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

EVALUACIÓN DE RIESGOS DE UN PROYECTO DE INVERSIÓN MINERA Y SU APLICACIÓN A UN PROYECTO DE MEDIANA MINERÍA

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

OMAR RODRIGO FERNÁNDEZ LOBOS

PROFESOR GUÍA:

ENRIQUE JOFRÉ ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GERARDO DÍAZ RODENAS

RENÉ LE-FEAUX CORTÉS

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE: Magister en Gestión y Dirección de Empresas
POR: Omar Rodrigo Fernández Lobos
FECHA: 16/06/18
PROFESOR GUÍA: Enrique Jofré Rojas

EVALUACIÓN DE RIESGOS DE UN PROYECTO DE INVERSIÓN MINERA Y SU APLICACIÓN A UN PROYECTO DE MEDIANA MINERÍA

La evaluación de riesgos en los proyectos mineros es una problemática recurrente debido a la incertidumbre presente en las distintas etapas de evaluación, esto hace que sea de gran interés el poder anticiparse a situaciones o eventos que se pueden producir y afectar negativamente al proyecto.

El presente trabajo consiste en identificar y evaluar de manera general los riesgos asociados a los proyectos de inversión en la industria minera y busca a través de un caso particular, poner en práctica una metodología que considere la incertidumbre presente en la evaluación y pueda identificar los factores preponderantes que influyen en el resultado económico. El caso particular corresponde al Proyecto Minero Arqueros, un proyecto greenfield de mediana minería que ha desarrollado a la fecha estudios de ingeniería de prefactibilidad avanzada.

Mediante la utilización de herramientas de gestión de riesgos, se analizan cualitativamente los riesgos que impactan al proyecto, se caracteriza la incertidumbre asociada a la totalidad de los principales riesgos identificados y se procede a realizar la evaluación tradicional determinista, posteriormente incorporando un proceso de simulación de Montecarlo, se contrastan tales resultados con el método de la valoración en riesgo, es decir VAN TIR y luego VaR, siendo posible con ello determinar el riesgo global al cual está afecto el Proyecto Arqueros.

El análisis conjunto de todos los factores de incertidumbre asociados a los factores de riesgo detectados, arrojó un Valor esperado del proyecto de 55,9[MMUSD] y un Valor en Riesgo (VaR), determinado con un 95% de confianza, equivalente a 15,36[MMUSD]. Lo que significa que el proyecto podría llegar a desvalorizarse en ese valor.

Identificados los factores preponderantes que afectan el resultado económico del proyecto, se elabora un plan de gestión de riesgos con las distintas medidas para mitigar los riesgos y minimizar los efectos adversos previstos, durante las distintas etapas del desarrollo del proyecto.

Dedicatoria

Con mucho amor y cariño para toda mi familia, padres, esposa, hijos, hermana por su apoyo y comprensión, también para aquellos que fueron parte de mi formación como persona y que ya no están aquí.

Agradecimientos

Agradezco especialmente a los Señores Yoshifumi Noguchi, Go Yajima y Takao Asaki por el apoyo para realizar este programa.

También agradezco al Sr. René Le-Feaux por haber aceptado ser parte de la comisión revisora de tesis.

A todos mis compañeros del MBAMIN 6ta Generación. En especial, a GOSAFE (Gomez-Sandoval-Fernández), por el apoyo y compañerismo para alcanzar los objetivos individuales y grupales y por hacer de este curso una linda vivencia y una oportunidad para crecer como profesional y como persona.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA Y JUSTIFICACIÓN 2
1.1.1. Justificación 2
1.2. OBJETIVOS 3
1.2.1. Objetivo General 3
1.2.2. Objetivos Específicos 3
1.3. METODOLOGÍA 3
2. MARCO CONCEPTUAL 4
2.1. Evaluación de Proyectos 4
2.1.1. Proyectos Mineros 5
2.1.1.1. Fases de un Proyecto Minero 6
2.1.1.2. Estudios que Sustentan un Proyecto Minero 7
2.1.2. Análisis de Riesgos e incertidumbre 10
2.1.2.1. Análisis Cualitativo 12
2.1.2.2. Análisis de Sensibilidad (Simulación) 14
3. ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO 19
3.1. Descripción General 19
3.2. Ubicación 19
3.3. Marco Geológico 20
3.3.1. Litología 22
3.4. Infraestructura 23
3.4.1. Mina Subterránea 23
3.4.1.1. Antecedentes del cuerpo mineralizado 23
3.4.1.2. Recursos y Reservas 24
3.4.1.3. Método de Explotación 25
3.4.1.4. Diseño Minero (configuración de la explotación) 27
3.4.2. Planta Concentradora 27
3.4.2.1. Proceso de trituración 28
3.4.2.2. Proceso de Molienda 29
3.4.2.3. Proceso de Flotación 29
3.4.3. Depósito de relaves 30

3.4.4. Línea de Conducción de Agua 30
3.4.5. Línea de Transmisión Eléctrica 31
3.4.6. Infraestructura Complementaria 31
3.4.7. Caminos de acceso 32
3.5. Etapa de Construcción y Operación 32
4. ANÁLISIS DE RIESGOS PROYECTO ARQUEROS 33
4.1. Identificación de Riesgos 33
4.1.1. Riesgo Geológico 33
4.1.2. Riesgo Económico 33
4.1.3. Riesgo de Permisos 33
4.1.4. Riesgos Metalúrgicos 34
4.1.5. Riesgos de Logística y comercialización 34
4.1.6. Riesgos Operacionales 35
4.1.7. Riesgos de Inversión 35
4.2. Análisis Cualitativo de los Riesgos del Proyecto Arqueros 35
4.2.1. Matriz de Riesgo 36
4.3. Análisis Cuantitativo 38
4.3.1. Riesgo Geológico 39
4.3.2. Riesgo Económico 40
4.3.3. Tasa de Cambio [CLP/USD]: 41
4.3.4. Riesgo de Permisos 43
4.3.5. Riesgos Metalúrgicos 44
4.3.6. Riesgos Operacionales 45
4.3.6.1. Costo de Operación Mina 45
4.3.6.2. Costo de Operación Planta 46
4.3.7. Riesgos de Inversión 47
5. VALORIZACIÓN SIN RIESGO (VAN Estático) 49
5.1. Consideraciones Económicas 49
5.2. Plan de Producción 52
5.3. Inversión 52
5.4. Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno 53
6. VALORIZACIÓN CON RIESGO 54
6.1. Simulación de Montecarlo (Análisis Crystal Ball) 54

6.2. Valor en Riesgo (VaR) 58
7. MITIGACIÓN DE RIESGOS 61
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 65
9. BIBLIOGRAFÍA 67
ANEXO 1. Modelo Flujo de Caja 69
ANEXO 2. Reportes de Salida Crystal Ball 73

Índice de Tablas

Tabla 1. Niveles de Impacto de riesgos 13
Tabla 2. Niveles de Probabilidad de riesgos 13
Tabla 3. Recursos Minerales 24
Tabla 4. Plan de Producción 32
Tabla 5. Matriz de Riesgo Proyecto Arqueros 37
Tabla 6. Evaluación de riesgos del proyecto arqueros 37
Tabla 7. Priorización de Riesgos Proyecto Arqueros 38
Tabla 8. Rango de Variación para Variables de Riesgo 38
Tabla 9. Recursos Extraíbles 39
Tabla 10. Valores Proyectados del Precio del Dólar 42
Tabla 11. Parámetros Metalúrgicos 51
Tabla 12. Costo de Operación 51
Tabla 13. Capex inicial de Proyecto 53
Tabla 14. Medidas de Respuesta al Riesgo 61
Tabla 15. Resumen Medidas de Mitigación 64

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Riesgo asociado a las Etapas de un Proyecto Minero 7
Ilustración 2. Flujo de Trabajo para estudio típico de un Proyecto Minero. . 10
Ilustración 3. Incertidumbre durante la fase de estudio de proyectos. 11
Ilustración 4. Esquema Explicativo del Análisis de Riesgos por Simulación . 15
Ilustración 5. Formula Valor Actual Neto (VAN) 16
Ilustración 6. Representación Gráfica del VaR 18
Ilustración 7. Plano de Ubicación del Proyecto 20
Ilustración 8. Mapa Geológico Formación Arqueros 21
Ilustración 9. Espesores del cuerpo mineralizado 26
Ilustración 10. Plano Esquemático Mina 27
Ilustración 11. Flujo de Procesamiento de Mineral 28
Ilustración 12. distribución Triangular Típica 39
Ilustración 13. Distribución de Probabilidad para Ley de CU 40
Ilustración 14. Distribución de Probabilidad para el precio del cobre 41
Ilustración 15. Distribución de Probabilidad Costo de mano de obra mina ... 43
Ilustración 16. Correlación Precio del cobre y costo mano de obra 43
Ilustración 17. Análisis de Evaluación Ambiental de Proyectos Mineros 44
Ilustración 18. Distribución de probabilidad para Recuperación de Cu 45
Ilustración 19. Distribución de probabilidad para el costo mina 46
Ilustración 20. Distribución de probabilidad para el costo planta 47
Ilustración 21. Distribución de Probabilidad para Capex inicial (Construcción) 48
Ilustración 22. Distribución de Probabilidad para Capex inicial (permisos) . 48
Ilustración 23. Precio del Cobre (años 1935-2017) 49
Ilustración 24. Precio de la Plata (años 1950-2017) 50
Ilustración 25. Producción Anual Proyectada de fino de cobre y plata. 52
Ilustración 26. Flujo Efectivo y Van Acumulado Anual 53
Ilustración 27. Histograma VAN caso simulación probabilística 55
Ilustración 28. Estadísticas de Estimación del Van Caso Simulado 56
Ilustración 29. Histograma de TIR caso Simulación Probabilística 56
Ilustración 30. Estadísticas de estimación de TIR 57
Ilustración 31. Sensibilidad VAN Simulado 58
Ilustración 32. Simulación VAN 5% 59
Ilustración 33. Simulación TIR 5% 60

1. INTRODUCCIÓN

Los proyectos mineros se caracterizan por involucrar generalmente grandes montos y periodos largos de inversión, además su evaluación involucra incertidumbres relacionadas principalmente con la evaluación del yacimiento y los datos geológicos en los que se basa el proyecto, el precio del metal (commodity), costos, capacidades productivas, y en general todo lo relacionado con los estudios de ingeniería realizados.

Los valores y eventos inciertos del proyecto, pueden impactar directamente sobre el costo total de este y su vida útil, por lo tanto, la correcta gestión de riesgos, aparece como una herramienta importante para aumentar la probabilidad de éxito. En muchas ocasiones se tiende a realizar evaluaciones basadas en escenarios estáticos, que no siempre consideran los cambios que pueden producirse en el rendimiento económico del proyecto una vez que éste ha alcanzado la etapa de producción, por ende, es importante poder identificar tempranamente las fuentes de incertidumbre, los riesgos relevantes y específicamente aquellos propios del proyecto, de tal manera de realizar una adecuada gestión de aquellos riesgos considerados como los más influyentes y que pueden tener un gran impacto en la decisión final sobre invertir; y también en definir las características de operación o las recomendaciones para el proyecto, de tal manera que permitan asegurar una mayor rentabilidad.

Por otra parte, Chile como principal productor de cobre a nivel global y país con las mayores reservas de cobre en el mundo, posee un amplio panorama de inversiones mineras, muchas de ellas están en periodo de evaluación y otras simplemente detenidas por ser declaradas inviables, ya sea por temas técnico-económicos o factores sociopolíticos. Dentro de los proyectos en evaluación existen algunos que corresponden a proyectos de mediana minería, un sub-sector de la economía chilena con alta relevancia, sin embargo, muy sensible, especialmente al ciclo negativo de precios del cobre, lo que genera en muchas ocasiones la salida temprana de actores de este segmento, o la detención de faenas productivas, lo que es un factor que genera también incertidumbres a la hora de tomar la decisión de invertir.

Considerando lo antes mencionado, en el siguiente trabajo de tesis se investigan las incertidumbres y riesgos presentes en el proceso de evaluación económica de un proyecto minero de aplicación a un caso real de un proyecto de mediana minería, específicamente a través de la evaluación económica del Proyecto Arqueros, que corresponde a un proyecto greenfield, ubicado en la cuarta región y que considera la explotación de un yacimiento de cobre mediante la construcción de una mina subterránea con un ritmo de producción de 5ktp de mineral, una vida útil estimada de 17 años, con su respectiva planta de proceso y las instalaciones necesarias para producir concentrado.

Se realizará una evaluación económica considerando la inclusión de la incertidumbre, para recomendar estrategias de inversión y medidas de control de riesgos. Se espera poder reconocer los riesgos asociados a los proyectos de minería, y en el caso de aplicación, poder cuantificar el riesgo a través del Var del Proyecto y realizar recomendaciones respecto a variables que deben ser priorizadas para gestionar el riesgo del proyecto en evaluación. Aun cuando los resultados no indicarán la optimización del proyecto de inversión, permitirá evaluar distintos escenarios pudiendo observar el comportamiento de varias variables al mismo tiempo proyectadas a futuro.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA Y JUSTIFICACIÓN

La inclusión de la incertidumbre en cualquier tipo de proyecto podría tener efectos positivos o negativos en el resultado de la evaluación, e influir en la decisión final del inversor. Por lo antes mencionado es que la alta dirección de las empresas requiere tener las herramientas para tomar la mejor decisión y aumentar la probabilidad de éxito.

La identificación de los riesgos asociados a un proyecto minero, producidas por las incertidumbres que están presentes en las inversiones de este tipo, permiten una mejor evaluación del proyecto como oportunidad de inversión.

La teoría indica que la magnitud de los riesgos va cambiando a medida que el proyecto avanza en sus fases de estudio, y especialmente en el caso de los proyectos mineros que debido a los continuos cambios se han transformado en una constante discusión durante los últimos años, ya que distintos equipos de evaluadores normalmente obtienen resultados diferentes para mismos proyectos, por lo tanto es importante medir la exposición al riesgo dependiendo del nivel de confianza definiendo el monto máximo que el proyecto podría perder antes de decidir invertir.

1.1.1. Justificación

La importancia de realizar este trabajo radica en poder resolver los siguientes planteamientos:

¿Cuáles son las incertidumbres típicas involucradas en los proyectos de minería?

¿Por qué debe emprenderse la gestión de la incertidumbre en los proyectos mineros?

Mostrar técnicas de identificación, evaluación, tratamiento y monitoreo que pueden usarse dentro del proceso de gestión de incertidumbre para proyectos mineros.

Recomendaciones de cómo debe manejarse la incertidumbre y mostrar los aspectos relevantes que deben ser considerados en un proyecto minero de mediana Minería.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

El presente trabajo tiene por objetivo realizar una evaluación de los riesgos que están presentes en un proyecto de inversión minera "greenfield" de mediana minería y a través de su aplicación al Proyecto Arqueros, realizando una evaluación económica que permita determinar el impacto asociado a las distintas incertidumbres existentes e identificar variables que deben ser consideradas para la gestión de riesgos del proyecto.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificación cualitativa y cuantitativa de los riesgos asociados a un proceso de toma de decisión de inversión de un Proyecto Minero.

- Identificación de factores preponderantes que influyen en resultado económico de la evaluación del caso de aplicación.

- Demostrar numéricamente la importancia de la incorporación de la incertidumbre en la evaluación económica del Proyecto a través de la simulación.

- Determinar el Valor del Riesgo del Caso de Aplicación a través de la herramienta VAR (Value at Risk)

- Cuantificar el impacto de los factores de riesgo críticos sobre la valorización del proyecto.

- Identificar las variables preponderantes del proyecto que deben ser consideradas en la gestión de riesgos.

1.3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente trabajo considera lo siguiente:

- Investigación Bibliográfica, referente al estado del arte y casos similares de estudio e investigación, que consideren la evaluación de riesgos en proyectos mineros, especialmente aquellos de mediana minería.

- Se realizará un levantamiento de los riesgos susceptibles de impactar al proyecto y una descripción de sus principales características.

- Se realizará la priorización de los riesgos del caso de aplicación para realizar el análisis cuantitativo.

- Con los datos del caso de aplicación se realizará la evaluación del proyecto mediante el método del VAN tradicional, asumiendo una estrategia operacional fija. Considerando ritmos de producción fijos, valorizados a los precios esperados.

- En función de la priorización de riesgos, de los antecedentes y el juicio experto de los realizadores del proyecto, se definirá la distribución de probabilidad de cada uno, estableciendo valores máximos, óptimos y mínimos.

- Se realizará el análisis numérico del efecto de los riesgos identificados, sobre los objetivos generales del proyecto y simulación a través de software Crystal Ball.

- Se estimará el Var del Proyecto

- Se analizarán los Resultados, y posteriormente las conclusiones y recomendaciones.

2. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se presentarán los principales aspectos teóricos que serán considerados para desarrollar este trabajo.

2.1. Evaluación de Proyectos

La evaluación de proyectos es un proceso muy relevante donde se utilizan prioritariamente agentes económicos que definen las etapas, la toma de decisiones y la asignación de recursos. A partir de esto se determinan cambios respecto a la planificación por lo tanto se define en ocasiones como un medio para optimizar la gestión de proyectos y posee entre otras, las siguientes características.

- Está enfocada en poder definir una asignación adecuada de recursos

- Entrega al evaluador metodologías para determinar las ventajas de realizar distintas acciones respecto de otras acciones posibles

- Identifica, mide y valoriza, cuantitativa y cualitativamente, los beneficios y costos.

La evaluación debe contar siempre con una base científica que pueda sustentar los resultados y/o inversiones que se deben realizar.

2.1.1. Proyectos Mineros

Para el caso de la evaluación de proyectos mineros, antes de que exista como proyecto debe pasar por una fase de comprobación de la viabilidad. En la fase de estudios previos, se realizan diferentes estudios e investigaciones y se recopila toda la información necesaria para tomar la decisión de ejecutar o no el proyecto y definir y poder valorarlo considerando todos los aspectos técnicos y económicos.

Para desarrollar un buen estudio de un proyecto minero debe estar considerado siempre el análisis de los siguientes elementos:

- El yacimiento
- El tipo de mineral
- El mercado
- El ambiente social económico y financiero en el que se desarrollará

Estos elementos definen las principales características del proyecto y en el caso minero algunas de ellas están relacionadas con las reservas minerales limitadas, características y dificultades propias del yacimiento, incertidumbres geológicas, periodos extensos para su estudio y puesta en marcha, larga vida útil y la influencia de los precios cíclicos del metal, altos requerimiento de capital, complejidad de aspectos sociales y medioambientales.

Una forma de diferenciar los proyectos es de acuerdo al monto de inversión requerido, el que está determinado generalmente por la complejidad de diseño del proyecto y el nivel de aprobaciones requeridas para lograr la su operación.

En el caso particular de la minería, se podrían considerar proyectos de tamaño mediano a aquellos que involucran montos de inversión superiores a 10 MUSD, mientras que para aquellos proyectos que involucran montos superiores a 250 MUSD se podrían considerar mayores.

2.1.1.1. Fases de un Proyecto Minero[1]

Los proyectos mineros, comienzan en una idea para luego ser transformados en una operación minera, y en todo proyecto minero se pueden distinguir normalmente las siguientes 5 etapas:

A. Fase de Exploración y evaluación preliminar

Esta etapa está orientada a la búsqueda de alternativas que permitan agregar valor al negocio, se identifican, pero sin un análisis profundo de los riesgos involucrados.

Es fundamental en esta fase poder eliminar aquellas alternativas que no tienen potencial para la generación de valor para evitar un uso injustificado de recursos en el desarrollo de estudios.

B. Fase de Prefactibilidad

En base a las alternativas identificadas en la etapa anterior el enfoque esta dado en poder incrementar la cantidad y calidad de la información existente, se recopila información geológica con el objetivo de disminuir la incertidumbre y se eleva la ingeniería a un nivel básico para definir los principales aspectos necesarios para iniciar la operación, se obtiene un presupuesto. Las distintas alternativas valorizadas son evaluadas y normalmente se recomiendan aquellas respaldadas por retornos de inversión que sean al menos superiores a cero. Finalmente, las alternativas son priorizadas con el objetivo de definir cuáles serán sometidas a la aprobación para proseguir con los estudios de Definición.

C. Fase de Factibilidad

Se avanza en el desarrollo de los estudios de ingeniería a un mayor nivel de detalle (50 a 75% completado) y se incrementa la cantidad de las pruebas correspondientes para confirmar y validar información de la etapa anterior, la alternativa seleccionada para esta etapa es sometida a una evaluación económica exhaustiva (generalmente VAN) donde se consideran los valores finales para la inversión y los costos para la futura operación con un nivel de certeza de un 10-15%. En esta etapa se encuentra completamente definido el alcance del proyecto, los riesgos y sus controles, así como todas las consideraciones para el desarrollo de estudios medioambientales y obtención de permisos necesarios para la ejecución del proyecto. De esta manera, en esta fase se presenta el proyecto a la aprobación final para iniciar su construcción.

[1] Fuente y adaptación, proviene de [6] y [7]

D. Fase de Construcción

Una vez aprobado el proyecto, se realizan los estudios de ingeniería de detalle y paralelamente se da inicio al plan de adquisiciones y contratos de acuerdo al presupuesto aprobado. Así una vez terminados los estudios complementarios, se debe materializar físicamente lo proyectado en los estudios y disponerlo a condición de operación en función del presupuestos y plazos establecidos.

E. Puesta en marcha operación y cierre.

Una vez construido el proyecto y dispuesto con todas las pruebas necesarias de funcionamiento para garantizar el cumplimiento de los alcances y sus objetivos, el proyecto es entregado al grupo que realizará la operación para la puesta en servicio y posterior inicio de la producción.

Una vez terminada la operación, con la finalidad de eliminar, mitigar y controlar los efectos adversos al área utilizada se debe dar cumplimiento al Plan de Cierre en función del presupuesto y plazos establecidos en el estudio del proyecto.

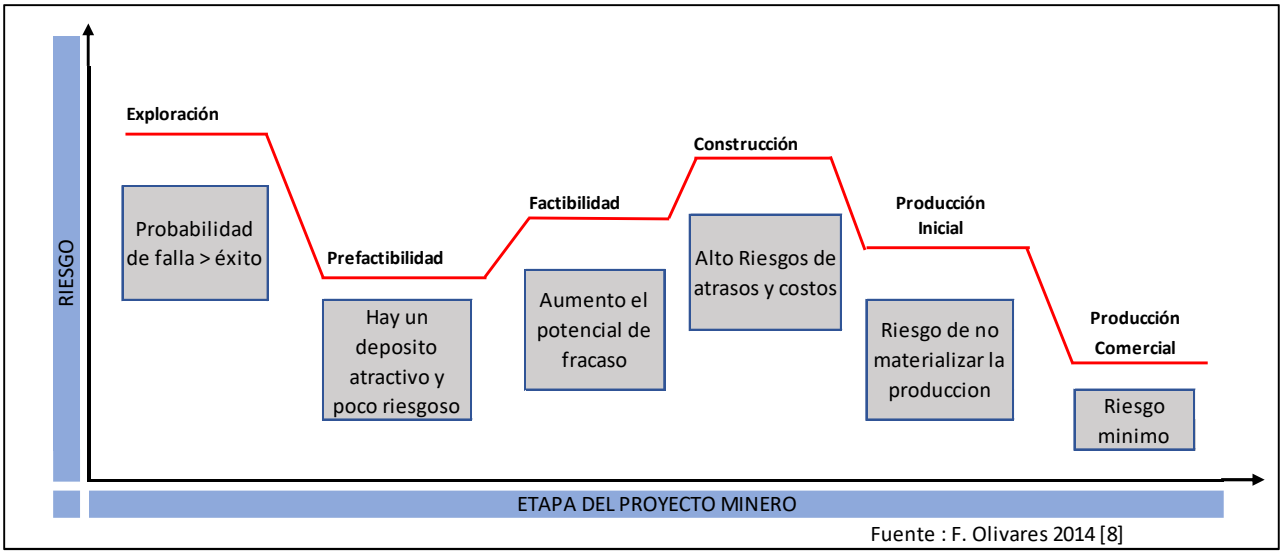


Ilustración 1. Riesgo asociado a las Etapas de un Proyecto Minero

2.1.1.2. Estudios que Sustentan un Proyecto Minero [2]

La evaluación de un proyecto minero desde la exploración hasta la explotación es un proceso difícil y complejo, las actividades de evaluación e ingeniería para un proyecto se inician una vez descubierto el depósito y continúan hasta el inicio de la construcción.

