destaca que existen factores estratégicos que se obvian por parte de los detractores al analizar la metodología con que Codelco procedió. En este

sentido, en primer lugar se deben considerar las restricciones de inversión asociadas a la empresa estatal Codelco, debido a que es el Estado de Chile quien decide cual será el presupuesto asociado a inversión de Codelco. De acuerdo a lo anterior, la falta de liquidez pudiese considerarse un tema crítico, ya que el destinar dinero de las arcas fiscales para un proyecto pudiese implicar no contar con este dinero para fines públicos en el corto plazo. En este sentido, el mantener por un lado los ingresos que Codelco genera al fisco y por otro lado el liderazgo en la producción implicará sacrificar ciertos excedentes – en este caso los que recibió MINMETALS – por recibir año a año como país las utilidades que Codelco genera.

En línea con lo anterior aquí podría existir un hecho social clave: Codelco al endeudarse, con el fin de autofinanciar sus proyectos de inversión, debe pagar su deuda con dinero proveniente de las arcas fiscales, luego la inversión en un yacimiento podría impactar en el corto plazo en menores ingresos al fisco, destinados ya sea a educación, transporte, desarrollo. Luego para asegurar la producción actual, mediante el desarrollo de nuevos proyectos, sin disminuir en el corto plazo los ingresos al fisco se pueden considerar alternativas de desarrollo mediante *joint ventures*, lo que ciertamente implicaría las consecuentes pérdidas de los excedentes que exige la contraparte, en este caso el excedente recibido por MINMETALS.

Finalmente, la determinación de los resultados encontrados mediante el análisis *ex-ante* y *ex-post* permite detectar que el controversial acuerdo fue materializado de forma de

contribuir al desarrollo de Codelco y contar con liquidez para el desarrollo del proyecto. Y a su vez un porcentaje de cobertura al riesgo de la volatilidad precio. En efecto, fue el resguardarse de los precios asegurando un desarrollo de inversión conjunto – minimizando eventuales pérdidas dado las bajas proyecciones del cobre – el que gatilló este acuerdo. De acuerdo a lo anterior el error más grave en relación a los resultados *ex-ante* y *ex-post* puede haber sido la fijación de precios en un ciclo económico emergente ya que la inversión aumenta mucho vs un precio que se proyecta constante dado el contrato futuro.

Dentro de la extensión de esta tesis se recomienda en una análisis *ex-post* incluir las opciones de expansión que puede tener Minera Gabriela Mistral dado las tendencias actuales de los precios futuros, a su vez incluir los alineamientos estratégicos más que de forma cualitativa, en forma cuantitativa en la línea de Steward Myers (1977), W. Kester (1984) y Pindyck (1988), los cuales discuten de las opciones de crecimiento, como fuentes de valor de las firmas, ya que para muchas firmas una parte importante de su valor de mercado se atribuye a sus oportunidades de inversión y crecimiento en el futuro y manteniendo su liderazgo en la industria.

BIBLIOGRAFIA

Auger, F, y Guzmán, J.I. (2010). How rational are investment decisions in the copper industry? *Resources Policy*, 35, 292–300.

Babajide, A. (2001). *Real Options Analysis as a Decision Tool in Oil Field Developments*. (Tesis de maestría no publicada). Massachusetts Institute of Technology, EE.UU.

Bodie, Z., Kane, A. y Marcus, A. J. (2003). *Investments*. United States of America: The McGraw–Hill Companies, Inc.

Boyle, P. (1977). Options: A Monte Carlo Approach. *Journal of Financial Economics*, 4(3), 323-338.

Brennan, M y Schwartz, E. (1985). Evaluating natural resource investments. *The Journal of Business*, 58(2), 135-157.

China, MINMETALS. (2010). *About our company*. Retrieved March 10, 2011 from MINMETALS web site: <http://www.minmetals.com.cn/index.jsp>

Cortazar G., Milla C., Severino F. (2008) A multicommodity model of futures prices: Using futures prices of one commodity to estimate the stochastic process of another. *The Journal of Futures Markets*, June, 28, 6, 537-560.

Cortazar, G. (2001). Simulation and numerical methods in real options valuation. In E. Schwartz y Trigeorgis, L. (Ed.), *Real options and investment under uncertainty: classical readings and recent contributions* (pp. 601-620). Cambridge, Massachusetts, United States: The MIT Press.

