

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



“OPTIMIZACIÓN DE BENEFICIOS CON GESTIÓN DE RIESGOS EN
LAS MINAS SUBTERRÁNEAS – GRUPO VOLCAN”

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO
ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN REGULACIÓN, GESTIÓN Y
ECONOMÍA MINERA

AUTORES:

VILA VALENZUELA, JERRY ANGEL
ZAFRA SIANCAS, JOSÉ ANTONIO

ASESOR:

GALVÁN LANDAVERE, RAFAEL JESÚS

LIMA – PERÚ

Abril, 2019

Resumen Ejecutivo

Actualmente, las empresas mineras con operaciones subterráneas no están optimizando sus utilidades y probablemente están perdiendo la oportunidad de generar valor a los accionistas. El presente trabajo de investigación concreta el desarrollo y la evaluación de un caso práctico de una de las minas subterráneas en marcha del Grupo Volcan, en el cual se propone desarrollar un modelo para definir el tamaño óptimo de producción y a la vez, maximizar los beneficios y el valor de la empresa con la aplicación de teorías económicas y gestión de riesgos operativos. Todo esto obedece a la aplicación del modelo determinístico en los cálculos; es decir, que todas las variables permanecen constantes con la probabilidad de cumplimiento al 100% de los objetivos propuestos; lo cual no es cierto, por ejemplo, los resultados de reconciliación del plan objetivo versus el plan real al final del año 2018 terminan entre 55% a 65% de cumplimiento y generalmente logran los objetivos con producción no planeada; por tal razón, se pretende gestionar los riesgos operativos mediante la aplicación del Modelo Estocástico identificando las variables operativas más críticas e inciertas que hacen más sensible al VAN y proponiendo acciones que los mitiguen.

La mina San Cristóbal tiene un ritmo actual de producción de 3,250 tpd que genera un VAN (línea base) de US\$ 192M y con la metodología aplicada, se obtiene un ritmo óptimo de producción de 4,000 tpd con un VAN determinístico de US\$ 213M, un VAN estocástico (porcentajes de cumplimiento histórico) de US\$ 181M que representa el 85% del VAN determinístico y un VAN estocástico (con gestión de riesgos operativos) de US\$ 207M con una probabilidad de éxito de 85% que sea positivo, alcanzando el 97% del VAN determinístico con una inversión de US\$ 8.5M. Con respecto al modelo sin proyecto (línea base), la metodología aplicada nos brinda un incremento de VAN de US\$ 15M. Esto crea mayor robustez y confiabilidad para el cumplimiento de las metas proyectadas generando más valor a la compañía minera.

Índice

Resumen Ejecutivo	ii
Lista de tablas.....	v
Lista de figuras.....	vi
Introducción.....	1
CAPÍTULO 1 POSTULADOS TEÓRICOS.....	6
1.1 El negocio minero y la generación de valor.....	6
1.2 Vida óptima económica y ritmo óptimo económico de producción ...	7
1.3 Teorías económicas	9
1.4 Teorías económicas aplicadas en minería.....	12
1.5 Herramientas Financieras para evaluación de proyectos	14
1.6 Modelo Determinístico.....	15
1.7 Incertidumbre, Riesgo y tipos de riesgos	15
1.8 Gestión de Riesgos en Proyectos	16
1.9 Tipos de Análisis de Riesgos	17
1.9.1 Análisis Cualitativo de Riesgos.....	17
1.9.2 Análisis Cuantitativo de Riesgos.....	18
1.10 Modelo Estocástico y Metodología.....	18
1.11 Software especializados en riesgos y probabilidades	25
1.11.1 Minitab.....	25
1.11.2 Arena Simulador.....	25
1.11.3 Active Risk Manager (ARM).....	25
1.11.4 @Risk.....	26
1.11.5 Risk Simulator.....	26
1.12 Validación de Resultados.....	26
1.13 Marco Teórico	28
1.13.1 Estimado de Recursos de Mineral Económicamente Explotable.....	28
1.13.2 Vida Óptima económica y Ritmo Óptimo de producción	28
1.13.3 Planeamiento de Largo Plazo.....	29
1.13.4 Flujo de caja.....	29
1.13.5 Tamaño Óptimo de Producción con el Máximo Beneficio.....	30
1.13.6 Gestión de Riesgos en Proyectos.....	31
1.13.7 Tipos de Riesgos.....	31
1.13.8 Tipo de Análisis de Riesgo.....	31

1.13.9 Software especializados en riesgos y probabilidades	31
1.13.10 Validación de Resultados	31
CAPÍTULO 2 CASO DE ESTUDIO	32
2.1 Descripción de Volcan	32
2.2 Descripción del problema	32
2.3 Riesgos Operativos y Modelo Estocástico	38
2.4 Caso de Estudio piloto de la metodología para determinar el tamaño y el beneficio óptimo incluyendo el Modelo Estocástico	40
2.5 Validación de la hipótesis	41
2.6 Presentación de resultados	41
2.6.1 Maximización de Beneficios y Optimización de Ritmo de Producción	41
2.6.2 Fórmulas Empíricas	41
2.6.3 Teorías económicas para Maximizar Beneficios a un Ritmo Óptimo de Producción	43
2.6.4 Aplicación de Modelo Estocástico y Gestión de Riesgos Operativos	47
CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN	63
3.1 Modelo Base - Determinístico	63
3.2 Modelo Base – Estocástico	65
3.3 Modelo con Porcentaje de Cumplimiento Histórico – Estocástico ...	66
3.4 Modelo con Gestión de Riesgos – Estocástico	66
3.5 Validación de resultados	69
Bibliografía	72

Lista de tablas

Tabla 1: Matriz de variables para maximizar beneficios a un tamaño óptimo de producción.....	12
Tabla 2: Resumen de variaciones porcentuales y media por mina - Producción ..	35
Tabla 3: Resumen de variaciones porcentuales y media por mina - Avances	36
Tabla 4: Resumen Estadísticos de parámetros.....	38
Tabla 5: Cuadro Comparativo de Recurso de Mineral Económicamente Explotable	40
Tabla 6: Ingreso Marginal y Costo Marginal.....	44
Tabla 7: VAN Y TIR de los escenarios evaluados.....	46
Tabla 8: Distribuciones de probabilidad ajustadas de cada variable según diversos criterios y estadísticos	47



Lista de figuras

Figura 1: Maximización de beneficios de una empresa perfectamente competitiva	10
Figura 2: Aplicación de la regla de decisión marginal	10
Figura 3: Equilibrio a largo plazo en condiciones de competencia perfecta	11
Figura 4: Representación gráfica de variables definir el máximo beneficio a un tamaño óptimo de producción	13
Figura 5: Esquema de Comparación entre el modelo Actual y el modelo Final	27
Figura 6: Esquema de Comparación entre el modelo Real y el modelo Final	27
Figura 7: Variación Porcentual - Producción Objetivo vs Real	33
Figura 8: Producción Objetivo vs Real por cada mina.....	34
Figura 9: Variación Porcentual - Avances Objetivo vs Real	36
Figura 10: Avances Objetivo vs Real por cada mina.....	37
Figura 11: Reservas de Mineral Vs. Producción de Mineral Mina San Cristóbal...	43
Figura 12: Ingreso Marginal Versus Costo Marginal	45
Figura 13: Tamaño de Producción Versus Beneficio Unitario	45
Figura 14: Curva Producción - Beneficio	46
Figura 15: Distribución de probabilidad ajustada para el Tonelaje	48
Figura 16: Distribución de probabilidad ajustada para el Tonelaje	48
Figura 17: Distribución de probabilidad ajustada para la Ley de Plomo.....	49
Figura 18: Distribución de probabilidad ajustada para la Ley de Cobre	50
Figura 19: Distribución de probabilidad ajustada para la Ley de Plata.....	50
Figura 20: Distribución de probabilidad ajustada para la Recuperación Metalúrgica de Zinc	51
Figura 21: Distribución de probabilidad ajustada para la Recuperación Metalúrgica de Plomo	52
Figura 22: Distribución de probabilidad ajustada para el OPEX Variable Unitario	52
Figura 23: Distribución de probabilidad ajustada para el OPEX Fijo Unitario.....	53
Figura 24: Configuración de Simulación @Risk	54
Figura 25: Tornado de los riesgos operativos en torno al VAN esperado	54
Figura 26: Deducciones Concentrados, Términos comerciales y Gastos de ventas	56
Figura 27: Distribución de probabilidad del VAN y Distribución Acumulada - MB .	57
Figura 28: Distribución de probabilidad del VAN y Distribución Acumulada - MR .	59
Figura 29: Distribución de probabilidad del VAN y Distribución Acumulada - MF .	61
Figura 30: Resumen de Distribuciones de Probabilidad del VAN esperado.....	62
Figura 31: Comparación entre el Modelo Determinístico, Modelo Estocástico sin gestión de riesgos y Modelo Estocástico con gestión de riesgos.....	68
Figura 32: Comparación entre el modelo Real y el modelo Final	69

Introducción

En la actualidad, las empresas mineras con operaciones subterráneas, no están optimizando sus utilidades sobre la base de estudios técnicos - económicos y análisis de riesgos, por lo que posiblemente están dejando de generar dinero y perdiendo la oportunidad de generar valor a la empresa. Este trabajo de investigación tiene el objetivo de desarrollar y evaluar un caso práctico de una mina subterránea del Grupo Volcan. Con este ejercicio pretendemos desarrollar un modelo para definir el tamaño óptimo de producción incluyendo gestión de riesgos (Modelo Estocástico o Probabilístico) y de esta manera, maximizar los beneficios económicos y el valor de la empresa. Por otro lado, también pretendemos demostrar que las fórmulas empíricas no estiman de manera correcta los tamaños óptimos de producción por el mismo hecho que usan una sola variable y otras constantes, que son productos de un análisis estadístico de muchas minas (subterránea y cielo abierto) en décadas pasadas.

El presente trabajo de investigación contiene tres capítulos relevantes. El primer capítulo está basado en el soporte, análisis y selección bibliográfica del tema a estudiar. El segundo capítulo está centrado en el desarrollo y aplicación de teorías económicas que tiene el objetivo de identificar el tamaño óptimo de producción y, por ende, el máximo beneficio. Como se indicó párrafos previos, estos resultados son cálculos determinísticos que en su ejecución existen incertidumbres de cumplimiento. Además, contempla la aplicación del modelo estocástico al escenario de tamaño óptimo obtenido incluyendo incertidumbres y la propuesta de acciones que mitiguen el nivel de riesgo de las variables operativas, con el fin de alcanzar las metas propuestas en la ejecución de las actividades operacionales en mina. Como tercer y último capítulo, se tiene la discusión de la metodología y de los resultados obtenidos.

Este trabajo de investigación desarrolla un caso práctico con el propósito de implementar una metodología para definir el tamaño óptimo de producción con el máximo beneficio incluyendo la gestión de riesgos operativos, exclusivamente en minas subterráneas. A diferencia de otros sectores industriales, en el negocio minero las empresas son tomadores de precios, producen productos idénticos y los consumidores son indiferentes entre las empresas, donde los consumidores y vendedores cuentan con toda la información relevante de precios, calidad y cantidad. Además, no existen barreras de

entrada o salida, por lo que si hay ganancias en la industria entrarán nuevas empresas al mercado y si hay pérdidas, saldrán empresas del mercado. Según Robert Frank (2009), las empresas que practican estos supuestos son identificados como empresas de competencia perfecta y la decisión que deben tomar para maximizar sus beneficios es fijar el nivel de producto que le permitirá obtener el máximo beneficio posible. Los beneficios se maximizan en el punto en el que un incremento adicional de la producción no altera los beneficios, esta condición establece que la producción que maximiza el beneficio de la firma es aquella en la que el Ingreso Marginal es igual al Costo Marginal.

En este sentido, las empresas mineras son industrias de perfecta competencia que para maximizar sus beneficios es necesario definir un tamaño óptimo de producción (Robert Frank, 2009; María Luisa Maino y Estrella Rosa, 2011). En la actualidad, estos conceptos económicos son puestos en práctica en minería a cielo abierto y están relacionadas directamente con la cantidad de recursos de minerales económicamente explotables. Por otro lado, es de conocimiento que la industria minera es un negocio que requiere muchos años en su evaluación antes de su operación (Estudios preliminares y estudios de ingeniería de detalle) antes de iniciar con la etapa de construcción, la razón está centrada en la gestión de mitigar la incertidumbre en los diferentes riesgos mineros (Legal, geológico, ambiental, social, mercado, operativo, político y financieros). Actualmente, las empresas mineras de clase mundial, en especial las mineras a cielo abierto (Cerro Verde, Chinalco, Antamina), han desarrollado ampliaciones considerando criterios técnicos del yacimiento (leyes bajas) y económicos (ganancias) de escalamiento que no es más que la aplicación de teorías de economía de escala; es decir, cuanto más produce menos es el costo por cada unidad adicional obteniendo así un adicional de beneficio. (Robert Frank, 2009).

El presente trabajo de Maximización de Beneficios y Gestión de Riesgos, considera la aplicación de las teorías económicas y la gestión de riesgos en una operación minera subterránea en marcha. Con la aplicación de las teorías económicas se identifica la maximización de los beneficios a un tamaño de producción de la mina, esto ocurre cuando el Costo Marginal es igual al Beneficio Marginal. Todo el proceso de cálculo para estimar el Máximo Beneficio obedece a cálculos determinísticos; es decir, que todas las variables permanecen constantes en el tiempo y la probabilidad de cumplimiento sería del 100%, lo cual en una operación en marcha no es todo cierto, porque existe incertidumbre

y riesgo de no alcanzar lo calculado. Para estimar la variabilidad de resultados (Real) versus lo planeado (objetivo) se analiza la información histórica de los indicadores técnicos de los procesos operativos en mina y planta, que impactan de forma negativa en la producción de finos y los costos de la operación. Identificado las variables relevantes con impacto negativos se procede a formular acciones correctivas para mitigar el nivel de riesgo asociado con la finalidad de proponer metas físicas realizables que garanticen ganancias alcanzables. Actualmente, se presenta la oportunidad de optimizar las ganancias de las minas subterráneas, aplicando los conceptos modernos de las teorías económicas de la producción aplicadas en minería; evaluación y desarrollo de proyectos mineros con gestión de riesgos, modelos estocásticos, economía de escala con tamaños de producción eficiente, entre otros.

El presente trabajo orientado a la Maximización de Beneficios y Gestión de Riesgos con el objetivo de proyectar planes ejecutables, considera la aplicación de las teorías económicas y la gestión de riesgos en una operación minera subterránea en marcha. Con la aplicación de las teorías económicas se identifica la maximización de los beneficios a un tamaño de producción de la mina, esto ocurre cuando el Costo Marginal es igual al Beneficio Marginal. Todo el proceso de cálculo para estimar el máximo Beneficio se basa en cálculos determinísticos considerando todas las variables constantes en el tiempo (productividad, consumos, disponibilidad y utilización de equipos, entre otros), en este caso la probabilidad de cumplimiento sería tan igual como se estimó, lo cual en una operación minera en marcha no es 100% cierto, ya que existen incertidumbres y riesgos en las operaciones unitarias del proceso de minado y concentración que no permiten alcanzar los objetivos de plan de minado, producción de metal fino, costos estimados. Bajo esta premisa, se procede a estimar la variabilidad de resultados (Real) versus lo planeado (objetivo) se analiza la información histórica de los indicadores técnicos de los procesos operativos en mina y planta, que impactan de forma negativa en la producción de finos y los costos de la operación. Identificado las variables relevantes con impacto negativos se procede a formular acciones correctivas para mitigar el nivel de riesgo asociado con la finalidad de proponer metas físicas realizables que garanticen ganancias alcanzables. Actualmente, se presenta la oportunidad de optimizar las ganancias de las minas subterráneas aplicando los conceptos modernos de las teorías económicas de la producción aplicadas en minería (Frank, 2009; Malli, 2015); evaluación y desarrollo de

proyectos mineros con gestión de riesgos, modelos estocásticos, economía de escala con tamaños de producción eficiente, entre otros.

Los métodos usualmente empleados en la industria minera para efectos de la planificación y decisiones de inversión tienen limitaciones para aplicar los conceptos de gestión de riesgos y la aplicación de criterios estocásticos en la proyección de sus actividades. Por lo que, se busca implementar y desarrollar una metodología específica incluyendo el análisis estocástico con un modelo general de flujo de caja. La aplicación de la metodología para el cálculo de Beneficio Óptimo en yacimientos de minas subterráneas incluyendo un modelo estocástico (riesgos) generará un plan de minado robusto, flexible y ejecutable, que a su vez brindará un valor agregado a la empresa minera evitando pérdidas económicas. Se afirma: “La cuantificación, evaluación y gestión de la incertidumbre del cuerpo mineral es fundamental para la planificación estratégica de minas.” (Godoy & Dimitrakopoulos, 2011:1).

Para efectos del presente trabajo de investigación, la aplicación del modelo estocástico (modelo probabilístico de variables aleatorias) consta de 3 fases fundamentales: Primero, se identifican las variables críticas e inciertas; es decir, que tienen un mayor impacto en el Plan de minado mediante un análisis de sensibilidad o un matriz de riesgos posibles. Segundo, se cuantifican las incertidumbres de las variables identificadas y seleccionadas en la fase anterior, mediante la data histórica y aplicación de herramientas estadísticas, de esta forma, se obtendrán las distribuciones de probabilidad adecuadas y estadísticos de cada variable. Finalmente, se evaluará los riesgos mediante el software @Risk que incluye la Simulación de Monte Carlo. Esta nos brindará información de valores de VAN y probabilidad de éxito en cada escenario según el nivel de confianza que se requiera. Además, a partir de esto se desarrollará un plan de acciones específicas para mitigar los riesgos con sus respectivas inversiones.

El sustento de un Negocio Minero está centrado en la cantidad y calidad de sus Recursos de mineral económicamente explotables como soporte fundamental del valor en el negocio. Los depósitos minerales, que constituyen la base geológica para el suministro minero son: inicialmente desconocidos, fijos en tamaño, variables en calidad y fijos en ubicación.

La falta de crecimiento supone un riesgo para el negocio y podemos anotar que las desventajas de una reducida capacidad de crecimiento pueden ser: Limitadas posibilidades de crear valor, dificultad para sostener negocio en el tiempo, ausencia de expectativas del mercado, vulnerabilidad frente a «take-overs» (adquisiciones); imposibilidad de atraer talento; esto se resume en el tiempo como pérdida de valor y «muerte».

Por otro lado, las ventajas de desarrollar capacidades para crecer, va crear valor para el accionista, se puede sostener el negocio en el tiempo, mejores posibilidades de capturar oportunidades del mercado, atraer y conservar talento y generar expectativas positivas en el mercado, esto se resume en el tiempo de generar mayor valor y “blue sky”.

Como objetivos generales tenemos los siguientes:

- Optimizar los beneficios de las minas subterráneas con un tamaño óptimo de producción, considerando la gestión de riesgos operativos identificados.
- Desarrollar una metodología práctica para determinar el tamaño óptimo de producción de las minas subterráneas con la aplicación de teorías económicas

Además, entre los objetivos específicos tenemos:

- Disponer de data histórica sistematizada y actualizada de anomalías operativas para evaluarlas cuantitativamente y obtener información estadística (mínimos, máximos, variabilidad, distribución de probabilidad más adecuada, correlación y entre otros), las que nos servirá para el análisis probabilístico.
- Identificar los riesgos operativos relevantes y proponer planes de acción para mitigarlos con el propósito de que los planes operativos sean realizables.
- Analizar los resultados de máximo beneficio del tamaño óptimo de producción de la mina caso (San Cristóbal), mediante la comparación del modelo determinístico y estocástico, calculando la probabilidad de éxito y el valor actual neto. (Comparar el Modelo Base sin Riesgo, Modelo Base con Riesgo y el Modelo con Gestión de Riesgos).

CAPÍTULO 1 POSTULADOS TEÓRICOS

1.1 El negocio minero y la generación de valor.

La industria minera se caracteriza por la producción de recursos minerales no renovables, es un negocio de largos años de vida útil y de alto riesgo, el proceso productivo se inicia con la prospección y exploración de recursos minerales, la explotación de los minerales comerciales, concentración de dichos minerales para ser comercializados a las fundiciones para obtener el metal fino que finalmente llegará a las industrias generando valor agregado entendiendo en términos de marketing como un servicio extra al producto, para satisfacer los requerimientos de las personas a nivel mundial, desde medicamentos, utensilios, autos, aviones, construcción, electrónica, entre otros.

Para el caso de un negocio minero, la generación de valor agregado o valor añadido se entiende en términos económicos, financieros y contables como la diferencia entre el valor de los concentrados producidos a los precios de mercado de los metales y los costos realizados en la extracción del mineral y el proceso de tratamiento para obtener el concentrado. En este caso, se comercializa concentrados de zinc, plomo y cobre como metales básicos y como sub productos, dos metales preciosos: la plata y el oro.

En general, en la industria minera mundial, la identificación del máximo valor conlleva a sopesar variables endógenas, las cuales asumimos que podríamos medir, controlar y/o estimar su probabilidad de ocurrencia; por ejemplo, el tamaño de producción de la mina y planta, los niveles nivel de costos de operación (Costos fijos y variables y/o costos directos e indirectos), los gastos de inversión o capital de inversión para el sostenimiento de la operación, ejecución de nuevos proyectos de mejoras y trato con las comunidades y medio ambiente. Hoy en día, una de las tendencias mineras más importantes en minería es la “innovación” ya que está probado que conlleva a reducir costos (Báez, 2015:1-5). Por otro lado, se tienen las variables exógenas que están determinadas por factores o variables que no son controladas por la operación, tal es el caso, de los precios o cotización de los metales y las tasas tributarias definidos por el gobierno.

1.2 Vida óptima económica y ritmo óptimo económico de producción

Para determinar la vida óptima económica (VOE) y el ritmo óptimo económico (ROE) en una operación minera ya sea con explotación a cielo abierto o por sub suelo (Subterránea), se cuenta con fórmulas empíricas antiguas que son bastante conocidas (Taylor – 1976, Mackenzie – 1982 y Jimeno - 1986). También se cuentan con teorías económicas para definir el tamaño óptimo de producción y maximización de beneficios en un horizonte de vida (Frank – 2009, María Luisa Maino & Estrella Rosa – 2011, Libby Rittenberg & Timothy Tregarthen – 2012). Estos conceptos serán discutidos con más detalle en los párrafos siguientes, ya que engloba el tema de investigación.

Para estimar el tamaño de producción de una operación minera, tradicionalmente se cuenta con una serie de fórmulas empíricas basadas en estadísticas de tamaños de producción de minas. Generalmente son de aplicación en una primera fase de los estudios conceptuales y/o de pre factibilidad.

La primera fórmula es la denominada Regla de H. K. Taylor (1976), aplicada a cualquier tipo de yacimiento y método de explotación. La fórmula que presenta es:

$$VOE^1 = 6.5 \times (\text{Reservas en Mt})^{0.25} \times (1 \pm 0.2)$$

$$ROP^2 = 0.15 \times (\text{Reservas en Mt})^{0.75} \times (1 \pm 0.2)$$

Uno de los parámetros más importantes que intervienen en estas fórmulas de Taylor son las reservas de mineral (mineral comercial), donde cada tonelada de mineral explotado, procesado y comercializado genera un beneficio económico. Las constantes son cantidades resultantes de estadísticas de casos reales al igual que todas las fórmulas empíricas.

Según el Código australiano JORC, el cual brinda estándares mínimos para reportar, declarar e informar sobre Recursos Minerales y Reservas de Mena, define que:

¹ VOE, Vida Óptima Económica, Vida Útil que hace máximo el VAN del proyecto. (C. López Jimeno, 1986)

² ROP, Ritmo Óptimo de Producción, Ritmo de explotación que maximiza el VAN del proyecto. (C. López Jimeno, 1986)

“An ‘Ore Reserve’ is the economically mineable part of a Measured and/or Indicated Mineral Resource. It includes diluting materials and allowances for losses, which may occur when the material is mined or extracted and is defined by studies at Pre-Feasibility or Feasibility level as appropriate that include application of Modifying Factors. Such studies demonstrate that, at the time of reporting, extraction could reasonably be justified” (2012:16)³

La segunda fórmula es de Brian Mackenzie (1982), quien propuso las fórmulas distinguiendo el método de explotación, en función a las reservas de mineral:

ROP para minas subterráneas (t/año): = 4.22 x (Reservas en t)^{0.756}

ROP para minas a cielo abierto (t/año) = 5.63 x (Reservas en t)^{0.756}

Estas fórmulas son sencillas e interesantes, pero sus autores no especifican la base estadística o método empleado para su determinación.