[2] Fuente y adaptación, proviene de [6] y [13]

La factibilidad técnico-económica de cada proyecto debe ser analizada y ajustada durante cada fase del proyecto en desarrollo con una profundización de la información de ingeniería. Los estudios de ingeniería durante el desarrollo del proyecto que son comúnmente utilizados por la industria minera previo a la etapa de inversión corresponden al estudio conceptual, el estudio de factibilidad preliminar y el estudio de factibilidad.

2.1.1.2.1. Estudio Conceptual

El estudio conceptual, a veces también denominado estudio de alcance o "Scoping Study", es la parte inicial del estudio del proyecto minero y considera una evaluación preliminar. Los principales parámetros para el estudio conceptual son asumidos. En consecuencia, el nivel de inexactitud es tomado como ± 50%. Aunque un estudio conceptual es útil como una herramienta, e importante para decidir el desarrollo de los estudios de ingeniería posteriores, no es válido para la decisión económica de realizar el proyecto.

Dentro de las principales actividades del estudio conceptual, están las siguientes;

- Planeamiento Estratégico.
- Diseño de los criterios de exploración y reconocimiento geológico.
- Estrategia para la estimación de recursos.
- Identificación de distintas alternativas para el desarrollo del proyecto.
- Estimación preliminar de inversión y costos (trade-off).
- Primera evaluación económica preliminar

2.1.1.2.2. Estudio de Pre-factibilidad

El estudio de pre factibilidad corresponde a una etapa intermedia en el proceso de ingeniería para la evaluación del proyecto minero. Los principales parámetros considerados para la prefactibilidad están en una base de ingeniería definida. El nivel de precisión es más alto que en el estudio conceptual, y en la mayoría de los casos puede alcanzar ± 25% de inexactitud. El análisis económico preliminar permite evaluar distintas alternativas de desarrollo y factibilidad general del proyecto. Sin embargo, estas estimaciones de costos y

parámetros de ingeniería no tienen la precisión necesaria para tomar la decisión de invertir en el proyecto.

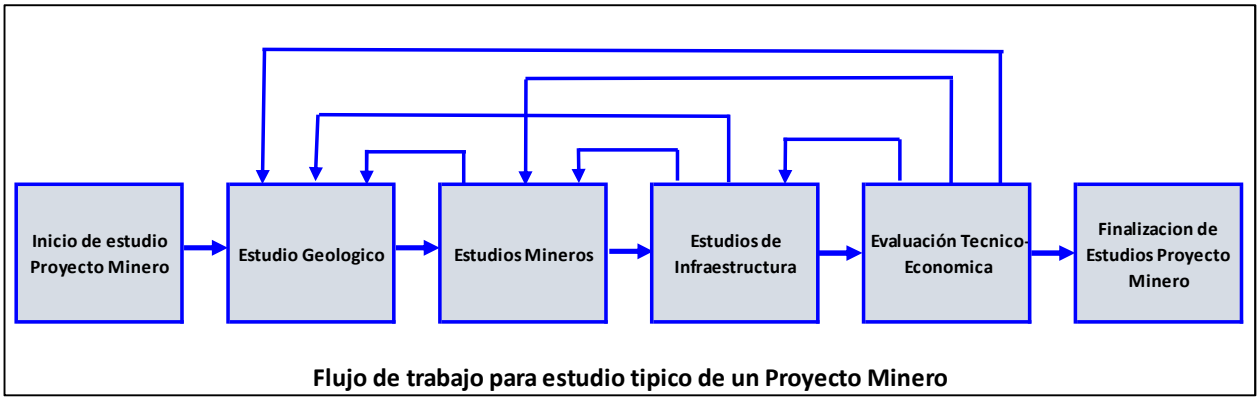
En esta etapa es posible reconocer las siguientes actividades:

- Definición del yacimiento
- Estimación más confiable de recursos medidos e indicados
- Identificación y evaluación preliminar una o más alternativas factibles.
- Utilización de fuentes secundarias para la estimación de costos y gastos de capital.
- Ingeniería conceptual y estudios de mercado.
- Evaluación económica conceptual.

2.1.1.2.3. Estudio de Factibilidad

Un estudio de factibilidad corresponde a una última etapa en el proceso de la ingeniería más detallada y que permite evaluar un proyecto de minería, generalmente conduce a una decisión de invertir o no en el proyecto. Los parámetros principales para un estudio de factibilidad se basan en análisis de ingeniería, y el nivel de precisión es más alto que el estudio de prefactibilidad, usualmente ± 15% de inexactitud. Con frecuencia, el término "financiable" se utiliza para describir un estudio de factibilidad.

- Determinar de los costos desde fuentes más confiable
- Se realiza la ingeniería básica, el plan minero plan maestro, tramitación de autorizaciones y financiamiento.
- Se realiza una Evaluación Económica Básica.



Fuente: C. Kühn & J.K. Visser, 2014 [4]

Ilustración 2. Flujo de Trabajo para estudio típico de un Proyecto Minero.

2.1.2. Análisis de Riesgos e incertidumbre[3]

El estudio de los proyectos minero bajo condiciones de riesgo e incertidumbre, implica aceptar que en el proyecto existen innumerables situaciones que no son factibles de controlar con certeza.

Muchas de las situaciones están fuertemente influenciadas por factores externos que hacen bastante difícil su predicción con exactitud. Por otro lado, el nivel de producción, y el precio de los productos y costos de producción, en ocasiones dependen en gran medida del comportamiento del mercado en el momento del proyecto, por lo tanto, para ser utilizadas se debe dejar claramente establecido que son solamente estimaciones y pueden experimentar cambios.

Es así como los flujos de caja del proyecto (ingresos y costos), se ven influenciados por estas variables, y un grado importante del comportamiento del flujo se ve explicado por el conocimiento que se tenga sobre el comportamiento de las variables, e idealmente de la distribución de probabilidades que sea posible asociar al comportamiento de cada variable con incertidumbre. Para esto se emplean distintos métodos basados en dicho conocimiento, de tal forma que se tiene:

- **Riesgo:** Son conocidas las distribuciones de probabilidades de las variables y por ende la de los flujos de caja.
- **Incertidumbre:** Sólo son conocidos diferentes valores que puede adoptar la variable, pero no se conoce la probabilidad de ocurrencia de estos valores.

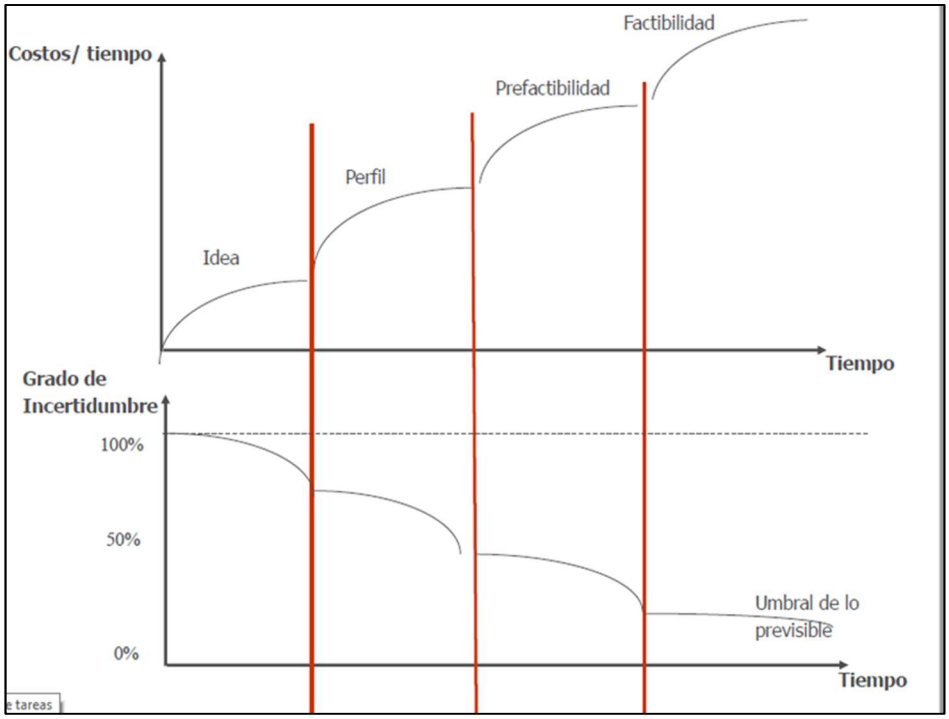
[3] Fuente y adaptación, proviene de [8] y [14]

Para enfrentar estos aspectos, existen instrumentos de análisis, orientados a estudio del riesgo y a la incertidumbre, por ejemplo:

Estimadores de Riesgo: Realizan un tratamiento analítico de la variabilidad de los flujos y las probabilidades de ocurrencia de los mismos, calculando estimadores de los indicadores de rentabilidad.

Simulación: Modelación de los Flujos de Caja a través de combinación de variables determinísticas y estocásticas. El comportamiento de las variables se simula empleando números aleatorios que describen la distribución de probabilidades.

Análisis de Sensibilidad: Establecer la variabilidad o sensibilidad de los indicadores de rentabilidad de un proyecto, frente a cambios en los valores de las variables que pueden estar sujetas a variabilidad. Este análisis es efectuado para un amplio rango de variabilidad y bajo el supuesto de efectuar un cambio a la vez.



Fuente: Kettlun, A. 2016 [15]

Ilustración 3. Incertidumbre durante la fase de estudio de proyectos.

2.1.2.1. Análisis Cualitativo

La definición de niveles de probabilidad e impacto puede reducir la influencia de parcialidades. Por lo que, realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos es por lo general un medio rápido para establecer prioridades para la planificación de la respuesta a los riesgos. También sienta las bases para realizar el análisis cuantitativo de riesgos.

El procedimiento de evaluación consiste en:

1. Determinar la escala de probabilidad (cualitativa o cuantitativa).

2. Determinar el impacto (alto, medio o bajo)

3. Priorizar los riesgos

El análisis cualitativo del riesgo considera la utilización de un conjunto de valores fijos en todos los proyectos que representen la probabilidad y el impacto de cada riesgo desde un punto de vista cualitativo. Mediante este análisis es posible categorizar y agrupar los riesgos para establecer prioridades para la planificación de las respuestas a los riesgos.

La evaluación de la probabilidad de los riesgos, investiga la probabilidad de ocurrencia de cada riesgo específico. La evaluación del impacto de los riesgos investiga el posible efecto sobre un objetivo del proyecto, como tiempo, costos, calidad, etc. Para cada riesgo identificado se evalúan la probabilidad y el impacto, asociando un valor cualitativo de probabilidad e impacto.

Los riesgos pueden ser evaluados en entrevistas o reuniones con participantes seleccionados por su grado de conocimiento y dependiendo de la especialidad, por ejemplo, los miembros del equipo del proyecto y/o asesores externos.

Para realizar el análisis cualitativo de impacto y probabilidad se debe tener en cuenta los siguientes conceptos;

El impacto es una estimación de la ganancia o pérdida que se sufriría en caso de que el riesgo ocurriese. El equipo del proyecto determina el impacto que tendrían los riesgos sobre todas las áreas relacionadas, si el evento ocurriese.

Para el análisis del impacto cualitativo, se podrían definir tres o cuatro niveles de impacto de riesgos, por ejemplo, aquellos definidos en la tabla 1.

IMPACTO	DESCRIPCION
Alto	De producirse el riesgo, ocasionaría un daño sensible al objetivo.
Medio	Riesgo Importante, pero no afectará la totalidad del objetivo, ni pondrá en peligro los resultados asociados al mismo.
Bajo	Riesgo que no afectará el resultado final del objetivo ni el proyecto de manera importante como para tomar medidas.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 1. Niveles de Impacto de riesgos

Estimación de la probabilidad de ocurrencia de riesgo (Cualitativo)

Una vez identificados los riesgos, se analizan para determinar la probabilidad de que ocurra cada evento. Normalmente es más simple y más rápido hacerlo de forma cualitativa utilizando factores de probabilidad como los que muestran en la tabla 2.

En el procedimiento de gestión de riesgos se determinarían los valores a usar para estimar la probabilidad de cada riesgo desde un punto de vista cualitativo.

PROBABILIDAD	DESCRIPCION
Alto	Los antecedentes o resultados indican que el riesgo ocurrirá con mucha frecuencia.
Medio	Existen bases para creer que su frecuencia no sea tan preocupante.
Bajo	No hay elementos de juicio para considerar que el riesgo ocurrirá o no son suficientes para prever probabilidad media o alta

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2. Niveles de Probabilidad de riesgos

Determinación de la Categoría y Prioridad del Riesgo

Siempre es importante poder identificar el mayor número posible de riesgos del proyecto, sin embargo, en muchos casos el número de riesgos identificados puede ser excesivo, en estos casos es recomendable agrupar los riesgos en función de sus prioridades de manera de poder centrarse en los más críticos.

La evaluación y priorización de cada riesgo generalmente se realiza utilizando una matriz de probabilidad e impacto. Esta matriz asignará categorías a los riesgos basándose en la combinación de dichos factores (probabilidad e impacto) que llevan a la calificación de los riesgos como de prioridad baja, moderada o alta. Pueden usarse términos descriptivos o valores numéricos. Entonces a mayor impacto y probabilidad, más grave será el riesgo y en función de esto se puede establecer una respuesta.

En aquellos casos en que exista un número elevado de riesgos dentro de la categoría 'Alto', es recomendable priorizar dichos riesgos identificando los más altos dentro de esta categoría.

2.1.2.2. Análisis de Sensibilidad (Simulación)

Métodos Cuantitativos:
Se consideran métodos cuantitativos a aquellos que permiten asignar valores de ocurrencia a los diferentes riesgos identificados, es decir, calcular el nivel de riesgo del proyecto.

Los métodos cuantitativos incluyen:

- Análisis de probabilidad
- Análisis de consecuencias
- Simulación computacional

El desarrollo de dichas medidas puede ser realizado mediante diferentes mecanismos, entre los cuales se destaca el Método Montecarlo, el cual se caracteriza por:

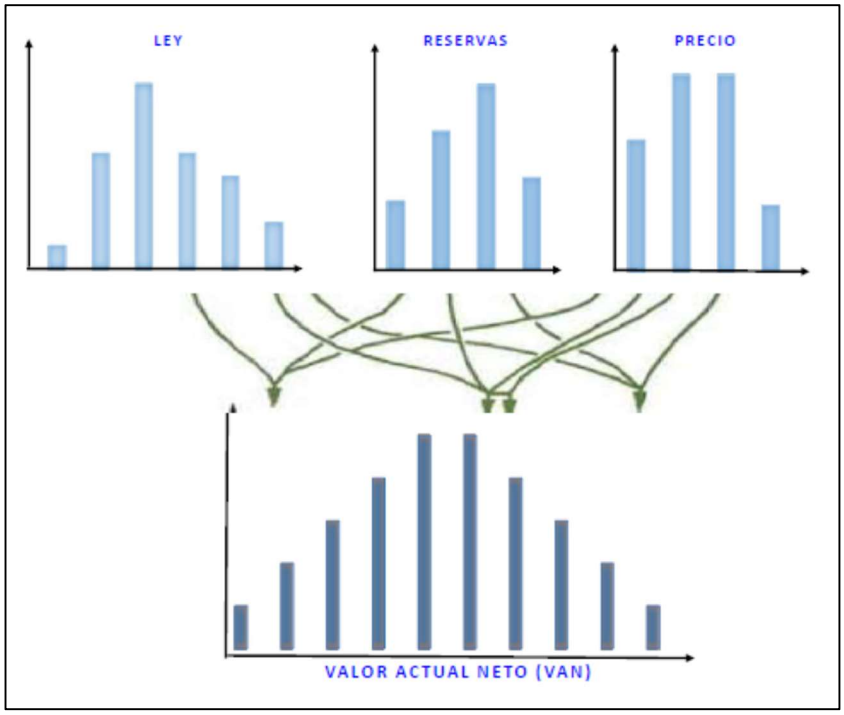
- Amplia visión para mostrar múltiples posibles escenarios
- Sencillez para llevarlo a la práctica
- Simulaciones computarizadas.

Método Montecarlo[4]
Es un método cuantitativo que permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias que pueden generar distintas escenarios y resultados, y es utilizado para el desarrollo de análisis de riesgos. El método fue llamado así en referencia al Principado de Mónaco, por ser "la capital del juego de azar".

[4] Fuente y adaptación, proviene de [9]

El método Montecarlo permite la solución de problemas por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilístico artificial, está basado en realizar un número lo suficientemente elevado de iteraciones (asignaciones de valores de forma aleatoria), de esa manera se espera que la muestra disponible de resultados, pueda ser lo suficientemente grande para que pueda ser considerada representativa de la realidad. Dichas iteraciones se pueden realizar también utilizando herramientas informáticas disponibles en el mercado.

Con los resultados obtenidos de las diferentes iteraciones realizadas se efectúa un estudio estadístico del que se sacan conclusiones relevantes respecto al riesgo del proyecto, tales como, valores medios, máximos y mínimos, desviaciones típicas, varianzas y probabilidades de ocurrencia de las diferentes variables determinadas sobre las que medir el riesgo.



Fuente: Naranjo 2005 [7]

Ilustración 4. Esquema Explicativo del Análisis de Riesgos por Simulación

Valor Actual Neto (VAN) [5]

Permite cuantificar a la fecha de hoy, el valor del flujo económico que es generado por una empresa o proyecto periódicamente a lo largo de su vida a un tipo de interés determinado. Es decir, permite calcular los flujos de fondos generados por un proyecto como diferencia entre los cobros y los pagos generados en un ejercicio y traerlos al momento actual aplicándoles una tasa de descuento.

El VAN expresa una medida de rentabilidad del proyecto en términos absolutos netos, es decir, en número de unidades monetarias (euros, dólares, pesos, etc.). Se utiliza para la valoración de distintas opciones de inversión. Ya que calculando el VAN podemos conocer con cuál de ellas vamos a obtener un mayor beneficio.

$$VAN = -Io + \sum_{t=1}^{n} \frac{Ft}{(1+K)^t} = -Io + \frac{F_1}{(1+K)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \cdots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Fuente: www.economipedia.com

Ilustración 5. Formula Valor Actual Neto (VAN)

Donde;

Ft = Flujos de dinero en cada periodo t

Io = Inversión realiza en el momento inicial (t = 0)

n = N de periodos de tiempo

k = Tasa de descuento o el tipo de interés exigido a la inversión

El VAN es utilizado para poder tomar dos tipos de decisiones: en primer lugar, poder definir si las inversiones son factibles de realizar y en segundo lugar, determinar qué inversión es mejor que otra en términos absolutos. Los criterios de decisión van a ser los siguientes:

VAN > 0: el valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios.

[5] Fuente y adaptación, proviene de [15] y www.economipedia.com

VAN = 0: el proyecto de inversión no generará ni beneficios ni pérdidas, siendo su realización, en principio, indiferente.

VAN < 0: el proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

Valor en riesgo (VaR) [6]

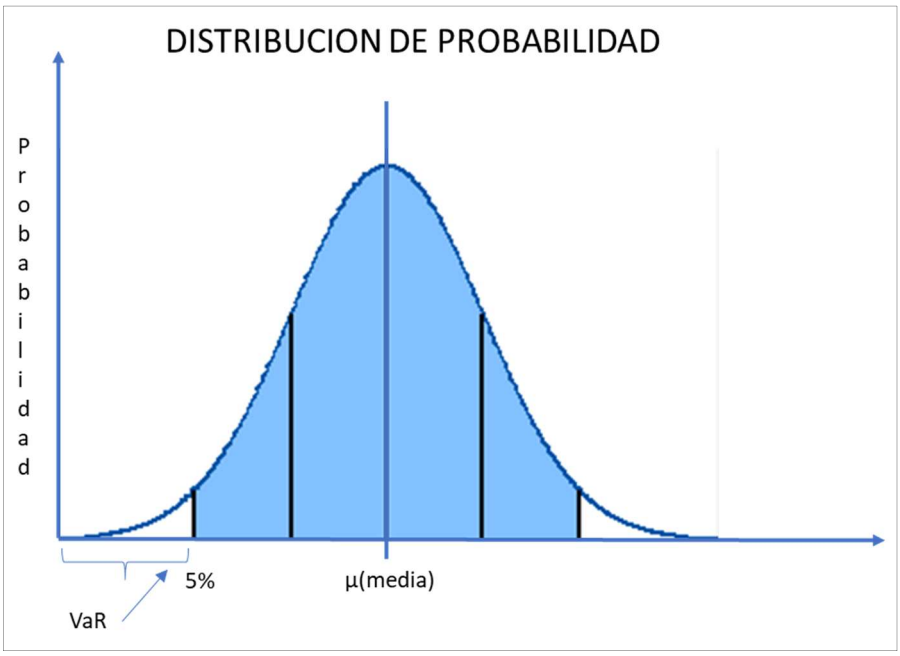
El valor en riesgo, conocido también como VaR (Value at Risk), es una técnica estadística para medir el riesgo financiero de una inversión.

El VaR define el monto de pérdida máxima que puede experimentar una inversión para un nivel de confianza en un intervalo de tiempo definido, el valor en riesgo cuantifica la pérdida potencial en el valor de un activo de riesgo o de la cartera de inversión, durante un período definido para un intervalo de confianza dado. En otras palabras, el VaR es un método de cuantificar el riesgo y se puede definir como el valor máximo probable de pérdida, con un intervalo de confianza determinado, y sobre un cierto periodo de tiempo.

Cuando el VaR es calculado se define lo siguiente:

- Pérdida máxima que se puede sufrir.
- Nivel de confianza o probabilidad de pérdida asociada al VaR: generalmente, los intervalos de confianza se fijan entre el 90% y el 99%.
- Plazo al que se hace referencia: pueden tomarse plazos de 1 día, o periodos de tiempo más largos (1 mes o 1 año).

[6] Fuente y adaptación, proviene de [5] y http://economipedia.com/definiciones/valor-en-riesgo-var.html



Fuente: E. Contreras, JM Cruz [5]- Elaboración Propia

Ilustración 6. Representación Gráfica del VaR

El VaR mide el riesgo financiero de una inversión y puede calcular también la pérdida máxima tanto para un solo activo financiero como para una cartera de activos financieros. Es utilizado en el análisis de riesgos para medir y controlar el nivel de riesgo que una empresa es capaz de aceptar en cada uno de los proyectos. La gestión de riesgos de cada empresa debe considerar necesario asegurarse de que no se incurre en riesgos mayores de los que la empresa podría soportar.

Las empresas pueden estimar los beneficios que tiene cada inversión en comparación con su VaR y así invertir más dinero donde haya mayores rendimientos por cada unidad de riesgo.

3. ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO[7]

3.1. Descripción General

El Proyecto Arqueros corresponde a un desarrollo minero de cobre, que ha realizado trabajos de exploración y prospección desde el año 2011 en adelante y en la actualidad ha concluido el estudio de factibilidad del proyecto, por lo tanto, se encuentra en etapa de evaluación para tomar la decisión de invertir y continuar con las siguientes etapas comenzando por el desarrollo del estudio medio ambiental, con el propósito de obtener la autorización para una futura explotación minera.

De acuerdo a las características del yacimiento, profundidad y geometría, el método de explotación más apropiado es de forma subterránea y corresponde al método de explotación por cámaras y pilares (Room&Pillar).

El beneficio del mineral se realizará en una planta concentradora ubicada al costado de la mina subterránea. El proyecto además considera la construcción de una línea de transmisión de energía eléctrica, un ducto de conducción de agua y caminos de acceso hasta en el sitio donde se construirá la planta de concentración; se ha estimado un recurso extraíble aproximado de 29,3 MMton y una capacidad de producción en 1.8000.000 ton/año de mineral, lo que define una vida útil estimada de 17 años.

3.2. Ubicación

El proyecto cuprífero se encuentra ubicado a 75 kilómetros al noreste de la ciudad de La Serena, Comuna de La Serena, Provincia de Elqui, Región de Coquimbo.

Se accede al proyecto desde la ciudad de La Serena a través de la Ruta Ch 41 (aproximadamente 32,4 km) hasta la localidad de Marquesa, para seguir 25,1 km por el camino secundario, Ruta D - 215, hasta el cruce con la localidad Viñita Baja; posteriormente se siguen 6,4 km por la Ruta D - 205, para finalmente seguir aproximadamente 8,2 km por rutas internas preexistentes hasta el área del proyecto que se encuentra emplazado a una altura promedio de 1.400 metros sobre el nivel del mar.