Dagdelen, K. (2001). Open pit optimization - strategies for improving economics of mining projects through mine planning. *Proceedings of the 17* international mining congress and exhibition of turkey- imcet2001* (pp. 117-121). Golden, Colorado, USA: Mining Engineering Department, Colorado School of Mines. ISBN 975-395-417-4

Damodaran, A. (2008). *Equity Risk Premiums (ERP): determinants, estimation and implications*. New York University: Stern School of Business.

Dixit, Avinash K., y Pindyck, Robert S. (1994). *Investment under Uncertainty*. New Jersey: Princenton University Press.

Ezzell J. R., Miles J. A. (1980). The Weighted Average Cost of Capital, Perfect Capital Markets, and Project Life: A Clarification. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, Sept., 15, 3, 719-730.

Eyzaguirre, N. (2005, June 08). *Se mantienen discrepancias por transparencia en el Convenio entre Codelco y su similar MINMETALS*. Retrieved May 14, 2011, from Senado de Chile: http://www.senado.cl/prontus_galeria_noticias/site/artic/20080126/pags/20080126200531.html

Guzmán, J.I, Nishiyama, T y Tilton, J.E. (2005). Trends in the intensity of copper use in Japan since 1960. *Resources Policy*, 30(1), 21–27.

Hull, J. (2008). *Options futures and other derivatives, seventh edition*. New Jersey: Pearson Education International.

Kester, W. (1984). Today's Options for Tomorrow's Growth. In E. Schwartz y Trigeorgis, L. (Ed.), *Real options and investment under uncertainty: classical readings and recent contributions* (pp. 33-45). Cambridge, Massachusetts, United States: The MIT Press.

Larraín, F. (2011, April 21). *Primera Junta de Accionistas: Ministro de Hacienda respaldó Plan de Inversiones de Codelco*. Retrieved June 03, 2011, from Sala de Prensa de Codelco: <http://www.codelco.cl/prensa/>

Larraín, F. (2011, June 24). *Codelco capitalizará el 20% de sus utilidades de 2010*. Retrieved June 26, 2011, from Sala de Prensa de Codelco: <http://www.codelco.cl/prensa/>

Lüders, R. (2011, Enero 07). El desafío de Codelco: ¿invertir o financiar al fisco? La Tercera.com, Retrieved March 03, 2011, from http://www.quepasa.cl/articulo/7_4904_9.html

McDonald, R y Siegel, D. (1986, November). The value of waiting to invest. *The Quarterly of Economics*, 101(4), 707-728.

Merton, R.C. (1971, December). Optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model. *Journal of Economic Theory, Elsevier*, 3(4), 373-413.

Mikesell, R. F. (1979). *The world copper industry: structure and economic analysis*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Ministerio de Hacienda. (2005, Julio 25). *Acta Resultados del Comité Consultivo del Precio de Referencia del Cobre*. Retrieved March 04, 2011, from Dirección de Presupuesto del gobierno de Chile: http://www.dipres.gob.cl/572/articles-23022_doc_pdf.pdf

Moguillansky, G. (Ed.). (1998). *Chile: las inversiones en el sector minero 1980-2000*. Santiago, Chile: NACIONES UNIDAS, COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.

Pindyck, R.S. (1988, December). Irreversible investment, capacity choice, and the value of the firm. *American Economic Association*, 78(5), 969-985.

Schwartz, E.S y Trigeorgis, L. (2001). *Real options and investment under uncertainty: classical readings and recent contributions*. Cambridge, Massachusetts, United States: The MIT Press.

Smit, Han T.J. (1997). Investment analysis of offshore concessions in the netherlands. *Financial Management*, 26(2), 5-17.

Smit, Han T. J. y Trigeorgis, L. (2004). *Strategic investment: real options and games*. New Jersey: Princeton University Press.

Stewart, C. (1977). Determinants of Corporate Borrowing. *Journal of Financial Economics*, 5, 147-175.

Tilton, John. (1977). *The future of nonfuel minerals*. Washington D.C.: Brookings Institution.