La tercera fórmula es de López Jimeno (1986), quien presenta fórmulas que estiman la vida óptima económica de explotación por tipo de mineral, cobre, plomo – zinc y oro. Para determinar dicha fórmula, López Jimeno recopiló información de datos de minas en explotación y desarrollo y efectuó diversos análisis de regresión para ajustar unas curvas del tipo potencial ($y=a \cdot x^b$), donde “y” es la vida útil de explotación y “x” las reservas minables. A continuación, se muestran las fórmulas obtenidas.

Cobre: VOE (años) = 5.35 x (Reservas en Mt)^{0.273}

Oro: VOE (años) = 5.08 x (Reservas en Mt)^{0.31}

Plomo – Zinc: VOE (años) = 7.61 x (Reservas en Mt)^{0.275}

³ Traducción Libre

“Una ‘Reserva de Mena’ es la parte económicamente minable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Esto incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas, que pueden ocurrir cuando el material es minado o extraído y es definida por estudios apropiados a nivel de Pre Factibilidad o Factibilidad que tienen en cuenta la aplicación de Factores Modificadores. Tales estudios demuestran que, al momento de reportar, la extracción podría razonablemente ser justificada.” (JORC Code,2010:16)

Conforme a M. Bustillos/C. López Jimeno, recomiendan que “todas estas fórmulas deben ser aplicadas con cierta precaución, teniendo en cuenta algunos defectos que derivan de la omisión de todo un conjunto de factores” (2012:486).

Desde un punto de vista crítico, todas las expresiones mencionadas anteriormente fueron basados exclusivamente en una variable, las reservas de mineral, omitiendo variables relevantes como la ley de corte (Cut Off), leyes de mineral, recuperaciones metalúrgicas, leyes de concentrados, precios de minerales, costos de producción, gastos de inversión, tasas de descuento, entre otros. Para este caso de estudio, utilizaremos las fórmulas empíricas para comparar con el resultado obtenido después de aplicar las teorías económicas.

1.3 Teorías económicas

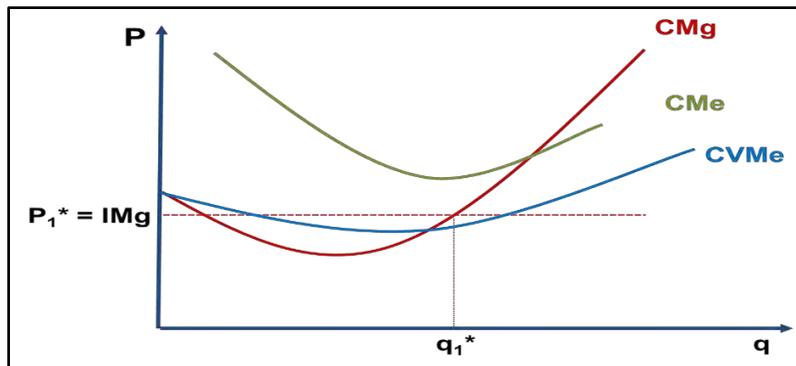
La limitación y restricción del VOE y ROE está centrada en el uso de una sola variable, en este caso, las reservas de mineral, cuyos resultados son ajustados en el proceso de implementación. A continuación, se presentan tres teorías económicas que maximizan beneficios a un Ritmo Optimo Económico – ROE, “tamaño óptimo de producción” en microeconomía.

En economía, de acuerdo a las teorías microeconómicas, define a las empresas mineras como mercados de competencia perfecta (Frank, 2009:304-346) a razón de que son industrias tomadoras de precios del mercado y producen productos homogéneos, idénticos (Commodities) y sus consumidores son indiferentes entre las empresas.

En economía, el tamaño de producción que maximiza los beneficios de la empresa perfectamente competitiva ocurre cuando el Precio de Mercado (P_1) es igual al ingreso marginal (IMg). La **Figura 1**, muestra el punto de máximo beneficio y se encuentra en la intersección de las curvas de precio con el Costo Marginal ($P = CMg$). Y el nivel de producción que maximiza los beneficios es q^1 .

De acuerdo a María Luisa Maino y Estrella Rosa (2011:203), indica que: “La condición de maximización de la firma en el largo plazo se da cuando el precio se iguala con el costo marginal de largo plazo. Además, en el largo plazo dado que no existen costos fijos para que la empresa decida producir el precio debe ser mayor o igual al costo medio total”.

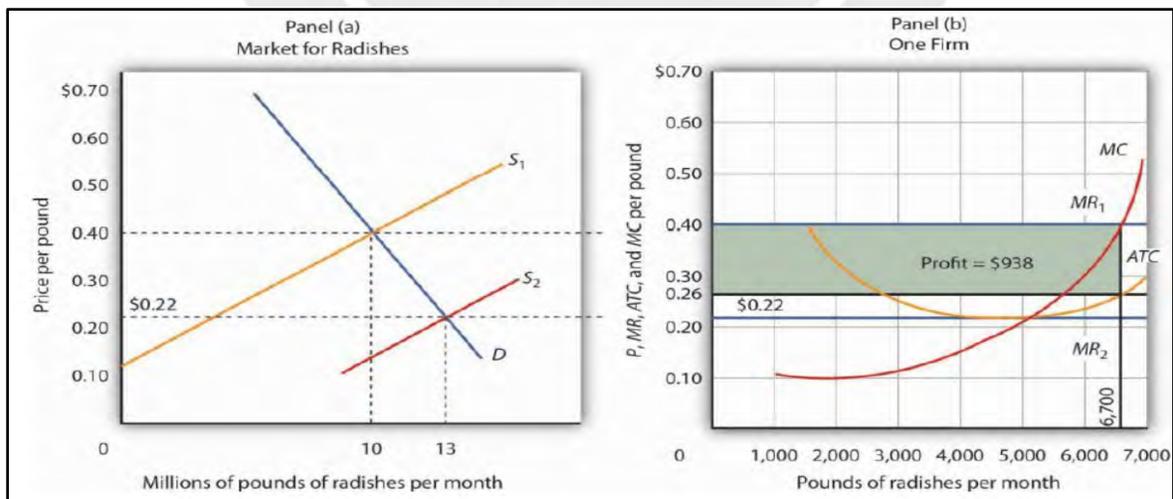
Figura 1: Maximización de beneficios de una empresa perfectamente competitiva



Fuente: Maino & Rosa (2011)

En la **Figura 2**, según Libby Rittenberg y Timothy Tregarthen, las curvas de S_1 , S_2 , MC , MR_1 , ATC , MR_2 , donde el área conformada por los puntos: US\$ 0.22, MR_2 , US\$ 0.40 y MR_1 , representa el área de máximo beneficio de un mercado competitivo en el largo plazo. Estos puntos de intersección resultan igualando el ingreso marginal de largo plazo (MR) o precio (P) con el costo marginal de largo plazo (MC) el cual debido al ingreso de nuevas empresas competidoras hará que se reduzca el precio (ver Panel a) hasta un nivel inferior que iguale al costo medio de largo plazo ocasionando cero beneficios.

Figura 2: Aplicación de la regla de decisión marginal



Fuente: Libby Rittenberg & Timothy Tregarthen (2012)

Al igual que Rittenberg & Tregarthen, Frank precisa: Q_1^* , que es el nivel de producción que maximiza el beneficio de cada empresa, nivel de producción en el que $P^* = CMC^*$.

En el **Figura 3**, Si el precio comienza siendo superior a P^* , continúa entrando empresas y siguen ajustándose los stocks de capital de las empresas ya existentes hasta que el desplazamiento de la curva de oferta de la industria hacia la derecha hace que el precio descienda a P^* . En P^* , el nivel de producción que maximiza el beneficio de cada empresa es Q_i^* , que es el nivel de producción en el que $P^* = CMC^* = CML = CMeC^*$. Los beneficios económicos de todas las empresas son iguales a cero.

Donde:

P^* : Precio

Q^* : Producción que maximiza los beneficios

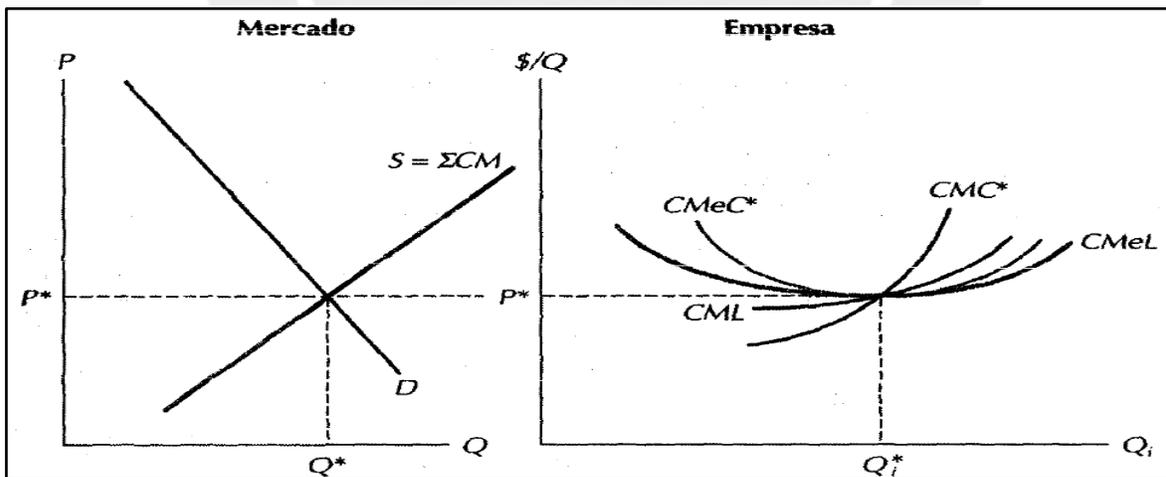
CMC^* : Costo Marginal del Capital

CML : Costo Marginal de Largo Plazo

$CMeC^*$: Costo Medio de Capital

$CMeL$: Costo Medio de Largo Plazo

Figura 3: Equilibrio a largo plazo en condiciones de competencia perfecta



Fuente: Frank (2009)

1.4 Teorías económicas aplicadas en minería

Actualmente, en la evaluación de proyectos mineros a cielo abierto, se usan modelos económicos en software mineros que permiten determinar el máximo beneficio del proyecto, considerando variables técnicas y económicas como diseño de la mina (talud entre rampas, talud final), costos operativos, costos de inversión, ley de corte, ley de mineral y considerando el Valor Actual Neto (VAN), que está dirigido a determinar el beneficio óptimo, la capacidad óptima de producción, la vida útil económica de la mina que son los principales parámetros en estudio de factibilidad de los proyectos mineros.

Basado en las teorías económicas, desarrollamos un ejemplo numérico presentado en el **Tabla 1**, que muestra las diferentes variables que toma en cuenta para identificar el tamaño óptimo de producción que proporciona el máximo beneficio, esto ocurre cuando el precio es igual al costo Marginal ($P = CMg$), siendo q^1 el nivel de producción que maximiza los beneficios.

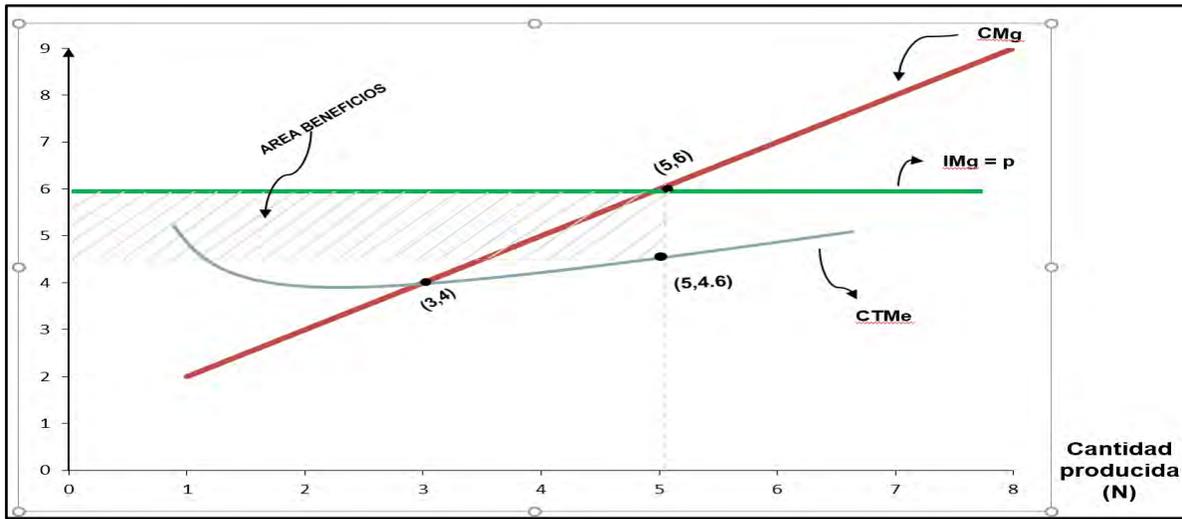
Tabla 1: Matriz de variables para maximizar beneficios a un tamaño óptimo de producción

Cantidad	Ingreso total	Costo total	Beneficio	Ingreso marginal	Costo marginal
(t)	US\$	US\$	US\$	US\$	US\$
Q	IT	CT	IT-CT	IM	CM
				($\Delta IT/\Delta Q$)	($\Delta CT/\Delta Q$)
0	0	3	-3		
1	6	5	1	6	2
2	12	8	4	6	3
3	18	12	6	6	4
4	24	17	7	6	5
5	30	23	7	6	6
6	36	30	6	6	7
7	42	38	4	6	8
8	48	47	1	6	9

Adaptado de: Gala (2017)

Con los resultados de la tabla calculamos el Beneficio Máximo (BM) que es igual al Precio (P) menos el Costo Total medio (CTMe) por la Cantidad Producida (Q), ($BM = P - CT / Q$). Donde el Costo Total Medio (CTM) es igual al cociente del Costo Total (CT) entre la Cantidad Producida (Q), reemplazando se obtiene US\$ 7, que sería el Beneficio Máximo.

Figura 4: Representación gráfica de variables definir el máximo beneficio a un tamaño óptimo de producción



Fuente: Gala (2017)

$$\text{Beneficios} = (P - \text{CTMe}) * Q; = (6 - 4.6) * 5 = 7$$

En Minería:

$$\text{Beneficio} = (\text{VM unitario} - \text{costo unitario total}) * Q$$

$$\text{Beneficio} = (\text{Ley} * \text{precio} * f - \text{costo unitario total}) * Q$$

En minería, el ingreso marginal es el valor del mineral unitario y el costo marginal es la variación de los costos totales por el incremento de una unidad adicional de producción.

Los autores Tahir Malli, Cagatay Pamukcu and Halil Köse (2015: 62-70) con ayuda de un software desarrollado, determinaron la capacidad óptima de producción y vida de la mina considerando el VPN en minas a cielo abierto a diferentes ángulos final del tajo abarcando parámetros como los costos operativos, gastos de inversión, características geomecánica del cuerpo de mineral y las rocas circundantes, capacidad de excavación y la estabilidad de taludes relacionada con el ángulo final del tajo. En este estudio, se evalúan 15 escenarios que finalmente reporta el mayor VAN, demostrando que no necesariamente un mayor VAN es el mejor. En este caso la decisión de optar por un escenario cobra relevancia la seguridad del personal y los equipos, optando por un ángulo final conservador. Por otro lado, la inversión inicial de la maquinaria y la depreciación de la maquinaria son dos factores clave que determinan con precisión la capacidad de producción óptima en una mina a cielo abierto.

En nuestro caso de estudio se busca maximizar los beneficios de las minas subterráneas en actual operación con un tamaño de producción ejecutable previa evaluación y mitigación de riesgos operacionales. El objetivo es determinar una metodología práctica con el uso de las teorías económicas aplicadas a la minería considerando escenarios con diferentes tamaños de producción, costos de operación (OPEX, Operating Expense), gastos de capital de inversión (CAPEX, Capital Expenditure) para determinar el valor de operación por escenario. El escenario seleccionado será el que presente fundamentalmente un mayor Valor Actual Neto (VAN). También se sabe, que un ritmo de producción demasiado exigente, demanda una gran inversión que tal vez no alcance a recuperarse dado que disminuye la vida de la mina.

1.5 Herramientas Financieras para evaluación de proyectos

Al tener como objetivo maximizar el beneficio de la empresa, es de prioridad conocer si los proyectos propuestos generarán valor o no; por lo que, se requiere de la evaluación financiera de proyectos. Entre las herramientas financieras mencionadas, tenemos a las siguientes:

VAN – el método del VAN es la más utilizada y racional pues considera todos los flujos efectivos de un proyecto.

Payback – tiene el inconveniente de no tener una guía histórica de fecha de corte, no considerar la oportunidad de los flujos de efectivo en el periodo de recuperación (el payback descontado sí controla esta última condición) y el flujo posterior al periodo.

TIR – que tiene la desventaja de cambiar la regla de decisión dependiendo si es financiamiento o inversión y de tomar valores múltiples por motivo de flujos contrarios (positivos y negativos) durante el tiempo del proyecto (la TIR modificada salva este inconveniente) y finalmente,

B/C – no muestra la escala de los flujos del proyecto.

(Ross, Westerfield & Jaffe, 2009:135-159)

Para concluir cabalmente un proyecto, dentro de la evaluación financiera, se incluye estimaciones de CAPEX, OPEX y evaluación económica, según el nivel precisión que se necesite de acuerdo a la fase del proyecto (Conceptual, Pre Factibilidad o Factibilidad).

Según Pincock Perspectives, los requerimientos mínimos de reporte para proyectos mineros en cuanto a CAPEX y OPEX se detallan a continuación: un Estudio de Ingeniería

Conceptual consta de una estimación de CAPEX con una precisión de $\pm 50\%$ y un OPEX con $\pm 35\%$, un Estudio de Pre Factibilidad consta de una estimación de CAPEX con una precisión de $\pm 25\%$ y un OPEX con $\pm 25\%$ y un Estudio Factibilidad consta de una estimación de CAPEX con una precisión de $\pm 15\%$ y un OPEX con $\pm 15\%$. (2015:11-12).

1.6 Modelo Determinístico

A pesar, de estos nuevos conceptos de teorías económicas, herramientas financieras y estudios de ingeniería a nivel Conceptual, Pre Factibilidad y Factibilidad, aún existe una gran limitación, el cual es asumir que las variables independientes y dependiente involucradas en los análisis, optimizaciones o evaluaciones constan de funciones constantes y que son conocidas con certeza; es decir, se mantienen constantes en el tiempo. Dicho concepto se define como modelo determinístico. Según Sepúlveda, menciona que: “el modelo Determinístico, a partir de unas entradas conformadas fundamentalmente por: modelo geológico (recursos y reservas); infraestructura (limitaciones y oportunidades); finanzas (inversiones; precios y costos); escenarios operativos (reservas; leyes de corte, y niveles de extracción o explotación); datos operativos (relación estéril/mineral; dotaciones y equipos – maquinaria), dan como resultado fijo unas salidas del planeamiento minero y que comprenden: la curva tonelaje-ley, la vida de la mina, el flujo de caja del proyecto minero, entre otros.” (2017:9-10). Se puede rescatar, que los resultados obtenidos aplicando el modelo Determinístico son únicos y fijos para un determinado conjunto de variables de entrada (inputs).

1.7 Incertidumbre, Riesgo y tipos de riesgos

Es por ello, que surgió el requerimiento de incluir los riesgos en la evaluación financiera, que es de vital importancia ya que, gracias a ello, se visibilizará el riesgo inherente a la información que se utiliza en el desarrollo de proyecciones y las posibilidades que estas proyecciones se aproximen a sus valores esperados. De esta manera, se tendrá un plan minero robusto para la adecuada toma de decisiones, todo lo contrario, cuando se utiliza el Modelo Determinístico, el cual aún se continúa utilizando en minería subterránea. Para tener un mejor entendimiento sobre la incertidumbre y riesgo, tenemos los siguientes conceptos:

Las incertidumbres consisten en amenazas y oportunidades que pueden no ser aceptables o sí por una organización con el potencial de destruir o agregar valor. Según

National Research Council, conceptualiza la incertidumbre como: “The term ‘uncertainty’ is normally used to describe a lack of sureness about something or someone, ranging from just short of complete sureness to an almost complete lack of conviction about an outcome”. (2000:41)⁴

Según el ISO 31000, que es la norma internacional para la gestión de riesgo, define riesgo como: “effect of uncertainty on objectives” (2018:1)⁵

Según Cabeza & Torra, existen tres grandes grupos de riesgos dentro de una empresa, estos pueden ser operativos, financieros y del entorno. Los riesgos operativos se relacionan con una posible pérdida de un fallo en procesos de producción, personal, sistemas y acontecimientos externos. Para el caso de minería serían, la inadecuada estimación de recursos y reservas, inundaciones en las labores, baja disponibilidad mecánica, CAPEX, OPEX, términos comerciales, entre otros. Los riesgos financieros se refieren a los créditos, condiciones del mercado, liquidez, reinversión y sistema. Para la minería los riesgos financieros serían las tasas de interés, cobros retrasados, etc. Finalmente, los riesgos del entorno se refieren a los entornos legales, estratégicos, reputaciones, país. Para el caso de minería sería el precio de los commodities, conflictos sociales, etc. Para este trabajo de investigación, considerarán principalmente los riesgos operativos de la unidad minera y en menor medida de los riesgos financieros y del entorno. (Cabeza & Torra, 2007:08 - 18)

1.8 Gestión de Riesgos en Proyectos

Según GEM Chile, menciona que: “el análisis se concentra en una de las razones más comunes e importantes por las que los compromisos productivos no se cumplen: la materialización de riesgos relevantes en el transcurso de la vida de la operación que no son tomados en cuenta al momento de generar el plan minero.” (2013:1). De acuerdo a lo señalado previamente, para la realización óptimo y confiable de un plan minero se

⁴ Traducción Libre

“El término ‘incertidumbre’ es normalmente usado para describir una falta de seguridad sobre algo o alguien, que va desde un poco de seguridad hasta una casi falta completa de convicción sobre el resultado.” (National Research Council, 2000:41)

⁵ Traducción Libre

“Efecto de la incertidumbre sobre los objetivos” (ISO,2018:1)

requiere analizar e incluir los riesgos más críticos de la operación; es decir, aplicar Gestión de Riesgos. El cual tiene como etapas principales: la identificación de las incertidumbres, cuantificación de las mismas, categorización, evaluación y gestión de riesgos. (Cerde, 2016:16)

La Gestión de Riesgos consiste en el proceso de planificación, identificación, análisis, desarrollo de acciones e implementación de planes de respuestas y control de riesgos e incertidumbres de la organización. (PMBOK, 2013:309); según el ISO 31000, indica que la gestión de riesgos es: "coordinated activities to direct and control an organization with regard to risk." (2018:1)⁶

La clave para gestionar de manera exitosa los riesgos de una organización, es ser proactivo y tener un balance o equilibrio en asumir riesgos que tienen potencial de generar valor agregado y evitar aquellos que la organización no podrá soportar.

Actualmente, la metodología más conocida y utilizada para la Gestión de Riesgos por las organizaciones es el del PMI (Project Management Institute) y la norma internacional guía es la ISO 31000 (Bravo, 2017:18-31). En caso, de minería a Cielo abierto se validó el modelo planteado por la empresa GEM que permitió evaluar técnicamente y económicamente el plan quinquenal de una mina específica en Chile (Cerde, 2016: 17).

1.9 Tipos de Análisis de Riesgos

Los riesgos mencionados previamente podrán ser analizados según los siguientes tipos:

1.9.1 Análisis Cualitativo de Riesgos

Priorización de riesgos que tiene una organización con el fin de analizarlos posteriormente. Es un análisis sencillo, económico y rápido de ejecutar que nos brinda una base para aplicar el análisis cuantitativo o directamente planificar la respuesta a los riesgos prioritarios. Dicho proceso es realizado durante el ciclo del proyecto en su totalidad e incluye el estudio de la probabilidad de ocurrencia y el impacto de los riesgos respectivos.