[7] Fuente y adaptación, proviene de [12] y [16]

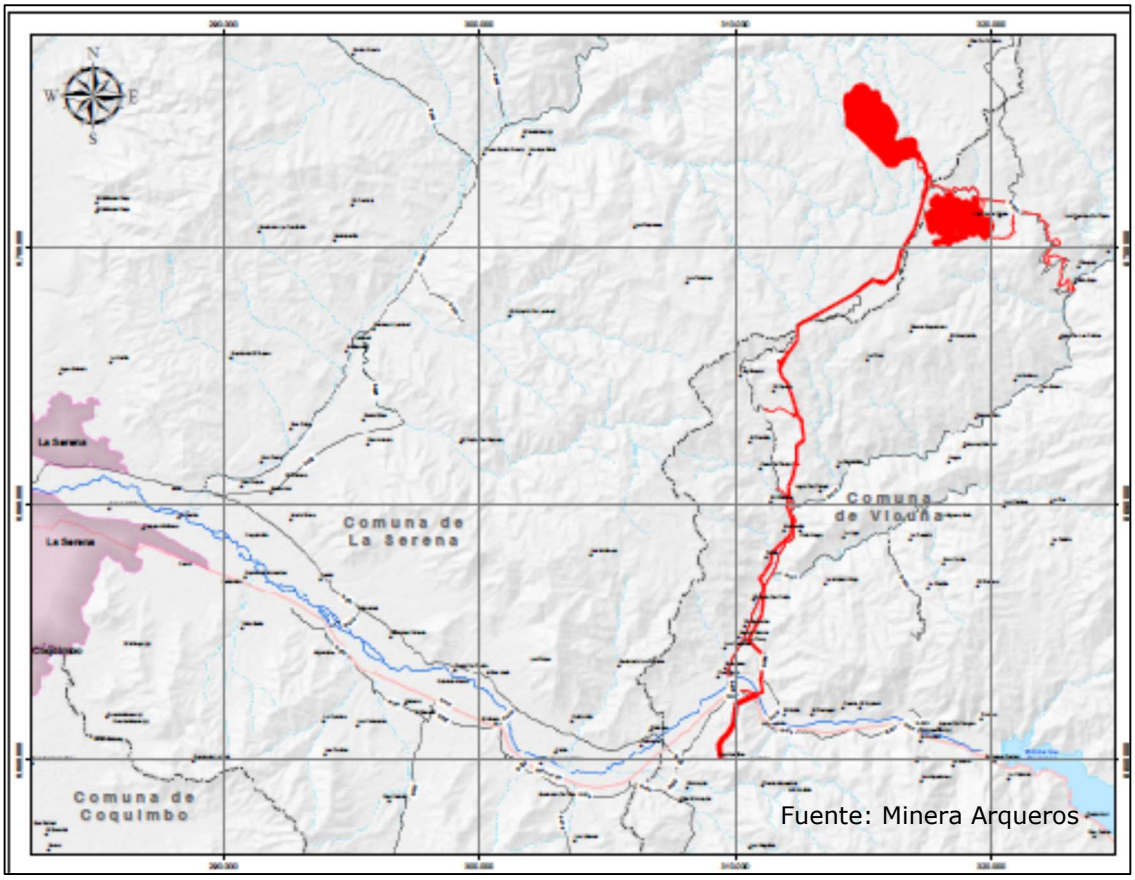


Ilustración 7. Plano de Ubicación del Proyecto

3.3. Marco Geológico

El Proyecto Arqueros se ubica en la pampa transicional entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes. En esta zona afloran secuencias sedimentarias volcánicas correspondientes a la Formación Arqueros y Quebrada Marquesa de edades comprendidas entre el Cretácico Inferior y el Paleoceno. Intruyen a las secuencias sedimentarias cuerpos dioríticos e hipabisales andesíticos del Cretácico Superior, granitoides del Paleoceno-Eoceno y cuerpos hipabisales y domos del Eoceno.

La Formación Arqueros corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria marina que se extiende como una franja de afloramientos de dirección Norte Sur. Los afloramientos corresponden a andesitas basálticas de clinopiroxeno y anfíbola, con intercalaciones de calizas y areniscas calcáreas y cherts. En base a la fauna marina que presentan los niveles calcáreos (Agria blumenbachi) se le asigna una edad Barremiana (Cretácico Inferior).

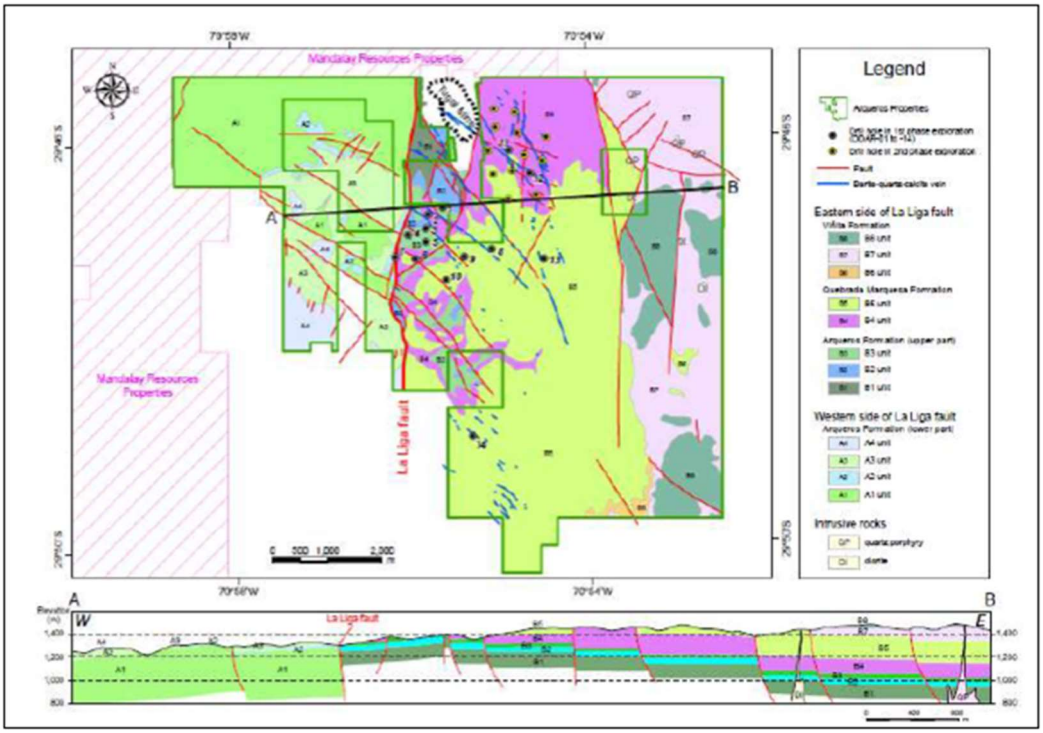
La Formación Quebrada Marquesa aparece concordantemente sobre la Formación Arqueros. Corresponde a una secuencia sedimentaria clástica, con un miembro inferior predominantemente clástico continental y un miembro

superior formado por andesitas y tobas. En su parte media presenta mantos de manganeso.

En la zona del proyecto se presenta como una franja de afloramientos de dirección Norte-Sur, en la que se reconocen una secuencia de brechas epiclásticas y volcánicas rojas con intercalaciones de areniscas con mineralización estratoligadas de manganeso correspondiente al miembro inferior. La fauna marina de sus niveles calcáreos y su posición estratigráfica permite asignarle una edad Barremiana-Aptiana (Cretácico Inferior). Asociado a intrusivos y sistemas de fallas regionales que los afectan aparece alteración hidrotermal, de edad aproximada Terciaria, como resultado de las fases finales del ciclo magmático Cretácico-Terciario.

Existe un tipo de mineralización de cobre, del tipo estrato ligado, asociada a la secuencia marino continental de la Formación Arqueros.

La ilustración N°8 muestra un mapa geológico y perfil con la ubicación de las distintas formaciones geológicas donde se enmarca el Proyecto Arqueros.



Fuente: Minera Arqueros

Ilustración 8. Mapa Geológico Formación Arqueros

En el aspecto estructural, se reconocen principalmente 2 fallas regionales (Falla La Liga y Falla Vicuña, de Oeste a Este). Se definen a partir de estas fallas tres dominios estructurales: un dominio occidental al Oeste de la Falla La Liga, un

dominio central entre la Falla La Liga y la Falla Vicuña y dominio oriental desde la falla Vicuña hacia el Este.

3.3.1. Litología

En el Proyecto Arqueros se reconocen las siguientes litologías:

- Unidad Litológica B4: Unidad perteneciente a la Formación Quebrada Marquesa, corresponde a intercalación de lavas basálticas, tobas, conglomerados volcánicos y lentes de areniscas. Presenta una potencia entre 50 y 200 metros.

- Unidad litológica B3: Unidad perteneciente a la Formación Arqueros, corresponde a lavas ocoíticas (lavas de composición andesítica con tamaño de fenocristales de plagioclasa mayor a 2 mm). Presenta una potencia entre 30 y 50 m.

- Unidad litológica B2: Unidad perteneciente a la Formación Arqueros, compuesta por rocas sedimentarias calcáreas como conglomerado, arenisca y calizas. Presenta una potencia entre 30 y 40 m. Se reconoce nivel de calizas con fósiles (rudistos), el cual hospeda la mineralización de cobre (Unidad B2H).

- Unidad litológica B1: Unidad perteneciente a la Formación Arqueros, similar a la Unidad B3, con una potencia de 50 m.

- Diques: Pórfidos de composición daciandesítica y basálticas, de espesores centimétricos hasta 50 metros aproximadamente.

Las unidades litológicas consideradas en el modelo se encuentran bien reconocidas en los antecedentes disponibles, excepto la unidad dique de la cual no se tiene una descripción litológica ni de distribución dentro del proyecto.

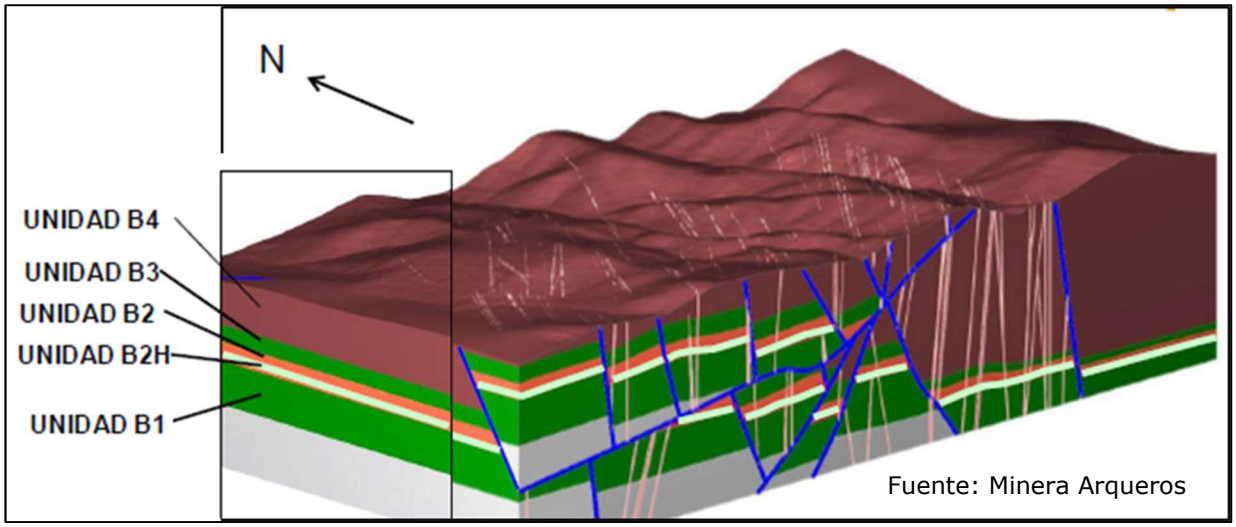


Ilustración 9. Unidades litológicas Proyecto Arqueros

3.4. Infraestructura

3.4.1. Mina Subterránea

Considerando principalmente las características geométricas del yacimiento y su ubicación respecto a la superficie, se definió la explotación a través de una mina subterránea.

3.4.1.1. Antecedentes del cuerpo mineralizado

El yacimiento consta de cuerpos mineralizados sub – horizontales, los cuerpos en general presentan corridas hasta 600 m, anchos hasta 500 m y potencias variables entre 4m y 15m aproximadamente y están ubicados a una profundidad entre 130 y 500m aproximadamente (ver ilustración N°9)

En términos geomecánicos se espera que el proyecto sea desarrollado principalmente en un ambiente con un macizo rocoso de buena calidad geotécnica, los aspectos geológicos relevantes en el proyecto Arqueros, determinados son los siguientes:

- Estratificación de unidades litológicas sedimentarias
- Fallas mayores
- Diques que cortan unidades litológicas y unidad mineralizada

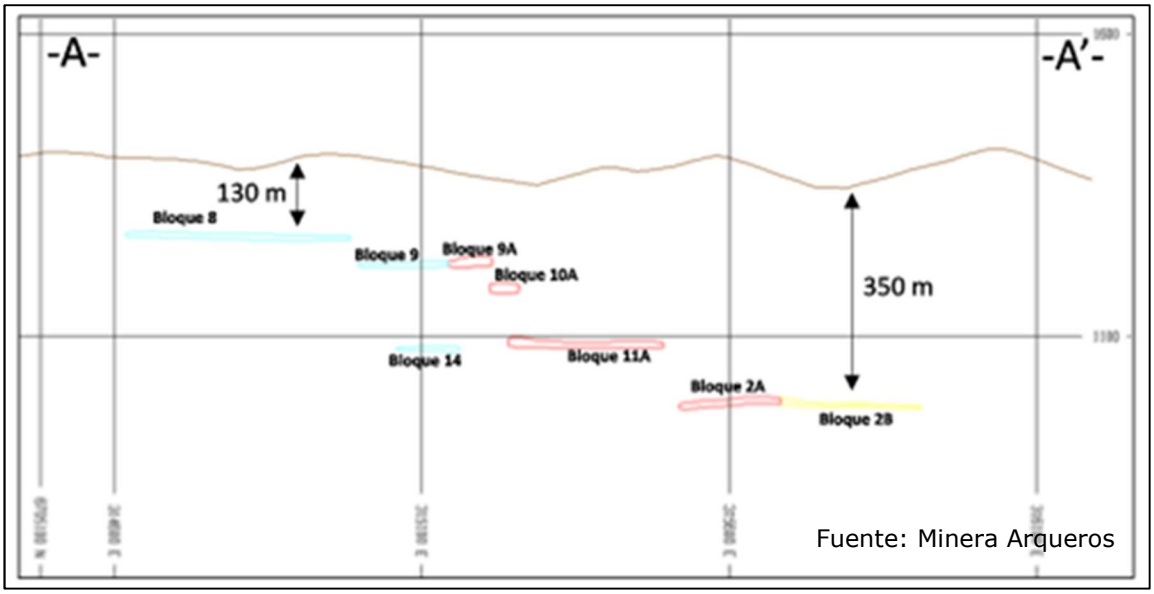


Ilustración 10. Perfil General de Cuerpos Mineralizados

3.4.1.2. Recursos y Reservas

El proyecto cuenta con un total de recursos equivalente a 33,7 MMTon con ley de 1,15% de cobre. Los recursos se encuentran categorizados en: medidos, indicados e inferidos; y en la tabla 3 se muestra el detalle de recursos por categoría y las consideraciones geológicas para determinar su categorización.

Por otra parte, el proyecto dispone de un total de recursos extraíbles equivalente a 29.7Mton con ley de 1.10% Cu. Estos recursos son considerados mineables e incluyen el factor de recuperación del mineral, considerando el método de extracción seleccionado y la dilución debido a la presencia de diques que ha sido incluida en el modelo de bloques.

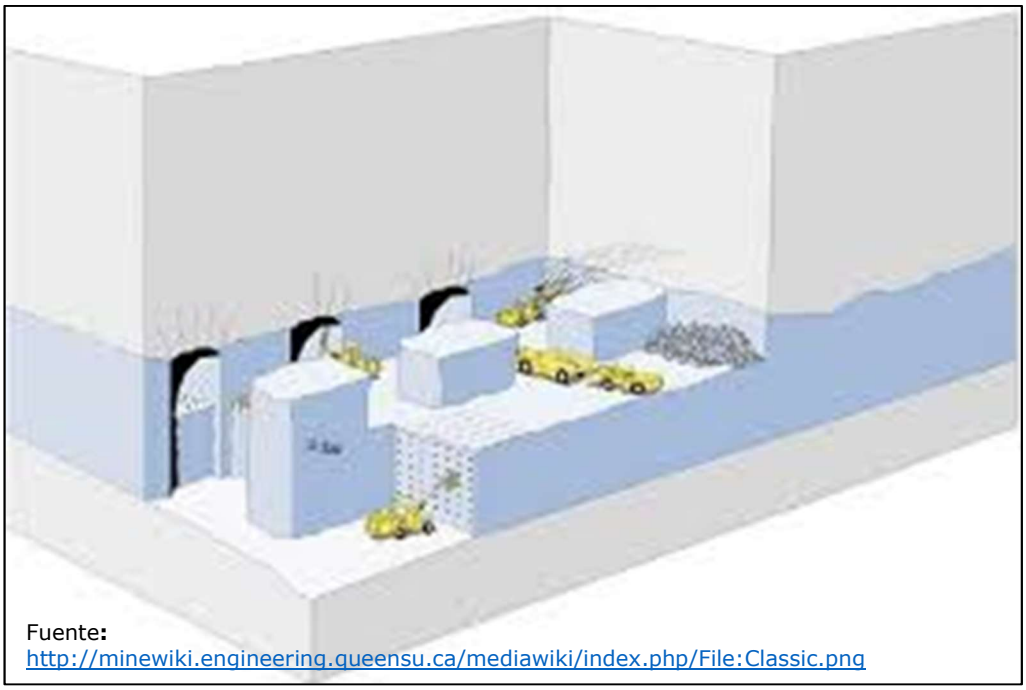
Category	Num. of ref. holes	Min data distance	Average data distance	Resources (kt)	Cu (%)	Ag (g/t)
Measured	≧3	0～75m	0～100m	15,461	1.18	14.30
Indicated	≧2	75～100m	100～150m	10,372	1.14	15.50
Inferred	≧1	100～200m	150～220m	7,950	1.10	16.20
Total Resources (M+I+I)				**33,783**	**1.15**	**15.10**

Fuente: Minera Arqueros

Tabla 3. Recursos Minerales

3.4.1.3. Método de Explotación

La explotación se desarrollará aplicando el método de cámaras y pilares (Room & Pillar) en un 95% aproximadamente y caserones abiertos (open Stopping). Estos métodos ofrecen una buena adaptación a las condiciones geométricas y geotécnicas presentes en el yacimiento, ayudando a controlar de mejor manera la mineralización del cuerpo mantiforme y disminuyendo la dilución operacional. Presenta desventajas de productividad debido a la baja razón de toneladas producidas por cada metro desarrollado y a la mayor tasa de fortificación en el caso del método de cámaras y pilares, respecto de otros métodos de minería subterránea.



Fuente:
http://minewiki.engineering.queensu.ca/mediawiki/index.php/File:Classic.png

Ilustración 11. Lamina Esquemática Método de Explotación

Para realizar la revisión de los métodos de explotación se tuvo en consideración, que la selección de un método de explotación estaba condicionada por la geometría y características geológicas del depósito; y por las condiciones geotécnicas del macizo rocoso en que está emplazado. Estos dos aspectos determinaron que la implementación del método de explotación pueda considerarse segura.

Particularmente la metodología de explotación para el caso del método de Caserones y Pilares considera dos formas constructivas, dependiendo de la potencia del manto mineralizado.

- Pasada única = 4.0 m <Altura Manto <6.0 m.

- Pasada doble = 6.0m <Altura Manto <12.0 m.

Y para el caso del método por caserones abiertos,

- Caserón abierto => Altura Manto > 12.0 m

Las opciones mencionadas anteriormente definen dos clases de Room & Pillar, con pasada única o con doble pasada. La segunda pasada puede realizarse por avance frontal o vertical, dependiendo de la altura final a extraer y el equipo disponible.

En el caso de la Pasada Doble, la galería inicial se asignará en el techo de la cámara y tendrá una altura de 4.0m con el ancho de acuerdo con el diseño de la sala para cada sector, siendo esta altura el mínimo para el funcionamiento eficiente del equipo de minería. Para las áreas de pase único, la sala se dimensionará de acuerdo con la altura económica del yacimiento.

En el caso de las áreas de caserones abiertos (open stopping), la explotación será en un solo nivel, con el desarrollo de la perforación y la tronadura desde el mismo nivel de base.

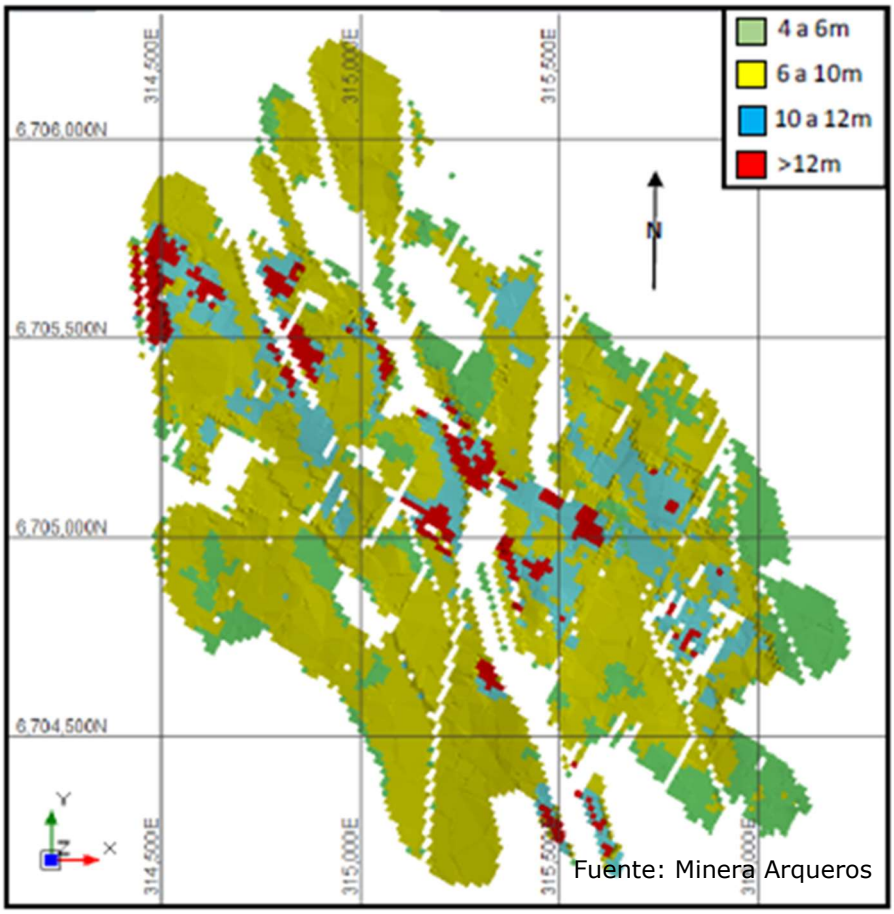


Ilustración 9. Espesores del cuerpo mineralizado

3.4.1.4. Diseño Minero (configuración de la explotación)

El diseño minero del Proyecto Arqueros, está influenciado por la ubicación de los cuerpos mineralizados, los lineamientos geotécnicos y el área proyectada para la zona de planta. Está emplazado en un sector donde la topografía de superficie no presenta grandes variaciones.

Se proyectan distintos niveles y la extracción de material será en camiones desde el punto de extracción hasta el chancador primario que estará ubicado a 900 de la entrada principal de la mina y la distancia máxima de transporte será de 10km.