Trigeorgis, L. (1991). A log-transformed binomial numerical analysis method for valuing complex multi-option investments. Source: *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 26(3), 309-326

Tvedt, J. (1995). *Market Structure, Freight Rates and Assets in Bulk Shipping*. (Disertación doctoral no publicada). Norges Hangelshøyskole, Norwegian School of Economics and Business Administration, Bergen, Noruega.

ANEXOS

ANEXO A: OPCIONES DE INVERSIÓN ESTOCÁSTICA EN TIEMPO CONTINUO

Diferentes autores (Merton, 1971 y Hull, 2008), especialistas en la metodología de las opciones reales, han incluido en su análisis la modelación de las variables inciertas a través de procesos estocásticos en tiempo continuo.

El análisis se basa en determinar en qué momento es óptimo realizar una inversión I , tal que ésta retorne un proyecto con valor V . Con V siguiendo un proceso Browniano geométrico, tal que

$$dV = \alpha \cdot V \cdot dt + \sigma \cdot V \cdot dz \quad (\text{A.1})$$

Donde se cumple lo siguiente:

- α , es la tasa de retorno del activo V
- dz es el incremento de un proceso Wiener
- $dz = \varepsilon(t) \cdot (dt)^{1/2}$ y
- $\varepsilon(t)$ es una variable sin correlación serial, con distribución normal

La ecuación A.1 indica que el valor actual del proyecto es conocido y que los valores futuros de éste distribuyen log-normal con una varianza que crece linealmente con el horizonte de tiempo. Luego, a pesar que nueva información es conocida a medida que el tiempo pasa, siempre estará presente la incertidumbre del valor del proyecto. Siegel y McDonald (1986), señalan que la oportunidad de inversión es equivalente a una

opción *call* perpetua, y decidir cuándo llevar a cabo la inversión es equivalente a decidir cuándo ejercer la opción. En esta línea el problema de inversión puede ser replicado a la metodología de las opciones financieras.⁷³

Para el caso de la resolución de la opción *call* perpetua, se debe considerar un supuesto básico, tal que los cambios del activo subyacente que posee un proceso browniano (V), son explicados por un activo existente (o un *portfolio* dinámico de activos), es decir el mercado debe existir un activo cuyo precio este perfectamente correlacionado con el activo V . Esto asume por tanto que se está en presencia de un mercado completo (las decisiones de las empresas no afectan al conjunto de oportunidades disponibles para los inversores).

Luego, la metodología para determinar la regla de inversión que maximiza el valor de mercado de una firma es la siguiente:⁷⁴

i) Sea el precio de un activo (ó un *portfolio* dinámico de activos) perfectamente correlacionado con V , además sea ρ_{Vm} la correlación de V con el mercado (completo), luego x es tal que:

$$dx = \mu \cdot x \cdot dt + \sigma \cdot x \cdot dz \quad (\text{A.2})$$

⁷³ El hecho de que el análisis sea considerado como una opción financiera implica realizar la replicación de un *portfolio* libre riesgo. En este sentido, tal como se destacó en el capítulo 1 y 2 un proyecto minero no debe ser descontado a la tasa de libre riesgo dado que existen variables tales que no pueden ser replicadas por ningún activo existente en el mercado financiero, ni existe en el mercado contratos futuros por el periodo completo de evaluación del proyecto. En este sentido es que la programación dinámica cobra gran relevancia y es implementada en esta tesis a través de la simulación de Monte Carlo.

⁷⁴ Nótese que en este caso se está inserto en un mercado completo

Suponiendo además que el modelo de Fijación de Precios de Activos de Capital ó CAPM (de acuerdo a sus siglas en ingles, *Capital Asset Pricing Model*) es válido, por lo que el retorno de x es tal que satisface la relación del CAPM y por tanto el valor esperado μ satisface la relación $r + \phi \cdot \rho_{Vm} \cdot \sigma$ donde r es la tasa libre de riesgo y ϕ corresponde al *market price of risk*.