⁶ Traducción Libre

"Actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización en lo relativo al riesgo." (ISO,2018:1)

Entre las herramientas y técnicas que se efectúan para el análisis cualitativo de riesgos, se tiene a:

- Reuniones o entrevistas
- Matriz de probabilidad e impacto.
- Evaluación de la calidad de datos sobre riesgos.
- Categorización de riesgos.
- Evaluación de la Urgencia de los riesgos.
- Juicio de expertos.

Normalmente se utiliza la Matriz de probabilidad e impacto, donde los riesgos se clasifican por aceptables, tolerables y no tolerables. (PMBOK, 2013:328-333)

1.9.2 Análisis Cuantitativo de Riesgos

Análisis numérico del efecto o consecuencia de los riesgos más sensibles definidos en el proceso Cualitativo de Riesgos. Dicho proceso tiene el objetivo de simplificar la toma de decisiones para mitigar o reducir los riesgos significativos de una organización. Como principales herramientas y técnicas para la realización del análisis cuantitativo, se tiene a:

- Técnicas de recopilación y representación de datos (entrevistas y distribuciones de probabilidad).
- Técnicas de análisis cuantitativo de riesgo y modelado (análisis de sensibilidad, análisis del valor monetario esperado y modelado y simulación).
- Juicio de expertos.

(PMBOK, 2013:333-341)

1.10 Modelo Estocástico y Metodología

La aplicación del Modelo Probabilístico, también denominado Modelo Estocástico, según Sepúlveda: “corresponde a un problema de optimización en el que algunos de sus parámetros son variables aleatorias, cuyas funciones de distribución de probabilidad son conocidas. Como estas funciones son no lineales, es muy difícil resolverlo con algoritmos tradicionales y en tiempos razonables”. (2017:20)

Este modelo se vincula con la simulación Monte Carlo, el cual lleva el nombre del famoso casino europeo debido a que los proyectos se analizan de igual forma que las estrategias de juegos de azar. Según Sepúlveda, afirma que:

“Es un método no determinista de evaluación de muchos posibles escenarios y posibles decisiones, relacionados mediante ecuaciones complejas y costosas computacionalmente de evaluar. El método genera eventos aleatorios que siguen las funciones de distribución de cada variable aleatoria y para cada combinación de eventos calcula los resultados de las ecuaciones que desea evaluar como salida”. (2017:21)

De lo expuesto, se deduce que el resultado de dicha simulación es una distribución de probabilidad de la variable dependiente, bajo las iteraciones aleatorias de todas las variables independientes del modelo básico. El procedimiento para la aplicación del modelo Estocástico con simulación Montecarlo, se inicia con la definición del modelo básico; es decir, con la función objetivo, su variable dependiente (en nuestro caso el VAN) y las variables independientes que incluyen dicho modelo (en nuestro caso los riesgos operativos y del entorno). Para la identificación de estas variables aleatorias, las cuales pueden ser discretas o continuas, se realizará previamente un análisis de sensibilidad, que es una herramienta entendible y fácil de aplicar; sin embargo, no permite el análisis simultáneo de variables, ni la correlación entre ellas.

“Si X es una variable aleatoria continua la probabilidad de que X tome un valor determinado generalmente es cero. Por tanto, no podemos definir una función de probabilidad en la misma forma que para una variable aleatoria discreta. Para llegar a una distribución de probabilidad para una variable aleatoria continua notamos que la probabilidad de que X se encuentre entre dos valores diferentes tiene significado.” (Spiegel, 2017:41)

Además, dicho modelo básico se evaluará y validará con información histórica, el cual es un tipo de modelo por definición.

El segundo paso, es la especificación de una distribución de probabilidad por cada variable aleatoria del modelo, estas distribuciones pueden ser definidas mediante dos metodologías: la primera de ellas es cuantificarla con data histórica que se tenga en las cartas mensuales y la segunda es realizando un taller con profesionales especialistas en la materia definiendo mínimos, máximos y valor más probable de cada variable aleatoria.

Además, para variables cualitativas, si es que se consideran en dicho trabajo de investigación, se podrá obtener información mediante la matriz de riesgos; estableciendo frecuencia y severidad.

La distribución de una variable aleatoria discreta se denomina función de cuantía, entre las principales y más comunes tenemos a Bernoulli, Binomial, Poisson, Geométrica y Negativa Binomial, las cuales describimos a continuación:

- Distribución Bernoulli.

Esta distribución está definida por un experimento aleatorio cuyos dos únicos resultados son excluyentes entre sí, éxito o fracaso. Consta de solo un parámetro: probabilidad de éxito y se define por la siguiente función de cuantía:

$$\Pr(x) = p^x(1 - p)^{1-x}; x = 0,1$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

- Distribución Binomial.

Es el resultado de repetir sucesivamente el experimento de Bernoulli manteniendo constante la probabilidad de éxito. Es definida por dos parámetros: número de repeticiones de un ensayo de Bernoulli y probabilidad de éxito. Es definida por la siguiente función de cuantía:

$$\Pr(X = x) = \binom{n}{x} p^x(1 - p)^{n-x}; si x = 0,1, \dots, n.$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

- Distribución Poisson.

Esta distribución se utiliza para modelar el número de observaciones independientes que suceden a una velocidad constante sobre el espacio o tiempo. Se define por un solo parámetro: número promedio de observaciones por unidad de medida. Su función de cuantía es definida por:

$$\Pr(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, si x = 0,1, \dots$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

- Distribución Geométrica.

Consiste en contar el número de pruebas de Bernoulli necesarias para obtener el primer éxito. Está definida por un solo parámetro: probabilidad de éxito. Su función de cuantía es dada por:

$$\Pr(X = k) = p(1 - p)^k, \text{ si } k = 0, 1, 2, \dots$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

Mientras que para una variable continua se llama función de densidad, entre las más utilizadas tenemos a la Normal, PERT, Triangular, Gaussiana Inversa y Log Logística. A continuación, detallamos más información sobre estas distribuciones:

- Distribución Normal.

Es la distribución más importante debido a que gran cantidad de variables aleatorias son descritas por ella. Se caracteriza por tener el parámetro de escala y de localización. Su función de densidad es definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right\}, -\infty < x < \infty$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

- Distribución Beta o PERT.

Es una de las distribuciones más flexibles para modelar variaciones porque consta de dos parámetros (alfa y beta) que incrementa su variedad de forma y tiene la siguiente función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{B(p, q)} x^{p-1} (1 - x)^{q-1}, 0 < x < 1$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

- Distribución Triangular.

Esta distribución está definida por tres parámetros: el valor mínimo, valor más probable y el valor máximo. El grado de asimetría de la distribución está relacionado con el valor más probable.

- Distribución Gaussiana Inversa o Wald.

Es utilizada para ajustar datos relativos al coste de las observaciones. Se define por dos parámetros: media y forma. Tiene la siguiente función de densidad:

$$f(x) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{2\mu^2 x}(x - \mu)^2\right\}, x > 0$$

(Gómez, 2009:14)

- Distribución de Valor Extremo o de Gumbel.

Se define por dos parámetros: moda y escala, mientras mayor sea su parámetro escala mayor será su varianza. Dicha distribución se aplica para describir el valor más amplio de una observación u suceso en un determinado periodo de tiempo.

$$f(x) = e^{-x} e^{-e^{-x}} > 0$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

- Distribución Log Logística.

Es definida por tres parámetros: escala, ubicación y valor umbral. También conocida como Distribución de Fisk.

$$f(x) = \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1}}{\left(1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right)^2}$$

(Cabeza & Torra, 2007:95-114)

El muestreo se puede dar de dos formas, una por el método latino Hipercúbico y otra por Montecarlo, el primero consta de una mayor precisión debido a que el proceso de muestro lo realiza por franjas a lo largo de toda la distribución de la variable aleatoria en cambio el segundo lo ejecuta de manera general.

Para definir las distribuciones de probabilidad en variables aleatorias con data histórica se deben previamente determinar los momentos de dicha variable; es decir parámetros que dan la caracterización a la función de densidad o cuantía. El primer momento (media, mediana y moda) define la localización de la distribución, el segundo momento (desviación estándar) define cuan dispersa es la variable, el tercer momento (asimetría) y cuarto momento (curtosis), donde se concentra la mayor parte de valores de dicha

variable. (Cabeza & Torra, 2007:87) Por experiencia, normalmente para cronogramas y costos se utilizan distribuciones PERT y Triangular, y para variable como precio, una distribución Log Normal.

Entre los criterios y estadísticos utilizados en la selección de distribución de probabilidad se tienen los siguientes:

- **Criterio de Información de Akaike (AIC).**

Se define mediante la siguiente ecuación:

$$AIC_j = -2 \ln(L_j(\hat{\Phi})) + 2p_j$$

Donde:

L_j = función de verosimilitud evaluada en el estimador del vector de parámetros

p_j = número de parámetros de dicha función.

(Flowers, Ortiz, Burgos, León & Balladares, 2017:55-78)

- **Criterio de Información Bayesiano (BIC).**

Se define mediante la siguiente ecuación:

$$BIC_j = -2 \ln(L_j(\hat{\Phi})) + p_j \ln(n)$$

Donde:

L_j = función de verosimilitud evaluada en el estimador del vector de parámetros

p_j = número de parámetros de dicha función.

En ambos criterios de información, se selecciona la distribución cuyo valor sea más pequeño, prefiriendo distribuciones de 2 parámetros debido al segundo término de sus ecuaciones respectivas. (Flowers, Ortiz, Burgos, León & Balladares, 2017:55-78)

- **Estadístico Chi-Cuadrado.**

Puede aplicarse para cualquier tipo de variable aleatoria; sin embargo, tiene la limitación de que requiere un tamaño mínimo de muestra de 25 observaciones. Se define de la siguiente forma:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde:

χ^2 = medida de discrepancia entre las frecuencias observadas y esperadas.

o_i = frecuencia del valor observado.

e_i = frecuencia del valor esperado.

k = número de intervalos.

(Cabeza & Torra, 2007:117-122)

- **Estadístico Kolmogorov-Smirnov.**

Permite determinar el grado de acuerdo o desacuerdo entre la distribución empírica de una muestra y una distribución teórica específica de una población. De manera que, si hay diferencia significativa entre estas, se podrá afirmar que la muestra no procede de la población. Se define mediante la siguiente expresión matemática:

$$KS = \max_{1 \leq i \leq n} \left[F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right]$$

Donde:

x_i = observaciones.

i = número de orden de la observación X_i .

$F(x_i)$ = función de distribución teórica.

n = número de observaciones.

(Cabeza & Torra, 2007:117-122)

- **Estadístico Anderson-Darling**

Asigna ponderación diferente a las discrepancias entre la distribución empírica y la teórica, además se considera más confiable y potente que el estadístico K-S para encontrar discrepancias en las colas de las distribuciones. Se define en la siguiente ecuación:

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)[1 - F(x)]} f(x) dx$$

Donde:

$f(x)$ = función de distribución de probabilidad teórica.

$F(x)$ = función de distribución empírica.

n = número de observaciones.

(Cabeza & Torra, 2007:117-122)

El tercer paso es la generación de resultados aleatorios y la ejecución de iteraciones del modelo de simulación definido y finalmente el cálculo del VAN con una determinada probabilidad de éxito.

1.11 Software especializados en riesgos y probabilidades

Con la finalidad de aplicar estos modelos, existen varios tipos de software para la realización de estas simulaciones; entre estos tenemos los siguientes:

1.11.1 Minitab

Es un software netamente estadístico que consta con un árbol interactivo para decidir óptimamente la herramienta a utilizar. Además, de obtener resultados confiables a partir del análisis de datos y la facilidad para interpretar los mismos. (Minitab, 2018).

1.11.2 Arena Simulador

Es un software de optimización de procesos complejos mediante la simulación de eventos discretos. Dicha simulación representa el comportamiento de un sistema complejo como una serie de eventos bien definidos y ordenados en el tiempo. El análisis es rápido y genera diversos entornos con el fin de solucionar algún problema o seleccionar la mejor opción donde el riesgo es mínimo. (Clarcat, 2018)

1.11.3 Active Risk Manager (ARM)

“Centraliza y simplifica riesgos organizacionales de arriba hacia abajo, de abajo hacia arriba como controles, oportunidades, acciones, incidentes y auditorías. Su funcionalidad le permite registrar, puntuar, evaluar y mitigar los riesgos en todos los niveles en su negocio a través de un sistema único, seguro y auditable” (Sword-Active Risk, 2017).

1.11.4 @Risk

Es un software para el análisis de riesgo utilizando la simulación Monte Carlo con el fin de mostrar múltiples resultados posibles de la variable objetivo y la probabilidad de éxito (nivel de confianza) del modelo básico trabajados en un interfaz de hoja de cálculo, el cual hace que su interacción sea amigable con el usuario. Consta de varias distribuciones de probabilidades que se ajustan a las variables estudiadas, así como tipos de muestreo y herramientas de optimización que finalizan en un resultado más confiable y real. (Palisade, 2018)

1.11.5 Risk Simulator

Es un software que permite realizar el análisis de diversos tipos de riesgos, pronosticar series históricas, optimizaciones dinámicas, valorizaciones económicas de proyectos con el fin de facilitar la toma de decisiones. (Software-Shop, 2018)

1.12 Validación de Resultados

Los entregables de este trabajo de investigación se resume y puntualiza en la determinación del tamaño de producción con el máximo beneficio, concluida la etapa se procede a su aplicación o ejecución, como todo proceso de gestión se hace el seguimiento y control de los resultados obtenidos, para este proceso utilizaremos indicadores de gestión que miden el nivel de certeza de estos estimados propuestos.

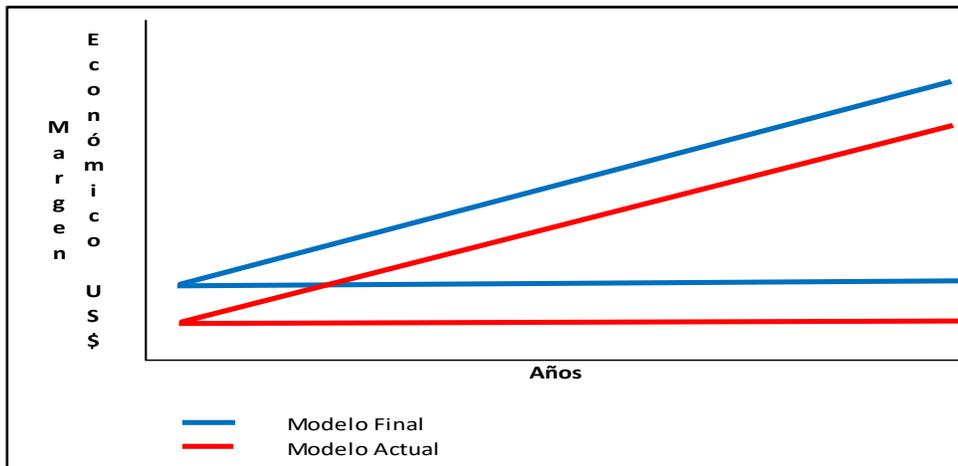
Para este propósito se proponen aplicar comparaciones de resultados (real versus objetivo). La comparación de los resultados de beneficio se realizará en dos periodos:

- a) Antes de la ejecución.
- b) Durante y final de la ejecución.

En cuanto la unidad de medida o indicador a utilizar será la Variación Porcentual (%).

- a) **Antes de la ejecución.** Para este propósito se propone aplicar la comparación del flujo de caja anual y acumulada entre los modelos simulados: actual y estocástico con gestión de riesgos.

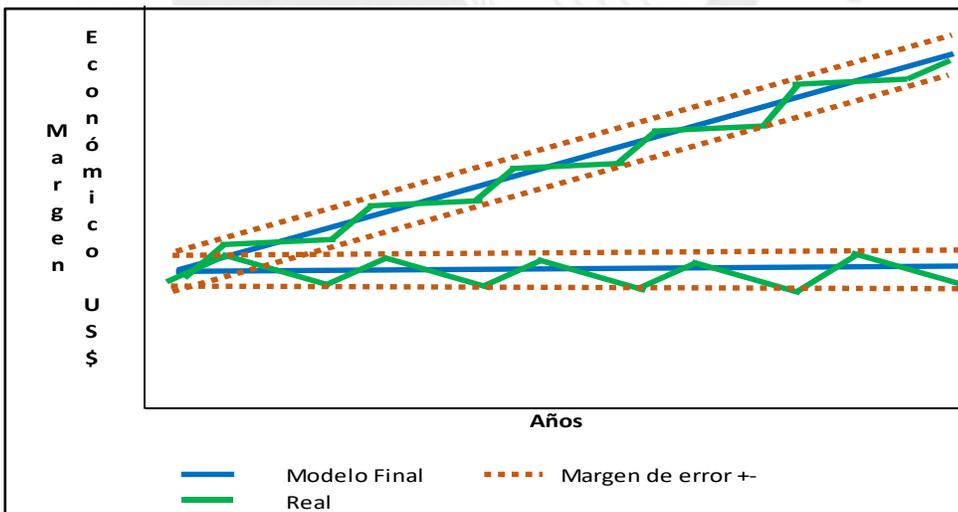
Figura 5: Esquema de Comparación entre el modelo Actual y el modelo Final



Fuente: Elaboración propia

- b) **Durante y final de la ejecución.** La práctica más usada es la Reconciliación de Datos, que consiste en hacer la comparación interna de lo estimado versus lo realizado (Objetivo Vs. Real). Esta operación será anual y acumulada. El indicador porcentual mide en cuanto nos acercamos o alejamos de lo propuesto.

Figura 6: Esquema de Comparación entre el modelo Real y el modelo Final



Fuente: Elaboración propia.

En esta etapa proponemos realizar el seguimiento de las variables relevantes que intervienen en el resultado final de Beneficio, nos referimos a las variables: producción de mineral, leyes de mineral, recuperaciones metalúrgicas, costos operativos y gastos de inversión.

1.13 Marco Teórico

La elaboración del presente trabajo de investigación está alineada con la aplicación de teorías, conceptos y filosofía de autores como también aplicación de casos reales en empresas mineras de clase mundial, que a medida que se describa la secuenciación del trabajo se estarán mencionando.

Para el desarrollo de la investigación, en primer lugar, se requiere identificar el tamaño de producción teórico que será la base y servirá para realizar la comparación con el tamaño de producción actual de la mina, de tal forma que podamos identificar el punto de partida para sensibilizar escalas de producción de mineral con el propósito de calcular el beneficio por escenarios de escalamiento. Para el cálculo del tamaño teórico de producción, tomaremos una media de los cálculos obtenidos de las fórmulas empíricas alineado a las minas subterráneas como la de B. Mackenzie (1982) y L. Jimeno (1986).

Las dos fórmulas empíricas tienen como variable relevante las Reservas de Mineral. En nuestro caso trabajaremos con los Recursos de Minerales Económicamente Explotables (RMEE). Con los RMEE se gana una mayor cantidad de recursos explotables y horizonte de operación.

1.13.1 Estimado de Recursos de Mineral Económicamente Explotable.

Para el estimado de reservas se consideran los recursos medidos e indicados (Código de JORC) y para el estimado de los RMEE se consideran los recursos medidos, indicados e inferidos, que igual al estimado de reservas se usan la misma metodología y factores modificadores de dilución, cut off, precios de metales, recuperación por método de minado, recuperación metalúrgica entre los principales. Para la elaboración de los estimados de RMEE usaremos la metodología de Volcan – Glencore, que es un estándar en la corporación, con los software mineros: Datamine y Deswik.

1.13.2 Vida Óptima económica y Ritmo Óptimo de producción

Una vez conocido el RMEE, acudimos a las fórmulas empíricas para calcular el Ritmo Óptimo Económico (ROE) y Vida Óptima Económica (VOE) con la finalidad de identificar el punto de partida de los escenarios a escalas de producción en toneladas por día (tpd).

1.13.3 Planeamiento de Largo Plazo.

El siguiente paso consiste en el desarrollo del Planeamiento de Largo Plazo o el “Life Of Mine”, LOM (Siglas en inglés) aplicando la metodología de Volcan – Glencore, con el uso del software Datamine y Deswik. Los pasos a seguir son: primero se realizan los diseños de la infraestructura (Desarrollos) de acceso y explotación (Minado) a las estructuras mineralizadas económicamente explotables; seguidamente se realiza la secuenciación de los desarrollos, preparaciones y minado de los bloques mineralizados, y finalmente se tiene un reporte de avances y producción de mineral en metros y tonelaje respectivamente.

1.13.4 Flujo de caja

El paso final consiste en estimar el beneficio o contribución de la operación haciendo uso del flujo de caja descontado para calcular el Valor Actual Neto (VAN) para cada escenario, que será la medida de comparación. Para este caso usaremos la metodología de Volcan – Glencore. Además, el VAN tiene como ventajas: es racional, usa todos flujos de efectivo, descuenta los flujos de una forma adecuada, no tiene problemas por escala ni por cambio de inversión a ingreso.

Todo este proceso consiste en estimar los ingresos y egresos de la operación. Para calcular los Ingresos se proyecta la producción de finos considerando las recuperaciones metalúrgicas para cada ley de cabeza, de igual forma los precios de metales son proyectados. Para el estimado de los egresos se considera los costos operativos incrementales (OPEX); gastos de inversión (CAPEX) para la sostenibilidad del negocio; las regalías, derecho tributario al estado; los gastos de ventas, cada vez menores a medida que bajan las leyes bajas la cantidad de concentrados; todo esto suma por el envejecimiento de la mina y traen consigo: Mayor consumo de energía (Mayor uso de maquinarias para las actividades del proceso, mayor cantidad de ventiladoras para evacuar el aire viciado, mayor cantidad de bombas para evacuar las aguas subterráneas evitando la inundación de la mina) y menor productividad en mano de obra, rendimiento de quipos, consumibles, entre otros, que de alguna forma se puede contrarrestar con la implementación de tecnología e innovación.

1.13.5 Tamaño Óptimo de Producción con el Máximo Beneficio.

Es el paso final y consiste en acopiar la información de cada escenario y agruparlos en una matriz de forma ordenada y alineados a la tasa o tamaño de producción “Q”, seguido del Costo Total (CT), Ingreso Total (IT), Beneficio Total (BT), para luego calcular el Costo Marginal (CM) y el Ingreso Marginal (IM).

Para la identificación del tamaño de producción óptimo con el máximo valor, aplicaremos la teoría económica en mercados perfectamente competitivos que en este caso la minería es una de ellas. En la información bibliográfica investigada, los autores explican de manera similar, la teoría de maximización de beneficios. Para este caso seguiremos lo anunciado por Frank (2011) en vista que existe información académica y aplicaciones en minería. Frank (2011), sustenta que la maximización de beneficios se presenta cuando el Precio (P) es igual al Costo Marginal (CMg). En minería el precio (P) es equivalente al Valor de Mineral (VM). El Ingreso Marginal (IMg) es el resultado del cociente de la variación de del Ingreso Total (IT) con la variación de la Cantidad (Q) y el Costo Marginal (CMg) es equivalente al cociente de la variación del Costo total (CT) y la variación de la Cantidad producida (Q).

De la matriz se identifica la fila de Valor de Mineral igual al Costo Marginal, donde el beneficio es el máximo. De esta forma, se identificó el tamaño óptimo, un resultado netamente determinístico, restringido que todas las variables son rígidas no tiene variación para alcanzar el valor de beneficio identificado, lo cual en la realidad no es cierto, la operación minera es dinámica con cambios en el proceso que conlleva a una incertidumbre con impactos generalmente negativos. El desafío de esta investigación está en identificar el tamaño de incertidumbre para llegar a conocer con un grado de confianza los nuevos resultados finales que de antemano creemos que están por debajo del estimado inicial, seguido a esto queda la intervención técnica para mitigar las incertidumbres con acciones de solución con el afán de disminuir la incertidumbre y tener un resultado más realista o ejecutable. Consideramos que el estudio es importante porque la gestión a realizar se cuenta con un planeamiento ejecutable para lograr los objetivos físicos y de rentabilidad con un programa de acciones para mitigar los riesgos.

1.13.6 Gestión de Riesgos en Proyectos

Se aplicará los lineamientos del PMI para la gestión de riesgos, debido a que es una guía de reconocimiento internacional para proyectos en general; es decir, es aplicable en cualquier sector económico. Además, por los buenos resultados obtenidos.