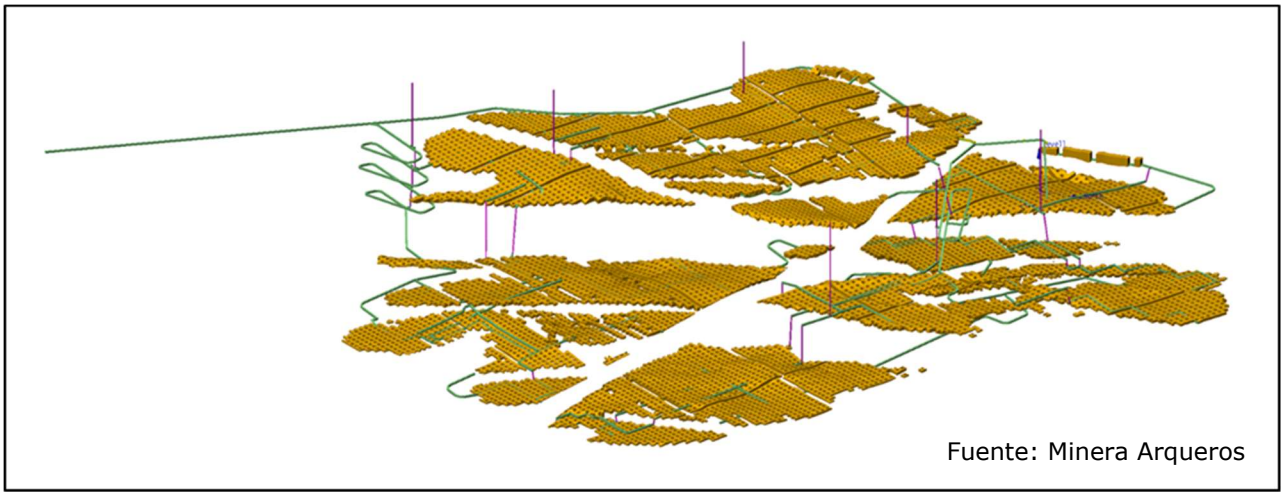
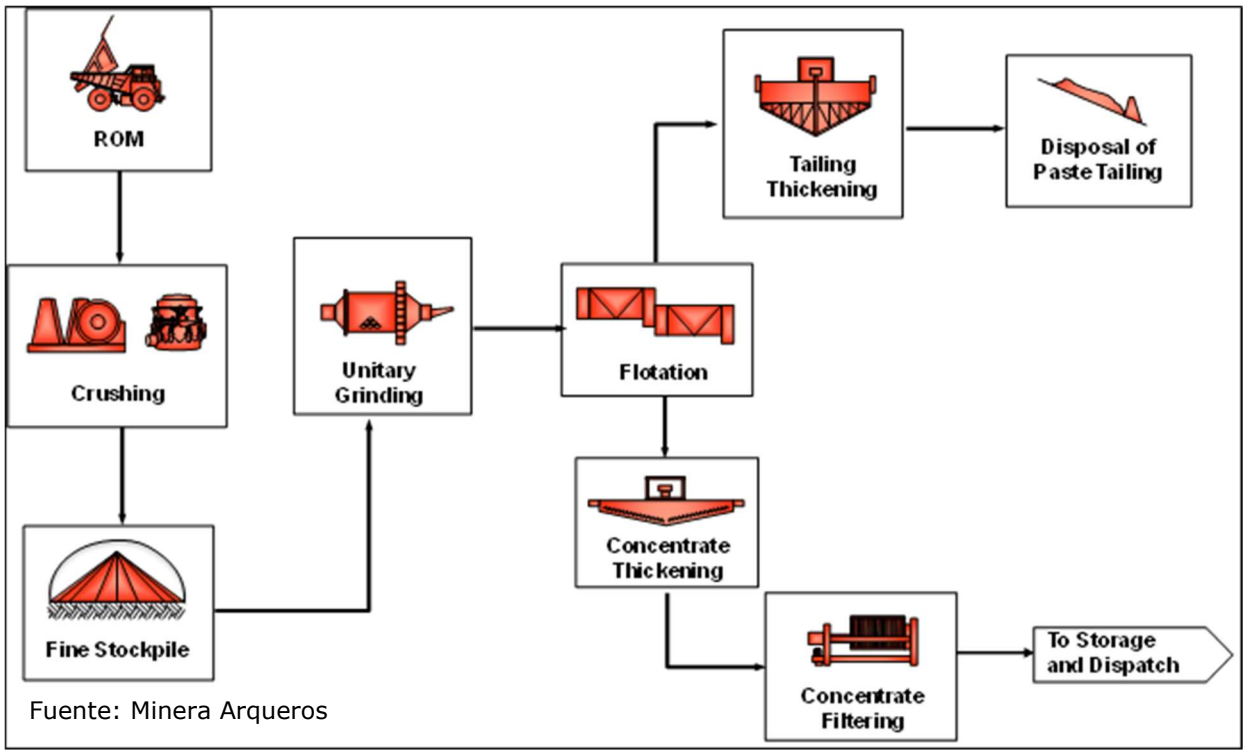


Ilustración 10. Plano Esquemático Mina

3.4.2. Planta Concentradora

El diseño de la planta consiste básicamente en un chancador primario alimentado por los camiones que transportan el mineral desde la mina, cuenta además con sistemas de harneros, molino de bolas, celdas de flotación, espesador de concentrado y filtro.

El concentrado de cobre se consolidará en el espesador y el filtro que deshidrata, para obtener el producto final con una ley promedio de 27% de Cu y 350 gr/ton de Ag, con un contenido de agua del 10%. Los relaves serán consolidados en pasta con un 72% de sólidos en el espesador antes de ser transferidos al depósito de relaves. La secuencia de procesamiento se describe en la ilustración N°13.



Fuente: Minera Arqueros

Ilustración 11. Flujo de Procesamiento de Mineral

3.4.2.1. Proceso de trituración

Este proceso aborda la secuencia del equipo de trituración en seco desde la tolva de carga de mineral crudo proveniente de la mina, hasta obtener un producto de granulometría adecuada que será depositado en el stock pile de material para la etapa de molienda.

El proceso del área seca se resume de la siguiente manera:

① El mineral cargado en la tolva se separa usando un alimentador con parrilla (tamaño de abertura 115 mm) y el mineral de gran tamaño se tritura en el chancador primario (configuración de 80 mm). El mineral sobredimensionado de la parrilla fija (tamaño de abertura 750 mm) en la parte superior de la tolva se reduce al tamaño apropiado con el martillo pica roca.

② Todo el mineral chancado se tritura nuevamente en el chancador de cono secundario (conjunto de 21 mm) junto con el mineral de menor tamaño del alimentador vibratorio y luego se alimenta a un harnero vibratorio de doble piso, donde se clasifica en tres categorías:

(a)>12 mm, (b) 12-7 mm, y (c) <7 mm

③ El sobre tamaño de (a) y (b) de la parrilla vibratoria se carga en la trituradora de cono terciario (tamaño de abertura 13 mm) previo paso por el harnero vibratorio junto con el producto de la trituradora secundaria.

④ El material de menor tamaño (c) se almacena directamente en el stock pile que tiene una capacidad efectiva de 2.500t disponible como material para el molino de bolas (P80 5 mm).

3.4.2.2. Proceso de Molienda

El proceso de molienda se realizará utilizando un molino de bolas. El material P80 de 50 mm descargado por el alimentador vibratorio debajo del stock pile de reserva alimenta al molino de bolas húmedo (5,000 hp) mediante una cinta transportadora en un circuito cerrado. El producto del molino de bolas está clasificado por ciclón, y el flujo inferior alimenta una vez más al molino de bolas y se procesa repetidamente hasta que alcanza P80 a 70 µm.

3.4.2.3. Proceso de Flotación

El proceso consiste en una serie de equipos que se utilizan para procesar la pulpa mineralizada después de la molienda, para separarla y concentrarla en concentrado y relaves.

① La lechada de P80 70 µm se mezcla con el reactivo y se somete a un proceso de flotación en la celda "Rougher", luego se procesa el concentrado Rougher en la celda 1 de limpiador columnar ("Cleaner 1") y finalmente se procesan los relaves Rougher en la célda del limpiador ("Scv-Rougher").

② El concentrado C1 (36% Cu) obtenido del Limpiador 1, se alimenta al concentrado espesante como concentrado final. Los relaves se reingresan al circuito de rectificación.

③ Los relaves del limpiador “Scv-Rougher”, se alimentan al espesador de relaves como relaves finales T1. El concentrado reingresa al circuito de rectificación.

④ La lechada del circuito de rectificado es clasificada por un ciclón después de la molienda, y el desbordamiento (P80 20 µm) se alimenta a la celda del limpiador 2-1 ("Limpiador 2-1"). El flujo inferior se procesa repetidamente en el molino de torre.

⑤ El concentrado de Cleaner 2-1 se procesa en la celda del limpiador de columnas 2-2 ("Cleaner 2-2"). Los relaves se procesan en la celda del limpiador ("Scv-Cleaner") en el circuito de limpieza.

⑥ El concentrado de Scv-Cleaner se alimenta al circuito de rectificación, mientras que los relaves T2 se alimentan al espesador de relaves como relaves finales, junto con los relaves T1.

⑦ El concentrado C2 obtenido de Cleaner 2-2 se procesa en el concentrado espesante como concentrado final, junto con el concentrado C1 Las leyes de cobre del concentrado final (C1 + C2) y de los relaves finales (T1 + T2) aquí serán 27% Cu y 0.15% Cu, respectivamente.

3.4.2.4. Proceso de filtración y Almacenamiento.

El concentrado se sedimenta y filtra. La suspensión concentrada final se concentra a una concentración sólida del 60% en el espesador, luego se procesa en una unidad de filtración para producir una pila de concentrado con un contenido de agua del 10%. La torta de concentrado se almacena en una pila de capacidad 1,150 t. El agua recuperada del espesador del concentrado y la unidad de filtración se devuelve al estanque de agua de proceso para su reutilización.

3.4.2.5. Procesamiento de relaves.

Esto consiste en la secuencia para consolidar los relaves en pasta y enviar esto al punto de descarga en el sitio de depósito.

Los relaves producidos en el proceso de flotación fluyen gravitacionalmente hacia el espesador de pasta, a través de una tubería de HDPE que mide 5.5 km de longitud total. Allí, se agrega floculante para consolidarlo a un sólido de 72% (pasta). La pasta es extraída por una bomba de vórtice y enviada a presión por una bomba de diafragma de pistón y descargada en el sitio de depósito. El agua sobrenadante del espesante se devuelve al estanque de agua de proceso para su reutilización.

3.4.3. Depósito de relaves

El depósito de relave está ubicado a 5,5 kilómetros de la planta concentradora y se considera la construcción de un terraplén de 35 m de altura, aproximadamente a 1.3 km del espesador. Todos los relaves en pasta (concentración de sólidos 72%) se depositarán aguas arriba de este punto. Se construirán zanjas en la ladera alrededor del sitio de depósito para drenar el agua debajo del terraplén, evitando la salida de agua al exterior.

3.4.4. Línea de Conducción de Agua

Se considera la captación de agua desde el río Elqui en el área de Marquesa, el agua será impulsada por bombas a través de tuberías hasta el estanque de agua dulce junto a la planta concentradora.

La tubería de agua tiene una longitud total de aproximadamente 27 km. Las estaciones de bombeo (estaciones de bombeo 1 y 2) se construirán en Marquesa (el punto de captación de agua) y la segunda en el km 20 de la línea de agua.

El flujo de agua diseñado corresponde a 35 litros por segundo, calculado en función del volumen requerido para las operaciones en la planta y dentro de la mina.

3.4.5. Línea de Transmisión Eléctrica

El proyecto considera la construcción de una línea de transmisión de 110 kV que corre de este a oeste al sur de Marquesa desde esta línea se suministrará energía a la mina, planta concentradora y la estación de bombeo 2, en la planta concentradora se instalará una subestación principal 110/23 kV que entregará la energía en faena. La energía para la estación de bombeo 1 se suministrará utilizando una línea de transmisión de 23 kV construida desde la subestación Marquesa de 66/23 kV. La ruta de la línea de transmisión de potencia se determinó utilizando un mapa topográfico detallado (1: 1,000) creado a partir de análisis y levantamientos aéreos, teniendo en cuenta factores como las condiciones de superficie (topografía, pendientes, llanuras de inundación) y las instalaciones existentes (líneas de transmisión de energía existentes, caminos y casas).

3.4.6. Infraestructura Complementaria

Las siguientes instalaciones auxiliares sobre el suelo se ubicarán en la zona del proyecto a un costado de la instalación de la planta

- Oficinas Administrativas (capacidad para 85 personas, 839 m2)
- Comedores (capacidad para 111 personas por un lado + 50%, incluida la cocina, 374 m2)
- Vestuario (capacidad para 147 personas, 271 m2)
- Sala de capacitación (capacidad para 20 personas, 50 m2)
- Policlínico de faena
- Laboratorio (espectrómetro de absorción atómica, analizador de tamaño de partícula láser)

Se proyecta, además, la construcción modular combinando componentes estandarizados.

3.4.7. Caminos de acceso

El proyecto considera la construcción de aproximadamente 10 km de camino de tierra de ancho 7,5m, entre la zona de Marquesa y la planta, de manera de proporcionar acceso al transporte de materiales y equipos durante la fase de desarrollo y para el transporte de concentrado y el traslado de los empleados durante la etapa de operación del proyecto. Las otras rutas a utilizar corresponden a caminos públicos existentes.

3.5. Etapa de Construcción y Operación

3.5.1. Plan de Construcción y Desarrollo

Para la construcción del proyecto se ha estimado un plazo de dos años desde la obtención del permiso ambiental para poder operar.

Durante la etapa de construcción se espera construir en la mina las excavaciones necesarias para la construcción de accesos y la preparación de la mina de manera de asegurar la producción de a lo menos, dos años con un ritmo de 5000tpd. También se considera la construcción de la Planta, línea eléctrica, acueducto e instalaciones complementarias, se considera un periodo de pruebas y de puesta en marcha de 6 meses.

3.5.2. Plan de Producción

Para la confección del plan minero se priorizó la extracción del mineral con ley de cobre superior durante los 10 primeros años de explotación.

El programa de producción considera la producción de mineral durante 17 años, con una tasa de alimentación fija correspondiente a 1.800kton de mineral por año, en la tabla 4 se presenta los números correspondientes a la producción de mineral por año con sus respectivas leyes de cobre y plata proyectadas.

Periodo	un	año-2	año-1	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8
Alimentación Planta											
Mineral	t		300.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000
Ley Cu	%		1,24	1,27	1,16	1,14	1,19	1,19	1,10	1,10	1,16
Ley Ag	g/t		10,3	10,5	11,4	8,6	13,8	12,8	12,6	14,2	16,6
Periodo	**un**	**año 9**	**año 10**	**año 11**	**año 12**	**año 13**	**año 14**	**año 15**	**año 16**	**año 17**	**Total**
Alimentación Planta											
Mineral	t	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	135.732	**29.235.732**
Ley Cu	%	1,20	1,08	0,98	0,96	0,95	1,01	1,01	1,10	1,10	**1,10**
Ley Ag	g/t	17,8	16,7	15,2	12,5	10,9	11,4	11,0	14,0	13,6	**13,10**

Fuente: Minera Arqueros – Elaboración Propia

Tabla 4. Plan de Producción

4. ANÁLISIS DE RIESGOS PROYECTO ARQUEROS

4.1. Identificación de Riesgos

La identificación de riesgos permite priorizar los riesgos para realizar otros análisis o acciones posteriores, la evaluación se realiza combinando la probabilidad de ocurrencia y el impacto de dichos riesgos. Para este análisis se ha considerado información proveniente de los estudios realizados y de la opinión de los especialistas del equipo de proyecto.

4.1.1. Riesgo Geológico

El proyecto Arqueros ha desarrollado en sus distintas fases la realización de sondajes geológicos y al igual que en todo proyecto minero, la incertidumbre geológica sigue presente, y viene dada por la condición natural de los recursos existentes en el depósito mineral. Por lo tanto, los factores de riesgo identificados para el proyecto en esta etapa son:

- Cantidad de recursos y reservas
- Ley de Cobre
- Ley de Plata
- Dilución (disminución de ley)

4.1.2. Riesgo Económico

La evaluación del proyecto se construye a partir del flujo de dividendos futuros proyectados de la compañía, la gran variabilidad en el comportamiento del mercado y la incertidumbre en los factores económicos asociados a la evaluación del proyecto, hacen que exista un riesgo económico importante que está dado por los siguientes aspectos.

- Precio del cobre
- Precio de la plata
- Costo de energía

4.1.3. Riesgo de Permisos

Todo nuevo proyecto que se desarrolla debe cumplir una serie de requisitos legales y reglamentarios para lograr su puesta en marcha es necesario además

contar con la aprobación del medio en el que pretende desarrollarse, el constante cambio de las condiciones y el ambiente en el que se desarrollan genera una serie de desafíos y aumenta las probabilidades de retrasos y aumentos de costos, generando una fuente importante de incertidumbre que afecta la valorización del proyecto. Los factores de riesgo de permisos considerados para el proyecto son los siguientes.

- Permiso Ambiental (EIA o DIA)
- Permisos Sectoriales (Plan de Cierre, otros)

4.1.4. Riesgos Metalúrgicos

En el caso del Proyecto Arqueros por las características propias del yacimiento se ve enfrentado a un desconocimiento respecto del comportamiento metalúrgico del mineral que será extraído, la imposibilidad de extraer muestras suficientes de mineral que permitan realizar pruebas de flotación determina el hecho de que la recuperación metalúrgica presente un importante nivel de incertidumbre y los factores de riesgo están dado por los siguientes aspectos.

- Recuperación de Cobre
- Recuperación de Plata
- Ley de concentrado

4.1.5. Riesgos de Logística y comercialización

Este punto está relacionado con el suministro de elementos básicos para desarrollar la operación y considera también la evaluación de las alternativas que posee el proyecto para la venta del concentrado.

Los factores de riesgo de logística para el proyecto son;

- Abastecimiento de agua
- Abastecimiento de energía
- Lugar de venta de Concentrado
- Penalizaciones por impurezas

4.1.6. Riesgos Operacionales

Los desempeños y los valores inciertos de las variables del proyecto en la etapa de operación contribuyen a una incertidumbre general sobre el costo total y la duración de los proyectos, por lo tanto, es muy importante la inclusión del análisis de estos parámetros inciertos y la caracterización del riesgo. Los factores de riesgo más importantes identificados son;

- Ritmo de Producción (Capacidad productiva)
- Costo operación mina
- Costo operación planta

4.1.7. Riesgos de Inversión

Las posibilidades para el desarrollo exitoso de un proyecto minero están directamente relacionadas con la política y capacidad de inversión de cada empresa al momento de tomar la decisión. La estimación del capital de inversión también presenta algunas incertidumbres relacionadas principalmente con la calidad de los estudios, esto podría significar diferencias importantes en la estimación del capital inicial. Considerando lo antes mencionado se determinó que el factor de riesgo de inversión más importante identificado para el Proyecto es el siguiente;

- Aumento de Capex

4.2. Análisis Cualitativo de los Riesgos del Proyecto Arqueros

Para realizar el análisis cualitativo de riesgos se considera la valorización del riesgo a través de un análisis conjunto del Impacto y la Probabilidad de ocurrencia de cada uno de los factores de riesgo determinados anteriormente.

En base a lo anterior, se desarrolla la priorización de los eventos de riesgo, considerando lo siguiente:

Impacto: Está definido por las siguientes categorías:

- **Alto: (9)** De producirse el riesgo, ocasionaría un daño sensible al objetivo.
- **Medio: (6)** Aunque el análisis revela que el riesgo es importante, este no afectará la totalidad del objetivo, ni pondrá en peligro los resultados asociados al mismo.

- **Bajo: (3)** Aunque se considera que existe un riesgo, este no afectará el resultado final del objetivo ni al proyecto de manera importante como para tomar medidas.

Probabilidad: Está definido por las siguientes categorías:

- **Alta: (9)** Los antecedentes o resultados indican que el riesgo ocurrirá con mucha frecuencia.

- **Media: (6)** Existen bases para creer que su frecuencia no sea tan preocupante.

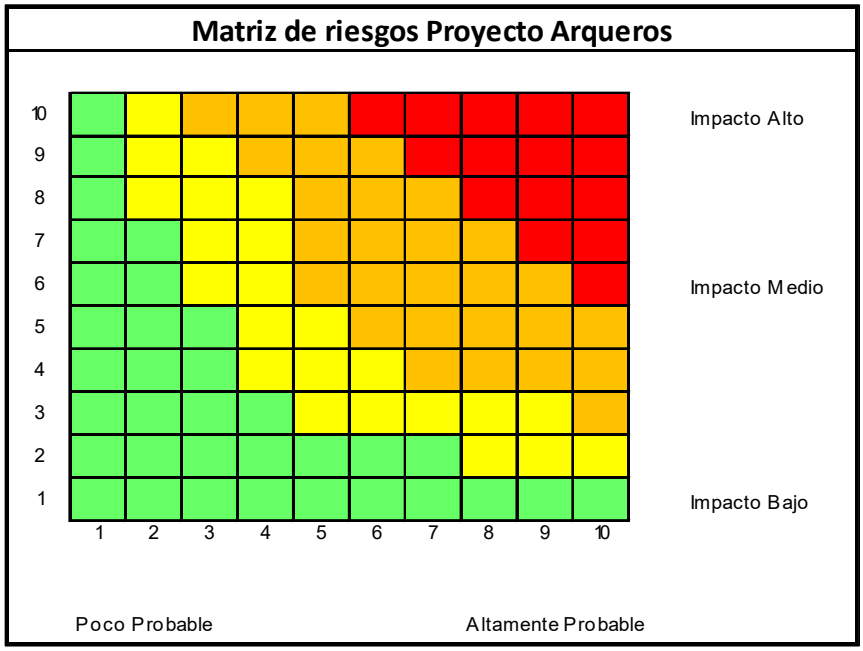
- **Baja: (3)** No hay elementos de juicio para considerar que el riesgo ocurrirá o no son suficientes para prever probabilidad media o alta.

4.2.1. Matriz de Riesgo

Dependiendo de la combinación entre impacto y probabilidad, en la siguiente gráfica se puede observar un ejemplo del esquema de valorización de riesgo en función de la probabilidad e impacto de tipo numérico con escala.

- Zona verde: Riesgo Muy Bajo
- Zona amarilla: Riesgo Bajo
- Zona naranja: Riesgo Medio
- Zona roja: Riesgo Alto.

Esta escala permite priorizar recursos y enfocarse en un análisis más detallado de tipo cuantitativo en los riesgos de la escala roja y anaranjada, que son los de mayor impacto al proyecto.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. Matriz de Riesgo Proyecto Arqueros

En la tabla 5 se muestra la identificación de riesgos del proyecto asociados a una escala cuantitativa en función de la matriz definida anteriormente.

N°	Categoria	Riesgo	Probabilidad	Impacto	Puntaje
1	**Geologicos**	Menor cantidad de recursos	6	9	54
2		Menor Ley de Cobre	6	9	54
3		Menor Ley de Plata	6	3	18
4	**Economicos**	Menor Precio del cobre	9	9	81
5		Menor Precio de la plata	6	3	18
6		Mayor Costo de energía	6	3	18
7	**Permisos**	Plazo Permiso Ambiental	9	3	27
8		Permisos sectoriales	6	3	18
9	**Metalurgicos**	Menor Recuperación de Cobre	6	9	54
10		Menor Recuperación de Plata	6	3	18
11		Menor Ley de concentrado	3	6	18
12	**Logistica y comercalización**	Lugar de venta de Concentrado	6	3	18
13		Penalización por impureza	3	6	18
14	**Operacionales**	Menor Ritmo de Producción	6	9	54
15		Mayor Costo operación mina	6	6	36
16		Mayor Costo operación planta	6	6	36
17	Inversion	Aumento de Capex	6	9	54

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6. Evaluación de riesgos del proyecto arqueros

De los factores de riesgo identificados, aquellos definidos con riesgo alto y medio, serán considerados en el análisis cuantitativo.

N°	Riesgo	Puntaje
1	Menor Precio del cobre	81
2	Menor cantidad de recursos	54
3	Menor Ley de Cobre	54
4	Menor Recuperación de Cobre	54
5	Menor Ritmo de Producción	54
6	Aumento de Capex	54
7	Mayor Costo operación mina	36
8	Mayor Costo operación planta	36
9	Plazo Permiso Ambiental	27

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7. Priorización de Riesgos Proyecto Arqueros

4.3. Análisis Cuantitativo

El análisis considera una metodología para estimar cada uno de los riesgos definidos como alto y medio en el capítulo 3.1, en función del juicio experto, Primeramente, se estimarán los rangos de variación de las variables más importantes y posteriormente se definirá la distribución de probabilidad para cada variable a considerar.