Dado que α es la tasa esperada del cambio de V , se considera que esta es siempre menor que el retorno ajustado por riesgo μ . Ya que si este no fuese el caso, la firma nunca invertiría, ya que esta siempre mantendría la opción de esperar. Luego se espera que exista un valor δ que al ser sumado a α corresponda al retorno ajustado por riesgo, es decir $\mu = \alpha + \delta$. De forma de llevar esta consideración a su analogía con las opciones financieras, considérese que V es el precio de una acción, δ por tanto correspondería a la rentabilidad por dividendos de la acción (*dividend rate on the stock*). Luego, el retorno de la acción V sería $\mu = \alpha + \delta$, es decir *the expect rate of capital gain* más la rentabilidad de los dividendos. Si δ siempre fuese cero, una *call* siempre se ejercería en su maduración y nunca de forma anticipada, ya que no existiría un costo de oportunidad de mantener la opción viva, pero si lo que ocurre es lo contrario δ es mayor que cero, esto indica que existe un costo de oportunidad de mantener la opción viva antes de ejercerla. De acuerdo a lo anterior, δ puede representar el flujo de dividendos que se está dejando de ganar al mantener la opción viva, por lo tanto si el costo de oportunidad es muy alto, en algún punto debe ser conveniente ejercer la opción obteniéndose un *trade-off* en relación a la opción y a la acción, es en ese punto donde se opta por tener la acción en lugar de tener la opción del ejercicio de ésta. Es importante destacar que si δ fuese muy grande (es decir $\delta \rightarrow \infty$) la opción tendrá un valor cero ya que el costo de oportunidad es tan alto que lo conveniente es realizar el proyecto de forma inmediata.

Luego como se mencionó anteriormente si δ refleja los flujos del proyecto, y V es el valor esperado del proyecto a lo largo de su vida entonces $\delta \cdot V$ representa la tasa de los flujos de caja que el proyecto renta

ii) La regla óptima de decisión se presenta a continuación:

sea $F = F(V)$ el valor de la opción de la inversión de la firma. Asumiendo que se está corto en $FV = \frac{dF(V)}{dV}$ unidades del proyecto, por lo tanto el valor de este *portfolio* es $P = F - F_V \cdot V$, el cual corresponde a un valor dinámico, debido a que es función de V . Estar en una posición corta en este *portfolio* requiere de un pago por periodo equivalente al costo oportunidad de cada una de las unidades en las cuales se está en corto, es decir se requiere de un pago de $\delta \cdot V \cdot F_V$ ya que de otra manera no se tendría la contraparte en posición larga. Ahora, como el *portfolio* debe ir cambiando en unidades de tiempo infinitesimal dt su retorno esperado corresponde a $dF - F_V \cdot dV - \delta \cdot V \cdot F_V \cdot dt$, como no existen posibilidades de arbitraje se debe cumplir que el valor esperado del *portfolio* es la tasa libre de riesgo por lo que el *portfolio* debe ser igual a $r \cdot (F - F_V \cdot V) \cdot dt$.

Luego para obtener el valor de la opción de inversión en cada periodo, se considera válido el lemma de Ito, por lo que dF cumple la fórmula A.1

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot V^2 \cdot F_{VV} + (r - \delta) \cdot V \cdot F_V - r \cdot F = 0 \quad (\text{A.3})$$