1.13.7 Tipos de Riesgos

Se analizarán los riesgos operativos, porque se tiene la suficiente información detallada para que el trabajo de investigación sea sustentable. Además, el propósito es gestionar los riesgos y mientras se pueda tener información razonable sobre sus consecuencias es posible identificar medidas para controlarlos (mitigarlos).

1.13.8 Tipo de Análisis de Riesgo

Como primera instancia se analizará las variables aleatorias cualitativamente, luego mediante un análisis cuantitativo (proceso que es subjetivo) se obtendrá la probabilidad de éxito y VAN para la óptima toma de decisiones. Para el análisis cuantitativo contamos con la información histórica requerida de las variables y sensibilidades en un modelo Determinístico.

1.13.9 Software especializados en riesgos y probabilidades

Entre los software propuestos, por motivos de años de experiencia en minería, tipo de simulación efectuada, distribuciones que se ajustan mejor al tipo de variable (para la selección se utilizará un consenso de los criterios de Información de Akaike, Bayesiano y los estadísticos Chi-Cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling), flexibilidad en el método de tipo de muestreo, tipo de análisis de datos y aplicación en grandes operaciones mineras, se utilizará el @Risk, el cual consta de dos herramientas de optimización: el Envolver y el Risk Optimizer.

1.13.10 Validación de Resultados

Este caso de estudio amerita la aplicación de las dos etapas de validación previamente nombradas, con el propósito de conocer la brecha de lo propuesto en el estudio respecto a los resultados reales; por otro lado, nos permite identificar oportunidades de mejora de las actividades en el proceso operativo.

CAPÍTULO 2 CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se realiza una descripción de la compañía minera, del problema de investigación, Riesgos Operativos y Modelo Estocástico, del caso de estudio piloto, Validación de resultados y presentación de resultados obtenidos de la mina San Cristóbal – Grupo Volcan.

2.1 Descripción de Volcan

Volcan Compañía Minera, es uno de los mayores productores mundiales de zinc, plomo y plata. Las reservas de mineral probado y probable ascienden a 50 Mt y los recursos de minerales que no forman parte de las reservas son: 146Mt en recursos medidos e indicados y 108Kt de recursos inferidos cuya suma total bordea los 300Mt.

En la actualidad, Volcan cuenta con ocho (08) minas polimetálicas, cinco (05) plantas concentradoras con una capacidad de tratamiento de 21,900 tpd y una planta de lixiviación de 2,500 tpd; todas ubicadas en la sierra central del Perú. La producción promedio anual de metal fino es de, 300Kt de zinc, 50Kt de plomo, 5Kt de cobre, 18M Oz de plata y 10K Oz de oro. El estado de resultados, anota un total de ventas de US\$ 860M; un EBITDA de US\$ 343M (40%) y un Margen Neto de US\$ 93M (11%). Volcan, también es titular de centrales de generación hidroeléctrica y de sistemas de transmisión eléctrica, que suministra a sus propias operaciones a terceros. De esta manera, busca mejorar su estructura de costo.

Volcan, cotiza en la Bolsa de Valores de Lima, en la Bolsa de Comercio de Santiago de Chile y en la Bolsa de Madrid de Latibex. Al 31 de diciembre del 2017, las acciones están representado por 1,633'414,553 acciones comunes clase "A" y 2,443'157,622 acciones comunes clase "B", cada una de un valor nominal de S/ 0.87. (Memorias Volcan Compañía Minera S.S.A., 2017)

2.2 Descripción del problema

Toda operación minera cuenta con un programa de producción y un presupuesto operativo a corto, mediano y largo plazo. El nivel de detalle es mayor en los planes a corto plazo, que son planes operativos o ejecutables con un alto grado de confianza que tiene

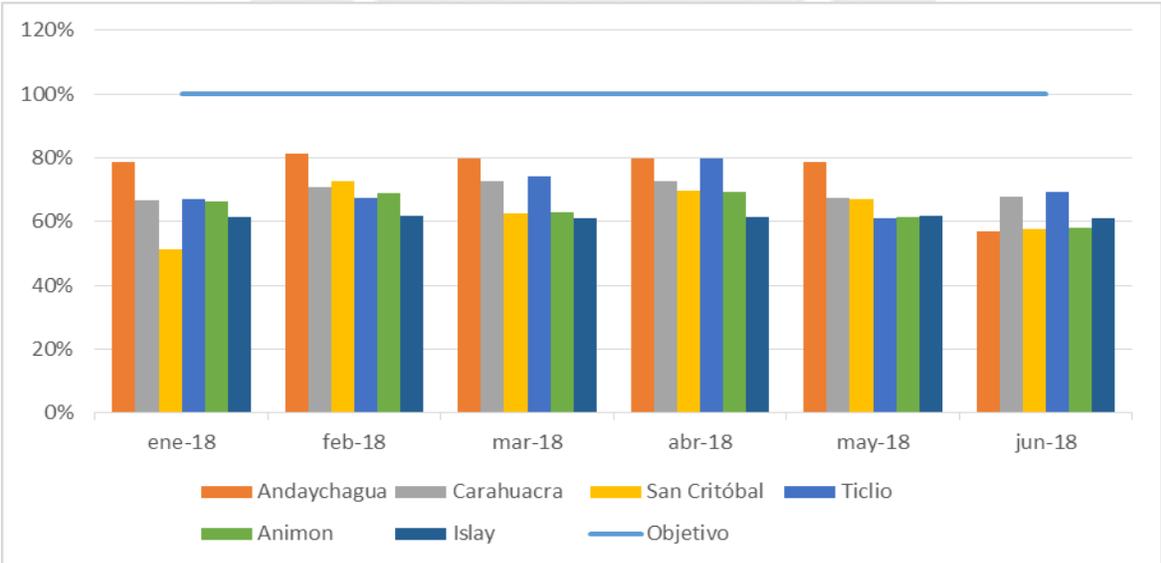
el propósito de alcanzar las metas físicas previstas en su oportunidad, como método de minado, secuenciación de actividades en los desarrollos, preparaciones, explotación, proactividad en los servicios operacionales de mina, planta y la administración, y gestión de roles relevantes en la responsabilidad social y el medio ambiente; todo esto con el fin de lograr las metas proyectadas.

Sin embargo, en el caso específico del Grupo Volcan, evaluando y analizando la información estadística real de actividades relevantes y comparándolas con los objetivos propuestos; se obtuvo resultados que están por debajo de lo esperado, los cuales muestran los principales inconvenientes para lograr metas en el corto, mediano y largo plazo.

Por ejemplo, al procesar la información de los planes de minado de enero al junio del 2018 y compararlos con los resultados reales, se puede observar la brecha de los objetivos de toneladas de producción de mineral planeado versus el cumplimiento de toneladas de producción de mineral. Por otro lado, se puede inferir que dicha brecha fue reemplazada por la producción de mineral no planeada.

En la **Figura 7**, se muestran las brechas de producción objetivo versus la producción real de las minas de San Cristóbal con una media de 63% de cumplimiento en el semestre, Carahuacra con 70%, Andaychagua con 76%, Ticlio con 70%, Animon e Islay con 64% y 61%, respectivamente.

Figura 7: Variación Porcentual - Producción Objetivo vs Real

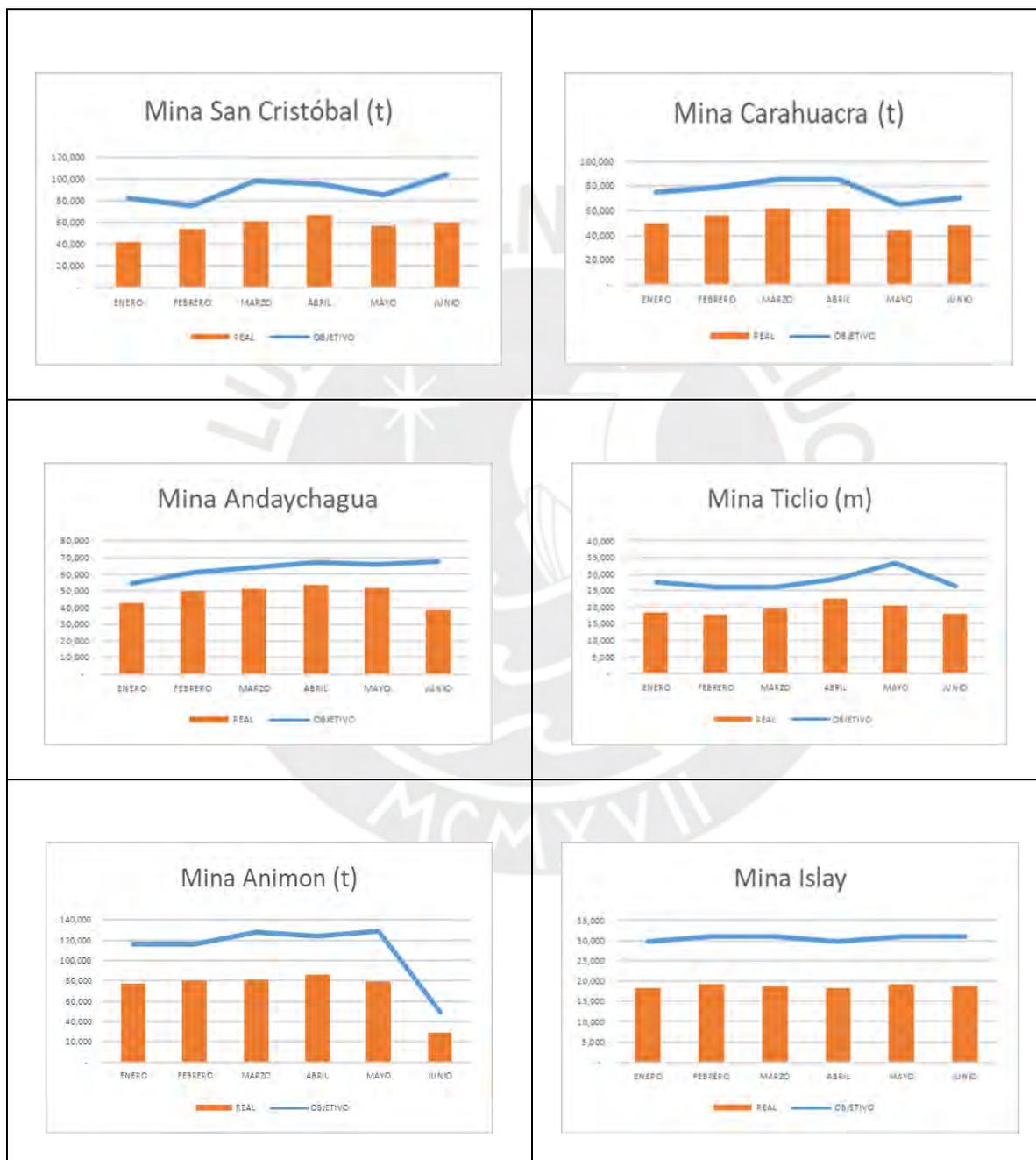


Fuente: Elaboración propia. Reporte de Resultados 2018.

La línea celeste en horizontal representa la meta a un 100%, observando un área de incumplimiento en todas las minas. El no cumplimiento del Plan de minado impacta en el mediano plazo con una baja de producción y a un mayor costo.

La **Figura 8** muestra las desviaciones de cada mina en el primer semestre del año 2018.

Figura 8: Producción Objetivo vs Real por cada mina



Fuente: Elaboración propia. Reporte de Resultados 2018.

La **Tabla 2** muestra el resumen de las variaciones porcentuales mensuales y la media del semestre de cada mina.

Tabla 2: Resumen de variaciones porcentuales y media por mina - Producción

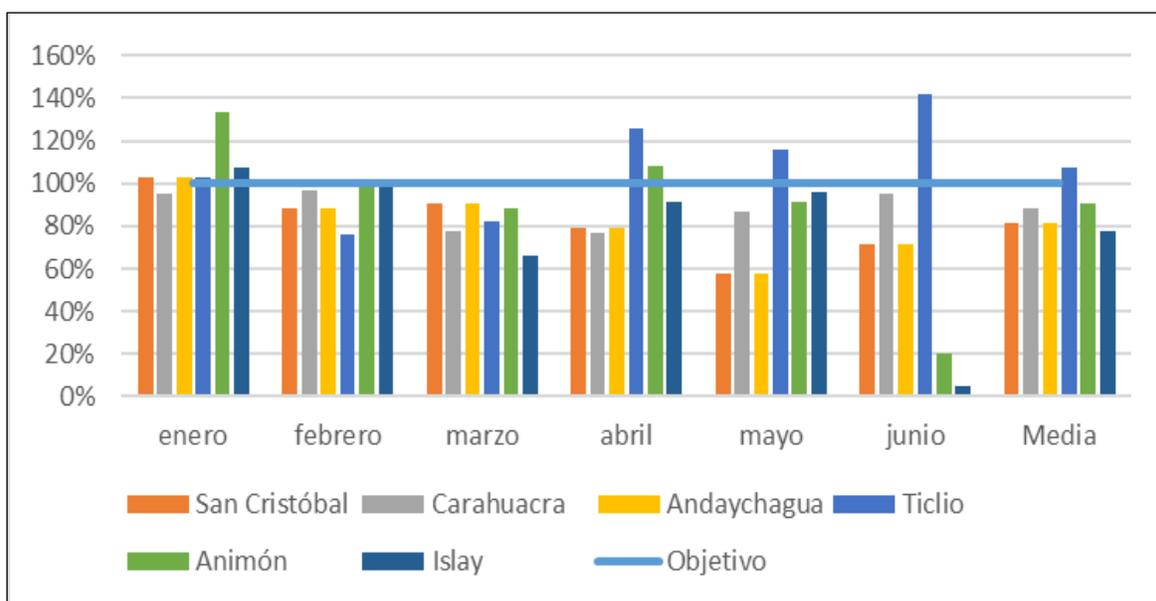
Mina	Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18	Jun-18	Media
Objetivo	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
San Cristóbal	51%	73%	63%	70%	67%	58%	63%
Carahuacra	67%	71%	73%	73%	68%	68%	70%
Andaychagua	79%	82%	80%	80%	79%	57%	76%
Ticlio	67%	68%	74%	80%	61%	69%	70%
Animon	66%	69%	63%	69%	61%	58%	64%
Islay	61%	62%	61%	61%	62%	61%	61%

Fuente: Elaboración propia. Reporte de Resultados 2018.

Así como se evaluó el cumplimiento de los planes de minado, también se evaluó los avances de labores de desarrollo y preparación de la mina para garantizar la continuidad sostenible en el tiempo. En el siguiente análisis, se comparan los objetivos programas de avances de los meses de enero a junio del 2018 versus lo ejecutado.

A continuación, se presentan los resultados de la comparación realizada para cada mina. La **Figura 9** muestra un resumen de las minas en actual operación, donde se observa que la mina de San Cristóbal alcanzó un 82 % de cumplimiento en los 6 meses y de la misma forma las minas de Carahuacra con 88%, Andaychagua con 82% e Islay con 78% y la mina Ticlio es la única que está en verde con 107%. El objetivo de los avances es de llegar a las zonas mineralizadas para continuar con la producción, en este escenario el impacto va recaer en una baja de producción a falta de áreas preparadas para su explotación respectiva.

Figura 9: Variación Porcentual - Avances Objetivo vs Real



Fuente: Elaboración propia. Reporte de Resultados 2018.

La **Tabla 3** muestra los resultados porcentuales de cumplimiento de los avances respecto a los objetivos propuestos en un principio.

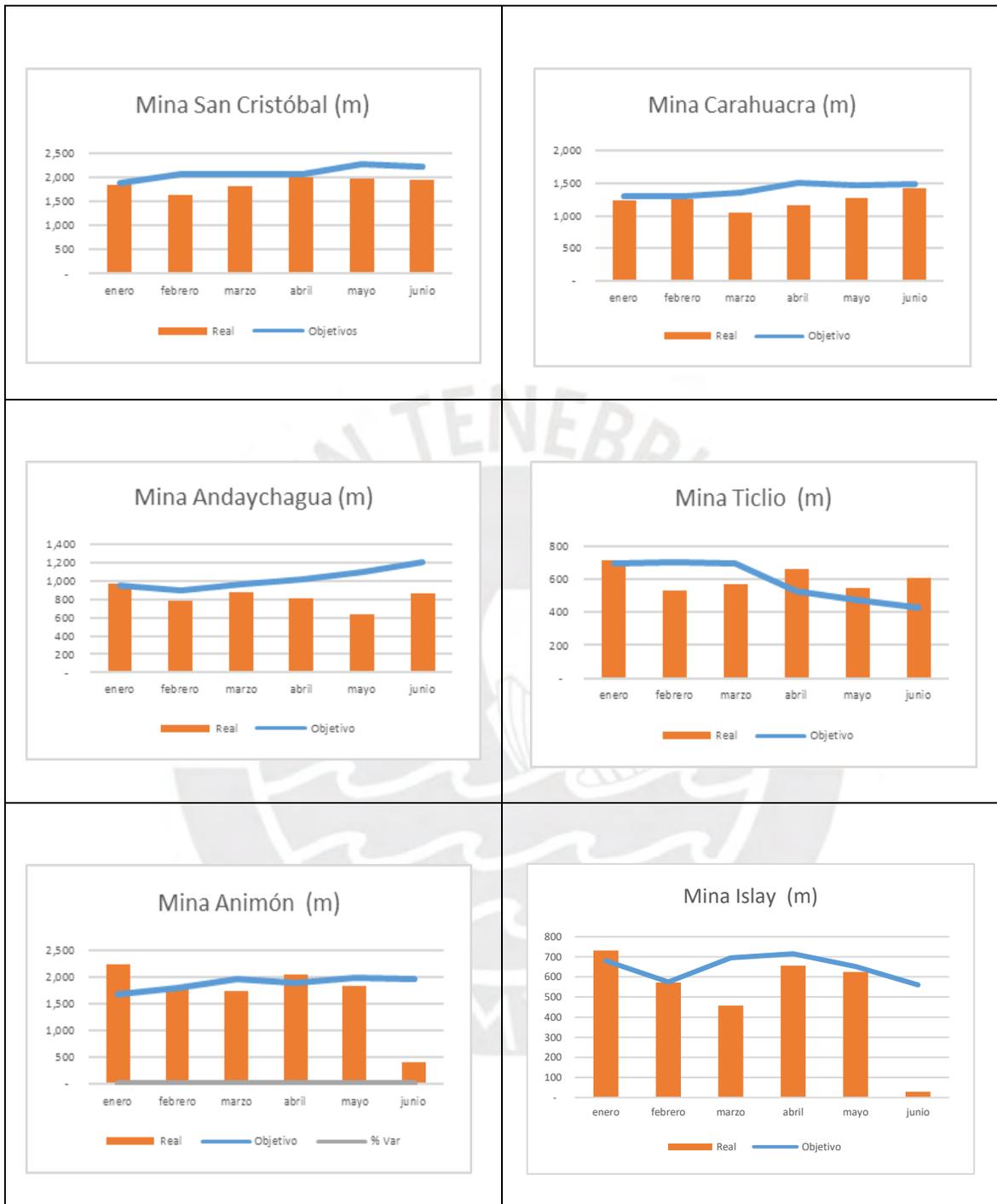
Tabla 3: Resumen de variaciones porcentuales y media por mina - Avances

Minas	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	Media
Objetivo	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
San Cristóbal	103%	88%	90%	79%	57%	72%	82%
Carahuacra	95%	97%	78%	77%	87%	95%	88%
Andaychagua	103%	88%	90%	79%	57%	72%	82%
Ticlío	103%	76%	82%	126%	116%	142%	107%
Animón	134%	101%	88%	108%	92%	20%	90%
Islay	107%	100%	66%	92%	96%	5%	78%

Fuente: Elaboración propia. Reporte de Resultados 2018.

La **Figura 10** muestra los resultados mensuales de cada mina, en cada mina se compara los resultados mensuales realizados, con respecto a los programados. Las barras representan los metrajes realizados y la línea azul, el metraje objetivo para garantizar la continuidad operativa o brindarle sostenibilidad a la operación.

Figura 10: Avances Objetivo vs Real por cada mina



Fuente: Elaboración propia. Reporte de Resultados 2018

En conclusión, se ha identificado que, en el primer semestre del año 2018, las minas del Grupo Volcan constan de un porcentaje de cumplimiento entre 61% y 76% de la producción planeada y de 78% a 100% del metraje planeado en avances.

Consecuentemente, las evaluaciones económicas realizadas con los parámetros proyectados (Plan de minado) utilizando un modelo determinístico y no incluyendo los riesgos, no se acercan a la realidad de la operación, no pudiendo optimizar, ni gestionar los riesgos y finalmente dejando de generar beneficios para la empresa.

2.3 Riesgos Operativos y Modelo Estocástico

Analizando el porqué del problema descrito el capítulo previo, se identificaron algunas causas raíz totalmente operativas como: ritmo de producción no óptimo, retrasos en las preparaciones, baja disponibilidad mecánica de equipos, deficientes estimaciones de los recursos, inundaciones de agua no permitiendo el ingreso a las áreas mineralizadas programadas, estudios geomecánicos no coherentes a falta de información, etc. Todas estas causas actualmente definidas como “riesgos operacionales”.

A continuación, se representan los análisis estadísticos de algunos parámetros operativos (variables aleatorias) durante el periodo entre 2011 y 2017.

Tabla 4: Resumen Estadísticos de parámetros

Parámetro	Tonelaje Mina t			Ley Zn %			Ley Cu %			Ley Pb %			Ley Ag (oz/t)		
	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.
Media	119,517	128,306	93%	5.71	5.45	105%	0.20	0.16	135%	0.72	0.68	106%	3.24	3.17	102%
Mediana	124,921	132,500	95%	5.45	5.41	102%	0.18	0.16	112%	0.70	0.67	105%	3.14	3.15	100%
Desviación E	16375.77	13974.28	0.10	0.94	0.34	0.18	0.08	0.05	0.87	0.18	0.09	0.25	0.56	0.16	0.18
CV	0.14	0.11	0.11	0.17	0.06	0.17	0.42	0.30	0.65	0.26	0.13	0.24	0.17	0.05	0.18
Curtosis	-0.52	0.96	2.26	0.69	0.13	0.20	3.97	6.56	16.09	3.08	0.80	1.57	2.36	0.35	2.54

Parámetro	Disponibilidad Mecánica % Scoop			Utilización % Scoop			Disponibilidad Mecánica % Jumbo			Utilización % Jumbo		
	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.
Media	87	86	101%	57	56	102%	85	86	99%	32	51	62%
Mediana	89	85	104%	59	60	102%	87	85	101%	31	50	62%
Desviación E	6.07	0.73	0.07	7.86	4.98	0.13	6.98	0.73	0.08	6.60	3.52	0.11
CV	0.07	0.01	0.07	0.14	0.09	0.13	0.08	0.01	0.08	0.21	0.07	0.18
Curtosis	8.10	-1.79	8.65	0.35	-1.96	4.80	16.28	-1.79	15.61	-1.07	2.38	-0.70

Parámetro	Tonelaje Planta t			Ley Concentrado Pb (%)			Ley Concentrado Zn (%)			Ley Concentrado Ag (oz/t) en Pb			Ley Concentrado Ag (oz/t) en Zn		
	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.
Media	86,444	86,601	101%	45.56%	45.99%	100%	51.88%	53.56%	97%	113.17	111.99	104%	7.46	6.98	111%
Mediana	87,138	88,600	101%	45.35%	44.46%	98%	51.66%	53.78%	97%	87.67	104.07	102%	7.16	7.02	108%
Desviación E	8576.99	9732.83	0.16	0.04	0.03	0.11	0.01	0.01	0.02	46.70	40.19	0.28	1.26	1.78	0.23
CV	0.10	0.11	0.16	0.09	0.06	0.11	0.02	0.01	0.02	0.41	0.36	0.27	0.17	0.26	0.20
Curtosis	-0.55	3.84	8.81	1.05	-0.91	-0.20	-0.40	-1.39	-0.37	-0.48	-1.03	-0.25	-0.72	-0.56	-0.53

Parámetro	Recuperación Zn			Recuperación Pb			Recuperación Ag CC Zn			Recuperación Ag CC Pb		
	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.	Real	Plan	Cumpl.
Media	92.35%	92.12%	100%	84.47%	84.75%	100%	24.57%	24.11%	103%	40.89%	42.73%	96%
Mediana	92.37%	92.33%	100%	84.88%	84.84%	100%	24.49%	24.34%	101%	32.32%	45.04%	102%
Desviación E	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.05	0.02	0.02	0.14	0.15	0.11	0.22
CV	0.02	0.01	0.02	0.04	0.03	0.05	0.10	0.09	0.14	0.36	0.26	0.22
Curtosis	-0.33	-0.63	-0.41	-0.37	0.61	-0.89	-0.14	-0.92	-0.04	-1.06	0.81	-0.34

Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

El análisis univariado (Estadística Descriptiva) realizado nos permite saber si existe elementos atípicos en los datos de cada variable, como se muestra en la información previa no se cuenta con estos valores que podrían distorsionar los parámetros estadísticos.