Es importante destacar que a pesar de que el suministro de agua y energía para el proyecto han sido definidos cualitativamente como de alto impacto, por ser de importancia estratégica para el desarrollo del proyecto, para el caso de este estudio serán considerados en el cálculo cuantitativo, solamente desde el punto de vista del impacto económico en el Opex y Capex.

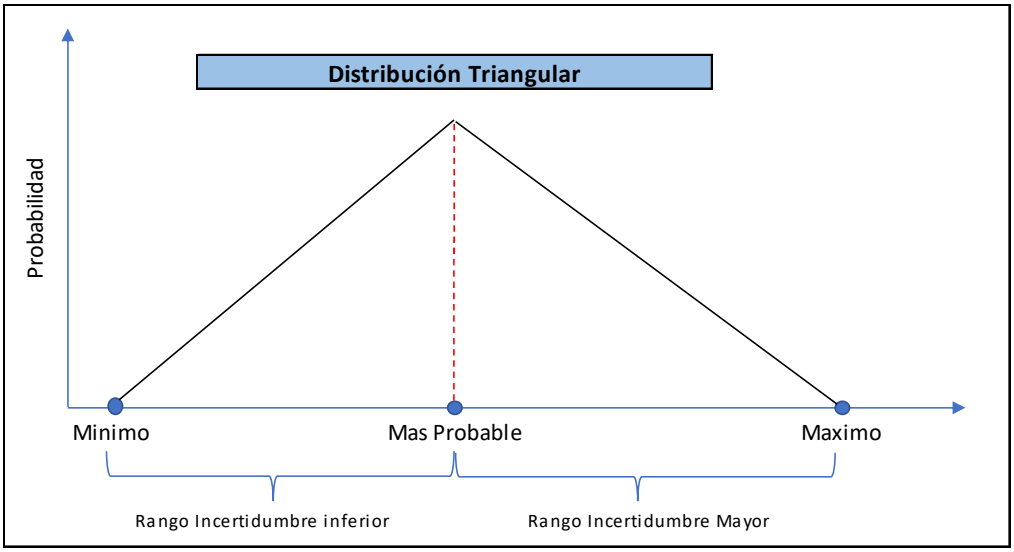
Riesgo	Variable	Variación	
		Maximo	Minimo
Recursos geologicos Ley de Cobre Ritmo de Producción	Ley de Cobre	-10%	5%
Recuperación	Recuperación de cobre	-10%	5%
Capex	Capex construccion	7,50%	-10%
	Capex Permisos e Ing.	-5%	5%
Operación	Opex Mina	-10%	10%
	Opex Planta	-10%	10%
	Mano de Obra	-15%	7,50%
Precio	Precio del cobre	-15%	15%

Fuente: Minera Arqueros - Elaboración Propia

Tabla 8. Rango de Variación para Variables de Riesgo

Para este caso de estudio, se han definido principalmente distribuciones triangulares, ya que de esta manera nos permite graficar el valor mínimo, el más probable y el valor máximo que poseen los riesgos que serán analizados en el modelo.

Las gráficas típicas de entrada son representadas en la ilustración 12.



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración 12. distribución Triangular Típica

4.3.1. Riesgo Geológico

En base al nivel de información y categoría del recurso actualizado en la última campaña de sondaje, se tiene que la evaluación ha considerado una proporción de recursos indicados e inferidos para la estimación, esto genera un grado de incertidumbre que puede impactar directamente en la cantidad de cobre fino a producir.

La cantidad de recursos extraíbles y su representatividad respecto al total se muestran en la tabla 9.

Categoria	Mineral Kton	Fino Cu Kton	%
Medidos	13.787	142	47%
Indicados	8.946	89	30%
Inferidos	6.639	66	23%
Total	**29.372**	297	100%

Fuente: Minera Arqueros-Elaboración Propia

Tabla 9. Recursos Extraíbles

Según lo indicado en la tabla 9, se tiene que el 23% de los recursos poseen una categoría de inferido y un 30% la categoría de indicado, esto sin duda es una fuente de incertidumbre lo que podría afectar directamente en la variación de leyes de cobre y plata del modelo existente.

Riesgo de Menor Ley de cobre

La estimación de leyes se realizó desde un modelo realizado con la información de recursos disponible de las campañas de sondaje realizadas hasta la fecha La incertidumbre correspondiente a la variación de la ley de cobre respecto al modelo de leyes realizado esta dado principalmente por el nivel de categorización de recursos evaluados, pero además está influenciada por otros factores como la presencia de diques de estéril en la zona mineralizada que podría aumentar la dilución y manejo operacional que se tenga del piso y techo del manto mineralizado durante la etapa de operación.

En base a lo descrito anteriormente para el caso de este estudio se definió la modelación de la incertidumbre mediante una distribución triangular con un error del -10% y +5%. La distribución triangular resultante se representa en la ilustración 13.

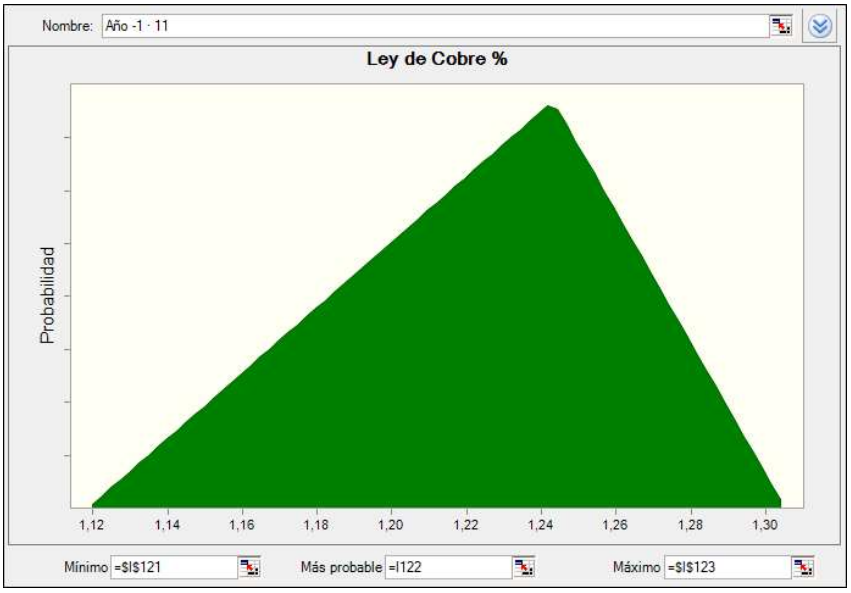


Ilustración 13. Distribución de Probabilidad para Ley de CU

4.3.2. Riesgo Económico

Menor Precio del Cobre

El cobre corresponde al principal producto del Proyecto Arqueros, y su venta se considera como concentrado de cobre a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI).

El precio del cobre presenta una variabilidad histórica lo que genera una alta inestabilidad en los flujos de ingresos de las empresas mineras, sin embargo, se espera que durante el próximo tiempo mantenga un buen nivel, sostenido principalmente por las siguientes razones:

- Buena Proyección del crecimiento económico Global
- Estable demanda del cobre en China
- Mayor demanda de cobre (Autos eléctricos, energías no renovables)
- Falta de nuevos proyectos mineros

Considerando lo descrito anteriormente y que el precio de largo plazo definido para la valoración estática de este corresponde a 2,81US$/lb, se definió la modelación de la incertidumbre mediante una distribución triangular con un error del -15% y +15%. Con valores mínimos y máximos 2,38US$/lb y 3,23 US$/lb respectivamente. La distribución triangular resultante se representa en la ilustración 14.

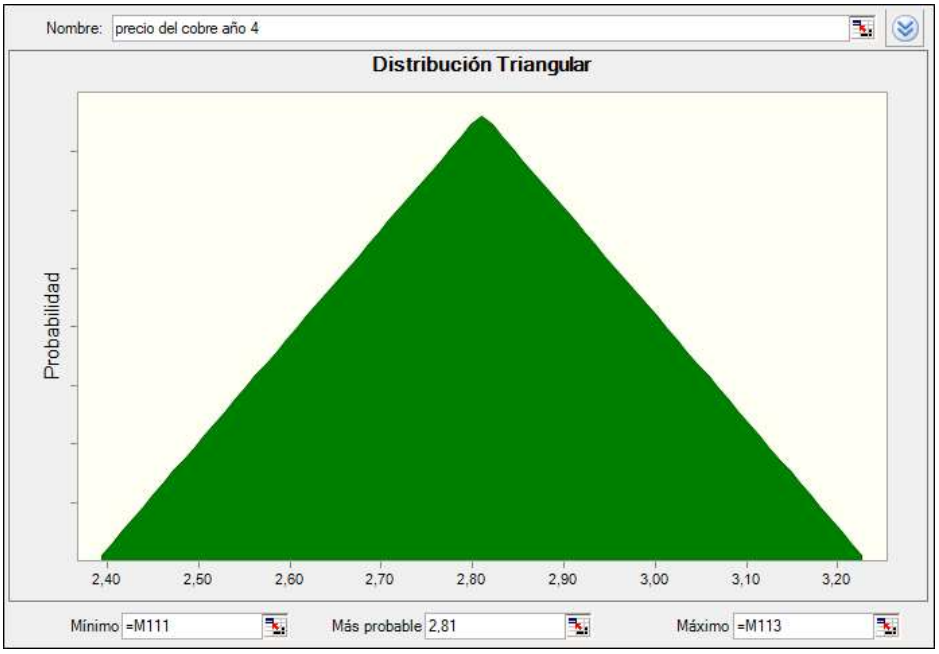


Ilustración 14. Distribución de Probabilidad para el precio del cobre

4.3.3. Tasa de Cambio [CLP/USD]:

La variación del precio del dólar impacta en la industria, especialmente la industria minera debido a su alta dependencia de factores externos y

generalmente la caída en el precio del cobre tiende a relacionarse con el alza en el valor del dólar.

Un dólar bajo, si bien afecta a la exportación, por otro lado, beneficia a las empresas a la hora de emitir deuda (menor costo de financiamiento en la moneda norteamericana) y causa un mejoramiento del consumo de productos importados, poniendo límites a las alzas de precios internos.

Divisa	Min	Optimo	Maximo
Dólar (CL$)	550	650	700

Fuente: Minera Arqueros

Tabla 10. Valores Proyectados del Precio del Dólar

Por lo general es necesario convertir a dólares americanos todos los costos que originalmente se dan en moneda nacional, por ejemplo, el costo de mano de obra. Considerando lo antes mencionado para el caso de estudio se definió la modelación de la incertidumbre para el costo de mano de obra considerando la influencia del dólar mediante una distribución triangular con un error del (-15%) y (+7,5%) y fue correlacionado con el valor del precio del dólar con un coeficiente de correlación (R2) +0.83, obtenido desde el trabajo de titulo realizado por C. Saud S. "Relación Precio del Cobre y Costos de Extracción"

La distribución de probabilidad resultante (triangular) se representa en la ilustración 15.

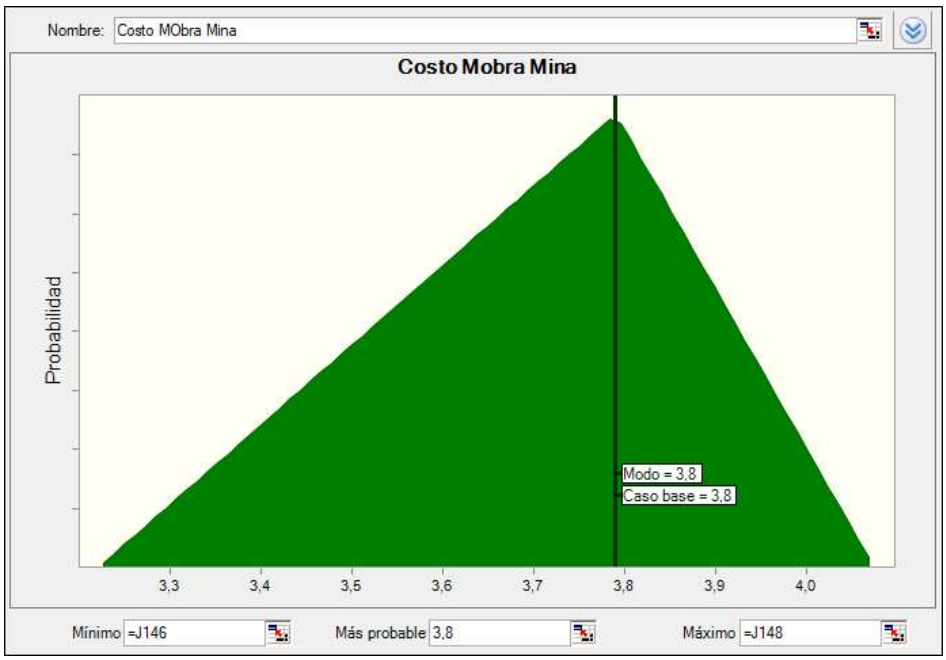


Ilustración 15. Distribución de Probabilidad Costo de mano de obra mina

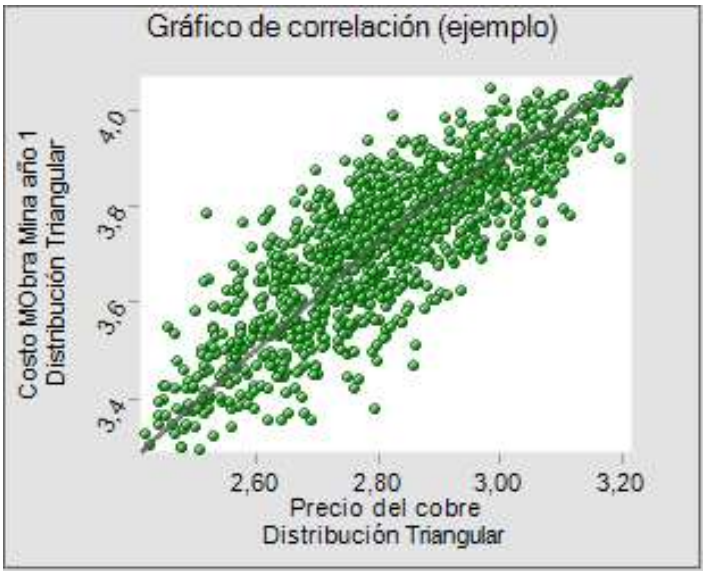


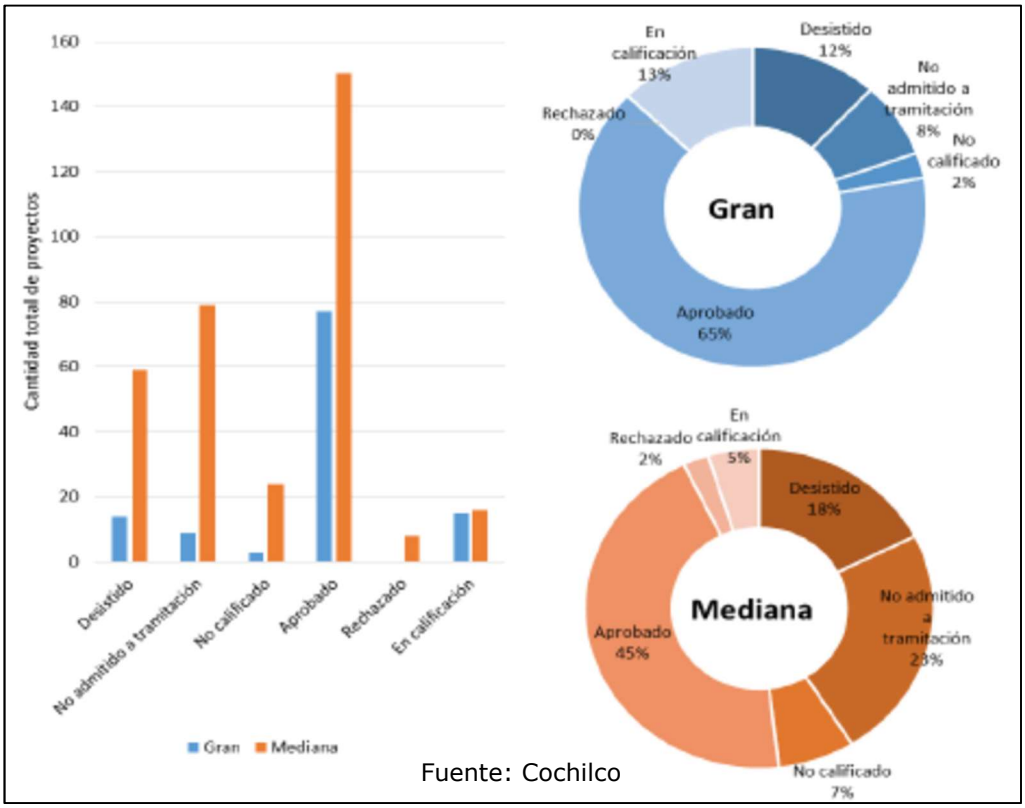
Ilustración 16. Correlación Precio del cobre y costo mano de obra

4.3.4. Riesgo de Permisos

Durante el último tiempo han aumentado significativamente las dificultades para obtener la aprobación ambiental de los proyectos mineros, respecto al tipo de proyectos de acuerdo a un estudio realizado por Cochilco, la cantidad de proyectos de mediana minería ingresados al sistema de evaluación ambiental es mayor que la de gran minería (casi tres veces mayor) al igual que la cantidad de proyectos aprobados.

Sin embargo, porcentualmente la aprobación corresponde a un 65% para la gran minería versus un 45% en mediana. La diferencia se hace aún mayor al comparar los proyectos no admitidos a tramitación, mientras estos alcanzan un 8% de los proyectos de gran minería, un 23% de los proyectos de mediana minería no son admitidos a tramitación.

Para el caso del Proyecto Arqueros, respecto al riesgo de permisos, el peor caso sería la no aprobación del proyecto, lo que implicaría que el proyecto debería ser replanteado o evaluado nuevamente. Considerando lo anterior para este caso de análisis, el riesgo de permiso será cuantificado considerando un incremento del +20% en el costo de tramitación de permisos y desarrollo de estudios de ingeniería. Por lo tanto, la evaluación de este riesgo está asociado a un aumento de capex y será considerada en la simulación del riesgo de inversión.



Fuente: Cochilco

Ilustración 17. Análisis de Evaluación Ambiental de Proyectos Mineros

4.3.5. Riesgos Metalúrgicos

Durante las distintas etapas del proyecto realizadas hasta el momento, los resultados de la recuperación metalúrgica para el cobre y la plata contenida en el mineral han ido aumentando su nivel de confianza, inicialmente se realizaron pruebas del tipo "batch" a escala laboratorio y posteriormente análisis de recuperación en una mini panta piloto. Sin embargo, se estima que la

representatividad de las muestras utilizadas en las pruebas realizadas podría ser inferior al óptimo, por lo tanto, en función de los resultados obtenidos en la etapa de factibilidad del proyecto y el juicio experto de los especialistas se definió modelar la incertidumbre en la recuperación metalúrgica de cobre mediante una distribución triangular con un error del -10 [%] y +5[%].

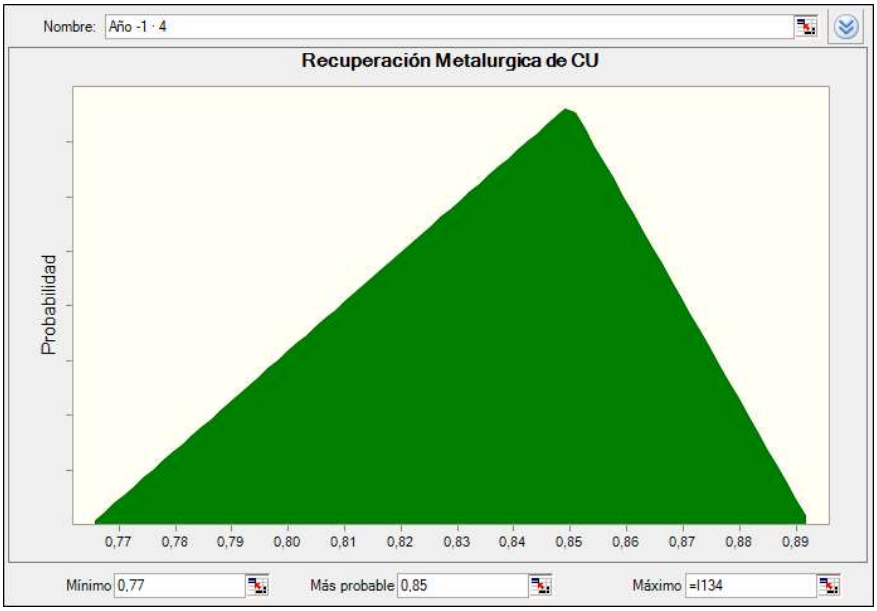


Ilustración 18. Distribución de probabilidad para Recuperación de Cu

4.3.6. Riesgos Operacionales

El proceso de puesta en marcha y operación de un proyecto "greenfield" implica varios desafíos, por ejemplo, el conocimiento del cuerpo mineralizado, la distribución de la mineralización, alcanzar las cifras proyectadas en términos de productividad y resultados del procesamiento de minerales, esto conlleva un importante grado de incertidumbre. Para el caso de este estudio los riesgos operacionales estarán cuantificados dentro del costo de operación mina y planta, por ser los más relevantes del proceso.

4.3.6.1. Costo de Operación Mina

La definición del proceso de operación mina desarrollado durante la etapa de factibilidad, incorporó diferentes tipos de información considerando aspectos de la geología del yacimiento, estudios geomecánicos que definieron el método de explotación que será desarrollado, los niveles de recuperación de mineral, manejo de dilución, equipamiento a utilizar en función de las labores proyectadas y en general todo aquello relacionado con la explotación del yacimiento y el transporte del mineral hasta la planta concentradora.

El método de explotación principal definido es por cámaras y pilares (Room & Pillar), este método se caracteriza por tener una baja productividad respecto a otros métodos de minería subterránea, por lo tanto, para alcanzar el rendimiento proyectado de 5ktpd, será necesario desarrollar una gran cantidad de túnel en sección reducida lo que implica que el proyecto debe contar con un muy buen sistema de ventilación para realizar la cantidad de disparos planeada por cada día. Por otra parte, es muy importante el comportamiento del manto mineralizado, el que debe mantener preferentemente una altura homogénea y limites bien delineados que puedan favorecer la correcta explotación.

El posible desconocimiento de algunos de los aspectos antes mencionados genera un grado de incertidumbre para el proyecto, por lo tanto, en función de la información obtenida desde la factibilidad y el juicio experto de los profesionales a cargo del proyecto se ha definido que los costos operacionales de mina (no incluye costo por mano de obra) cuentan con una incertidumbre que puede ser cuantificada con un rango inferior de -5[%] y un rango superior de +15[%]. De acuerdo a lo anterior, a continuación, se muestran las distribuciones de probabilidad modeladas.

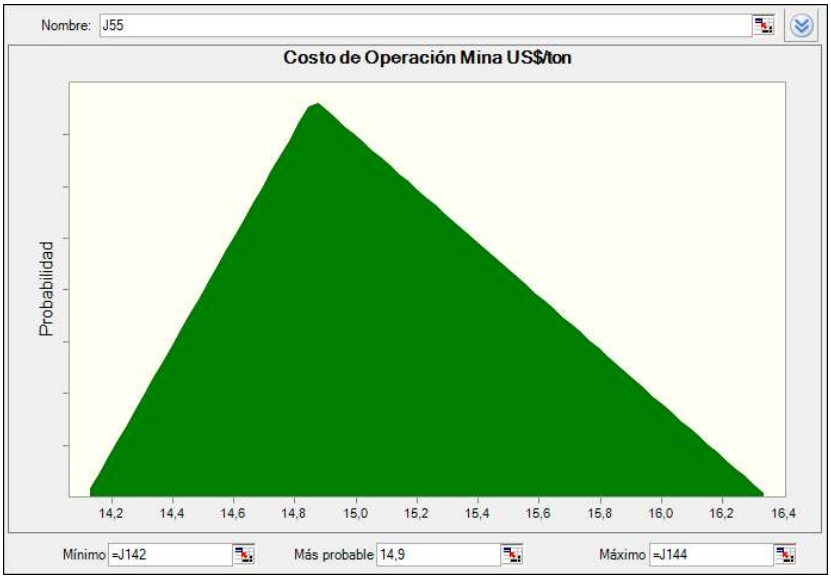


Ilustración 19. Distribución de probabilidad para el costo mina

4.3.6.2. Costo de Operación Planta

La definición del proceso de operación de la planta desarrollado durante la etapa de factibilidad, definió un costo de operación para la planta en función de los resultados de pruebas metalúrgicas y estudio del proceso y equipos. Sin embargo, la insuficiencia de las muestras disponibles, el desconocimiento del rendimiento durante la fase de operación, se presentan como factores de incertidumbre y se ha definido que los costos operacionales de planta (no incluye costo por mano de obra) cuentan con una incertidumbre que para este

estudio está cuantificada con un rango inferior de -5[%] y un rango superior de +15[%].