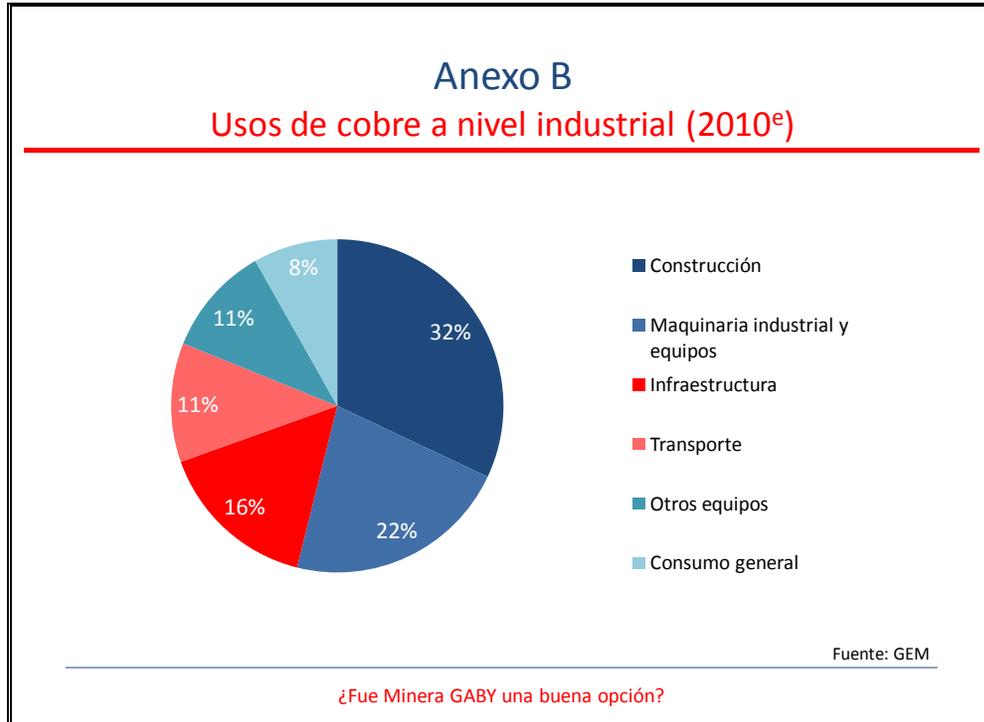
Dado que la función anterior es una ecuación diferencial de segundo orden se puede obtener el valor de $F(V)$ de acuerdo a $F(V)$ tal que satisfaga la fórmula A.1, para esto es necesario establecer las condiciones borde que rigen esta ecuación, las cuales de acuerdo a Dixit y Pindyck (1994) son las presentadas a continuación:

- Se establece que si el valor del activo subyacente V es cero el valor de la opción de adquirirlo también posee un valor cero, es decir: $F(0) = 0$
- Al invertir en el activo subyacente en el tiempo óptimo de ejercicio t^* , el valor de la regla óptima de inversión debiese ser equivalente a los

flujos del subyacente menos el costo de inversión, es decir, $F(V^*) = V - I$

- La tercera condición se establece en referencia a la suavidad del comportamiento de la regla óptima de inversión, esta derivación efectuada por Pyndick (1988) establece que $F(V)$ debe ser continua y suave en el punto de ejercicio V^* , si esta condición no se cumpliera implica que es mejor ejercer la opción en otro punto. Es decir, se cumple que $F_V(V^*) = I$.
- Dado que esta es una ecuación diferencial, se asume la resolución de esta corresponde a $F(V) = a \cdot V^\beta$. Donde a corresponde a la evaluación de la función en las tres condiciones de borde previamente establecidas, y β corresponde a $\beta = \frac{1}{2} - \frac{r-\delta}{\sigma^2} + \left\{ \left\{ \frac{r-\delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right\}^2 + \frac{2 \cdot r}{\sigma^2} \right\}^{1/2}$, con $V^* = \beta \cdot I / (\beta - 1)$ y, tal que, $a = (V^* - I) / (V^*)^\beta$
- Reemplazando las fórmulas derivadas para a y β se obtiene el valor de la oportunidad de inversión. Luego un *portfolio* libre de riesgo puede ser construido de acuerdo a la opción de inversión y estando corto en el proyecto.

La obtención de las relaciones anteriores se basan en que todo el riesgo puede ser replicado a través del mercado completo, luego las variables que no puedan ser replicadas de esta forma deben considerar un riesgo que no es el libre de riesgo, y debe ser tal que este correlacionado con el mercado (WACC y CAPM).

ANEXO B: PRINCIPALES USOS DEL COBRE A NIVEL INDUSTRIAL

ANEXO C: LINEAMIENTOS ESTRATÉGICOS DE MINMETALS

CHINA MINMETALS CORPORATION (MINMETALS), fundada en el año 1950, es un grupo de gran tamaño, el cual establece vínculos en todo el mundo para el desarrollo, producción, comercialización y explotación de metales y minerales. Dentro de su cartera de productos también se dedican a las finanzas, bienes raíces y la logística. En el año 1999, China Minmetals fue incluida entre las 39 "*key enterprises*" de acuerdo a su gran importancia en la seguridad nacional y sustento económico bajo la jurisdicción directa del Gobierno Central. En el año 2007, Minmetals fue clasificada como Clase A de acuerdo a la evaluación del SASAC del desempeño de las empresas de propiedad estatal bajo la jurisdicción del Gobierno Central. En el año 2008, el Grupo obtuvo el lugar número 331 entre las compañías de Fortune Global 500.