Como se puede apreciar en las tablas, los parámetros de tonelaje de mina, leyes de mineral, disponibilidad de equipos y recuperación están cerca en cuanto al cumplimiento, esto no sucede con la utilización del jumbo cuyo porcentaje de cumplimiento es de 62%. Esto es debido, a que la operación no está centralizada; por lo que, dedica mucho tiempo en transportarse que, en realizar su actividad principal, que es la perforación.

En cuanto a la forma de concentración de datos, se puede observar que las distribuciones reales de cada parámetro son distintas a las planificadas. Esto tiene una gran influencia en la evaluación económica pues mientras la distribución sea más escarpada; es decir, los datos se acerquen más a su media (baja concentración de datos en las colas de la distribución), menor será el impacto que se obtenga en la variable dependiente VAN.

Respecto al tonelaje de mina, consta de una distribución Platicúrtica; es decir, tiene una baja concentración de datos en torno a su media. En tal sentido, las variables de leyes de mineral (excepto la del Cobre), leyes de concentrados, % de utilización de equipos y % de recuperación tienen un similar coeficiente de curtosis.

En cuanto a la disponibilidad mecánica y ley de Cobre tienen una distribución Leptocúrtica; es decir, la concentración de sus datos en torno a su media es grande. El coeficiente de variación de las variables de ley de Cobre y ley de concentrado de Plata en el concentrado de Plomo, es mayor respecto a las demás; por lo que, se afirma que tienen una mayor dispersión de datos (yacimientos geológicos no homogéneos). Todo lo contrario, sucede con las variables de ley de concentrado de Zinc y recuperación de Zinc.

¿Cómo podemos optimizar el ritmo de producción y reducir el impacto de los riesgos en el VAN del plan de minado, para cuyos resultados sean más confiables y cercanos a la realidad?

Este trabajo de investigación plantea aplicar con una metodología técnica y económica para determinar el tamaño óptimo de sus minas, determinar el horizonte del negocio y la aplicación del modelo Estocástico (identificación e inclusión de los riesgos e incertidumbres netamente operativos que se convive por temporadas al no contar con planes de acción determinantes) para generar un plan de minado robusto, flexible y

confiable, que a su vez brindará un valor agregado a la empresa minera evitando pérdidas económicas por falta de un sustento técnico económico.

2.4 Caso de Estudio piloto de la metodología para determinar el tamaño y el beneficio óptimo incluyendo el Modelo Estocástico

Para la elaboración y aplicación de la metodología a seguir en la determinación del Tamaño Óptimo de Producción con el Máximo Beneficio, se ha visto por conveniente hacer un modelo piloto en una mina subterránea en actual operación. El criterio optado para seleccionar la mina ideal es que sea la operación que tenga la mayor cantidad de recursos de mineral económicamente explotable con el mayor contenido de Zinc por tonelada, de tal forma que garantice un mayor horizonte de vida útil de la mina. Se entiende por Recursos de Mineral Económicamente Explotable, a los recursos de mineral cuyo valor por tonelada superan el costo total de producción por tonelada. El costo total de producción considera los costos de operación y comercialización, es el valor NSR (Net Smelter Return, que traducido en español es Retorno neto de fundición).

Alineados con lo descrito en el párrafo anterior, se elaboró un cuadro comparativo que muestra los tonelajes y contenidos metálicos de zinc expresados en porcentajes de las seis minas en actual operación. Como se puede observar en la **Tabla 5**, la Mina San Cristóbal es la que cumple con el criterio requerido para el desarrollo del caso de propuesto.

Tabla 5: Cuadro Comparativo de Recurso de Mineral Económicamente Explotable

MINA	San Cristóbal	Andaychagua	Carahuacra	Ticlio	Islay	Animón
TM	25,918,189	4,791,783	6,878,945	1,654,963	2,270,513	26,530,049
%Zn	5.00	4.14	3.64	5.30	1.50	4.35
%Pb	0.84	0.80	0.52	1.28	0.66	1.38
%Cu	0.18	0.06	0.05	0.25	0.04	0.12
OzAg	3.43	2.50	2.05	1.43	7.01	1.57
VPT	111.28	93.31	71.34	114.16	89.69	93.66

Fuente: Elaboración propia. Reporte de LOM 2018.

Hoy en día el tamaño de producción de la mina San Cristóbal es de 3,250 toneladas por día (tpd), equivalente a 1,3 millones de tonelada por año (tpa). El caso de estudio pretende demostrar que para el tamaño de RMEE, esta producción no es la óptima por consiguiente se estaría dejando de ganar un extra de beneficios económicos.

2.5 Validación de la hipótesis

Para la validación de la hipótesis, primero se evaluarán varios escenarios para lograr optimizar el ritmo de producción, luego se realizará la comparación de los resultados obtenidos aplicando el modelo Determinístico y el Estocástico (incluyendo las distribuciones y probabilidades de los riesgos operativos). En este punto, se evaluará y validará el modelo básico con información histórica, el cual es un tipo de modelo por definición.

Finalmente, con información real se realizará el proceso de reconciliación, siendo el indicador porcentual la clave para medir en cuanto nos acercamos o alejamos de lo propuesto.

2.6 Presentación de resultados

2.6.1 Maximización de Beneficios y Optimización de Ritmo de Producción

En el caso de la mina San Cristóbal el desafío es de averiguar el Ritmo de Producción (RdeP) que genere el máximo valor aplicando propuestas para este caso de estudio.

Para determinar el Ritmo Óptimo de Producción aplicamos dos conceptos. La primera consiste en la aplicación de las fórmulas empíricas y el segundo consiste en la aplicación práctica de las teorías económicas en minería.

2.6.2 Fórmulas Empíricas

Para la determinación del Ritmo Óptimo de Producción y la Vida Óptima Económica, aplicamos las fórmulas Brian Mackenzie (1982) y la de López Jimeno (1986).

Donde:

- RMEE = 25'918,000 t
- tpa = toneladas por año
- tpd = toneladas por día.

Fórmula de Brian Mackenzie (1982), quien propuso las fórmulas distinguiendo el método de explotación.

ROP para minas subterráneas (t/año): $= 4.22 \times (\text{Reservas en t})^{0.756} = 1'698,225$ tpa, con una vida útil de 15.26 años. La producción diaria es de 4,600 tpd.

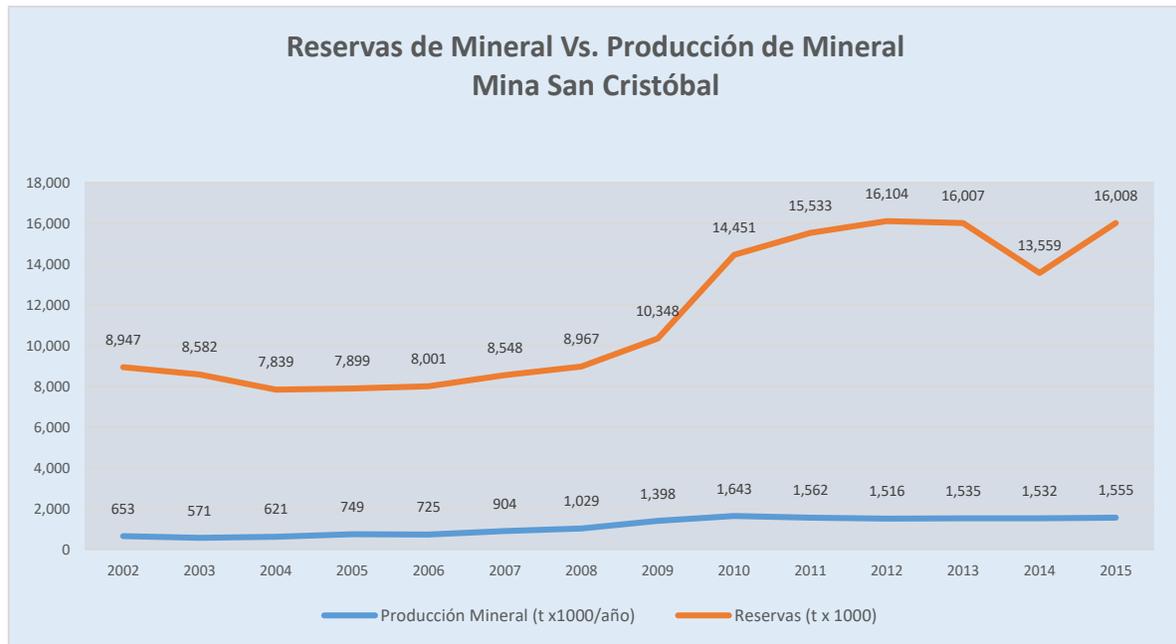
Fórmula de López Jimeno (1986), quien presenta fórmulas que estiman la vida óptima económica de explotación por tipo de mineral, cobre, plomo – zinc y oro. Para determinar dicha fórmula, López Jimeno recopiló información de datos de minas en explotación, desarrollo y evaluar análisis de regresión para ajustar unas curvas del tipo potencial ($y=a *x^b$), donde “y” es la vida útil de explotación y “x” las reservas minables. En este caso aplicamos la fórmula de plomo y zinc.

Plomo – Zinc: $VOE \text{ (años)} = 7.61 \times (\text{RMEE en Mt})^{0.275} = 1'391,478 \text{ tpa}$ con una vida útil de 18.63 años. La producción diaria estimada es de 3,800 tpd.

Como podemos ver, ahora tenemos dos propuestas de ROP; la primera de 4,600 tpd (Mackenzie) y la segunda es de 3,800 tpd, (López Jimeno) si comparamos con el ritmo actual de 3,250 tpd, estamos por debajo de ambas propuestas, ahora nos preguntamos ¿Cuál es el óptimo? Para esto recurrimos a las teorías económicas aplicadas en minería.

Analizando la información histórica, la mina San Cristóbal en los últimos 10 años incrementó sus reservas de mineral paulatinamente; sin embargo, la producción no tuvo la misma tendencia (Ver **Figura 11**). Esto nos indica que el Ritmo de Producción actual estaría sub dimensionado con relación al tamaño de la mina (Cantidad de Reservas). Las buenas prácticas indican que a una mayor cantidad de reservas generalmente las leyes de los contenidos metálicos tienden a ser más bajas. En estos casos las empresas mineras deciden ampliar la mina para evitar pérdida económica o cerrar la operación. Un ejemplo práctico se tiene en la Mina Cerro Verde, la mina triplicó su producción de mineral con leyes bajas para generar el máximo retorno a la inversión.

Figura 11: Reservas de Mineral Vs. Producción de Mineral Mina San Cristóbal



Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

2.6.3 Teorías económicas para Maximizar Beneficios a un Ritmo Óptimo de Producción.

Los beneficios se maximizan en el punto en el que un incremento adicional de la producción no altera los beneficios, es decir cuándo el $IMg = CMg = P$. La decisión que debe tomar la empresa es fijar el nivel de producto que le permitirá obtener el máximo beneficio posible (Robert Frank, 2009).

Después estudiar las teorías económicas de Frank, 2009:304-346, María Luisa Maino y Estrella Rosa (2011), Libby Rittenberg y Timothy Tregarthen, llegamos a la conclusión que todas coinciden que el máximo beneficio se obtiene cuando $IMg = CMg = P$. Para el desarrollo del presente caso nos alineamos con Robert Frank por que fue aplicado en minería a cielo abierto.

Con esta premisa, se elaboró siete escenarios de ritmos de producción, teniendo como límite inferior el actual tamaño de producción que es de 3,250 tpd, seguido con intervalos de 250 tpd hasta llegar a 5,000 tpd como límite superior. En este rango de 3,250 tpd a 5,000 tpd se encuentran los ritmos de producción estimados con las fórmulas de López Jimeno (3,800 tpd) y Brian Mackenzie (4,600 tpd). Para el desarrollo de cada escenario se

elaboró un plan de largo plazo (LOM) con los recursos de mineral económicamente explotables. Se estima los ingresos a un precio fijo, se estima los costos operativos, los gastos de venta, las regalías y los gastos de inversión que permitan la continuidad normal de la producción en la vida de la mina.

La **Tabla 6**, muestra un resumen de resultados de los escenarios desarrollados. La columna “Cantidad” representa el incremento adicional por unidad de producción; la columna de ingreso total unitario, es el ingreso anual actualizado a una tasa de descuento de 10% entre el total de producción; la columna de costo total unitario, al igual que los ingresos es el cociente del costo anual actualizado a la misma tasa descuento, entre el total de producción de mineral. Las demás columnas resultan de la interacción de estas.

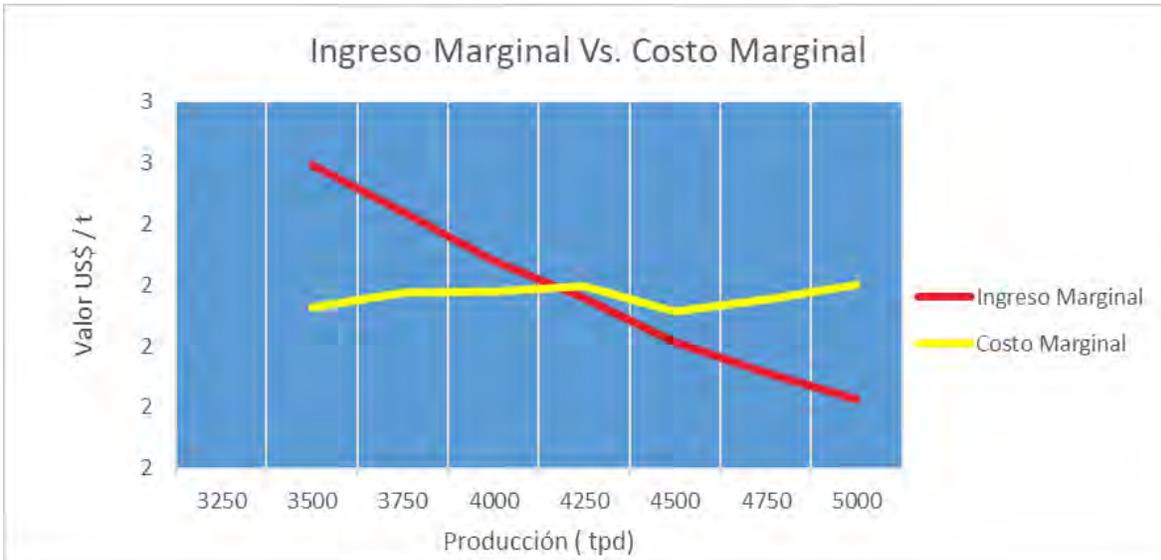
Tabla 6: Ingreso Marginal y Costo Marginal

Escenario (tpd)	Cantidad (t)	Ingreso total US\$/t	Costo total US\$/t	Beneficio US\$/t	Ingreso Marginal US\$/t	Costo Marginal US\$/t
Incremento Adicional	Q	IT	CT	IT-CT	IM ($\Delta IT/\Delta Q$)	CM ($\Delta CT/\Delta Q$)
3250	1	48	40	7.42		
3500	2	50	42	7.89	2.50	2.03
3750	3	53	44	8.15	2.34	2.07
4000	4	55	47	8.25	2.18	2.08
4250	5	57	49	8.21	2.06	2.10
4500	6	59	51	8.11	1.91	2.01
4750	7	61	53	7.87	1.81	2.05
5000	8	62	55	7.50	1.73	2.10

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 12**, muestra la representación gráfica del punto de intersección del Ingreso marginal (IMg) con el Costo Marginal (CMg), punto donde el ritmo óptimo de producción es de 4,000 tpd.

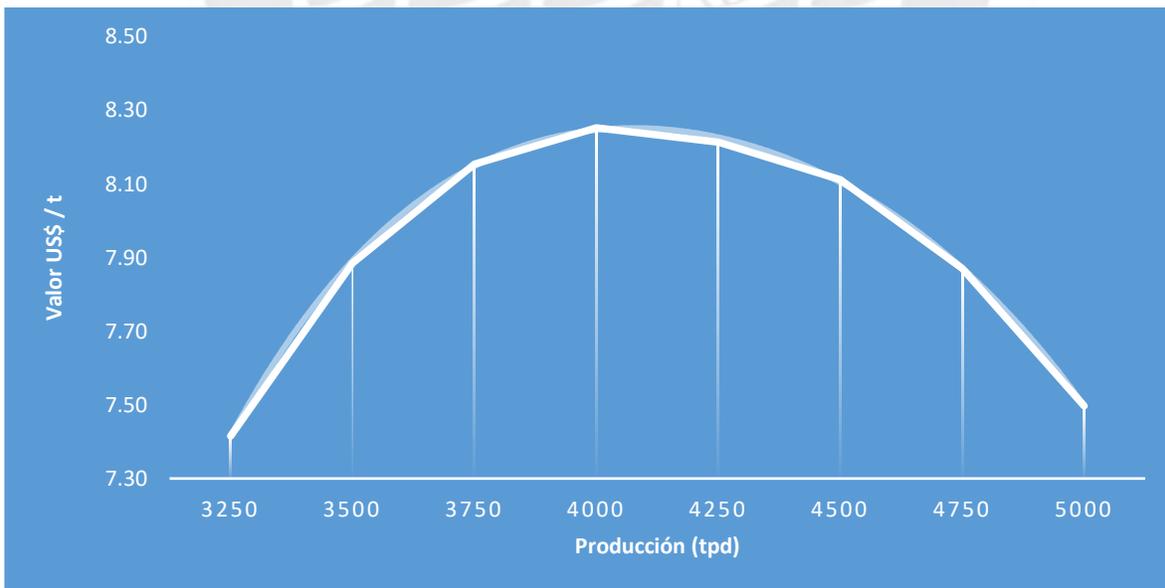
Figura 12: Ingreso Marginal Versus Costo Marginal



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 13**, muestra la curva de los beneficios para cada tamaño de producción o escenarios. Los beneficios es el Valor Anual actualizado a una tasa de descuento de 10%. El máximo benéfico se encuentra cuando el ritmo a producción es de 4,000 tpd.

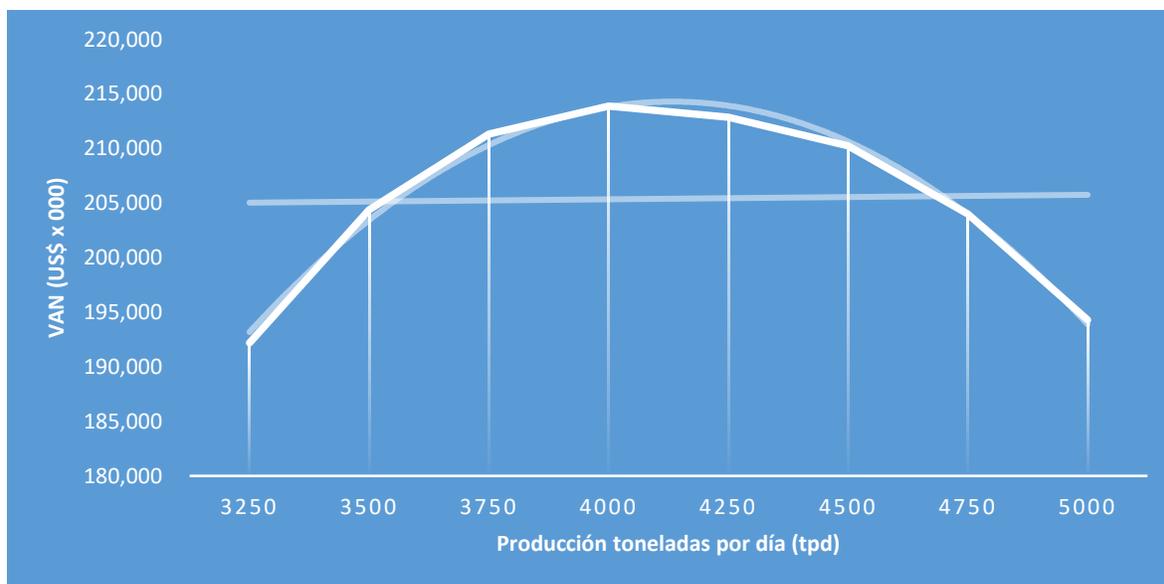
Figura 13: Tamaño de Producción Versus Beneficio Unitario



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 14**, muestra la curva con el máximo VAN al ritmo de producción de 4,000 tpd. Por otro lado, podemos decir que los ritmos óptimos de producción determinados con las fórmulas empíricas de López Jimeno y Brian Mackenzie de 3,800 tpd y 4,600 tpd respectivamente, proyectan beneficios por debajo del máximo beneficio estimado con las teorías económicas aplicadas a la minería.

Figura 14: Curva Producción - Beneficio



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, el nuevo Ritmo Óptimo de Producción es de 4,000 tpd con un Máximo Beneficio de US\$ 213M.

Tabla 7: VAN Y TIR de los escenarios evaluados

Escenario	Ritmo Producción (tpd)	Vida Útil (años)	Ingresos (M US\$)	Capex (M US\$)	VAN (M US\$)	TIR (%)
1	3250	22	141	0	192	Indefinido
2	3500	21	152	4	204	626%
3	3750	19	163	10	211	259%
4	4000	18	174	17	213	166%
5	4250	17	185	30	213	119%
6	4500	16	196	34	210	92%
7	4750	15	207	45	204	73%
8	5000	14	217	56	194	59%

Fuente: Elaboración propia

Además, como se muestra en la **Tabla 7**, se evaluó la TIR encontrando contradicciones con los valores de VAN; por lo que, para nuestro caso, no se toma en cuenta como criterio de decisión, debido a que cada escenario (proyectos mutuamente excluyentes) evaluado presenta diferente vida útil, distinta escala de inversión y distribución de beneficios desiguales.

2.6.4 Aplicación de Modelo Estocástico y Gestión de Riesgos Operativos

Las simulaciones del modelo base de evaluación financiera se realizaron en el software @Risk, al tener la data histórica de cada variable operativa durante el periodo de 7 años; es decir 84 meses, se pudo obtener las distribuciones de probabilidad que más se ajustan, según un consenso entre el Criterio de Información de Akaike (AIC), el Criterio de Información Bayesiano (BIC), el Estadístico Chi-Cuadrado, el Estadístico Kolmogorov-Smirnov y el Estadístico Anderson-Darling, al comportamiento de cada una de ellas. A continuación, se presentan las distribuciones obtenidas:

Tabla 8: Distribuciones de probabilidad ajustadas de cada variable según diversos criterios y estadísticos

Variable	Criterios y Estadísticos					
	AIC	BIC	Chi-Cuadrado	K - S	A - D	Consenso
Tonelaje t	Triang	Triang	Triang	ExtValueMin	Triang	Triang
Ley Zn %	ExtValue	ExtValue	Loglogistic	Loglogistic	ExtValue	ExtValue
Ley Pb %	ExtValue	ExtValue	Loglogistic	Loglogistic	ExtValue	ExtValue
Ley Cu %	InvGauss	InvGauss	LogNorm	InvGauss	InvGauss	InvGauss
Ley Ag oz/t	Loglogistic	ExtValue	Loglogistic	Loglogistic	Loglogistic	Loglogistic
RM Zn %	Normal	Normal	Normal	Weibull	Normal	Normal
RM Pb %	Triang	Triang	ExtValueMin	BetaGeneral	Kumaraswamy	Triang
OPEX F Unitario	Triang	Triang	Triang	Triang	Triang	Triang
OPEX V Unitario	Triang	Triang	Triang	Triang	Triang	Triang

Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

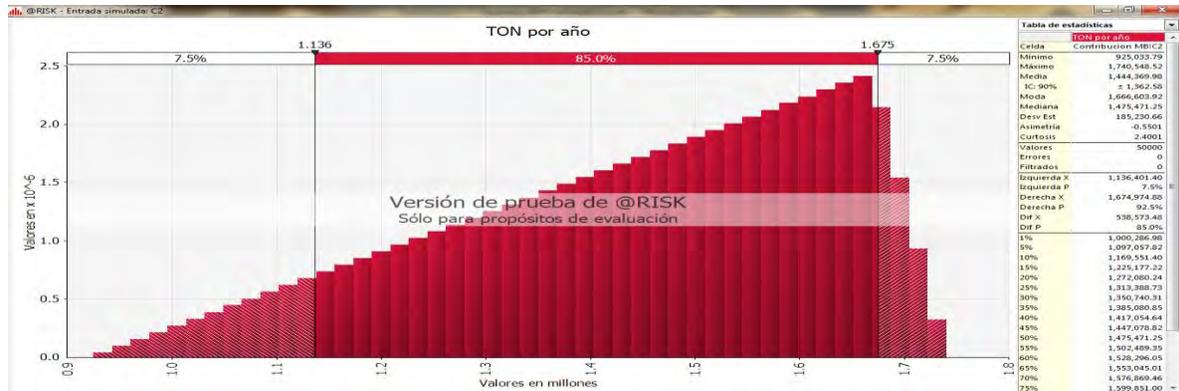
Además, se detalla la información de los estadísticos de cada una de las distribuciones de probabilidad:

➤ **Tonelaje de mineral**

La variable de Tonelaje de mineral tiene una distribución Triangular, con un rango de valores entre 925,033 t y 1'740,548 t, el valor promedio es de 1'444,369 t y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- 295,000 t. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 1'136,000 t y 1'675,000 t. El valor con mayor frecuencia es de 1'666,603 t, su mediana o percentil 50 es de 1'475,471 t, su desviación estándar es de 185,230 t, su asimetría es negativa con un valor

de -0.55 y finalmente su curtosis es de 2.4 (Platicúrtica); es decir, consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 15: Distribución de probabilidad ajustada para el Tonelaje



Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ **Ley de Zinc**

La variable de Ley de Zinc tiene una distribución ExtValue, con un rango de valores entre 2.81% y 13.92%, el valor promedio es de 4.99% y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- 1.44%. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 3.91% y 6.38%. El valor con mayor frecuencia es de 4.57%, su mediana o percentil 50 es de 4.84%, su desviación estándar es de 0.91%, su asimetría es positiva con un valor de +1.14 y finalmente su curtosis es de 5.45 (Leptocúrtica); es decir, consta de una alta concentración de datos en la zona central.