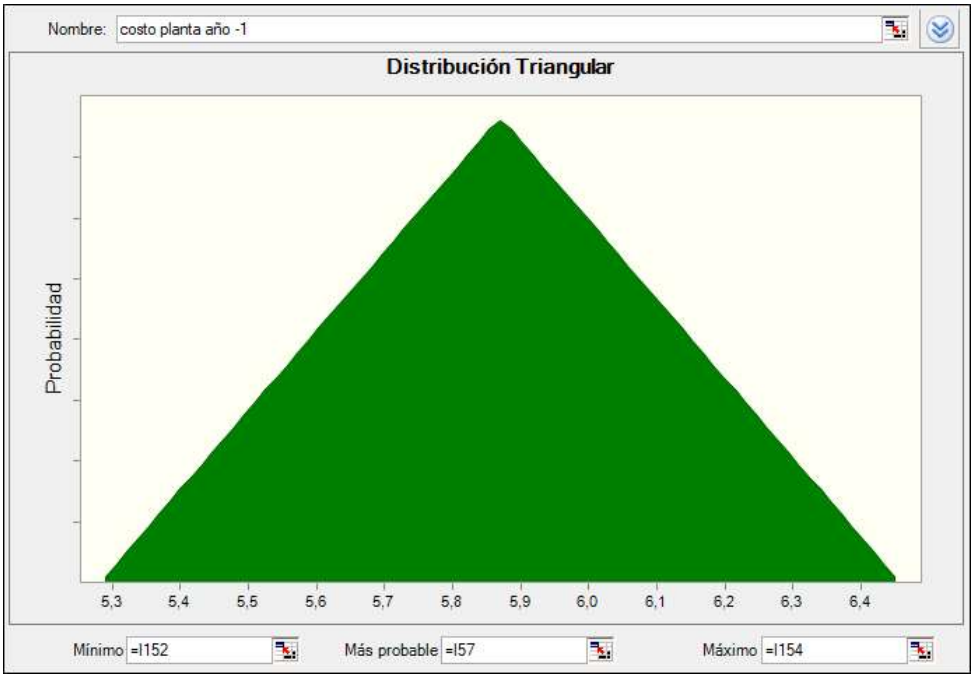


Ilustración 20. Distribución de probabilidad para el costo planta

4.3.7. Riesgos de Inversión

Aumento de Capex

La valorización del proyecto de explotación y la estimación de la inversión de capital del proyecto está sujeta a una incertidumbre que debe cuantificarse e incorporarse en el modelo financiero, de manera de poder evaluar su impacto sobre el objetivo económico del proyecto.

Aspectos relevantes como un aumento de precio importante, posibles subestimaciones realizadas durante el estudio de factibilidad, y aumento de las tasas de interés de préstamos, son factores generadores de incertidumbre, para el caso del aumento de inversión también se han considerado los efectos de atraso en la obtención de permiso y requerimientos adicionales de Reclamaciones de las autoridades y/o comunidades durante el proceso de EIA, y requisito de cierres excesivos respecto a lo considerado en los estudios.

Para el proyecto Arqueros se estimó una inversión de capital correspondiente a 241 [MMUSD], y la incertidumbre que para este estudio está cuantificada con un rango inferior de -10[%] y un rango superior de +7,5[%], para la inversión en construcción del proyecto y con un rango inferior de -5[%] y un rango superior de +5[%], para la los estudios de ingeniería y tramitación de permisos, las distribuciones de probabilidad respectivas se presentan a continuación.

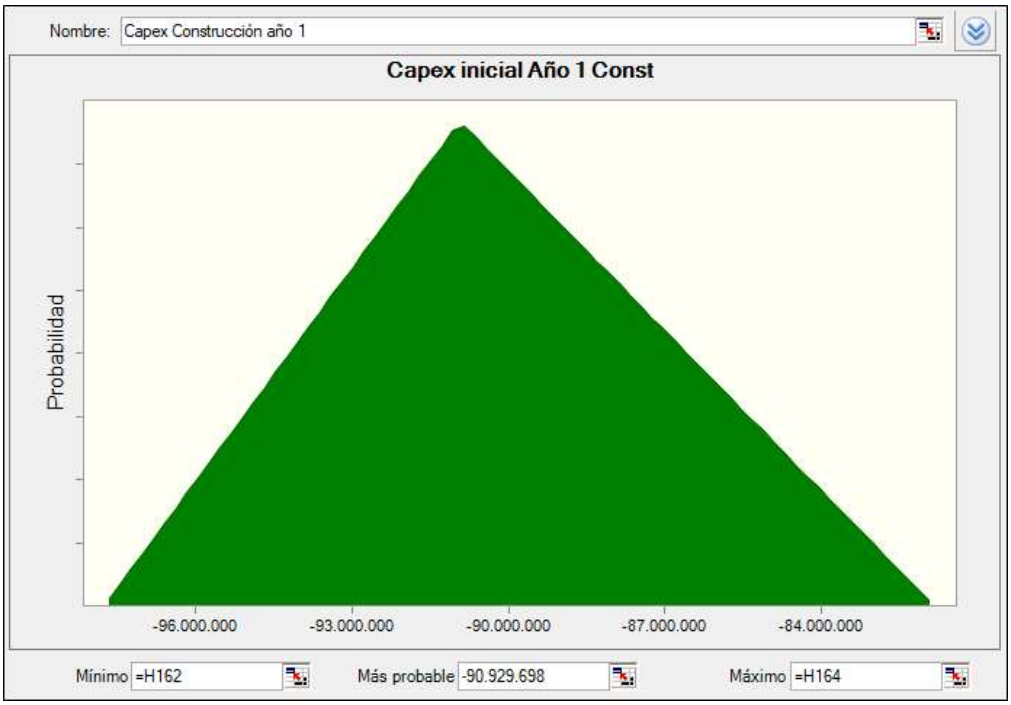


Ilustración 21. Distribución de Probabilidad para Capex inicial (Construcción)

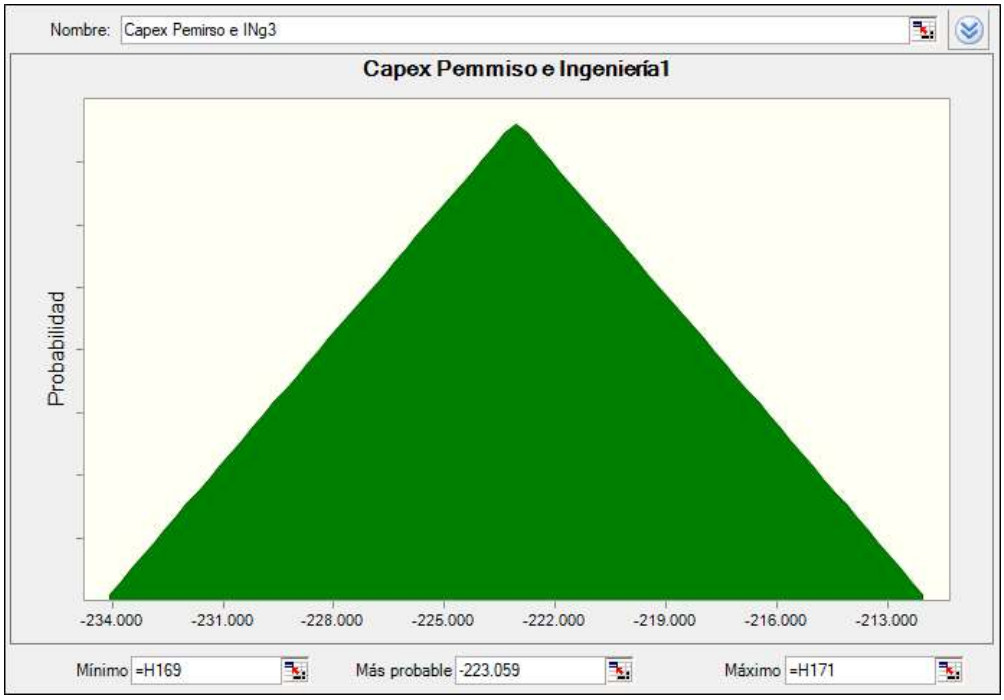


Ilustración 22. Distribución de Probabilidad para Capex inicial (permisos)

5. VALORIZACIÓN SIN RIESGO (VAN Estático) [8]

En el siguiente capítulo se entregará información correspondiente a la valorización del proyecto donde se estimará el VAN y la TIR del proyecto mediante la metodología de flujos de caja estáticos, la información recopilada corresponde al último estudio de ingeniería realizado por el proyecto e incluye lo siguiente:

5.1. Consideraciones Económicas

Para la definición de los parámetros económicos que serán utilizados para el valor del proyecto se consideró la siguiente información.

5.1.1. Precio del Cobre

COCHILCO proyecta el precio promedio del cobre para 2018 en US$ 3,06 la libra y para 2019 estima un precio de US$ 3,11 la libra.

Sin embargo, en base a fundamentos y tendencias del mercado y estudios internos realizados por Minera Arqueros sobre el comportamiento del precio, para este estudio se definió un precio de largo plazo **2,81US$/lb.**

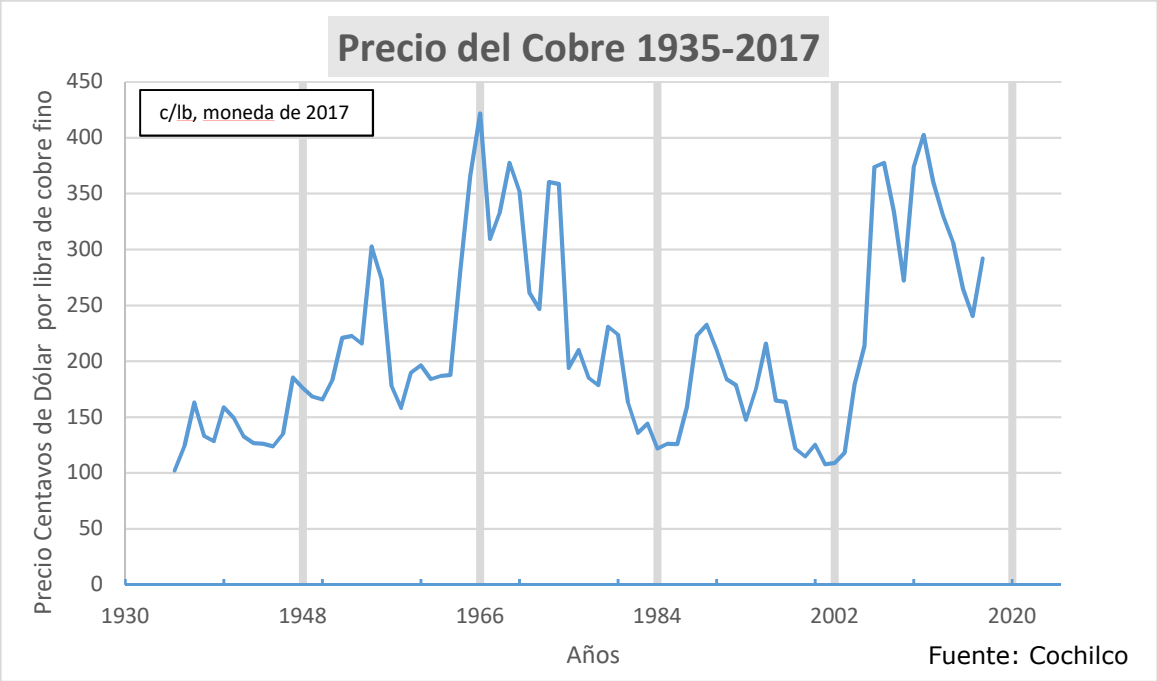


Ilustración 23. Precio del Cobre (años 1935-2017)

[8] Fuente y adaptación, proviene de [12]

5.1.2. Precio de la Plata

En base a fundamentos y tendencias del mercado y estudios sobre el comportamiento del precio, para este estudio se define un precio de **17,7 US$/toz.**

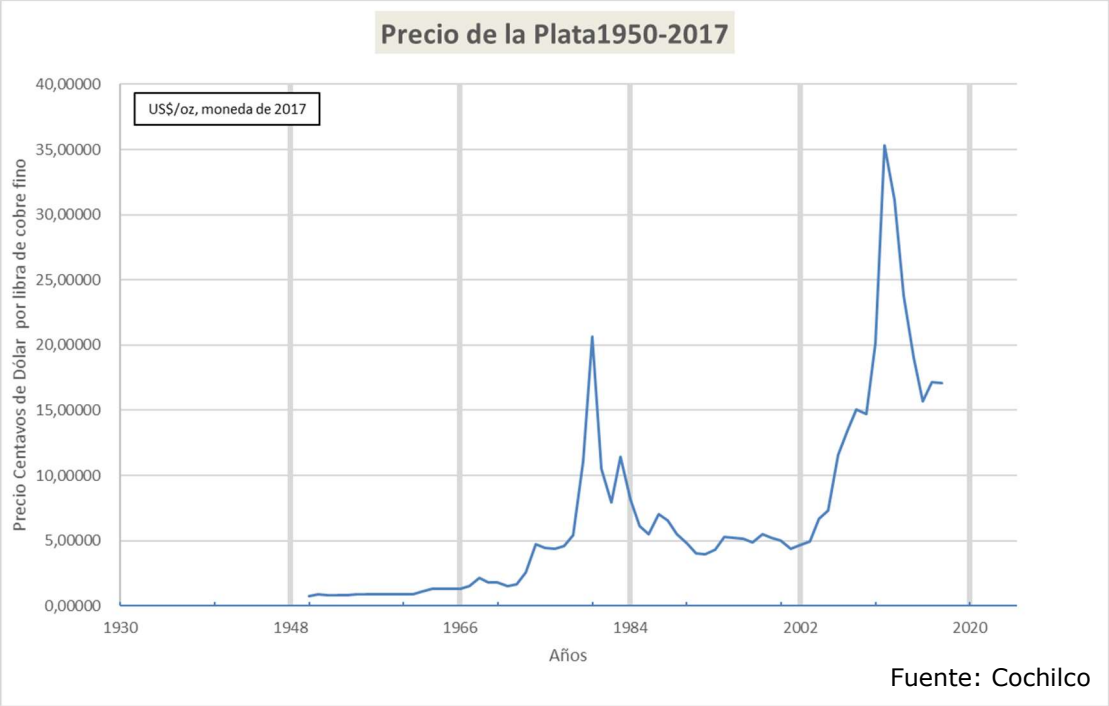


Ilustración 24. Precio de la Plata (años 1950-2017)

5.1.3. Tasa de Cambio [CLP/USD]:

El valor del dólar para utilizado para el último estudio de ingeniería del proyecto corresponde a 650 [clp/usd].

5.1.4. Tasa de descuento

Para el estudio de este proyecto se ha definido una tasa de descuento de 8%. La estimación de la tasa considera aspectos como, tasa libre de mercado, riesgo país y riesgo del proyecto. Sin embargo, su definición fue dada en función de los lineamientos de la empresa ejecutora en relación a sus otros proyectos.

5.1.5. Parámetros Metalúrgicos

Los parámetros metalúrgicos considerados para el cálculo del VAN estático, serán aquellos que fueron determinados en el estudio de prefactibilidad avanzado, en función de la información obtenida en las pruebas metalúrgicas realizadas; las recuperaciones del proceso de fundición y refinación fueron

estimadas en función de valores de otros proyectos similares que comercializan el concentrado a la Empresa Nacional de Minería (Enami).

En la tabla 11 se detallan los parámetros metalúrgicos que serán utilizados para la valorización.

Parámetro	Un	Indicador
Recuperación Cu	%	85,0
Recuperación Ag	%	83,0
Payable Cu	%	96,3
Payable Ag	g/dmt	-20,0
Ley de concentrado (Cu)	%	27,0
Ley de concentrado (Ag)	g/ton	346,0

Fuente: Minera Arqueros

Tabla 11. Parámetros Metalúrgicos

5.1.6. Costo promedio de operación

El costo de operación corresponde a los valores obtenidos en el estudio de prefactibilidad avanzado del proyecto, para el cálculo del flujo de caja se utilizaron valores por año en función de la cantidad de producción y distancias de transporte mina, en la tabla 12 a continuación se muestra el costo de operación promedio en dólares por tonelada producida para las distintas áreas, e incluye el costo del sistema de abastecimiento de agua industrial hasta la zona del proyecto.

Área	Un	Costo
Mina	US$/ton	14,5
Planta	US$/ton	7,1
Administración	US$/ton	3,4
Ventas	US$/ton	1,5
Agua	US$/ton	0,4
COSTO TOTAL	**US$/ton**	26,9

Fuente: Minera Arqueros

Tabla 12. Costo de Operación

5.2. Plan de Producción

El plan minero considera una producción total de 527.639klb y 9571koz de plata producidas en 17 años, en la ilustración 27 se grafica la producción de cobre y plata proyectada durante la vida del proyecto, también se puede ver que durante el año (-1) considera la producción de mineral, este corresponde al material tratado durante el periodo de puesta en marcha.

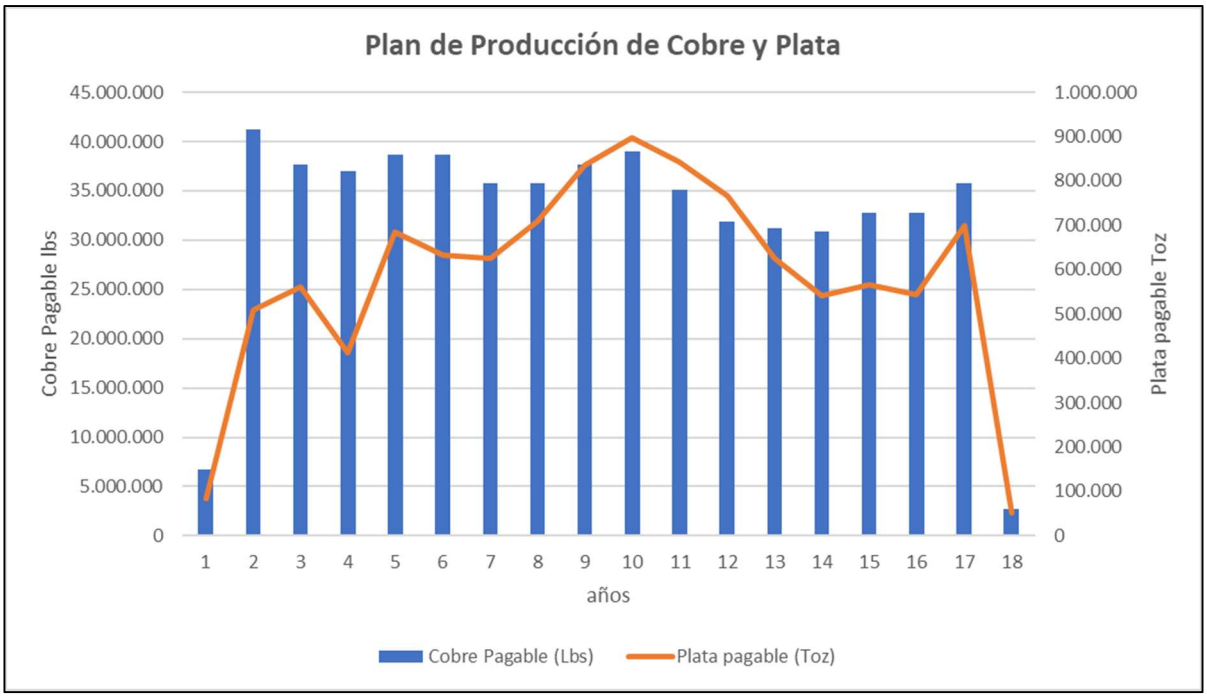


Ilustración 25. Producción Anual Proyectada de fino de cobre y plata.

5.3. Inversión

El proyecto Arqueros considera una inversión inicial de 241 millones de dólares aproximadamente, correspondiente a equipamiento y construcción mina, construcción de la planta de tratamiento e infraestructura complementaria, este monto también considera costos de administración y estudios en la etapa pre-operacional, el detalle de la inversión se muestra en la lámina tabla 13.

CAPEX inicial	US$
Mina	61.176.561
Planta	98.063.688
Infraestructura	43.506.855
Total	202.747.104
Costo preoperacional	
Estudios-Permisos	21.487.685
Costo Administración	17.253.221
Total	38.740.906

Fuente: Minera Arqueros

Tabla 13. Capex inicial de Proyecto

5.4. Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno

En la siguiente lamina se muestran los flujos anuales proyectados y el van parcial para cada periodo.

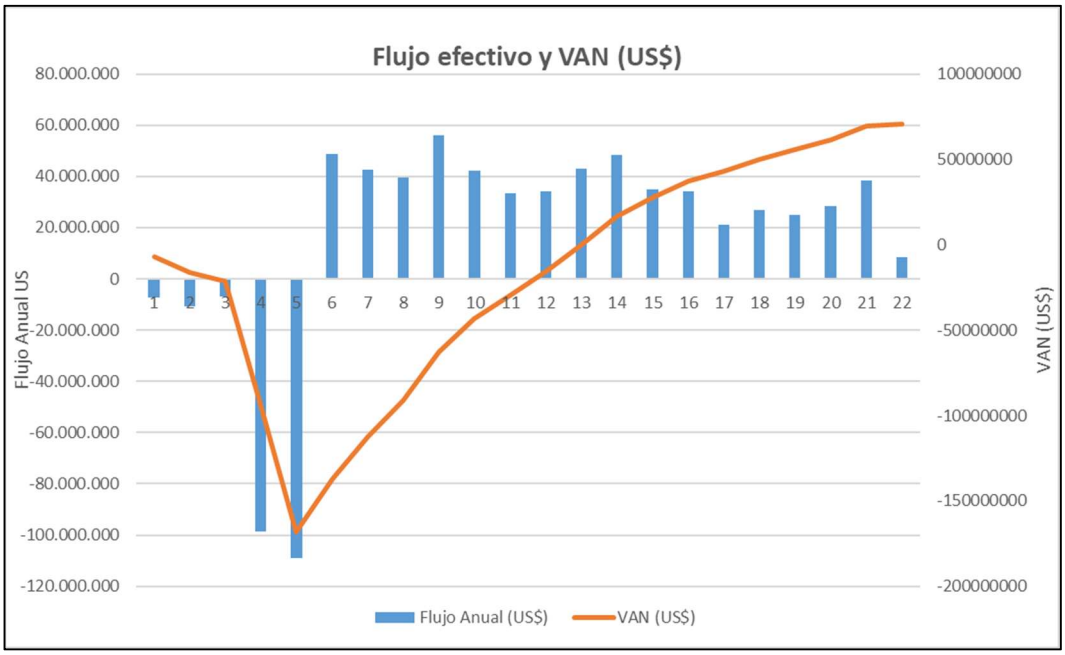


Ilustración 26. Flujo Efectivo y Van Acumulado Anual

La valorización a partir de flujos de caja estáticos para el Proyecto Arqueros con un precio de cobre de 2,81 US$/lb genera un valor actual neto del Proyecto de **70.8 [MMUSD]**, y una tasa interna de retorno de **13,8 [%]**.

6. VALORIZACIÓN CON RIESGO

En esta parte del informe se presentan resultados de la simulación de valorización del Proyecto Arqueros, incorporando la modelación de riesgos críticos.

Para el cálculo se estima el valor de la empresa a través de la estimación de los flujos de dinero que se espera generar en el futuro, considerando una variable adecuada sobre la cual medir el riesgo que en este caso será el Valor Actual Neto, VAN.

Se estudiará el impacto de los distintos factores de riesgo en la valorización del proyecto Arqueros, respecto al caso Base valorizado sin consideración de incertidumbre en 70,8(MMUSD) y una TIR de 13,8%. Para el cálculo también se aplicará una tasa de descuento de 8%

Los resultados obtenidos permiten llevar a cabo la simulación de todos los factores de riesgo considerados como relevantes en este estudio y que han sido modelados con una distribución continua que permita el análisis con la técnica de Montecarlo.