Los productos y materias primas a cargo de este grupo han sido ampliamente utilizados en diferentes áreas asociada a la construcción económica nacional y al mejoramiento de la vida de la población. Minmetals ha hecho notables contribuciones al desarrollo económico nacional y el programa de modernización. En los últimos años, ha puesto en marcha una nueva estrategia de desarrollo enfocada en la intensidad sus operaciones en metales ferrosos, metales no ferrosos, las finanzas, bienes raíces y la logística. Para forjar una cadena industrial, Minmetals ha promovido su transformación estratégica para garantizar más recursos. El Grupo ha pasado de ser una empresa de propiedad estatal tradicional con fuertes características de la economía planificada en el pasado a una empresa moderna, competitiva e independiente en la economía de mercado socialista. Y

ha pasado de ser una compañía basada netamente en la importación y exportación a una empresa integrada, tanto aguas arriba como aguas abajo, con las industrias de donde provienen sus recursos. El Grupo también ha cambiado de ser una empresa que sólo participaba en las operaciones de los productos a un grupo comprometido en las operaciones tanto de productos y activos y capital.

Como una de las compañías Fortune 500 global, Minmetals ha fortalecido la cooperación estratégica con los dos grandes empresas nacionales y extranjeras para buscar el desarrollo mutuo. Minmetals juega un papel importante en la promoción de los intercambios y la cooperación entre empresas de China y otros países, el Grupo ocupa el puesto de presidente que representa a China en el Consejo de Negocios China-Brasil y China-Chile.

"Para valorizar la escasez de recursos y lograr el desarrollo sin límites," el Grupo se compromete a la estrategia de "*going out*" y desarrolla los recursos minerales en el extranjero para satisfacer la demanda cada vez mayor de recursos en el desarrollo de la economía nacional.

El personal del Grupo es muy profesional, bien educado, diligente y trabajador.

China Minmetals cree en la sinceridad y defiende el principio de igualdad y beneficio mutuo. El Grupo siempre busca la cooperación *win-win*.

En el siglo 21, Minmetals seguirá desarrollando sus actividades comerciales más importantes, así como sus operaciones diversificadas y ampliará su red comercial. Con los clientes en primer lugar, Minmetals hará todo lo posible por contar con los recursos y proporcionar servicios de valor añadido a sus clientes, en un intento por convertirse en un proveedor global de servicios de alta calidad en metales y minerales (CHINA MINMETALS CORPORATION, 2011).

**ANEXO D: ANÁLISIS *EX-ANTE* Y *EX-POST* MEDIANTE LA
METODOLOGÍA DE FLUJOS DE CAJA DESCONTADOS**

El análisis *ex-ante* al igual que en el análisis *ex-post* se considera una distribución de precios de acuerdo a un proceso GMR, donde el logaritmo del precio del año en t es función del precio del logaritmo en el año $t-1$. Considerando el cálculo de los parámetros β_0 , β_1 , y ε_t mediante el proceso AR (1) y la consecuente obtención de η , σ , \bar{x} , descritas en el capítulo 5, sección 5.1 se pueden estimar 3 vectores de precios, los cuales en su conjunto componen una banda de precios, las cuales representan el precio determinístico a ser considerado en el cálculo del VPN estático.

Para la estimación de las bandas de precios se considera en primer lugar la data histórica de precios asociados a los periodos 1975-2005 y el periodos 1975-2005, para el caso *ex-ante* y *ex-post*, respectivamente. Las variables obtenidas se muestran en la Tabla D -1.