Figura 16: Distribución de probabilidad ajustada para el Tonelaje

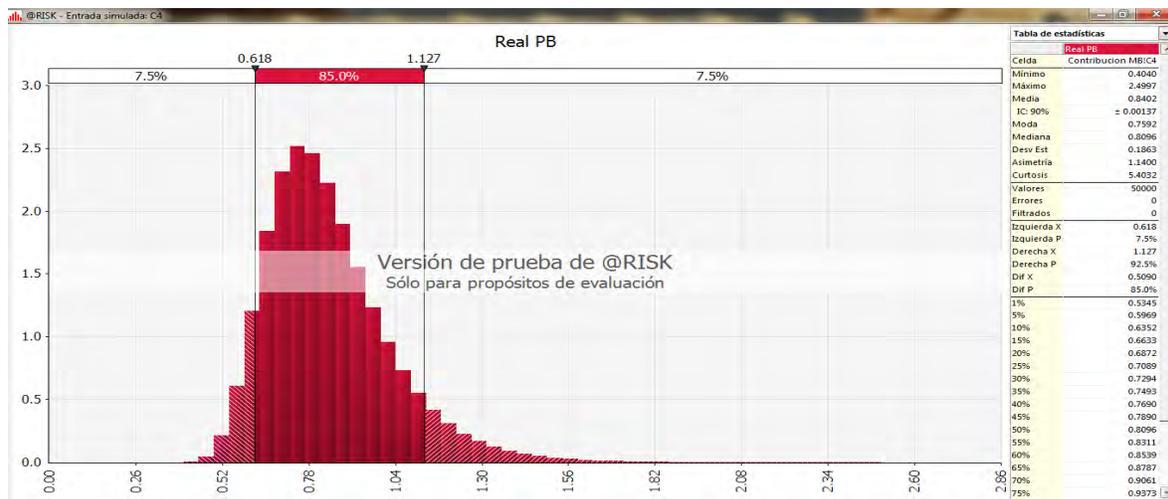


Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ Ley de Plomo

La variable de Ley de Plomo tiene una distribución ExtValue, con un rango de valores entre 0.40% y 2.49%, el valor promedio es de 0.84% y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de $\pm 0.30\%$. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 0.61% y 1.12%. El valor con mayor frecuencia es de 0.75%, su mediana o percentil 50 es de 0.80%, su desviación estándar es de 0.18%, su asimetría es positiva con un valor de +1.14 y finalmente su curtosis es de 5.40 (Leptocúrtica); es decir, consta de una alta concentración de datos en la zona central.

Figura 17: Distribución de probabilidad ajustada para la Ley de Plomo



Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ Ley de Cobre

La variable de Ley de Cobre tiene una distribución InvGauss, con un rango de valores entre 0.06% y 1.13%, el valor promedio es de 0.18% y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de $\pm 0.13\%$. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 0.09% y 0.31%. El valor con mayor frecuencia es de 0.12%, su mediana o percentil 50 es de 0.15%, su desviación estándar es de 0.08%, su asimetría es positiva con un valor de +2.04 y finalmente su curtosis es de 9.88 (Leptocúrtica); es decir, consta de una muy alta concentración de datos en la zona central.

Figura 18: Distribución de probabilidad ajustada para la Ley de Cobre



Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ **Ley de Plata**

La variable de Ley de Plata tiene una distribución Loglogistic, con un rango de valores entre 1.84 oz/t y 13.96 oz/t, el valor promedio es de 3.43 oz/t y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de ± 0.88 oz/t. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 2.76 oz/t y 4.23 oz/t. El valor con mayor frecuencia es de 3.26 oz/t, su mediana o percentil 50 es de 3.35 oz/t, su desviación estándar es de 0.57%, su asimetría es positiva con un valor de +1.68 y finalmente su curtosis es de 12.31 (Leptocúrtica); es decir, consta de una muy alta concentración de datos en la zona central.

Figura 19: Distribución de probabilidad ajustada para la Ley de Plata

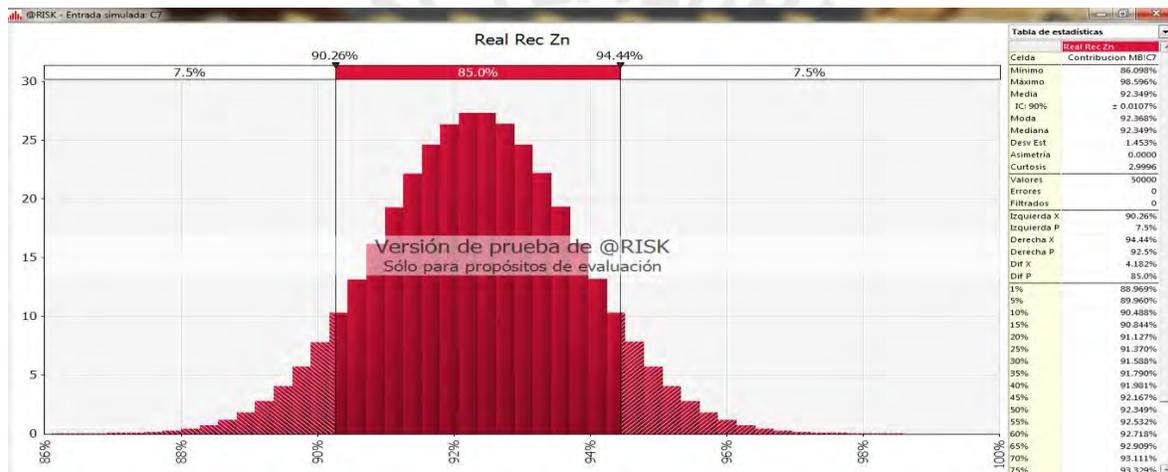


Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ **Recuperación Metalúrgica de Zinc**

La variable de Recuperación Metalúrgica de Zinc tiene una distribución Normal, con un rango de valores entre 86.09% y 98.59%, el valor promedio es de 92.34% y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- 2.39%. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 90.26% y 94.44%. El valor con mayor frecuencia es de 92.36%, su mediana o percentil 50 es de 92.34%, su desviación estándar es de 1.45%, su distribución es simétrica y finalmente su curtosis es de 2.99, está ligeramente por debajo de la normal de 3.00 (Mesocúrtica); es decir, consta de una concentración intermedia de datos en la zona central.

Figura 20: Distribución de probabilidad ajustada para la Recuperación Metalúrgica de Zinc

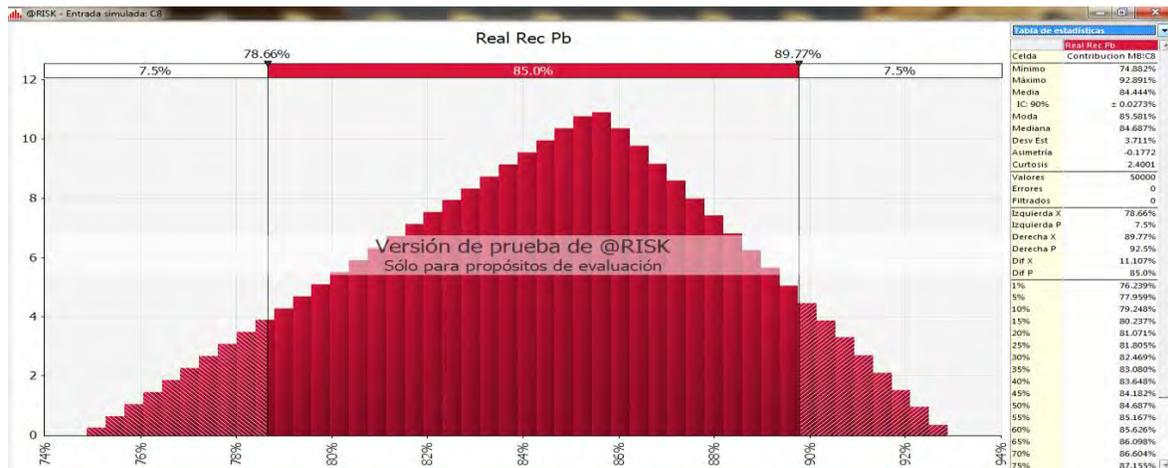


Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ **Recuperación Metalúrgica de Plomo**

La variable de Recuperación Metalúrgica de Plomo tiene una distribución Triangular, con un rango de valores entre 74.88% y 92.89%, el valor promedio es de 84.44% y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- 6.20%. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 78.66% y 89.77%. El valor con mayor frecuencia es de 85.58%, su mediana o percentil 50 es de 84.68%, su desviación estándar es de 3.71%, su asimétrica es ligeramente negativa con un valor de -0.17 y finalmente su curtosis es de 2.40 (Platicúrtica); es decir, consta ligeramente de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 21: Distribución de probabilidad ajustada para la Recuperación Metalúrgica de Plomo

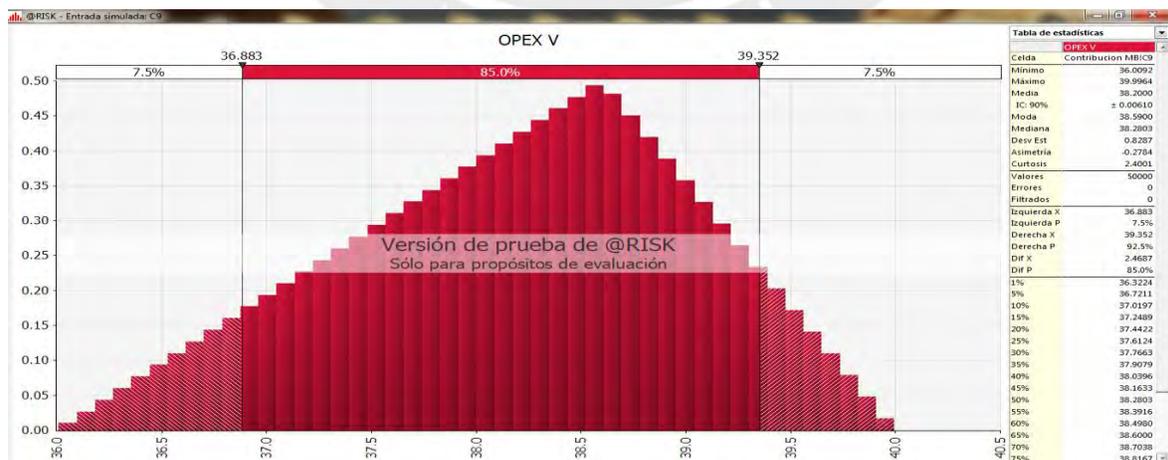


Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ **OPEX Variable Unitario**

La variable de OPEX Variable Unitario tiene una distribución Triangular, con un rango de valores entre US\$/t 36.01 y US\$/t 39.99, el valor promedio es de US\$/t 38.02 y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +/- US\$/t 1.38. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre US\$/t 36.88 y US\$/t 39.35. El valor con mayor frecuencia es de US\$/t 38.59, su mediana o percentil 50 es de US\$/t 38.28, su desviación estándar es de US\$/t 0.82, su asimetría es negativa con un valor de -0.27 y finalmente su curtosis es de 2.40 (Platicúrtica); es decir, consta ligeramente de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 22: Distribución de probabilidad ajustada para el OPEX Variable Unitario

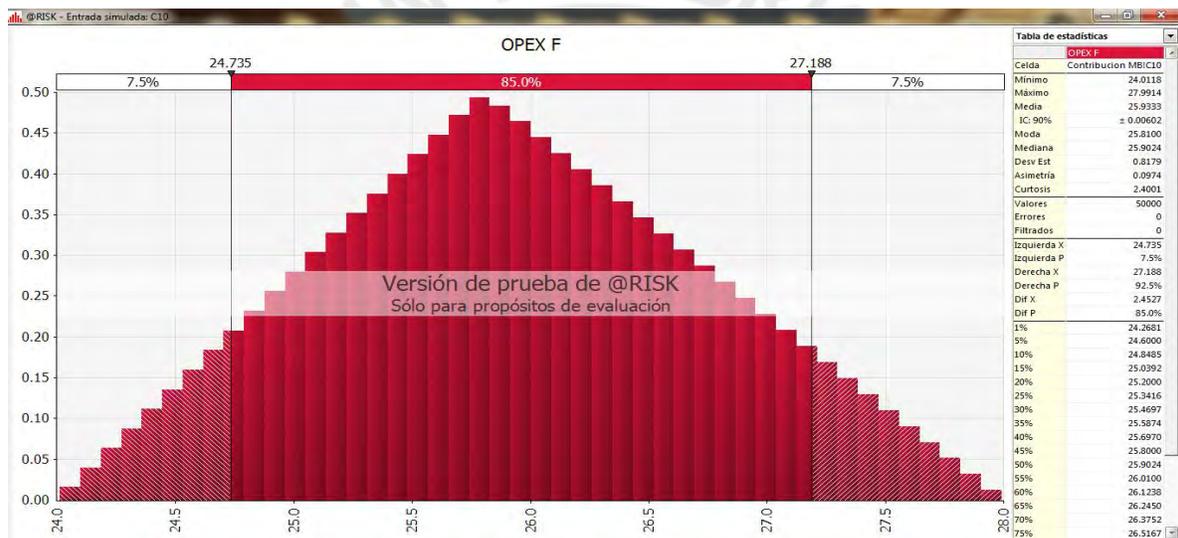


Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

➤ **OPEX Fijo Unitario**

La variable de OPEX Fijo Unitario tiene una distribución Triangular, con un rango de valores entre US\$/t 24.01 y US\$/t 27.99, el valor promedio es de US\$/t 25.93 y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +/- US\$/t 1.37. Además, tiene el 85% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre US\$/t 24.73 y US\$/t 27.18. El valor con mayor frecuencia es de US\$/t 25.81, su mediana o percentil 50 es de US\$/t 25.90, su desviación estándar es de US\$/t 0.81, su asimetría es ligeramente positiva con un valor de +0.09 y finalmente su curtosis es de 2.40 (Platicúrtica); es decir, consta ligeramente de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 23: Distribución de probabilidad ajustada para el OPEX Fijo Unitario

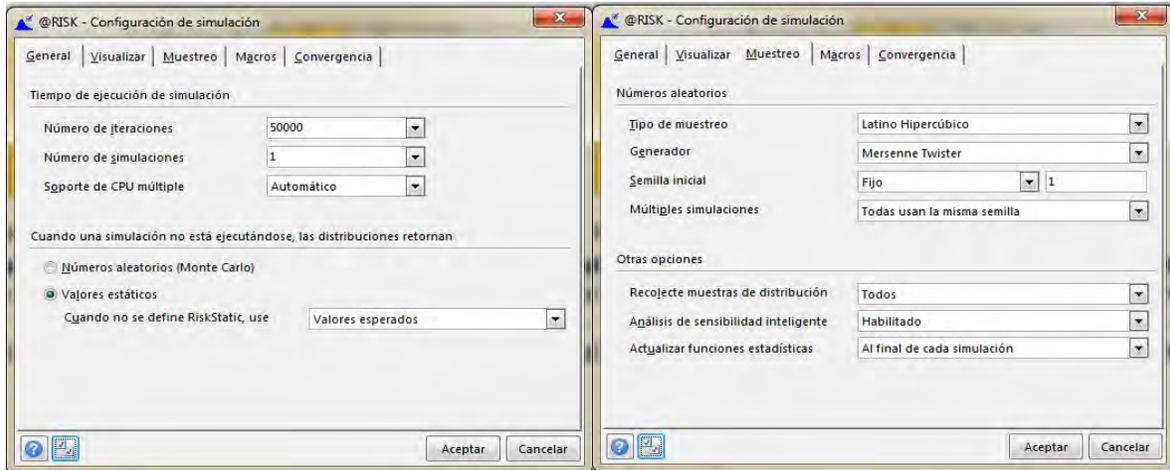


Fuente: Elaboración propia. Cartas Mensuales.

Teniendo las distribuciones de probabilidad para las variables a estudiar, se indica la correlación entre ellas, las leyes de cabeza de los metales tienen una correlación positiva con las recuperaciones metalúrgicas. Además, el tonelaje de mineral tiene una correlación negativa con el OPEX variable unitario.

Al tener todos los inputs requeridos para la simulación, se realizó la configuración de la misma como el número de iteraciones, número de simulaciones, tipo de muestreo, generador y semilla inicial. En la siguiente figura, se detalla esta información:

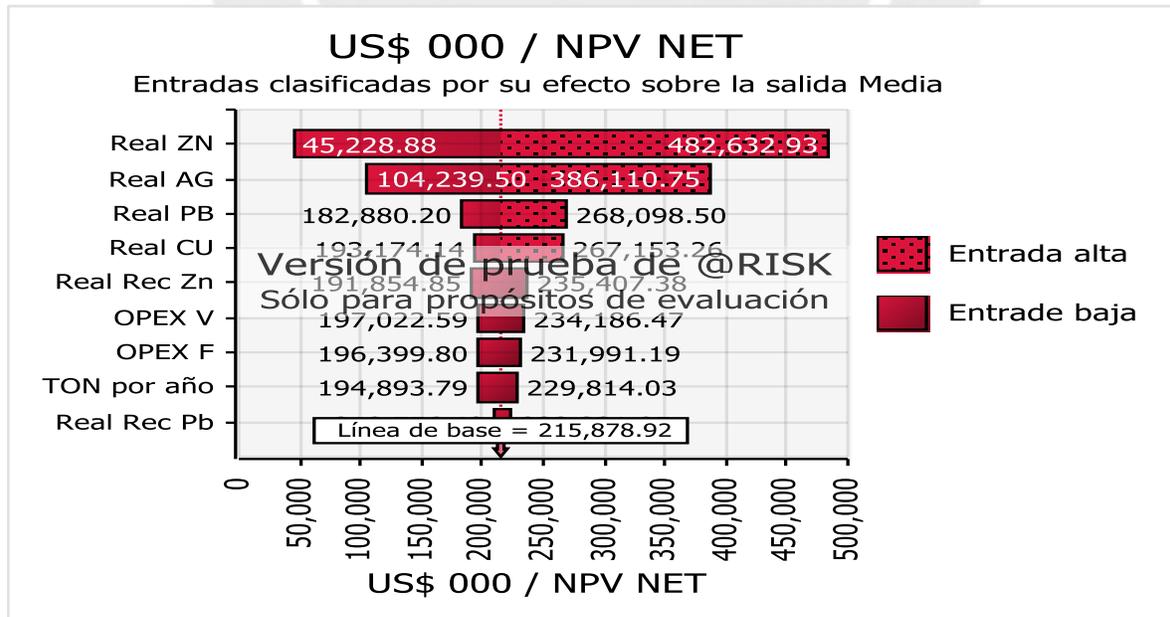
Figura 24: Configuración de Simulación @Risk



Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de las simulaciones ejecutadas en el software @Risk, se obtuvieron que las variables de leyes de cabeza de cada metal, son las que más impactan en el VAN y las variables de recuperaciones metalúrgicas, OPEX y tonelaje, las que menos impactan en nuestra variable dependiente. Estos resultados guardan relación con el análisis de sensibilidad realizado en el modelo Determinístico. A continuación, se muestra el gráfico de Tornado de los riesgos operativos en torno al VAN esperado:

Figura 25: Tornado de los riesgos operativos en torno al VAN esperado



Fuente: Elaboración propia.

Como indica la figura anterior, se detalla las variables operativas de mayor impacto en el VAN, en cuanto a la ley de Zinc se obtuvo una variación entre 80% y 124% en base al VAN esperado de US\$ 215M, con respecto a la ley de Plata se obtuvo una variación entre 52% y 79%, en cuanto a la ley de Plomo tuvo como resultado una variación entre 15% y 24%, finalmente para la ley cobre se obtuvo una variación entre 11% y 23%. Como consecuencia de dichos resultados se enfatizó en mejorar el cumplimiento de estas variables críticas.