6.1. Simulación de Montecarlo (Análisis Crystal Ball)

Para el análisis de riesgos del proyecto se tendrán en cuenta los siguientes elementos:

- El modelo económico definido para el proyecto y los indicadores de rentabilidad establecidos por la compañía.

- Las funciones de distribución de datos con incertidumbres representadas en el capítulo 3.

Se asignarán valores de manera aleatoria a las variables de riesgo del modelo y se obtendrán diferentes resultados. El objetivo es realizar un número lo suficientemente elevado de iteraciones (2000), de manera que la muestra disponible de resultados, sea lo suficientemente amplia como para que se considere representativa de la realidad.

Dichas iteraciones serán realizadas utilizando un motor informático (Software Cristal Ball). Con los resultados obtenidos de las diferentes iteraciones se obtiene el Valor Esperado del Proyecto Arqueros (VEP).

6.1.1. Simulación VAN

A continuación, se presentan los resultados de la simulación realizada al VAN del Proyecto Arqueros.

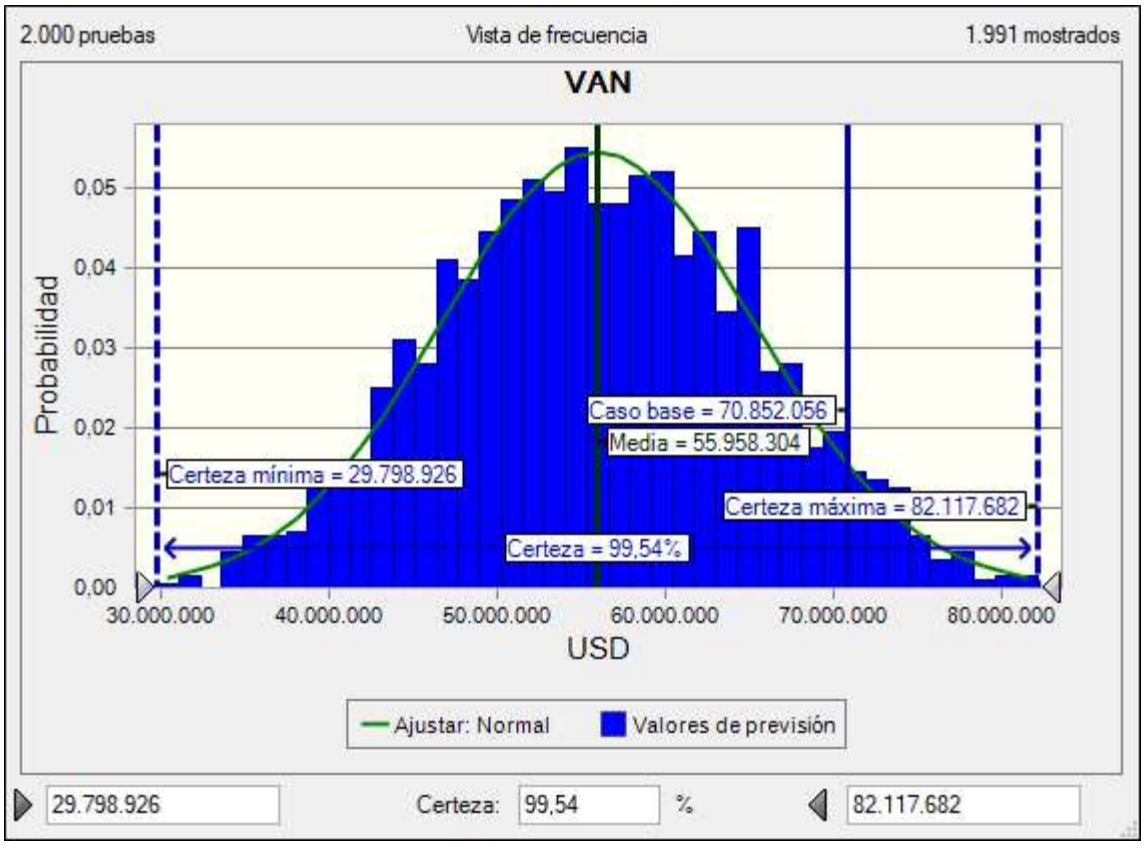


Ilustración 27. Histograma VAN caso simulación probabilística

De la simulación se puede afirmar con una certeza del 99,54% lo siguiente:

- El valor esperado del VAN corresponde a **US$ 55.958.304**
- El valor Mínimo del VAN, es positivo corresponde a **US$29.798.926**
- El valor máximo del VAN corresponde a **US$82.117.682**

El valor esperado del VAN con el caso simulado es menor al VAN calculado con la valoración estática del proyecto y su diferencia es de **$14.893.652**

Previsión: VAN

Editar Vista Previsión Preferencias Ayuda

2.000 pruebas | Vista de estadísticas | Hoja1!C94

Estadística	Ajustar: Normal	Valores de previsión
Pruebas	---	2.000
Caso base	---	70.852.056
Media	55.958.304	55.958.304
Mediana	55.958.304	55.786.551
Modo	55.958.304	---
Desviación estándar	9.342.635	9.342.635
Varianza	87.284.828.964.208	87.284.828.964.208
Sesgo	0,00	0,0461
Curtosis	3,00	2,89
Coeficiente de variación	0,1670	0,1670
Mínimo	-∞	26.133.808
Máximo	∞	90.616.770
Error estándar medio	---	208.908

Ilustración 28. Estadísticas de Estimación del Van Caso Simulado

6.1.2. Simulación TIR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada a la TIR del Proyecto Arqueros.

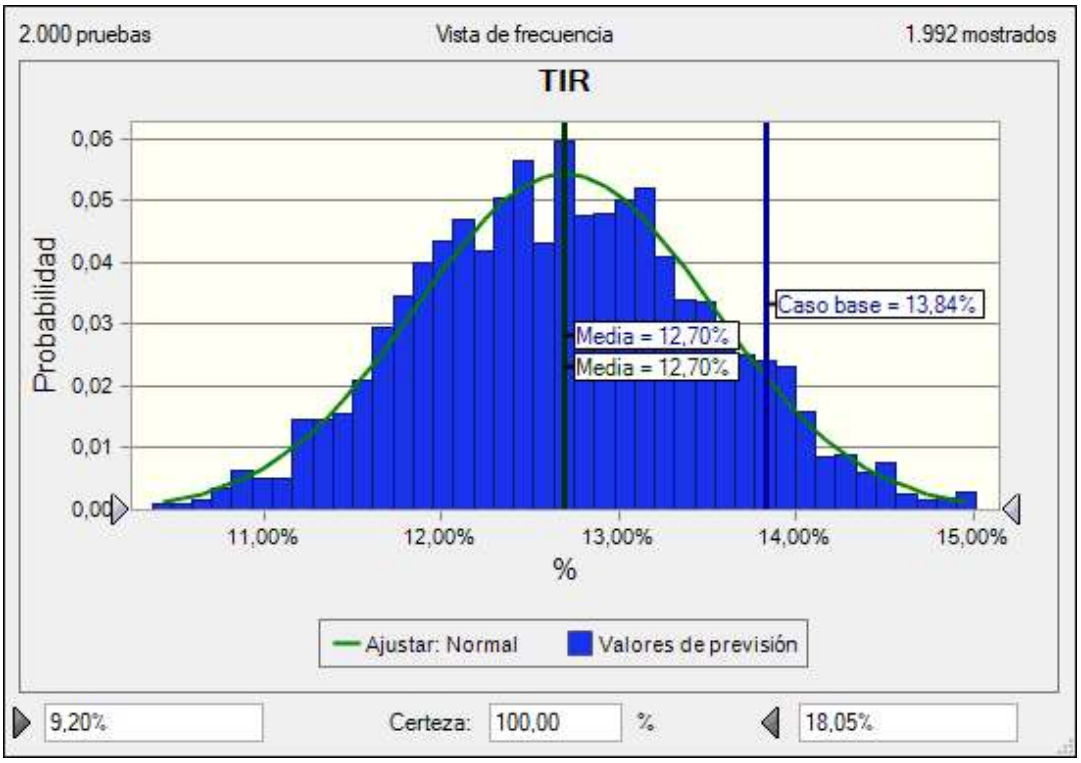


Ilustración 29. Histograma de TIR caso Simulación Probabilística

De la simulación se puede afirmar con una certeza del 100% lo siguiente:

- El valor esperado de la TIR corresponde a 12,70%
- El valor Mínimo de la TIR, corresponde a 9,20%
- El valor máximo de la TIR corresponde a 18,05%

El valor esperado de la TIR con el caso simulado es menor a la TIR calculada con valoración estática del proyecto y su diferencia es de 1,14%.

Previsión: TIR

Editar Vista Previsión Preferencias Ayuda

2.000 pruebas | Vista de estadísticas | Hoja1!C95

Estadística	Ajustar: Normal	Valores de previsión
Pruebas	---	2.000
Caso base	---	13,84%
Media	12,70%	12,70%
Mediana	12,70%	12,69%
Modo	12,70%	---
Desviación estándar	0,83%	0,83%
Varianza	0,01%	0,01%
Sesgo	0,00	0,1152
Curtosis	3,00	2,91
Coeficiente de variación	0,0654	0,0654
Mínimo	-∞	10,12%
Máximo	∞	15,86%
Error estándar medio	---	0,02%

Ilustración 30. Estadísticas de estimación de TIR

6.1.3. Análisis de Sensibilidad

La ilustración 32 muestra los resultados del análisis de contribución a la varianza obtenido desde la simulación del VAN, en ella se puede apreciar cuales son los factores que tienen mayor impacto en el cálculo del VAN, en este caso corresponde al precio del cobre, la recuperación metalúrgica de cobre, el capex inicial y la ley de cobre.

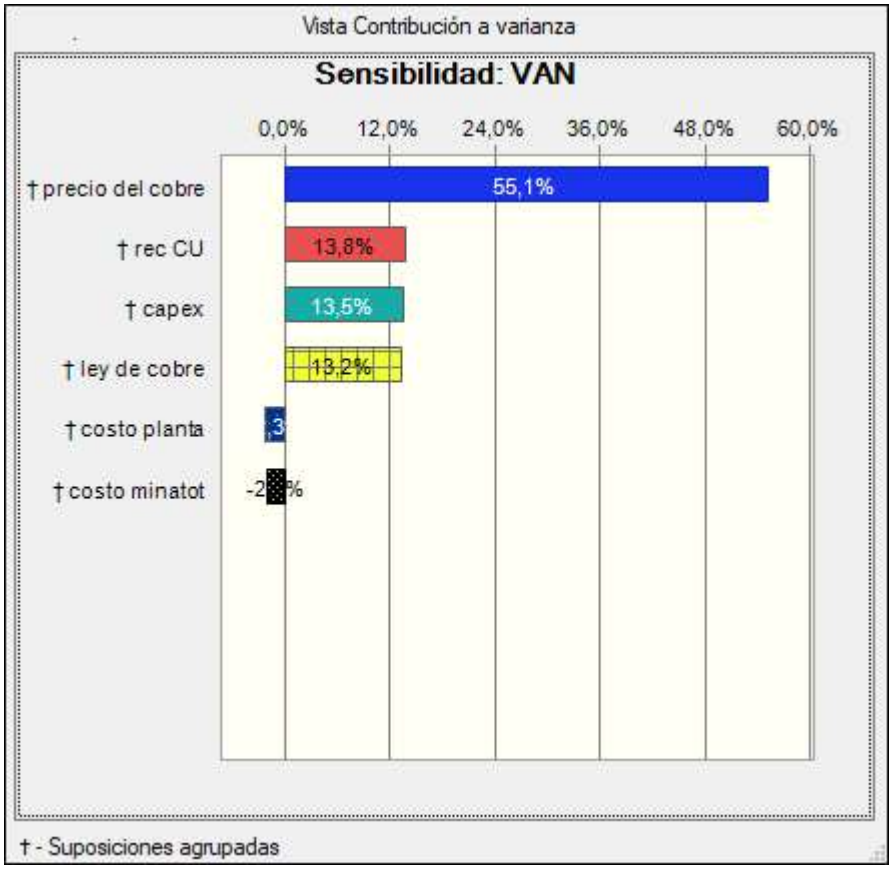


Ilustración 31. Sensibilidad VAN Simulado

6.2. Valor en Riesgo (VaR)

El resultado de la simulación de la valorización del proyecto Arqueros señala que existe un 90% de probabilidad de que el VAN del proyecto se encuentre entre 40,5 y 71,3 [MMUSD].

Además, es posible afirmar, que el valor en riesgo del proyecto corresponde **15,3 [MMUSD]**, es decir este monto corresponde a la máxima pérdida posible con un intervalo de 95% de confianza.

- **VAN** esperado **US$ 55,958,304**

- **VaR** = 55,958,304 – (40,591,037) = **US$ 15,367,267**

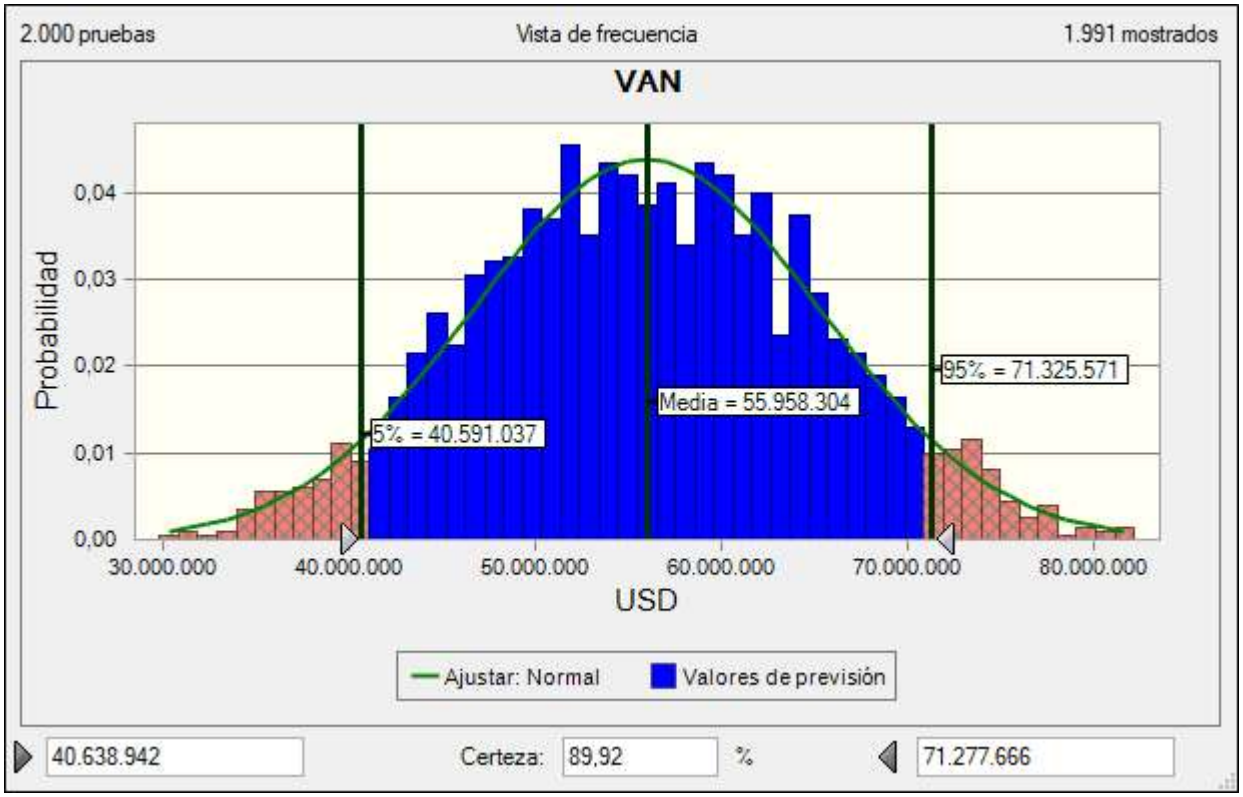


Ilustración 32. Simulación VAN 5%

TIR

Por otra parte, el resultado de la simulación de la valorización del proyecto Arqueros señala que existe un 90% de probabilidad de que la TIR del proyecto se encuentre entre 11,33% y 14,06%.

Es posible afirmar también que, de acuerdo a la estimación de riesgo realizada, el resultado indica que el valor en riesgo del proyecto corresponde 1,4%, es decir, este monto corresponde a la máxima disminución posible de la TIR con un intervalo de 95% de confianza.

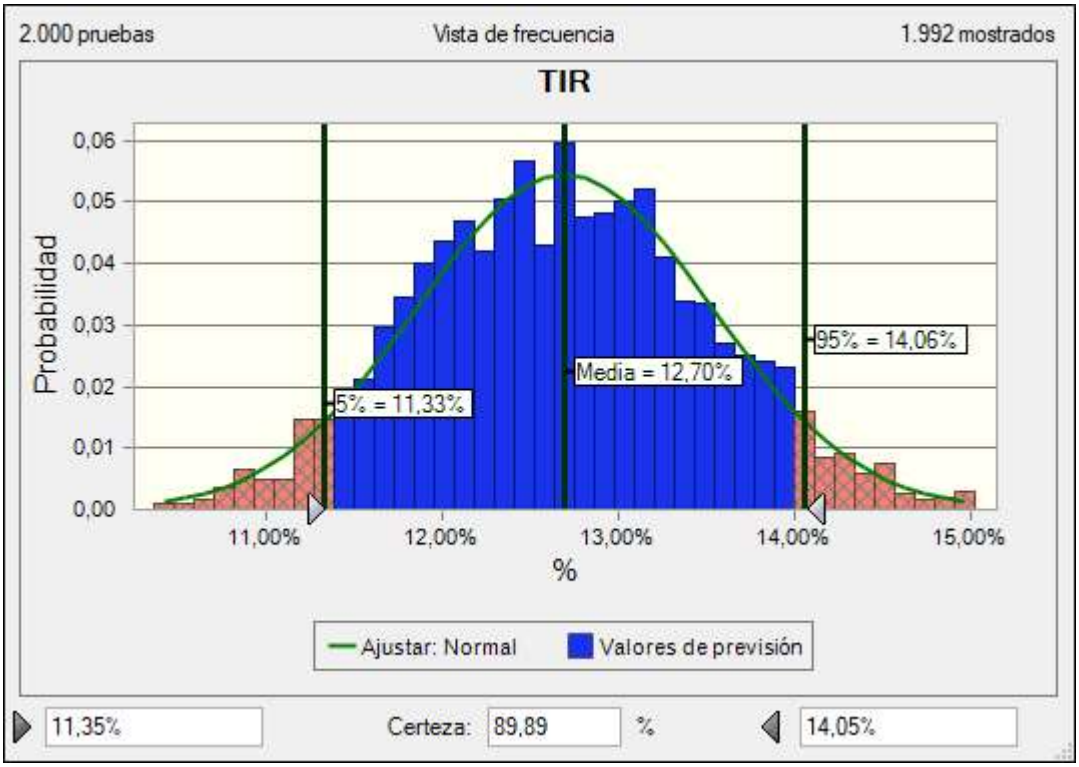


Ilustración 33. Simulación TIR 5%

7. MITIGACIÓN DE RIESGOS

En el presente capitulo, se presentan las diferentes medidas que se recomiendan para poder mitigar los riesgos más importantes que han sido detectados en el Proyecto Arqueros, la mitigación de los riesgos tiene como propósito poder minimizar los efectos adversos previstos, particularmente durante las distintas etapas del desarrollo del proyecto desde la evaluación y hasta la construcción y operación, se busca principalmente reducir la probabilidad de ocurrencia o el impacto que cada uno de ellos pudiese ocasionar y llevarlos a límites aceptables para Compañía Minera Arqueros.

Como fue señalado anteriormente, no se han considerado medidas para todos los riesgos, por lo tanto, en función del tipo de riesgo se han definido distintas respuestas posibles según la zona en que se encuentran y que están detalladas en la tabla 14.

Zona de Riesgo	Medidas de Respuesta
Muy Bajo	Asumir el Riesgo
Bajo	Asumir el Riesgo
Medio	Reducir, evitar, compartir o transferir
Alto	Reducir, evitar, compartir o transferir

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14. Medidas de Respuesta al Riesgo

Los riesgos detectados para el proyecto varían en el tiempo, por lo tanto, aquellos riesgos que están presentes al inicio del proyecto, no necesariamente estarán presentes en las siguientes etapas, e incluso es posible que puedan aparecer nuevos riesgos que deben ser analizados. La estrategia de mitigación está referida a todas las acciones que se puedan toman por adelantado y que puedan aumentar la rentabilidad del proyecto y disminuir el riesgo de pérdida proyectado.

MEDIDAS DE MITIGACION

A continuación, se mencionan cada una de las medidas de mitigación asociadas al riesgo detectado.

Riesgo de Menor Recurso Geológico.

a) Previo al desarrollo de la ingeniería de detalle se debe eliminar el 23% de recursos inferidos a través del desarrollo de una campaña de sondajes en superficie que permita llevarlos a la categoría de indicados.

Se ha estimado necesario realizar un total de 15.000m de sondaje, con un costo estimado de USD300.000.

Riesgo de Menor Ley de Cobre

a) Realizar un túnel de prospección, que permita alcanzar el cuerpo mineralizado para realizar el reconocimiento geológico del yacimiento (en su cota superior), confirmar los límites y el comportamiento de la mineralización del yacimiento de manera In-situ. Posteriormente se debe actualizar el modelo de leyes, con la información obtenida desde el túnel y la campaña de sondajes indicada en el punto anterior.

b) Realizar 2.000m de sondaje inclinado orientados a determinar con mayor exactitud, la presencia de diques en el mineral.

Se estima que se debe realizar un túnel de 1000m, con un costo estimado de USD3.000.000, para el caso de los sondajes inclinados se estiman 1.000m con un costo estimado de USD100.000.

Riesgo de Menor Recuperación Metalúrgica

a) Es necesario aumentar la escala de las pruebas metalúrgicas, para esto se deben realizar pruebas piloto con el material que se obtendrá desde el túnel de reconocimiento.

Se estima que el desarrollo de las pruebas tendrá un costo estimado de USD500.000.

Riesgo de Menor Ritmo de Producción

a) Realizar mapeo geotécnico y mediciones de terreno para obtener valores geomecánicos del yacimiento (in-situ), aprovechando el desarrollo del túnel de reconocimiento, con la nueva información se debe optimizar el diseño minero y planificar nuevamente con tasas de extracción razonable.

Riesgo de Aumento de Capex

a) Revisión y consolidación del informe de Ingeniería Básica Existente.

b) Definición temprana de una estrategia clara para la construcción del proyecto y para la compra de equipos, en este caso para comprar equipos de bajo costo se debe establecer un buen sistema de control y aseguramiento de calidad.

c) Preparar plan maestro considerando el análisis de permisos críticos y los tiempos asociados a la aprobación, procurando no iniciar el proyecto antes de la obtención de ellos.

Riesgo de Aumento Opex

a) Realizar previo a la inversión un estudio específico que permita definir y programa de gestión de costos y productividad del proyecto considerando medidas estratégicas para controlar el cumplimiento de los costos e indicadores de productividad proyectados durante la operación del proyecto.

Riesgo de Baja en el Precio del Cobre

a) Realizar el análisis de opciones reales para distintos escenarios de precio con la aplicación de medidas que garanticen la rentabilidad del proyecto tanto para periodos de precios bajos y precios altos. En base a lo anterior definir la estrategia y fortalecer la planificación de largo plazo de la compañía.

Riesgo de alza en el Costo Mano de obra

a) Realizar un estudio que considere minimizar el uso de mano de obra directa considerando el uso de nuevas tecnologías.

Insumos Críticos (Agua-Energía)

A pesar de que el suministro de agua y energía eléctrica para el proyecto no han sido evaluados cuantitativamente en este informe, han sido considerados de alto impacto por ser de importancia estratégica para el desarrollo del proyecto, por lo tanto, las medidas de mitigación recomendadas son las siguientes:

a) Elaborar un plan de acciones tempranas destinadas a buscar una segunda fuente de suministro de agua y/o aseguramiento de la fuente existente y en el caso del suministro de la energía eléctrica se deben realizar tramitaciones tempranas para asegurar el punto de conexión a la línea de suministro.

b) Considerando la ubicación del Proyecto y el grado de desarrollo que ha tenido últimamente el uso de energías renovables no convencionales, se debe realizar un estudio de factibilidad para el uso de energía solar como fuente de abastecimiento.