Tabla D - 1: Parámetros en el modelo AR (1) y estimaciones de proceso GMR

Periodo considerado	β_0	β_1	η	σ	\bar{x}
1975-2005	0,96	0,81	0,21	0,21	166
1975-2010	0,67	0,87	0,14	0,23	224

En segundo lugar, la estimación de las bandas de precios se realizó de acuerdo a la derivación de la ecuación (5.1), obteniéndose las fórmulas D.1 y D.2 asociadas al valor esperado y a la varianza condicional a un nivel $t < \tau$ (Tvedt, 1995).

$$E\left(\frac{X_t}{F_t}\right) = e^{e^{-\eta(\tau-t)} \ln x_t + \left(\bar{x} - 1/2 \cdot \sigma^2 / \eta\right) \cdot (1 - e^{-\eta(\tau-t)}) + 1/2 \sigma^2 \left[\frac{1 - e^{-2\eta(\tau-t)}}{2\eta}\right]} \quad (D.1)$$

$$Var\left(\frac{X_t}{F_t}\right) = e^{2e^{-\eta(\tau-t)} \ln x_t + 2\left(\bar{x} - 1/2 \cdot \sigma^2 / \eta\right) \cdot (1 - e^{-\eta(\tau-t)}) \cdot \left(e^{\frac{\sigma^2}{\eta}(1 - e^{-2\eta(\tau-t)})} - e^{-\frac{\sigma^2}{2\eta}(1 - e^{-2\eta(\tau-t)})}\right)} \quad (D.2)$$

La banda media es estimada a partir de la aplicación de logaritmo la ecuación D.1, en particular el comportamiento de los 5 primeros años se estima a partir de la esta ecuación, los cuales se estabilizan a partir del sexto año en torno al valor de la media. Para el caso de la banda de precio baja y alta se consideró la ecuación D.2 obteniendo así un al sexto año una estabilización en los valores, los cuales fueron considerados los nuevos valores medios.

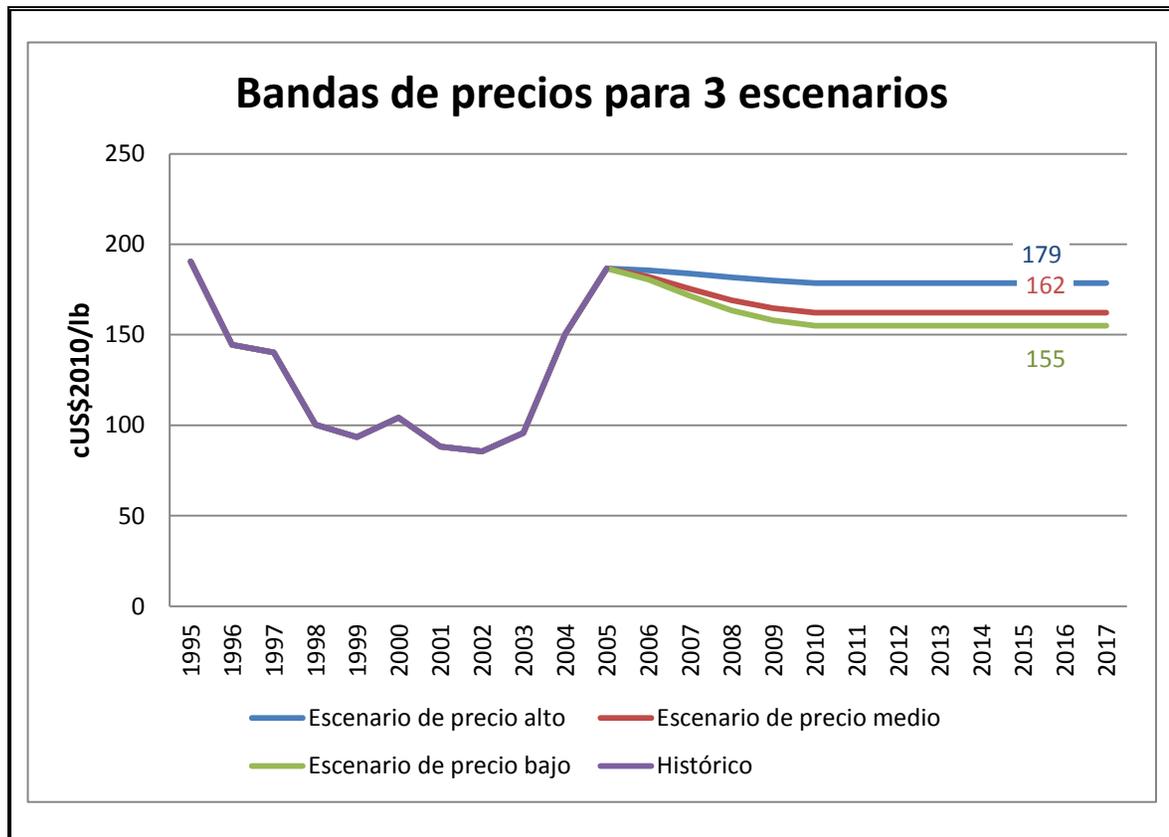


Figura D-1: Bandas de precios de acuerdo a 3 posibles escenarios equiprobables (2006-2017)