Se realizó tres simulaciones, según los modelos detallados en las siguientes líneas con sus respectivos resultados:

1) MODELO BASE - MB

Aplicación de modelo Estocástico al flujo de caja Determinístico. Es decir; se incluyeron las distribuciones de probabilidad de cada variable independiente definida y se obtuvo una distribución de probabilidad para la variable dependiente, el VAN. En este modelo, se tuvieron los siguientes supuestos basados en la información de la compañía minera:

- ✓ Producción media de 1'460,000 toneladas por año. (ritmo de producción óptimo determinístico definido previamente)
- ✓ LOM: 18 años (según el Recurso de Mineral Económicamente Explotable)
- ✓ Precio del Zinc: US\$/t 2,000.
- ✓ Precio del Plomo: US\$/t 2,200.
- ✓ Precio del Cobre: US\$/t 6,500.
- ✓ Precio de Plata: US\$/oz 18.
- ✓ Tasa de descuento: 10%.
- ✓ Deducciones en concentrados, términos comerciales y gastos de ventas según:

Figura 26: Deducciones Concentrados, Términos comerciales y Gastos de ventas

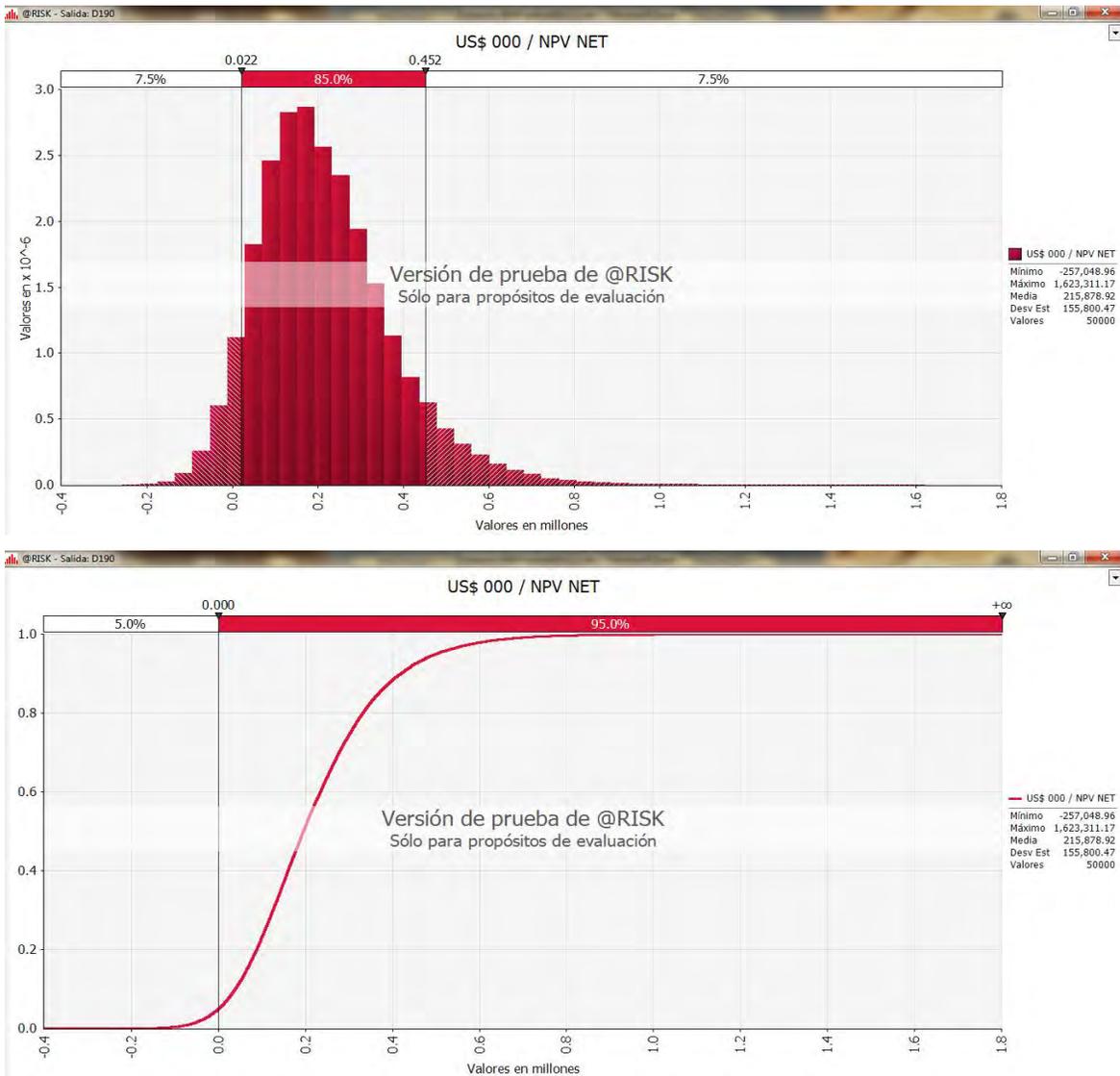
CC Zn Payable				Commercial Terms	
Zn Payable	FMT	56,323	Zn Concentrate		
ded. 1	%	8.00	Treatment Charge	US\$/DMT	-219
ded. 2	%	85.00	Pb Concentrate		
Ag Payable	Oz	357,979	Treatment Charge	US\$/DMT	-229
min ded	Oz/MT	3.1	Refining Charge	US\$/Ag	-1.5
ded %	%	69.00	Cu Concentrate		
CC Pb Payable			Treatment Charge	US\$/DMT	-249
Pb Payable	FMT	9,618	Refining Charge	US\$/Ag	-1.5
ded. 1	%	3.0	Sales Expenses		
ded. 2	%	95.0	Unit Sales Expenses Zn	US\$/DMT	16.8
Ag Payable	Oz	1,420,825	Unit Sales Expenses Pb	US\$/DMT	17.6
min ded	Oz/MT	1.6	Unit Sales Expenses Cu	US\$/DMT	18.9
ded %	%	95.0	Sales Expenses	US\$ 000	2,618
CC Cu Payable					
Cu Payable	FMT	1,209			
ded. 1	%	1.0			
ded. 2	%	96.7			
Ag Payable	Oz	1,528,827			
min ded	Oz/MT	0.0			
ded %	%	85.0			

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Utilización de equipos: 85%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Utilización de Energía: 95%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Utilización de Sistema de Bombeo: 95%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Dilución: 40%. (Riesgo operativo Leyes de cabeza de mineral)
- ✓ Estimación de Recursos y Reservas: 90% (Riesgo operativo Leyes de cabeza de mineral)

En este caso, se obtuvo un VAN esperado por encima del VAN determinístico en US\$ 2M, Además, existe una probabilidad de 85%, que los resultados del VAN estén entre US\$ 22M y US\$ 452M con una desviación estándar de US\$ 155M. Finalmente, se puede observar que existe la probabilidad de 5%, que el VAN sea negativo.

Figura 27: Distribución de probabilidad del VAN y Distribución Acumulada - MB



Fuente: Elaboración propia.

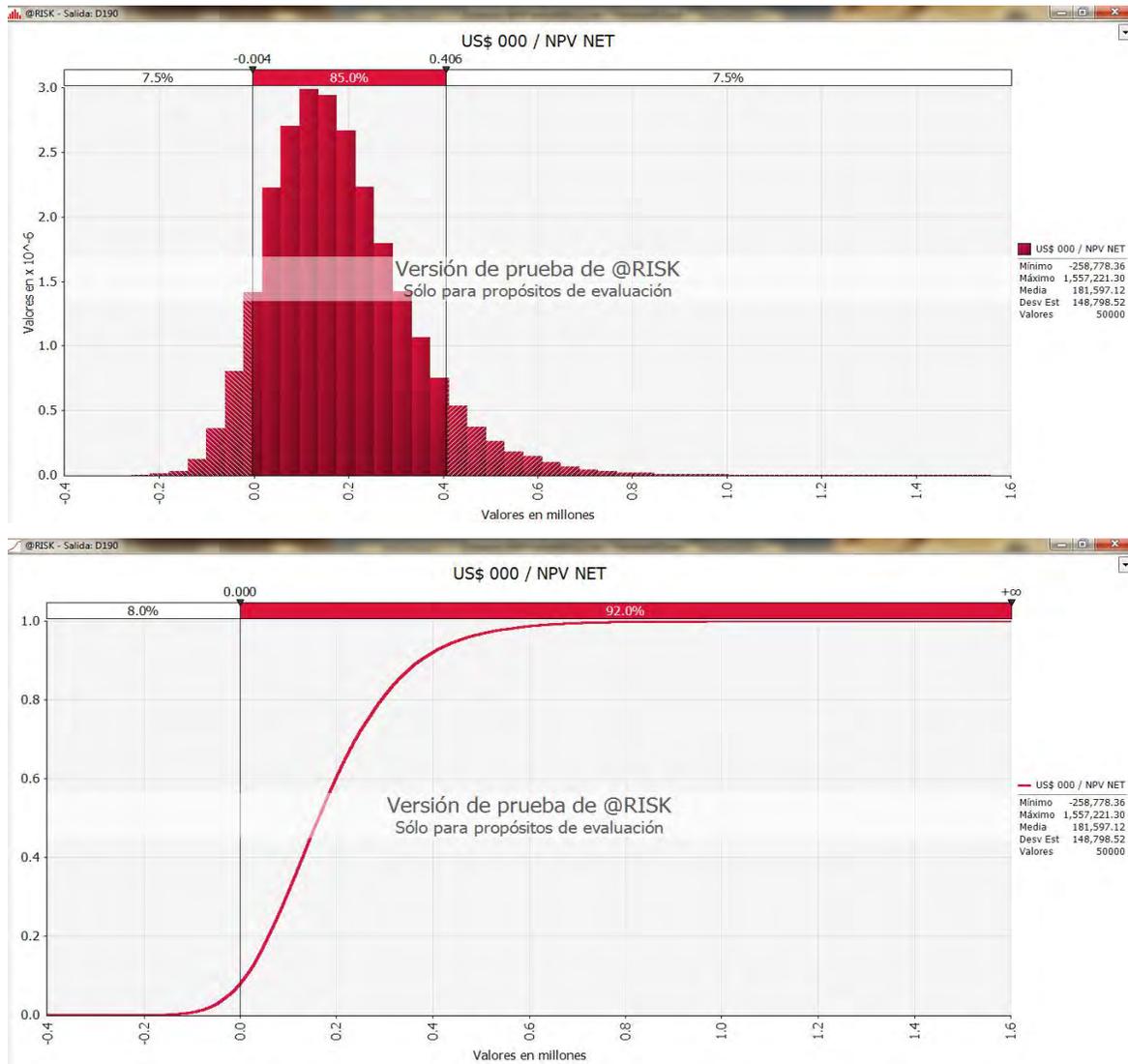
2) MODELO CON PORCENTAJES DE CUMPLIMIENTO HISTÓRICOS - MR

Aplicación de modelo Estocástico en base a porcentajes de cumplimiento de las variables operativas según información histórica; por ejemplo, el tonelaje extraído tiene un cumplimiento del 93% y se desglosa en utilización de equipos, Energía y de Sistema de bombeo, mientras que las leyes de mineral, en dilución (5% mayor de lo planeado) y estimación de Recursos y Reservas. En este modelo, se tuvieron los siguientes supuestos basados en la información de la compañía minera:

- ✓ Producción media de 1'359,127 toneladas por año. (ritmo de producción óptimo con riesgo operativo)
- ✓ LOM: 20 años (según el Recurso de Mineral Económicamente Explotable)
- ✓ Precio del Zinc: US\$/t 2,000.
- ✓ Precio del Plomo: US\$/t 2,200.
- ✓ Precio del Cobre: US\$/t 6,500.
- ✓ Precio de Plata: US\$/oz 18.
- ✓ Tasa de descuento: 10%.
- ✓ Deducciones en concentrados, términos comerciales y gastos de ventas (igual Modelo Base)
- ✓ Utilización de equipos: 81%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Utilización de Energía: 85%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Utilización de Sistema de Bombeo: 90%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Dilución: 42%. (Riesgo operativo Leyes de cabeza de mineral)
- ✓ Estimación de Recursos y Reservas: 89% (Riesgo operativo Leyes de cabeza de mineral)

En este caso, se obtuvo un VAN esperado por debajo del VAN MB en US\$ 34M. Además, existe una probabilidad de 85%, que los resultados del VAN estén entre -US\$ 4M y US\$ 406M con una desviación estándar de US\$ 148M. Finalmente, se puede observar que existe la probabilidad de 8%, que el VAN sea negativo.

Figura 28: Distribución de probabilidad del VAN y Distribución Acumulada - MR



Fuente: Elaboración propia.

3) MODELO CON GESTIÓN DE RIESGOS - MF

Aplicación de modelo Estocástico con inversiones para mejorar y de esta manera, elevar el porcentaje de cumplimiento de las variables operativas definidas.

En cuanto a la variable Producción, se tiene las siguientes inversiones:

- Adquisición de equipos_US\$ 5100K.
- Suministro Backup Térmico_US\$ 800K.
- Adquisición de Bombas Stand By_US\$ 900K.

Con respecto a la variable de leyes de mineral, se tiene las siguientes inversiones:

- Estudio Geomecánico_US\$ 950K.
- Adquisición equipo Optech_US\$ 60K.
- Perforación Diamantinas InFill_US\$ 712.5K.

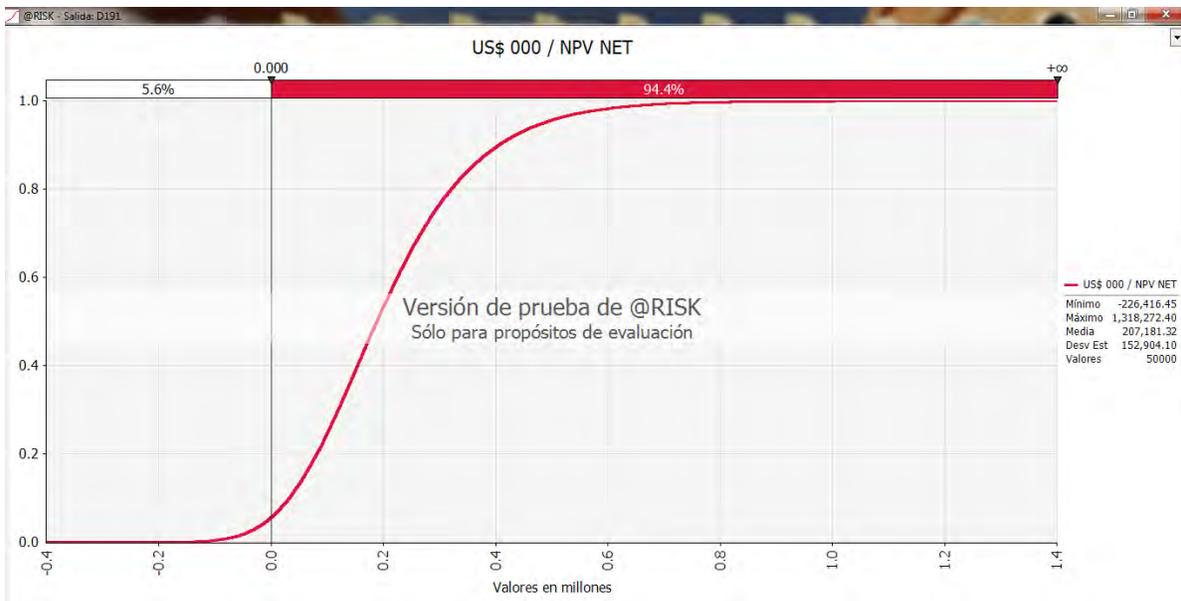
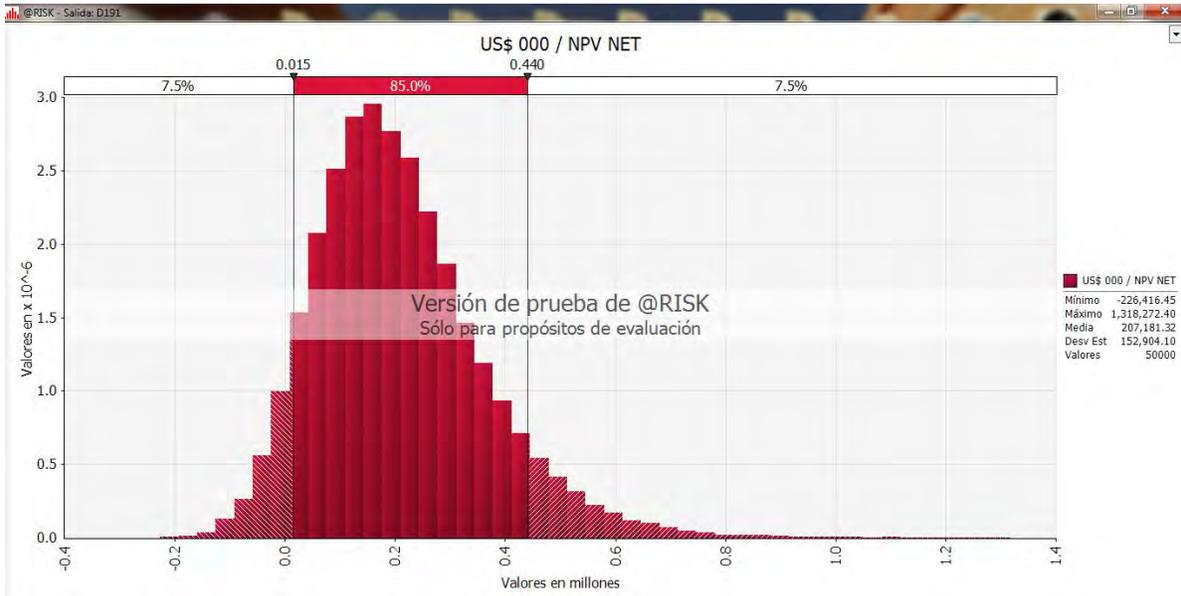
En este modelo, se tuvieron los siguientes supuestos basados en la información de la compañía minera:

- ✓ Producción media de 1'422,836 toneladas por año. (ritmo de producción óptimo con riesgo operativo)
- ✓ LOM: 19 años (según el Recurso de Mineral Económicamente Explotable)
- ✓ Precio del Zinc: US\$/t 2,000.
- ✓ Precio del Plomo: US\$/t 2,200.
- ✓ Precio del Cobre: US\$/t 6,500.
- ✓ Precio de Plata: US\$/oz 18.
- ✓ Tasa de descuento: 10%.
- ✓ Deducciones en concentrados, términos comerciales y gastos de ventas (igual Modelo Base)
- ✓ Utilización de equipos: 85%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Utilización de Energía: 90%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Utilización de Sistema de Bombeo: 93%. (Riesgo operativo Producción)
- ✓ Dilución: 40%. (Riesgo operativo Leyes de cabeza de mineral)
- ✓ Estimación de Recursos y Reservas: 90% (Riesgo operativo Leyes de cabeza de mineral)

Los porcentajes de incremento en cada variable, se definieron mediante la metodología de juicio de expertos.

En este caso, se obtuvo un VAN esperado por debajo del VAN MB en US\$ 8M y por encima del VAN MR en US\$ 26M. Además, existe una probabilidad de 85%, que los resultados del VAN estén entre US\$ 15M y US\$ 440M con una desviación estándar de US\$ 152M. Finalmente, se puede observar que existe la probabilidad de 5.6%, que el VAN sea negativo.

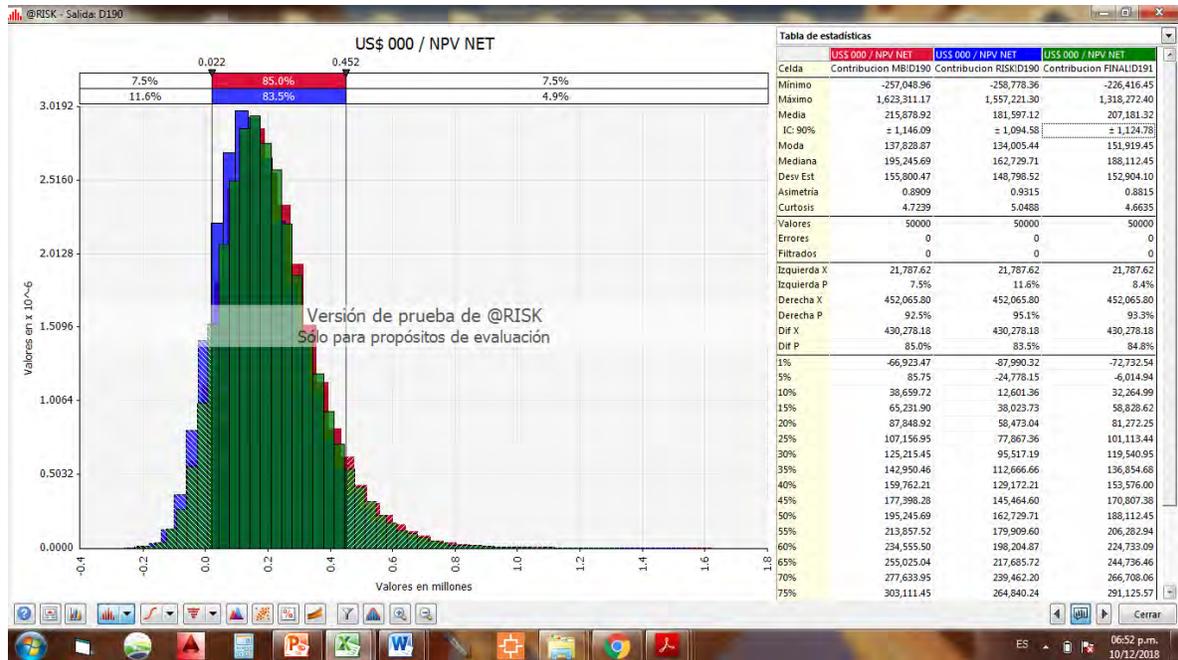
Figura 29: Distribución de probabilidad del VAN y Distribución Acumulada - MF



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se resumen los resultados de las tres simulaciones realizadas en el software de análisis de riesgos:

Figura 30: Resumen de Distribuciones de Probabilidad del VAN esperado



Fuente: Elaboración propia.

El modelo con Porcentajes de Cumplimiento Históricos (5.04), tiene la curtosis mayor a los demás, esta indica que su distribución de datos está más concentrada en torno a su media, esto también se puede concluir con el valor de desviación estándar, la cual es menor a todos. Además, este modelo consta de una asimetría positiva relativamente mayor (0.93) que los demás; por lo que, el mayor porcentaje de datos de VAN se encuentran en la zona izquierda de la distribución de probabilidad.

A pesar que el modelo con Gestión de Riesgos (US\$ 207M), tiene un valor esperado menor que el modelo Base (US\$ 215M), este tiene un mayor valor de moda, que indica que su valor más frecuente es de US\$ 151M. Además, tiene una asimetría positiva menor que todos los modelos, representando que el porcentaje de sus datos están más cerca de su media que los demás modelos. Finalmente, los VAN esperados en los modelos Base y con Gestión de Riesgos, en un 85% de probabilidad de éxito, son positivo; mientras que, en el modelo con Porcentajes de Cumplimientos Históricos, tiene valores negativos.

CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN

3.1 Modelo Base - Determinístico

El enfoque principal ha sido determinar el ritmo óptimo de producción de la operación con el tamaño actual o a la cantidad de recursos de mineral económicamente explotables - RMEE - que cuenta actualmente la mina. Se sabe que el ritmo de producción actual de la mina es de 3,250 tpd y los RMEE ascienden a 23 millones de toneladas generando un VAN de US\$ 192M. Para determinar el Ritmo Óptimo de Producción abarcamos a dos conceptos: La primera considera la aplicación de las fórmulas empíricas y el segundo consiste en la aplicación práctica de las teorías económicas en minería. Tradicionalmente se cuenta con una serie de fórmulas empíricas basadas en estadísticas de tamaños de producción de minas que generalmente son de aplicación en una primera fase de los estudios conceptuales y/o de pre factibilidad. De las tres fórmulas empíricas estudiadas y aplicadas la Regla de H. K. Taylor (1976) calcula un ritmo de producción de 16,000 tpd, que es cuatro veces mayor al ritmo actual mientras que las fórmulas de López Jimeno (1986) y Brian Mackenzie (1982), dan como resultados ritmos de 3,800 tpd y 4,600 tpd respectivamente. Para este caso de estudio tomamos como referencia las dos últimas para el desarrollo y evaluación de escenarios de ritmos de producción. Amerita mencionar que hasta el momento no sabemos cuál de los dos ritmos de producción tiene el mayor beneficio y menos sabemos cuál es el ritmo de producción que maximiza los beneficios, pero si es posible saber con la aplicación del segundo concepto, las teorías económicas.

Al igual que el primer concepto, se evaluó fórmulas empíricas de varios autores, en el segundo concepto de las teorías económicas, también se han estudiado, comparando y analizando las teorías de R. Frank (2009); María Luisa Maino y Estrella Rosa (2011), Libby Rittenberg y Timothy Tregarthen (2012), donde llegamos a la conclusión que estas teorías argumentan en que el máximo beneficio de una empresa se obtiene cuando $IMg = CMg = P$. Para el desarrollo del presente caso nos alineamos con la teoría de Robert Frank porque fue aplicado en minería de gran escala con método de explotación a cielo abierto. Para la aplicación práctica de este caso de estudio, se desarrollaron siete (07) escenarios de ritmos de producción intercalados a 250 tpd, donde el escenario 01 considera el actual ritmo de producción que es de 3,250 tpd, el segundo escenario es de 3,500 tpd, el tercer escenario de 3,750 tpd, así sucesivamente hasta llegar al séptimo y

último escenario que es de 5,000 tpd, cabe mencionar que dentro de estos límites: inferior de 3,250 tpd y el límite superior de 5,000 tpd se encuentran los ritmos de producción calculados con las fórmulas empíricas. El ritmo de producción de 3,800 tpd calculado con la fórmula de López Jimeno y 4,600 tpd calculada con la fórmula de Brian Mackenzie.

Los desarrollos de cálculo determinístico por escenario arrojan valores netos actualizados mostrando que cuanto más produce menos es el costo por cada unidad adicional obteniendo así un adicional de beneficio (Robert Frank, 2009). Del análisis de estos resultados se resuelve tres conclusiones relevantes:

La primera conclusión afirma que el máximo valor de US\$ 213M, se presenta cuando los Ingresos Marginales se iguales a los Costos Marginales.

La segunda conclusión afirma que el ritmo óptimo producción que maximiza los beneficios es de 4,000 tpd.

La tercera conclusión se afirma que los ritmos de producción de López Jimeno (3,800 tpd) y Brian Mackenzie (4,600 tpd) generan menores beneficios respecto a lo generado con 4,000 tpd.