N°	Riesgo	Actividad	Objetivo	Costo Estimado US$
1	Menor Recurso Geologico	Realizar 15.000m de sondajes	Elevar categorización de recursos para reducir la incertidumbre	2.000.000
2	Menor Ley de Cobre	Realizar 1.000m de Tunel de Reconocimiento Realizar 1.000m de Sondaje inclinado	Reconocimiento Geologico-Geotecnico Actualizar Modelo de leyes Calculo optimizado de Dilución	3.000.000 100.000 100.000
3	Menor Recuperación Met.	Desarrollar pruebas complementarias a mayor escala	Analisis de Recuperación de Cobre y Plata	500.000
4	Menor Ritmo Producción	Realizar ensayos geomecanicos	Optimizar diseño minero y tasa de extracción.	200.000
5	Aumento Capex	Consolidar Ingeniería Basica Realizar Est. Estrategico de const. Realizar estudio regulatorio y plan maestro	Dar confiabilidad al diseño y definir estrategias para la construcción y puesta en marcha del proyecto.	100.000 100.000
6	Aumento Opex	Aseoria Experta	Desarrollar plan para asegurar la productividad durante la vida del proyecto y costos competitivos.	100.000
7	Bajo Precio del cobre	Asesoria Experta (Estudio de opciones reales)	Definir medidas para distintos escenarios y fortalecer la estrategia	100.000
8	Alza Costo MO	Asesoria Experta	Asegurar la incorporación de tecnologias y nuevas tecnicas al proyecto.	100.000

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15. Resumen Medidas de Mitigación

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo permitió evaluar los principales riesgos asociados a un proyecto minero de mediana minería a través del análisis del caso de aplicación del Proyecto Arqueros, mediante el análisis cualitativo y cuantitativo de los riesgos, fue posible determinar un valor del impacto económico que la incertidumbre presente podría provocar en el proyecto.

Los resultados obtenidos en el análisis cualitativo, permitieron determinar que los principales riesgos a los que se podría ver enfrentado el Proyecto Arqueros son: la inversión inicial, el precio del cobre, el costo de operación de la mina y planta y la producción de fino, que implícitamente considera otros riesgos tales como la cantidad y calidad de recurso geológico, la ley del mineral y la recuperación metalúrgica.

También se analizaron los riesgos relacionados con la obtención de permisos para la operación y que eventualmente podrían impedir su ejecución, por esta razón para el desarrollo del análisis cuantitativo se asumió que el proyecto contará con la aprobación de los permisos de operación. No obstante, lo anterior, siempre existe la probabilidad de que la obtención de permisos impacte en el costo de capital inicial y el costo de operación proyectados, debido a los posibles atrasos de aprobación, medidas adicionales de mitigación y aumento de estudios de ingeniería necesarios.

Para realizar una correcta evaluación, es de gran importancia el apoyo del equipo de proyecto y el juicio experto de profesionales del área, ya que permite realizar el análisis cuantitativo de riesgos y reconocer las incertidumbres presentes en el proyecto, sin embargo, uno de los factores más relevantes para el análisis económico del proyecto es poder evaluar estas incertidumbres a través de la simulación, ya que permite evaluar distintos escenarios y observar el comportamiento de varias variables al mismo tiempo proyectadas a futuro.

La valorización estática del Proyecto determinó un VAN de US$ 70.852.046 y una TIR de 13,8% y la valorización del proyecto con incertidumbre determinó un VAN de US$55.958.304 y un valor esperado para TIR de 12,7%, lo que significa diferencias de US$-14.893.652 y -1,1% respectivamente, respecto al caso valorado sin incertidumbre.

El cálculo del VAR del Proyecto Arqueros con los datos simulados determinó que el valor mínimo que puede alcanzar el proyecto con un 95% de probabilidad corresponde a US$40.591.037, por lo tanto, el valor en riesgo del proyecto corresponde a US$-15.367.267 y para el caso de la TIR corresponde a -1,4%.

La simulación de la valorización del proyecto, y los resultados de distribución de probabilidad del VAN del proyecto indican que no se obtendrían valores negativos de VAN bajo las condiciones simuladas.

La metodología desarrollada en este trabajo se presenta como una buena herramienta para cuantificar el riesgo asociado a la oportunidad de inversión de este proyecto al tomar la decisión, sin embargo, esta decisión debe ser complementada con otros indicadores debido a que a pesar de que el resultado de la simulación del VAN indica que no tiene probabilidad de ser negativo, su valoración podría considerarse baja respecto al monto estimado para la inversión.

Se recomienda poner énfasis en el plan de gestión de riesgos propuesto y aplicar las medidas de mitigación recomendadas, lo que a juicio del autor permitiría gestionar aquellos riesgos que han sido identificados y evaluados correctamente, reduciendo así considerablemente la incertidumbre presente. Por ejemplo, dentro de las medidas de mitigación para los riesgos que resultan de los factores internos, se recomienda el desarrollo de una campaña de sondajes y la construcción de un túnel de reconocimiento ya que se ha identificado que el recurso geológico es un factor preponderante de incertidumbre y con un alto impacto económico en el proyecto, y estas medidas permitirían reducir la incertidumbre considerablemente.

Para aquellos riesgos que resultan de los factores externos, como el precio del cobre y el aumento del costo de la mano de obra, las medidas de mitigación consideran desarrollar actividades orientadas a definir posibles respuestas efectivas en la etapa de operación, con el objetivo de no afectar la continuidad del negocio frente a bajas sustanciales de precio. Se recomienda, además, realizar estudios tempranos que permitan incluir el uso de tecnología y nuevas técnicas, lo que a juicio del autor ayudaría a que el proyecto sea más competitivo, de esta manera podrá enfrentar sin problemas los ciclos de precios del comodity o alzas sustanciales en el costo de la mano de obra.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Patricio Leddy. 2014 "Análisis del Riesgo de Inversión de un Proyecto de Exploración de Vetas Angostas de Oro".
http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132147/Analisis-del-riesgo-de-inversion-de-un-proyecto-de-exploracion....pdf?sequence=4&isAllowed=y

2. Francisco Valenzuela S. "Modelos de Gestión del Riesgo Asociado a la Incertidumbre en las Variables Intrínsecas del Proceso de Evaluación de Recursos".

3. Alí Meres. 2014 ""Evaluación de Riesgos Asociados a Proyectos de Inversión Minera: Caso Mina Cuprosa"
http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1215/1/meres_va.pdf

4. C. Kühn1 & J.K. Visser2 "Managing Uncertainty in Typical Mining Project Studies, Department of Engineering and Technology Management, University of Pretoria, South Africa
https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/42580/Kuhn_Managing_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

5. Eduardo Contreras y José Miguel Cruz "No más VAN: el Value at Risk (VaR) del VAN, una nueva metodología para análisis de riesgo.
http://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/ceges62.pdf

6. Ramon Naranjo. 2005 "Modelo de Riesgo Para la Evaluación económica Financiera de Proyectos Mineros" Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

7. Hidalgo R., P. D. 2013, Modelo de Gestión y Administración de Proyectos Operacionales. Tesis de Magister de en Gestión y Dirección de Empresas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 88p.

8. Fabian Olivares. 2014 "GESTIÓN DE RIESGOS EN MEGA PROYECTOS, Y SU APLICACIÓN AL PROYECTO CASERONES"
http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/116976

9. Análisis y cuantificación del Riesgo.
http://www.madrid.org/cs/StaticFiles/Emprendedores/Analisis_Riesgos/pages/pdf/metodologia/4AnalisisycuantificaciondelRiesgo%28AR%29_es.pdf

10. Cherezade Sud. 2017 "RELACIÓN PRECIO DEL COBRE Y COSTOS DE EXTRACCIÓN" Trabajo de Titulación, Universidad de Chile

11. Análisis de Riesgo e Incertidumbre.
http://mmellado.ublog.cl/archivos/19649/microsoft_word_cap5final.pdf

12. NCL – JRI Ingeniería. 2016 para Minera Arqueros, "Estudio de Factibilidad Proyecto Arqueros"

13. Instituto Tecnológico Geominero de España. 1997, Manual de Evaluación Técnico-Económica de Proyecto Mineros de Inversión.
http://info.igme.es/SidPDF/067000/513/67513_0001.pdf

14. Instituto Dominicano de Desarrollo Integral INC. 2015, Metodología de Evaluación de Riesgos en Proyectos.
http://iddi.org/file/repository/METODOLOGIA_EVALUACION_DE_RIEGOS_PROYECTOS_26_02_2016.pdf

15. Kettlun, A. 2016, Formulación y Evaluación de Proyectos Mineros "Evaluación de Proyectos Bajo Incertidumbre". Material Docente de la catedra de Evaluación de Proyectos del programa MBA Minero VI generación.
https://www.u-cursos.cl/

16. Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA), 2017. RCA – DIA Prospección Minera Arqueros Fase-2.
http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=ficha&id_expediente=2130595293

17. Revista Minería Chilena (MCH). Abril 2010. Guzmán J, Opciones Reales para evaluar inversiones.
http://www.mch.cl/reportajes/opciones-reales-para-evaluar-inversiones/

ANEXO 1. Modelo Flujo de Caja

Plan de Produccion		Año -1	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Ley de Cu en concentrado	%(Cu)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Ley de Ag en concentrado	(Ag g/ton)	346	346	346	346	346	346	346	346	346	346
Recuperación Cu	%	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Recuperación Ag	%	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Payable Cu	%	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
Payable Ag	g/dmt	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Dias operativos por año	dias		360	360	360	360	360	360	360	360	360
Produccion de mineral por año	tpd		5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Produccion de mineral por dia	Tpa	300.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000
Ley (Cu)	**%**	1,24	1,27	1,16	1,14	1,19	1,19	1,10	1,10	1,16	1,20
Ley (Ag)	**g/ton**	11,3	11,6	12,5	9,5	15,2	14,1	13,9	15,6	18,3	19,6
Produccion acumulada	Tpa	300.000	1.800.000	3.600.000	5.400.000	7.200.000	9.000.000	10.800.000	12.600.000	14.400.000	16.200.000
Humedad del concemtrado	%	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Concentrado (seco)	**DMT**	11.711	71.967	65.733	64.600	67.433	67.433	62.333	62.333	65.733	68.000
Concentrado (humedo)	**WMT**	12.799	78.652	71.840	70.601	73.698	73.698	68.124	68.124	71.840	74.317
Produccion de Ag	Toz	90.713	554.846	602.404	454.445	729.226	676.383	665.815	750.363	877.185	940.595
Cu Pagable ENAMI	Ton	3.045	18.712	17.091	16.797	17.533	17.533	16.207	16.207	17.091	17.681
Cu Pagable ENAMI	Lbs	6.713.081	41.252.966	37.679.875	37.030.222	38.654.354	38.654.354	35.730.916	35.730.916	37.679.875	38.979.181
Ag Pagable ENAMI	Toz	83.182	508.565	560.132	412.902	685.860	633.018	625.729	710.277	834.912	896.866

Plan de Produccion		Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17
Ley de Cu en concentrado	%(Cu)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Ley de Ag en concentrado	(Ag g/ton)	346	346	346	346	346	346	346	346
Recuperación Cu	%	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Recuperación Ag	%	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Payable Cu	%	96	96	96	96	96	96	96	96
Payable Ag	g/dmt	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Dias operativos por año	dias	360	360	360	360	360	360	360	28
Produccion de mineral por año	tpd	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Produccion de mineral por dia	Tpa	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	135.732
Ley (Cu)	**%**	1,08	0,98	0,96	0,95	1,01	1,01	1,10	1,10
Ley (Ag)	**g/ton**	18,4	16,7	13,8	12,0	12,5	12,1	15,4	15,0
Produccion acumulada	Tpa	18.000.000	19.800.000	21.600.000	23.400.000	25.200.000	27.000.000	28.800.000	28.935.732
Humedad del concemtrado	%	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Concentrado (seco)	**DMT**	61.200	55.533	54.400	53.833	57.233	57.233	62.333	4.700
Concentrado (humedo)	**WMT**	66.885	60.692	59.454	58.834	62.550	62.550	68.124	5.137
Produccion de Ag	Toz	882.469	803.205	660.531	575.983	602.404	581.267	739.794	54.192
Cu Pagable ENAMI	Ton	15.913	14.439	14.145	13.997	14.881	14.881	16.207	1.222
Cu Pagable ENAMI	Lbs	35.081.263	31.832.998	31.183.345	30.858.518	32.807.477	32.807.477	35.730.916	2.694.349
Ag Pagable ENAMI	Toz	843.112	767.492	625.547	541.363	565.598	544.461	699.708	51.169

Plan de Produccion		Año -1	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Ingresos										
Precio de Cobre	US$/lb	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81
Precio de Plata	US$/toz	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72
Ingreso por venta de cobre	US$	18.863.758	115.920.835	105.880.448	104.054.923	108.618.735	108.618.735	100.403.873	100.403.873	105.880.448
Ingreso por venta de plata		1.473.777	9.010.539	9.924.178	7.315.618	12.151.785	11.215.544	11.086.405	12.584.390	14.792.627
Total Ingreso	US$	20.337.535	124.931.374	115.804.626	111.370.541	120.770.520	119.834.280	111.490.279	112.988.263	120.673.075
Ingreso Neto por ventas	US$	18.548.911	113.940.902	105.732.618	101.520.339	110.399.095	109.481.349	101.906.138	103.374.530	110.504.895

Plan de Produccion		Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17
Ingresos										
Precio de Cobre	US$/lb	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81
Precio de Plata	US$/toz	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72	17,72
Ingreso por venta de cobre	US$	109.531.498	98.578.348	89.450.723	87.625.198	86.712.436	92.189.011	92.189.011	100.403.873	7.571.121
Ingreso por venta de plata		15.890.289	14.937.904	13.598.109	11.083.173	9.591.645	10.021.026	9.646.530	12.397.142	906.588
Total Ingreso	US$	125.421.787	113.516.252	103.048.832	98.708.372	96.304.081	102.210.037	101.835.541	112.801.015	8.477.709
Ingreso Neto por ventas	US$	114.891.373	104.026.302	94.436.725	90.316.221	88.026.532	93.413.180	93.046.082	103.190.981	7.753.606

Plan de Produccion	Año -5	Año -4	Año -3	Año -2	Año -1	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
CASH FLOW											
(+) Total Ingreso					20.337.535	124.931.374	115.804.626	111.370.541	120.770.520	119.834.280	111.490.279
(-) Costo operación					-3.369.413	-49.628.477	-48.156.175	-50.505.545	-49.892.066	-49.100.066	-47.573.024
(-) TC/RC					-1.788.624	-10.990.473	-10.072.007	-9.850.202	-10.371.425	-10.352.930	-9.584.141
EBITDA					15.179.498	64.312.425	57.576.443	51.014.795	60.507.029	60.381.284	54.333.114
(-) gasto Financiero			0	0	-6.048.380	-9.682.530	-9.271.303	-7.888.084	-6.504.866	-5.121.647	-3.738.429
(-)Gastos Fin. (Gar. Banco)									-89.554	-106.434	-123.525
(-) Otros gastos	-114.000	-3.600.900	-100.900	-7.397.570	-6.153.851	-652.173	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700
(-) Reserva P.de Cierre						-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471
(-) Dep. & Amortización						-18.091.161	-18.536.350	-19.432.084	-19.692.668	-20.185.004	-17.251.549
UAI	-114.000	-3.600.900	-100.900	-7.397.570	2.977.267	34.914.090	28.643.620	22.569.456	33.094.771	33.843.028	32.094.441
Utilidad Acumulada AI	-114.000	-3.714.900	-3.815.800	-11.213.370	-8.236.103	26.677.987	55.321.607	77.891.062	110.985.834	144.828.862	176.923.303
(-) Royalti Minero						179.433	148.080	117.710	170.336	174.077	165.335
(-) Impuesto (27%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.726.719	8.334.619
Utilidad Neta	-114.000	-3.600.900	-100.900	-7.397.570	2.977.267	34.734.657	28.495.539	22.451.746	32.924.435	25.942.232	23.594.487
(+) Dep & Amortizacion						18.091.161	18.536.350	19.432.084	19.692.668	20.185.004	17.251.549
(+) Reserva Plan de cierre	0	0	0	0	0	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471
(±) Asignación Para Cierre						-2.676.947	-1.084.164	-1.097.716	4.858.827	0	0
Net Cash Flow	-114.000	-3.600.900	-100.900	-7.397.570	2.977.267	51.121.341	46.920.196	41.758.585	58.448.400	47.099.707	41.818.507
Capex	-7.360.000	-7.152.786	-6.637.840	-223.058	0						
	0	0	0	-90.929.698	-111.817.406	-2.225.945	-4.478.671	-2.372.587	-2.461.682	-4.804.476	-8.502.768
Flujo efectivo	-7.474.000	-10.753.686	-6.738.740	-98.550.327	-108.840.139	48.895.396	42.441.525	39.385.998	55.986.718	42.295.231	33.315.739

Plan de Produccion	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17
CASH FLOW											
(+) Total Ingreso	112.988.263	120.673.075	125.421.787	113.516.252	103.048.832	98.708.372	96.304.081	102.210.037	101.835.541	112.801.015	8.477.709
(-) Costo operación	-49.499.024	-48.570.175	-47.920.696	-48.851.763	-48.270.091	-47.784.831	-47.020.200	-48.979.982	-49.861.982	-46.673.024	-4.150.611
(-) TC/RC	-9.613.733	-10.168.181	-10.530.415	-9.489.950	-8.612.107	-8.392.151	-8.277.549	-8.796.857	-8.789.459	-9.610.034	-724.103
EBITDA	53.875.507	61.934.720	66.970.677	55.174.539	46.166.634	42.531.390	41.006.332	44.433.198	43.184.100	56.517.958	3.602.995
(-) gasto Financiero	-2.355.210	-971.991	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(-)Gastos Fin. (Gar. Banco)	-140.829	-158.350	-176.090	-194.052	-212.238	-212.238	-162.642	-113.046	-63.450	-13.854	
(-) Otros gastos	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	-152.700	11.802.300
(-) Reserva P.de Cierre	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471	-972.471
(-) Dep. & Amortización	-14.944.633	-14.871.053	-15.345.557	-15.173.413	-15.613.497	-13.990.951	-15.263.468	-14.795.368	-16.122.388	-15.733.535	-15.723.067
UAI	35.309.664	44.808.154	50.323.859	38.681.903	29.215.729	27.203.031	24.455.052	28.399.614	25.873.092	39.645.398	-1.290.243
Utilidad Acumulada AI	212.232.967	257.041.121	307.364.980	346.046.883	375.262.612	402.465.643	426.920.695	455.320.309	481.193.401	520.838.799	519.548.557
(-) Royalti Minero	181.411	228.903	256.482	198.272	150.941	140.878	127.138	146.860	134.228	203.089	0
(-) Impuesto (27%)	12.401.067	14.556.316	16.605.673	14.057.594	11.261.033	10.826.453	9.666.474	10.931.641	10.188.151	14.531.560	3.562.297
Utilidad Neta	22.727.186	30.022.935	33.461.705	24.426.037	17.803.755	16.235.701	14.661.440	17.321.112	15.550.712	24.910.749	-4.852.539
(+) Dep & Amortizacion	14.944.633	14.871.053	15.345.557	15.173.413	15.613.497	13.990.951	15.263.468	14.795.368	16.122.388	15.733.535	15.723.067
(+) Reserva Plan de cierre	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471	972.471
(±) Asignación Para Cierre	0	0	0	0	0	0	-3.306.400	-3.306.400	-3.306.400	-3.306.400	-3.306.400
Net Cash Flow	38.644.290	45.866.459	49.779.732	40.571.921	34.389.722	31.199.122	27.590.978	29.782.551	29.339.171	38.310.355	8.536.599
Capex											
	-4.628.477	-3.081.175	-1.600.965	-5.547.096	-390.037	-9.955.655	-592.540	-4.941.640	-993.701	-67.540	0
Flujo efectivo	34.015.813	42.785.284	48.178.767	35.024.825	33.999.685	21.243.467	26.998.438	24.840.911	28.345.470	38.242.815	8.536.599

ANEXO 2. Reportes de Salida Crystal Ball

Informe de Crystal: completo

Simulación iniciada el 15-04-2018 a las 16:01

Simulación detenida el 15-04-2018 a las 16:01

Prefs ejecución:	
Número de pruebas ejecutadas	2.000
Monte Carlo	
Inicialización aleatoria	
Control de precisión activado	
Nivel de confianza	95,00%
Estadísticas de ejecución:	
Tiempo de ejecución total (seg)	6,01
Pruebas/segundo (promedio)	333
Números aleatorios por segundo	42.917
Datos de Crystal Ball:	
Suposiciones	129
Correlaciones	35
Matrices de correlación	18
Variables de decisión	0
Previsiones	2
** Elementos congelados **	2

Previsiones

oja de trabajo: [flujo de caja tesis2.xlsx]Hoja1

revisión: TIR **Celda: C95**

Resumen:

El nivel de certeza es 89,28%
El rango de certeza es de 11,35% a 14,05%
El rango completo es de 10,19% a 15,27%
El caso base es 13,84%
Después de 2.000 pruebas, el error estándar de la media es 0,02%

Estadísticas:	Valores de previsión
Pruebas	2.000
Caso base	13,84%
Media	12,70%
Mediana	12,69%
Modo	--
Desviación estándar	0,83%
Varianza	0,01%
Sesgo	-0,0331
Curtosis	2,86
Coeficiente de variación	0,0655
Mínimo	10,19%
Máximo	15,27%
Ancho de rango	5,08%
Error estándar medio	0,02%

Percentiles:	Valores de previsión
0%	10,19%
10%	11,63%
20%	12,00%
30%	12,26%
40%	12,49%
50%	12,69%
60%	12,90%
70%	13,15%
80%	13,43%
90%	13,76%
100%	15,27%

Previsión: VAN **Celda: C94**

Resumen:
El nivel de certeza es 90,09%
El rango de certeza es de 40.638.942 a 71.277.666
El rango completo es de 27.148.024 a 82.733.892
El caso base es 70.852.056
Después de 2.000 pruebas, el error estándar de la media es 208.627

Estadísticas:	Valores de previsión
Pruebas	2.000
Caso base	70.852.056
Media	56.015.718
Mediana	56.042.284
Modo	—
Desviación estándar	9.330.104
Varianza	87.050.846.186.126
Sesgo	-0,0868
Curtosis	2,87
Coeficiente de variación	0,1666
Mínimo	27.148.024
Máximo	82.733.892
Ancho de rango	55.585.868
Error estándar medio	208.627

Percentiles:	Valores de previsión
0%	27.148.024
10%	44.057.081
20%	48.233.861
30%	51.237.620
40%	53.576.278
50%	56.036.236
60%	58.433.704
70%	61.090.095
80%	64.259.853
90%	67.785.231
100%	82.733.892

Fin de previsiones

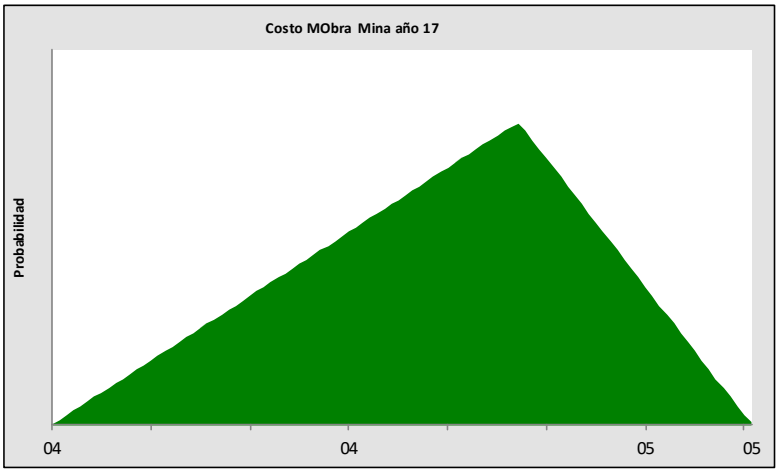
Suposición: Costo MObra Mina año 16 (contin.) **Celda: Y56**

Correlacionado con:	Coeficiente
precio del cobre año 16 (Y42)	0,83

Suposición: Costo MObra Mina año 17 **Celda: Z56**

Triangular distribución con parámetros:

Mínimo	3,7	(=Z146)
Más probable	4,4	
Máximo	4,7	(=Z148)



Correlacionado con:	Coeficiente
precio del cobre año 17 (Z42)	0,83