Fuente: Elaboración Propia

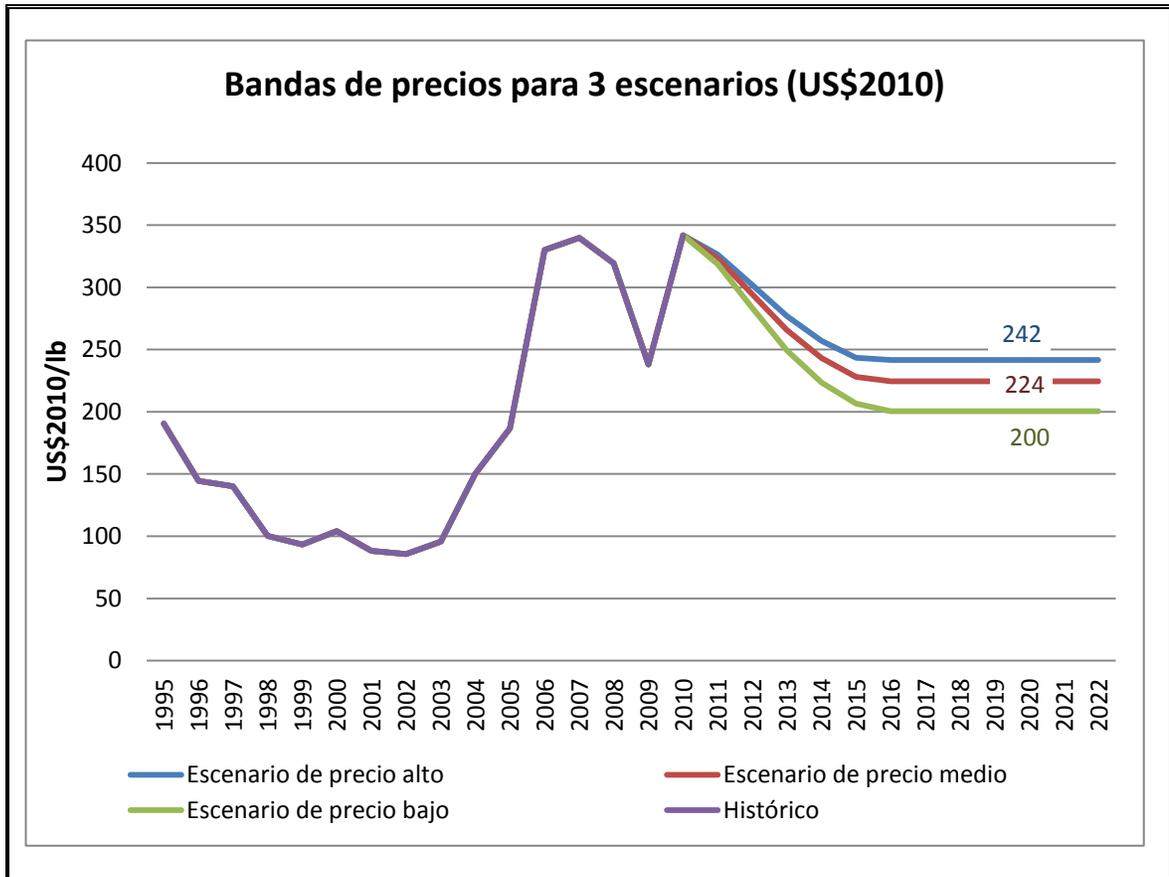


Figura D-2: Bandas de precios de acuerdo a 3 posibles escenarios equiprobables (2011-2022)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo anterior el valor asociado al VPN estático considera como precio único el valor de largo plazo del escenario de precio medio, correspondiente a 162 cUS\$2010/lb y 224 cUS\$2010/lb para el caso *ex-ante* y *ex-post*, respectivamente.