Desde un punto de vista crítico, las fórmulas empíricas son basadas exclusivamente en una variable, que son las reservas de mineral. Conforme a M. Bustillos y C. López Jimeno, recomiendan que “todas estas fórmulas empíricas deben ser aplicadas con cierta precaución, teniendo en cuenta algunos defectos que derivan de la omisión de todo un conjunto de factores” (2012:486). Por otro lado, estas fórmulas no fueron actualizadas desde la fecha que se publicaron, manteniendo los niveles de automatización y tecnología en las actividades unitarias de los procesos de mina y planta, por lo expuesto se recomienda el uso de estas fórmulas para estimar un ritmo de producción preliminar o extraoficial con un margen de error de más menos 15%; mientras que la aplicación de las teorías económicas si considera variables como tonelajes, leyes de mineral, recuperaciones metalúrgicas, leyes de concentrados, para los planes de minado a largo plazo y los precios de minerales, costos de producción, gastos de inversión, para finalmente llegar a determinar el VAN a una tasa de descuento. En la actualidad se cuenta en el mercado software mineros que facilitan el procesamiento de toda esta data en pocas horas, para este ejercicio se aplicó el software minero Deswik para el estimado de los RMEE, la secuencia de minado y los planes de minado de la vida de la mina por escenario. Así como el Deswik se tiene en el mercado el Datamine, MineSight, Gemcom, Vulcan, entre otros.

Toda esta parte de cálculos determinísticos muestra un entregable finamente trabajado que es el ritmo óptimo de producción, en este caso de 4,000 tpd, donde las variables técnicas operativas (geológicas, mineras, de planta) y económicas (precios, costos, gastos, impuestos) se realizarán tal como se han pronosticado. Por ejemplo, en geología se asume en los recursos estimados los tonelajes y leyes tienen un más menos de 10% de probabilidad de certeza, en planeamiento se considera que el plan de minado se va cumplir en 100%, en mina; la disponibilidad de los equipos de los jumbos, simbas, scooptrams, bombas de agua, abastecimiento de energía no estarán por debajo de lo programado. Sin embargo, analizando la información real histórica se observa que algunos casos se cumplen y en otras no, poniendo en riesgo los compromisos proyectados en metal fino. Este trabajo de investigación considera la evaluación y la identificación de actividades cuyo impacto sean riesgos potenciales. A estos riesgos lo llamaremos riesgos operacionales que una vez identificados se plantean acciones que garanticen el logro de objetivos.

3.2 Modelo Base – Estocástico

El modelo determinístico no incluye distribuciones de probabilidad en sus variables dependientes; es por ello, la necesidad de insertarlos en el modelo financiero para obtener resultados de VAN más confiables, que a su vez tenga una distribución de probabilidad (VAN medio US\$ 215M) para poder analizar más en detalle y no solo un valor fijo. En este caso, obtenemos un 101% del VAN Base Determinístico (US\$ 213M), esto sucede debido a que las distribuciones reales de probabilidad de las variables dependientes, tienen una mejor probabilidad de obtener mejores resultados de VAN. De igual forma sucedió con Montiel y Dimitrakopoulos quienes obtuvieron un 9% más del VAN determinístico, además de Sepúlveda cuyo VAN medio obtenido con el modelo estocástico fue significativamente mayor al VAN determinístico estimado y Arteaga, cuyo VAN medio se incrementa en un 133% en base del VAN fijo Determinístico. Todo lo contrario, fue demostrado por Godoy y Dimitrakopoulos en su artículo, ya que obtuvieron un VAN medio 26% menor que el VAN determinístico, concluyendo que los valores de tonelaje y leyes habían sido sobreestimados.

La configuración de la simulación Monte Carlo, es fundamental para obtener resultados más ajustados y precisos a la realidad, así como lo indica, Agüero en su tesis doctoral. En este caso utilizamos 50,000 iteraciones y el tipo de muestreo Hipercúbico.

En cuanto a las leyes de mineral, nuestro caso de estudio contiene distribuciones con alta dispersión, caso contrario sucede en la información que presenta Venegas, que al tener un yacimiento más homogéneo que el de este estudio, tienen menor desviación estándar y, por lo tanto, mayor concentración de datos en la zona central de sus distribuciones obteniendo valores más ajustados de VAN.

3.3 Modelo con Porcentaje de Cumplimiento Histórico – Estocástico

Los riesgos operativos críticos se detallan a continuación:

En referencia a la variable Producción, se tiene la utilización de equipos, utilización del sistema de energía eléctrica y sistema de bombeo.

En referencia a la variable de Leyes de mineral, se identificaron la dilución del mineral y la estimación de recursos y reservas.

Como se puede verificar estos riesgos guardan relación con los indicados en los estudios y artículos realizados por Montiel, Sepúlveda, Cabeza - Torra y Cerda.

En este modelo, se obtuvo un VAN medio de US\$ 181M, el cual representa un 84% del VAN medio del Modelo Base. Este resultado guarda relación con lo mencionado por GEM, que los planes mineros no se cumplen al 100%, debido a los riesgos asociados a la actividad.

3.4 Modelo con Gestión de Riesgos – Estocástico

Con el objetivo de disminuir la probabilidad y el impacto de las variables cuyos efectos son negativos en el modelo de VAN propuesto e incrementar la probabilidad y el impacto de las variables que están a favor del mismo, se recomienda los siguientes planes de gestión, los cuales fueron incluidos en este modelo:

Leyes y tonelajes Insitu_Mejorar en las interpretaciones geológicas aumentando la certeza de las mismas, revisar y evaluar los testigos de perforaciones o muestreos geológicos que se tengan. Además de incrementar en Perforaciones Diamantinas Infill, de esta manera, se tendrá un modelo de recursos minerales con información más confiable y

menos riesgosa. La inversión asciende a un monto de US\$ 0.712M, obteniendo un porcentaje de cumplimiento igual que el Modelo Base.

Leyes diluidas_Optimizar la dilución, realizar trade off para definir las dimensiones de explotación que nos brinde la menor dilución posible comparando con la compra de flota de equipos que se requiera, estudios geomecánicos y equipos escáner como el Optech. La inversión asciende a un monto de US\$ 1M, obteniendo un porcentaje de cumplimiento igual que el Modelo Base.

Al igual que Dimitrakopoulos, que considera que tanto los modelos recursos geológicos como los modelos de reservas minerales y precios de metales son fundamentales y de mayor impacto para la industria minera, los resultados del estudio nos indican que estas variables son determinantes en la variabilidad del VAN.

OPEX_Realizar gestión en reducción de costos operativos, seleccionar métodos de explotación masivos teniendo en cuenta el margen económico y condiciones del yacimiento.

Tonelaje extraído de mineral_Adquirir o alquilar un equipo de stand by, mejorar el plan de mantenimiento correctivo, preventivo y aplicar un plan predictivo., Además, mejorar la utilización de energía eléctrica, mediante un suministro de Backup Térmico, así como la utilización del sistema de Bombeo, adquiriendo bombas de stand by. De esta manera, se mejoraría el tonelaje a un 97% del Modelo Base, con una inversión de US\$ 6.8M aproximadamente.

Incluyendo todas estas inversiones, que en forma conjunta ascienden a US\$ 8.5M sin flujo descontado, se obtiene un VAN de US\$ 207M, que representa el 96% del VAN del Modelo Base, mejorando en 12% el VAN del Modelo con Porcentaje de Cumplimiento Histórico.

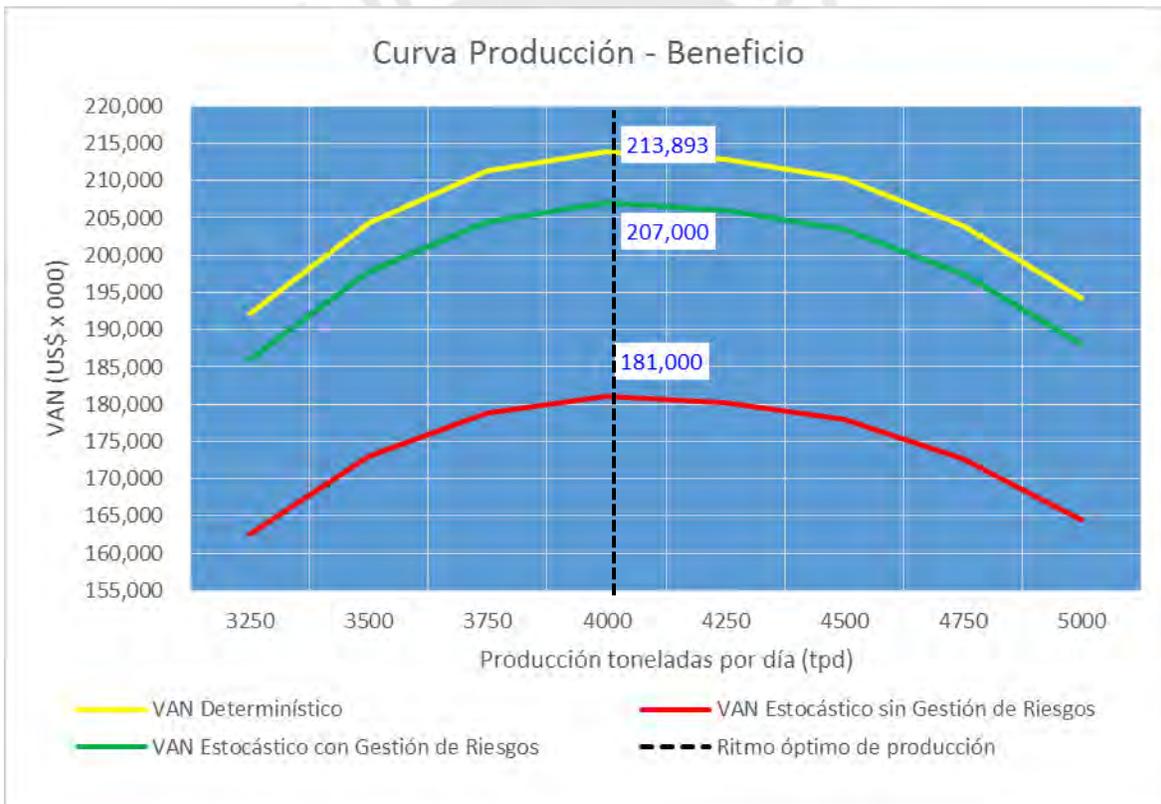
La conclusión en el capítulo Determinístico, es que el actual ritmo de producción no maximiza el VAN (US\$ 192M), el cual con las teorías económicas sí se logra obtener (US\$ 213M). Además, que las fórmulas empíricas, a pesar de no optimizar esta variable de producción, es una base para iniciar la evaluación.

La conclusión en el capítulo Estocástico, es que incluyendo los riesgos operativos en el flujo de caja obtenemos distribuciones de VAN (no solo un valor único, como en el caso Determinístico), con mayor detalle e información más cercana a la realidad (US\$ 181M),

para de esta manera poder enfatizar en los riesgos más impactantes (leyes de mineral) para el VAN. Es de esta manera, que se realizó una simulación con gestión de riesgos con el objetivo de conocer si la inversión requerida para elevar el porcentaje de cumplimiento de las variables más críticas, mejoraría el VAN; la respuesta fue positiva (US\$ 207M).

Se aprecia también que el VAN obtenido aplicando el modelo Determinístico (US\$ 213M), es mayor que el obtenido aplicando el modelo Estocástico con Gestión de Riesgos (US\$ 207M), de esta manera podemos concluir que las variables dependientes están sobreestimadas. Además, podemos estimar correctamente las inversiones requeridas y tomar mejores decisiones.

Figura 31: Comparación entre el Modelo Determinístico, Modelo Estocástico sin gestión de riesgos y Modelo Estocástico con gestión de riesgos



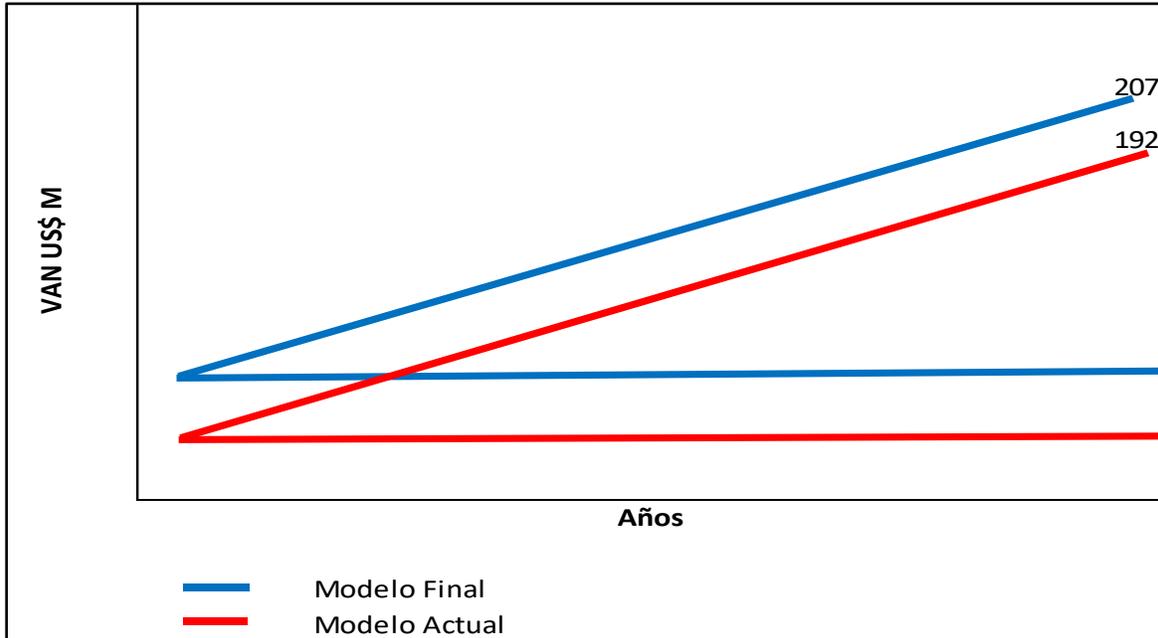
Fuente: Elaboración Propia.

Como se muestra en la figura, tenemos que el VAN obtenido aplicando el modelo Estocástico con Gestión de Riesgos (inversión de US\$ 8.5M) es de US\$ 207M, siendo mayor al VAN del modelo Estocástico sin Gestión de Riesgos y alcanzando un 96% del VAN determinístico.

3.5 Validación de resultados

Para el primer momento de comparación, se obtuvo los siguientes resultados:

Figura 32: Comparación entre el modelo Real y el modelo Final



Fuente: Elaboración Propia.

Como podemos apreciar en la figura, se obtiene un incremento en el VAN de US\$ 15M al emplear la metodología propuesta; es decir, optimizando el ritmo de producción y aplicando el modelo Estocástico. A su vez para realizar la comparación durante y el final de la ejecución, se requiere la información real de la mina, teniendo un margen de error de +/- 15% en los resultados finales. Esta metodología se podrá aplicar a otros casos de minas subterráneas, bajo las condiciones inherentes y específicas de cada una de ellas.

Finalmente, en base a este trabajo de investigación, se podrá incluir los precios de los metales, que debido a la gran volatilidad que tienen; se tendrá que realizar una simulación dinámica para dicha variable y de esta manera poder adicionarlo al modelo propuesto de VAN, como lo analizó Lemelin, Sabour y Poulin en la Mina Raglan – Canadá.

Conclusiones y recomendaciones

1. La conclusión en el capítulo Determinístico, es que el actual ritmo de producción no maximiza el VAN (US\$ 192M), el cual con las teorías económicas sí se logra obtener (US\$ 213M). Además, que las fórmulas empíricas, a pesar de no optimizar esta variable de producción, es una base para iniciar la evaluación.
2. La conclusión en el capítulo Estocástico, es que incluyendo los riesgos operativos en el flujo de caja obtenemos distribuciones de VAN (no solo un valor único, como en el caso Determinístico), con mayor detalle e información más cercana a la realidad (US\$ 181M), para de esta manera poder enfatizar en los riesgos más impactantes (leyes de mineral) para el VAN. Es así, que se realizó una simulación con gestión de riesgos con el objetivo de conocer si la inversión requerida para elevar el porcentaje de cumplimiento de las variables más críticas, mejoraría el VAN; la respuesta fue positiva (US\$ 207M).
3. Se aprecia también que el VAN obtenido aplicando el modelo Determinístico (US\$ 213M), es mayor que el obtenido aplicando el modelo Estocástico con Gestión de Riesgos (US\$ 207M), de esta manera podemos concluir que las variables dependientes están sobreestimadas.
4. Se obtiene un incremento en el VAN de US\$ 15M al emplear la metodología propuesta; es decir, optimizando el ritmo de producción y aplicando el modelo Estocástico.
5. Se recomienda aplicar las fórmulas empíricas (Mackenzie, Taylor, López Jimeno) cuidadosamente debido a su omisión en algunos factores, esta se debe utilizar solo como una línea base para utilizar teorías económicas
6. Cuando la definición de la distribución de probabilidad de cada variable operativa es basada en su estadística en un determinado periodo de tiempo, se recomienda excluir los datos picos que puedan tergiversar la distribución. Técnicamente la elección de la distribución más adecuada se obtiene por un consenso de criterios de información y estadísticos, y depende de la gestión de cada empresa (nivel de ingeniería del proyecto, distribución de costos en la empresa, existencia de data histórica de las variables).

7. Esta metodología se podrá aplicar a otros casos de minas subterráneas, bajo las condiciones inherentes y específicas de cada una de ellas. Como por ejemplo, qué tipo de fase de ingeniería requieren alcanzar en el proyecto, que variables operativas críticas influyen más haciendo más sensible al VAN del proyecto, que tipo de herramientas y técnicas utilizarán para el análisis de cada variable operativa, número de iteraciones a ejecutar, entre otros. Así se podrá estimar correctamente su ritmo óptimo de producción, las inversiones requeridas y tomar mejores decisiones para generar valor a la empresa.
8. Se recomienda darle continuidad al proceso de investigación de la metodología planteada con el fin de buscar la mejora continua.



Bibliografía

Artículos académicos y libros:

Báez, F. (2015). La Innovación en la Minería. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual.

Barros, C; Giadach, F & Vega, F. (2013). Planificación Minera en tiempos inciertos. Gestión y Economía Minera Ltda.

Bian, L. & Gebraeel, N. (2012). Stochastic Methodology for Prognostics under Continuously Varying Environmental Profiles. Wiley Online Library.

Cabeza, M. & Torra, S. (2007). El Riesgo en la Empresa: Medida y control mediante @RISK. Palisade.

Carpentier, S.; Gamache, M. & Dimitrakopoulos, R. (2016). Underground long-term mine production scheduling with integrated geological risk management. Mining Technology.

Chinbat, U. & Takakuwa, S. (2009). Using Simulation Analysis for mining project Risk Management. Winter Simulation Conference.

Davis, G. & Newman, A. (2008). Modern Strategic Mine Planning. Colorado School of Mines.

Deck, C & Guzmán, J. (2013). Planificación Minera en tiempos inciertos. Gestión y Economía Minera Ltda.

Dimitrakopoulos, R. (2011). Stochastic Optimization for Strategic Mine Planning a Decade of Developments. Journal of Mining Science.

Dimitrakopoulos, R. & Jewbali, A. (2013). Joint stochastic optimisation of short and long term mine production planning method and application in a large operating gold mine. Mining Technology.

Equipo PLP Volcan (2017). Implementación del Planeamiento Táctico en las Minas Subterráneas de Volcan Compañía Minera. PERUMIN 33.

Franco, G. & Henao, C. (2015). Implementation of strategic planning to mining in Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra.

Frank, R. (2009). Microeconomía y Conducta. 5ta Edición.

Flowers, R.; Ortiz, R.; Burgos, F.; León, J. & Balladares, M. (2017). Comparison of four Techniques to select the Probability Distribution of Best Fitting for the Analysis of Data of Annual Maximum Precipitation in Mexico. Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability.

Godoy, M. & Dimitrakopoulos, R. (2013). A Risk Quantification Framework for Strategic Mine Planning: Method and Application. Journal of Mining Science.

Lemelin, B.; Sabour, A. & Poulin, R. (2007). A flexible mine production model based on stochastic price simulations application at Raglan mine, Canada. Mining Technology.

Li, S. & Yang, C. (2012). An Optimum Algorithm for Cut-Off Grade Calculation Using Multistage Stochastic Programming. Journal of Theoretical and Applied Information Technology.

López, C. & Bustillo, M. (1986), Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras.

Malli, T.; Pamukcu, C. & Köse, H. (2015). Determination of Optimum Production Capacity and Mine Life Considering Net Present Value in Open Pit Mining at Different Overall Slope Angles. Acta Montanistica Slovaca.

Maino, M. & Rosa, E. (2011). Introducción a la microeconomía. Facultad de Economía y Negocios.

Montiel, L. & Dimitrakopoulos, R. (2013). Stochastic Mine Production Scheduling with Multiple Processes: Application at Escondida Norte, Chile. Journal of Mining Science.

Montiel, L.; Dimitrakopoulos, R. & Kawahata, K. (2016). Globally optimising open-pit and underground mining operations under geological uncertainty. Mining Technology.

Rittenberg, L & Tregarthen, T. (2012). Principles of Economics. 2da Edición.

Ross S.; Westerfield R. & Jaffe J. (2012). Finanzas Corporativas. 9na Edición.

Villalva, J. (2017). Eficiencia de la Minería de Hierro de Venezuela - Análisis Mediante El Enfoque De La Frontera Estocástica. Revista Científica Electrónica de Ciencias Gerenciales.

Páginas web

Clarcat. (2018), "Software Arena Simulation". Arena Simulation [en línea]. Disponible en: <https://www.clarcat.com/arena/> [consultado el 24 de junio de 2018].

Minitab. (2018), "Software Minitab". Minitab [en línea]. Disponible en: <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/> [consultado el 24 de junio de 2018].

Palisade. (2018), "@Risk". @Risk [en línea]. Disponible en: <http://www.palisade-lta.com/risk/> [consultado el 24 de junio de 2018].

Software – Shop. (2018), "Risk Simulator". Risk Simulator [en línea]. Disponible en: <https://www.software-shop.com/producto/risk-simulator/> [consultado el 15 de octubre de 2018].

Sword – Active Risk. (2017), "Software Active Risk Manager". Active Risk Manager [en línea]. Disponible en: <http://www.sword-activerisk.com/products/active-risk-manager-arm/> [consultado el 24 de junio de 2018].

Ponencias

Gala, F. (2017). "Costos en los Proyectos Mineros". Maestría en Regulación, Gestión y Economía Minera. Escuela de Posgrado PUCP. Lima, Perú.

Publicaciones Corporativas y externas

Barros, C.; Giadach, F. & Vega, F. (2013). ¿Por qué no se cumplen las metas productivas? - Análisis de Riesgos en Minería. Gestión y Economía Minera Ltda.

Deck, C. & Guzmán, J. (2013). Planificación Minera en Tiempos Inciertos. Gestión y Economía Minera Ltda.

ISO. (2018). ISO 31000 – Risk management Guidelines. 2da Edición.

JORC. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code).

PMI. (2013). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK®). 5ta Edición.

Runge; Pincok & Minarco. (2015). Minimum Engineering Study Requirements Update. Pincok Perspectives

Volcan Compañía Minera S.A.A. (2000-2017). Memoria Anual. Lima: Volcan Cía. S.A.A.

Volcan Compañía Minera S.A.A. (2000-2017). Cartas mensuales. Lima: Volcan Cía. S.A.A.

Tesis

Agüero, C. (2015). Valoración de Proyectos Mineros en el Perú mediante el enfoque de Opciones Reales. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Arteaga, J. (2015). Modelo de Optimización Estocástica de la ley de corte para depósitos polimetálicos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.

Bravo, A. (2017). Herramienta de software de apoyo a la Gestión de Riesgos en Proyectos basada en la Guía del PMBOK. Tesis de título de ingeniero. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Cerda, C. (2016). Análisis de Riesgo asociado a Incertidumbre Operacional en Planes Mineros para minería a cielo abierto. Tesis de título de ingeniero. Universidad de Chile.

Flores, P. (2009). Ampliación de Producción de Mina Condestable. Tesis de título de ingeniero. Universidad Nacional de Ingeniería.

Franco, G. (2017). Modelo de Optimización Estocástica para explotaciones mineras a cielo abierto. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia.