



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

OPTIMIZACIÓN DEL INTERVALO DE REEMPLAZO DE EQUIPOS MINEROS
MEDIANTE SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

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

JAVIER ALEJANDRO PALMA TOLVETT

PROFESOR GUÍA:
JUAN GUZMÁN BARROS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUI-HAN LIU CHOU
ENRIQUE JOFRÉ ROJAS

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y
DIRECCIÓN DE EMPRESAS
POR: JAVIER ALEJANDRO PALMA
TOLVETT
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: JUAN GUZMÁN BARROS

OPTIMIZACIÓN DEL INTERVALO DE REEMPLAZO DE EQUIPOS MINEROS MEDIANTE SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

Este estudio se centra en la determinación del intervalo de reemplazo óptimo (mayor rentabilidad en la inversión) de equipos móviles en la minería subterránea. Se desarrolló para Minera Florida, perteneciente al holding canadiense Yamana Gold, una mina de oro subterránea situada en la zona central de Chile, en la comuna de Alhué, Provincia de Melipilla. Esta compañía, se encuentra en un ambicioso proyecto de aumentar su producción desde aproximadamente 90.000oz de oro anual a 120.000oz, para lo cual la gestión de su flota (operación y mantenimiento) son fundamentales para alcanzar el objetivo.

El estudio del intervalo óptimo de reemplazo de equipos presenta diversas dificultades en su desarrollo, lo que puede llevar a las compañías mineras a tomar decisiones que impactan en la rentabilidad de la inversión, tales como extender la vida útil incrementando los costos o retirar un activo anticipadamente sin haber compensado su inversión inicial.

La metodología empleada para este estudio consiste en la utilización del indicador financiero CAUE (Costo Anual Uniforme Equivalente), el cual se utiliza con gran frecuencia para evaluar inversiones cíclicas, el cual se sugiere un valor mínimo en un año en particular indica el momento oportuno para sustituir esta inversión. Además, se utilizan simulaciones de Montecarlo para modelar las principales variables que influyen en el cálculo, otorgado la posibilidad de ajustar el cálculo al contexto operativo y de mercado del equipo a evaluar. Lo anterior, posibilita la obtención de resultados futuro más cercanos a la realidad y ajustados a niveles de certeza.

El desarrollo llevado a cabo indica que en el contexto particular de Minera Florida se encuentra un intervalo óptimo de reemplazo de equipos LHD a los 9 años, con una certeza del 70,2% que mejora la rentabilidad de la inversión, en contraste con el intervalo histórico de reemplazo de 13 años. Este cambio representaría un beneficio de alrededor de \$US 104 mil por equipo y \$US 1,7 millones para una flota evaluada a 9 años.

DEDICATORIA

“A Valentina. En este viaje intelectual y personal que ha sido la realización de esta tesis, su amor y apoyo incondicional han sido mi guía en los momentos más desafiantes.

Este trabajo no es solo el resultado de mi esfuerzo y dedicación, sino también un reflejo del amor y la comprensión que me ha brindado a lo largo de este proceso. Por ello, dedico este trabajo a ella, por ser mi compañera y mi mayor apoyo”

AGRADECIMIENTOS

Con profundo agradecimiento, extiendo mis más sinceras gracias a Minera Florida, a la Gerencia General y al equipo de la Gerencia Mina, por su apoyo incondicional en la realización de este programa de MBAMIN. Su ayuda ha sido fundamental, no solo al facilitarme el tiempo necesario para asistir a clases, sino también brindándome apoyo financiero. Asimismo, estoy profundamente agradecido por las facilidades, recursos e información que me proporcionaron para llevar a cabo esta tesis con éxito.

También deseo expresar mi gratitud al cuerpo docente y administrativo del MBA en Industria Minera de la Universidad de Chile. Un agradecimiento especial al profesor guía, Juan Ignacio Guzmán, por su invaluable ayuda, orientación y generosidad al compartir sus conocimientos durante el desarrollo de esta tesis. Su guía ha sido importante en mi formación académica y profesional.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional desde el comienzo del programa. Su motivación constante ha sido una fuente de inspiración y fortaleza, impulsándome a avanzar cada día. Su amor y confianza en mí han sido fundamentales en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Alcance	3
1.3. Objetivos	4
2. ANTECEDENTES.....	4
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. Análisis de datos.....	15
3.2. LCC – Life cycle cost	18
3.3. Costo anual uniforme equivalente (CAUE).	23
3.4. Simulación de Montecarlo.....	32
4. METODOLOGÍA.....	37
4.1. Definición del problema.....	37
4.2. Levantamiento de información.	38
4.3. Análisis de datos.....	39
4.4. Simulación de datos.....	41
4.5. Ejecución de la Simulación	43
4.6. Análisis de resultados.	45
5. DESARROLLO	46
5.1. Definición del problema.....	46
5.1.1. Identificación del problema.....	47
5.1.2. Establecer hipótesis del modelo.....	47
5.1.3. Determinar límites y suposiciones del modelo.	48
5.2. Levantamiento de información.	49
5.2.1. Definir variables claves.....	49
5.2.2. Recopilar datos históricos:	50
5.2.3. Determinar interrelación de variables.	53
5.2.4. Construcción de base de datos:	53
5.3. Análisis de datos.....	54
5.3.1. Selección de datos:	54
5.3.2. Exploración y modificación de datos:	54
5.3.3. Modelado de datos.....	55

5.3.4.	Interpretación de los resultados.....	59
5.4.	Simulación	62
5.4.1.	Definir variables de entrada.....	62
5.4.2.	Determinación de la distribución de probabilidad.....	62
5.4.3.	Desarrollo de algoritmo de simulación.....	65
5.4.4.	Ejecución de la simulación	67
5.4.5.	Análisis de resultados.....	67
5.4.6.	Validación de la Simulación y Refinamiento de simulación.....	68
5.5.	Análisis de resultados	69
5.5.1.	Verificación de la hipótesis.....	69
5.5.2.	Definir limitaciones del modelo.....	69
5.5.3.	Desarrollo de recomendaciones.....	70
6.	CONCLUSIÓN.....	71
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXO A DESARROLLO DE EXPLORACIÓN Y MODIFICACIÓN DE DATOS EN LAS VARIABLES SELECCIONADAS.....		74
ANEXO A.1 Exploración y modificación de datos de horas de operación.....		74
ANEXO A.2 Exploración y modificación de datos de Disponibilidad.....		78
ANEXO A.3 Exploración y modificación de datos de costos de Mantenimiento.....		81
ANEXO A.4 Exploración y modificación de datos de costos de Operación.....		85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen equipos Minera Florida. Fuente: El autor con información de ERP JDEwards.....	11
Tabla 2. Ejemplo de construcción de Base de datos para modelo. Fuente: El autor.	53
Tabla 3. Valores de variables estáticas del Modelo. Fuente: El autor.	54
Tabla 4. Cálculo del Costo del Capital Invertido. Fuente: El autor.	57
Tabla 5. Cálculo del Costo Operacional. Fuente: El autor.....	58
Tabla 6. Total costos operacionales modelados. Fuente: El autor.....	60
Tabla 7. Intervalo de reemplazo de LHD histórico Minera Florida. Fuente: El autor.	61
Tabla 8. Diferencia en costo total entre intervalo de reemplazo óptimo e intervalo histórico. Fuente: El autor.....	61
Tabla 9. Cálculo de factor de ajuste de distribución. Fuente: El autor.....	64
Tabla 10. Niveles de certeza para intervalos de reemplazo. Fuente: El autor.....	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación Minera Florida. Fuente: Documento inducción Minera Florida ...	5
Ilustración 2. Método explotación Sub-level Stopping. Fuente: Manual de operaciones Minera Florida	6
Ilustración 3. Proceso productivo desarrollo Minera Florida. Fuente: Manual de operaciones Minera Florida.....	7
Ilustración 4. Distribución mundial del mercado de equipos de minería subterránea. Fuente: Yamana Supply Strategy Equipment.....	8
Ilustración 5. Tendencia histórica de demanda nacional en equipos EPIROC. Fuente. Yamana Supply Estrategy Equipment.....	10
Ilustración 6. Distribución de gastos mina 2022. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.	12
Ilustración 7. Distribución de gastos en equipos mina 2022. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.....	13
Ilustración 8. Distribución de gastos en equipos mina 2022 por flota. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.	14
Ilustración 9. Proceso de análisis de datos. Fuente: Velásquez, J. D. (2021). Material docente curso Transformación Digital y Machine Learning. Universidad de Chile.	15
Ilustración 10. Etapas del ciclo de vida de un activo. Fuente: Manual de Infraestructura crítica CODELCO (2023).....	16
Ilustración 11. Costo del ciclo de vida de un activo. Fuente: Estrategia para Optimizar el uso de los Activos. https://predictiva21.com/ciclo-vida-remanente-activo/	22
Ilustración 12. Representación gráfica del CAUE. Autor: Kettlun L., A. (2022). Material docente Formulación y Evaluación de Proyectos Mineros. Universidad de Chile.	24
Ilustración 13. Proceso de simulación de Montecarlo. Fuente: El autor con información de Manual de Usuario de Crystal Ball.	34
Ilustración 14. Metodología del estudio. Fuente: El autor.....	37
Ilustración 15. Ejemplo gráfico Histograma. Fuente: El autor.....	39
Ilustración 16. Ejemplo gráfico Boxplot. Fuente: El autor.....	40
Ilustración 17. Ejemplo gráfico análisis de correlación. Fuente: El autor.....	40
Ilustración 18. Ejemplo de una definición de distribución estadística a una variable de entrada en Crystal Ball. Fuente: Manual de Usuario de Crystal Ball.....	42
Ilustración 19. Metodología del estudio. Fuente. El autor.....	46
Ilustración 20. Reporte de gastos y costos unitarios de mantenimiento. Fuente: Reportes costos mina, Minera Florida.	52
Ilustración 21. Reporte de gastos y costos unitarios de mantenimiento. Fuente: Reportes costos mina, Minera Florida.	52

Ilustración 22. Ecuaciones del modelo que representan un equipo prototipo que representa la flota. Fuente: El autor.	55
Ilustración 23. Cálculo del CAUE. Fuente: El autor.	59
Ilustración 24. Gasto LHD real año 2021. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.	60
Ilustración 25. Definición de distribución para horas de operación. Fuente: El autor.	63
Ilustración 26. Definición de distribución para costo de mantenimiento. Fuente: El autor.	64
Ilustración 27. Definición de suposiciones para Costos unitarios de mantenimiento. Fuente: El autor.	65
Ilustración 28. Definición de suposiciones para Horas de operación. Fuente: El autor.	66
Ilustración 29. Ejecución de simulación. Fuente: El autor.	67
Ilustración 30. Niveles de certeza al aumentar la edad del equipo. Fuente: El autor.	68
Ilustración 31. Horas de operación por equipos. Fuente: El autor.	74
Ilustración 32. Horas de operación por flota. Fuente: El autor.	75
Ilustración 33. Boxplot de horas de operación. Fuente: El autor.	76
Ilustración 34. Horas de operación por flota ajustada. Fuente: El autor.	76
Ilustración 35. Boxplot de horas de operación ajustada. Fuente: El autor.	77
Ilustración 36. Disponibilidad por equipo. Fuente: El autor.	78
Ilustración 37. Disponibilidad por flota. Fuente: El autor.	79
Ilustración 38. Boxplot de disponibilidad. Fuente: El autor.	80
Ilustración 39. Disponibilidad por flota ajustada. Fuente: El autor.	80
Ilustración 40. Boxplot de disponibilidad ajustado. Fuente: El autor.	81
Ilustración 41. Costos de mantenimiento por equipos. Fuente: El autor.	82
Ilustración 42. Costos de mantenimiento por flota. Fuente: El autor.	82
Ilustración 43. Boxplot de Costos de mantenimiento. Fuente: El autor.	83
Ilustración 44. Costos de mantenimiento por flota ajustado. Fuente: El autor.	84
Ilustración 45. Boxplot de Costos de mantenimiento ajustado. Fuente: El autor.	84
Ilustración 46. Costos de operación por flota. Fuente: El autor.	85
Ilustración 47. Boxplot de Costos de operación. Fuente: El autor.	86

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

En la actualidad, la minería se enfrenta al desafío de desarrollar yacimientos de mayores leyes y profundidades que requieren un mayor esfuerzo y recursos para su extracción. En consecuencia, una operación minera rentable requiere ser eficiente en el uso de recursos y control de costo, donde la información y su análisis sistemático se convierten en un pilar importante en las decisiones tomadas.

En los últimos tres años el mercado de oferta de equipos especializados para la minería subterránea (incluyendo sus componentes principales, repuestos e insumos) se ha visto interrumpida por la contingencia COVID-19, disminuyendo las cuotas de producción acostumbradas. Sumado a la creciente demanda nacional de este tipo de equipos impulsada por proyectos como Chuquicamata Subterránea o expansión niveles en Mina Teniente, ha convertido en un desafío ejecutar planes de recambio de equipos móviles de acuerdo a los planes a largo plazo (LOM) establecidos, en algunos casos con demoras de hasta 12 meses en el arribo de estas unidades, afectando principalmente a faenas pequeñas y medianas con nulo poder para influir en este mercado. Lo anterior tiene un efecto directo en la *Disponibilidad, Confiabilidad y Costos unitarios* en flotas de equipos móviles, y por consiguiente un impacto importante en los planes productivos y utilidades de las empresas.

En el mercado de equipos de minería subterránea es altamente especializado y dominado por 3 actores principales a nivel nacional; EPIROC, SANDVIK, CATERPILLAR y KOMATSU. Generalmente por temas de economía de escala, las empresas mineras o empresas contratistas que operan áreas en empresas mineras, mantienen la estrategia de tener un mismo proveedor e incluso modelo para las flotas de equipos móviles, lo cual permite beneficios cómo:

- Contratos de compra global de equipos con precios garantizados.
- Menores costos de inventario en repuestos y componentes.
- Estandarización de conocimientos en operadores y mantenedores.
- Mejoras en la planificación a largo plazo y Bugdet de equipos.
- Asociación estratégica y asistencia técnica.
- Facilidades en introducción de nuevas tecnologías.

Sin embargo, esta tendencia genera una dependencia estratégica a unos cuantos proveedores, produciendo impactos negativos ante cambios que puedan afectar el mercado como:

- Retrasos o interrupción en cadenas suministros.
- Disminución de cuotas de producción.
- Aumento de costos y precios.

Esta condición se produjo en los últimos tres años debido la contingencia COVID-19, gran parte de las empresas mineras a nivel mundial no tenían identificada esta amenaza en sus análisis y hoy en día es fundamental en las evaluaciones de riesgo en la industria. La vulnerabilidad se vuelve más evidente cuando el cliente trabaja en pequeñas y mediana minería y tiene un bajo poder de negociación, como lo ocurre en la tesis en desarrollo.

Como se ha mencionado previamente, la demanda de equipos nuevos en minería subterránea ha experimentado un aumento significativo en los últimos años, gracias a proyectos como Chuquicamata subterránea y extensión Teniente. Asimismo, requisitos para las empresas proveedoras de servicios de operación, los cuales incluyen equipos nuevos y *stand-by* para asegurar la producción, estos equipos no son operados más allá de 4 años y con una baja utilización. No obstante, una vez concluidos estos contratos, se genera una oferta atractiva en equipos usados para arrendamiento o compra de segunda mano, alternativas que también serán evaluadas como una opción de reemplazo al equipo nuevo.

En este contexto, el estudio de los intervalos óptimos (técnica y económicamente) de reemplazo de equipos garantiza una planificación financiera a largo plazo necesaria para prevenir y mitigar los riesgos actuales en el mercado de la venta y adquisición de equipos mineros.

Esta tesis busca dar respuesta a la problemática de cómo seleccionar el intervalo óptimo de reemplazo de equipos móviles, cálculo que generalmente es realizado en la industria minera bajo parámetros técnicos y algún grado de intuición, prescindiendo de variables económicas y financieras necesarias para tomar decisiones rentables. Lo anterior ocasiona un perjuicio en el negocio que a menudo se encuentra inadvertido, el costo de oportunidad de haber tomado una mejor decisión financiera.

Para el desarrollo de esta tesis utilizamos herramientas financieras como el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), la cual se utiliza generalmente para evaluar inversiones que se renuevan sistemáticas en el tiempo. Además, incorporamos el riesgo a través de simulación de Montecarlo, modelando estocásticamente las variables que impactan en el CAUE, y el peso de estas últimas en la decisión del reemplazo. Lo anterior permite ajustar el cálculo del CAUE al contexto de operación de los equipos mineros en su vida útil mediante de la determinación de distribuciones de probabilidad en las variables que más impactan el resultado, con base en la información histórica disponible.

Asimismo, se llevará a cabo una evaluación del impacto del intervalo óptimo en el pronóstico de inversión de equipos para una flota, así como en la influencia del costo total de un ejercicio LOM real (CAPEX + OPEX).

El beneficio de un plan de inversiones óptimo para equipos mineros permite:

- Negociar contratos de compra de equipos a largo plazo.
- Integración con socios OEM claves para aprovisionamiento de componentes, repuestos e insumos críticos.
- Definir la cantidad de equipos óptimos para el plan de producción, incluyendo certeza de esta decisión.
- Mejoras en la estrategia de Mantenimiento con una mirada económica. Un cambio en la vida útil de un equipo puede significar modificaciones en la estrategia de Mantenciones Mayores (*Overhaul*) y plan de cambio de componentes.
- Facilitar la incorporación de nuevas tecnologías.

La presente tesis se enfoca particularmente en el contexto de las flotas principales de minería subterránea en la mediana minería. No obstante, este estudio es factible aplicar a cualquier equipo crítico en cualquier área productiva.

1.2. Alcance

Esta tesis se desarrolla en el contexto de operación de Minera Florida, mina subterránea de tamaño mediano que explota mineral de oro y perteneciente a la compañía minera Yamana Gold de capitales canadienses. El análisis se realiza en 3 de sus flotas principales:

- Equipos de perforación radial de producción.
- Equipos de perforación frontal de dos brazos para desarrollo de túneles.
- Cargador bajo perfil de 10 ton para movimiento y carguío de material.

Este trabajo involucra desde la definición del problema, levantamiento de información operativa, financiera y tiene como resultado el cálculo del intervalo óptimo de reemplazo de forma estocástica y el uso de este en un ejercicio LOM real para el período comprendido entre los años 2023 y 2033.

1.3. Objetivos

- ✓ Aumentar la rentabilidad sobre la inversión en activos físicos.
- ✓ Incorporar herramientas de análisis financiero al cálculo de la vida útil óptima en equipos mineros.
- ✓ Mejorar la proyección de inversión en equipos mineros para un ejercicio LOM.

2. ANTECEDENTES

Sobre Minera Florida

Minera Florida es una mina de oro subterránea ubicada en la zona central de Chile, aproximadamente a 75 kilómetros al suroeste de Santiago, en la comuna de Alhué, Provincia de Melipilla (ver Ilustración 1). La compañía canadiense Yamana Gold adquirió la operación como parte de la adquisición de Meridian Gold en 2007. En 2017, Yamana Gold compró todas las concesiones pendientes en la propiedad vecina Las Cenizas para tener una participación del 100 % en el área del proyecto.

La mina ha estado en operación por más de 30 años a una tasa de procesamiento de mineral actual de 74.500 toneladas por mes (74,5 ktpm), los cuales son tratados en la planta de beneficio, obteniéndose como productos finales metal doré y concentrado de zinc con una producción aproximadamente de 90.000 Oz de oro. El objetivo a más largo plazo es aumentar la producción a +120,000 onzas de oro por año a través de la exploración y desarrollo de nuevos objetivos ubicados en las concesiones minerales adyacentes al Bloque Alhué, donde la mayor parte de la actividad minera ha tenido lugar en el pasado.

Aporta el 57 % de la empleabilidad local en la comuna de Alhué y sus alrededores, con una dotación total de 1.516 personas, 737 directos y 779 indirectos.



Ilustración 1. Ubicación Minera Florida. Fuente: Documento inducción Minera Florida

Las reservas de oro probadas y probables en Minera, Florida se estiman en 623.000 onzas y las medidas e indicadas en 759.000 onzas. Asimismo, las reservas probadas y probables de plata se estiman en 4,2 millones de onzas y las medidas e indicadas en 6,0 millones de onzas. La vida útil del yacimiento se estima en 10 años.

Método productivo

Minera Florida utiliza un el método de explotación *sub-level stoping*, este método se aplica en yacimientos verticales o sub-verticales donde la inclinación del cuerpo mineralizado excede el ángulo de reposo del mineral, donde la roca de caja y mineral es competente y auto-soportable (ver Ilustración 2). Principales características:

- ✓ Método soportado por pilares.
- ✓ El cuerpo mineralizado es dividido en diferentes caserones separados por losas y muros.
- ✓ La productividad del caserón es proporcional a su tamaño.
- ✓ La estabilidad y dilución de un caserón es inversamente proporcional a su tamaño.
- ✓ Baja dilución y recuperación.

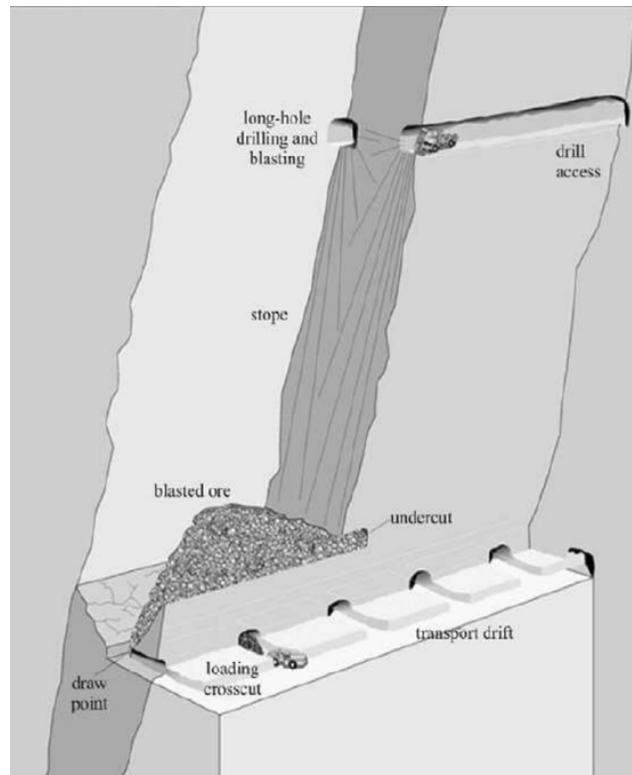


Ilustración 2. Método explotación Sub-level Stopping. Fuente: Manual de operaciones Minera Florida

El mineral explotado se recolecta en embudos o zanjias emplazadas en la base del caserón, desde donde se extrae según diferentes modalidades a través de cargadores de bajo perfil (LHD) controlados a control remoto a un punto de acopio. La expresión “*sub-level*” hace referencia a las galerías o subniveles a partir de los cuales se realiza la operación de explotación del mineral.

Minera Florida tiene dos procesos productivos principales en mina:

- Desarrollo: Construcción de galerías o subniveles para pasar a la etapa de producción. El cual tiene los siguientes subprocessos (ver Ilustración 3):



Ilustración 3. Proceso productivo desarrollo Minera Florida. Fuente: Manual de operaciones Minera Florida.

- Instalación de servicios (agua, aire, energía eléctrica y ventilación).
 - Perforación horizontal.
 - Carga de explosivos.
 - Tronadura (generación de galerías).
 - Manejo de mineral o estéril a un punto de acopio.
 - Acuñadura.
 - Fortificación de galerías.
- Producción: Explotación de frentes y transporte de mineral de Oro. El cual tiene los siguientes subprocesos:
 - Perforación vertical/radial.
 - Carguío de explosivos y tronadura (generación de caserones).
 - Manejo de mineral a un punto de acopio.
 - Carguío y transporte de mineral hacia Planta.
 - Carguío y transporte de estéril hacia botaderos o rellenos.

Estos procesos son desarrollados en distintos niveles principales de acuerdo con su cota a nivel de mar.

Equipos Mineros.

En el mercado de equipos de minería subterránea es altamente especializado y mueve un mercado de aproximadamente \$US 32,7 mil millones (ver Ilustración 4), estos equipos son utilizados principalmente en minería y obras viales de construcción túneles. El mayor desarrollo de mercado (\$US 14,8 mil millones y crecimiento de ~3-5 %) se encuentra en área de Asia Pacífico, concentrada principalmente en Australia, China e India. Por otro lado, América del Sur está en el tercer puesto de participación de mercado, con \$US 6,3 mil millones y un crecimiento en torno al ~2-4 %.

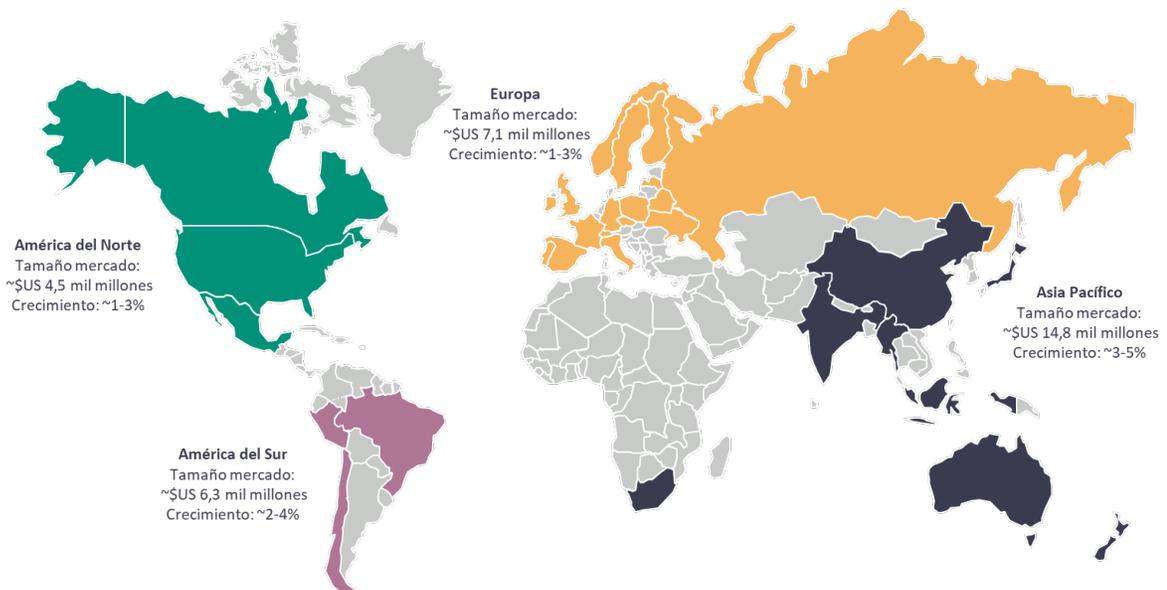


Ilustración 4. Distribución mundial del mercado de equipos de minería subterránea. Fuente: Yamana Supply Strategy Equipment

En los últimos tres años el mercado de oferta de equipos para la minería subterránea (incluyendo sus componentes principales, repuestos e insumos) se ha visto interrumpida por la contingencia COVID-19, disminuyendo las cuotas de producción acostumbradas. Sumado a la creciente demanda nacional de este tipo de equipos impulsada por proyectos como Chuquicamata Subterránea o expansión niveles en Mina Teniente, ha hecho desafiante desarrollar iniciativas de reemplazo de equipos móviles de acuerdo a los planes a largo plazo (LOM) establecidos, en algunos casos con demoras de hasta 12 meses en la llegada de estas unidades, afectando principalmente a faenas pequeñas y medianas con bajo poder de negociación para influir en este mercado. Esta afirmación tiene un impacto directo en la Disponibilidad, Confiabilidad y Costos unitarios en flotas de equipos móviles, lo que genera un impacto significativo en planes productivos y utilidades de las empresas.

A nivel nacional, el mercado está dominado por 4 actores principales; EPIROC, SANDVIK, CATERPILLAR y KOMATSU. En términos de economía de escala, las empresas mineras o contratistas que operan en áreas mineras mantienen una estrategia de establecer un mismo proveedor y modelo para flotas de equipos móviles, lo cual otorga beneficios como:

- Contratos de compra global de equipos con mejores precios garantizados.
- Mejora en el poder de negociación.
- Menores costos de inventario en repuestos y componentes.
- Mejor capacidad de entrenamiento y estandarización de conocimientos.
- Asistencia técnica.
- Mejoras en la planificación a largo plazo y Bugdet de equipos.
- Facilidades en introducción de nuevas tecnologías.

Sin embargo, esta tendencia genera una dependencia estratégica a unos cuantos proveedores, produciendo impactos negativos ante cambios que puedan afectar el mercado como:

- Retrasos e interrupción en cadenas suministros por contingencia mundial o local.
- No cumplimiento de plazo de entrega de equipos por retraso de fabricación (+12 semanas en Boomer S2 histórico y +4 semanas por logística).
- Impacto en desempeño de flotas por no cumplimiento de plan de recambio.

Como se ha mencionado con anterioridad, la demanda de equipos nuevos para minería subterránea ha experimentado un incremento significativo en los últimos años, en el caso de equipos similares a equipos de Minera Florida (mismo proveedor y modelo) hubo un aumento del 87 % en la demanda posterior al año 2019, lo cual pudo ser mayor aún de no ser por la contingencia COVID-19 (Ver Ilustración 5). Las proyecciones de los próximos 5 años indican un aumento de un 4 % de la demanda en equipos.

Tendencia histórica de demanda nacional equipos EPIROC similares a Minera Florida

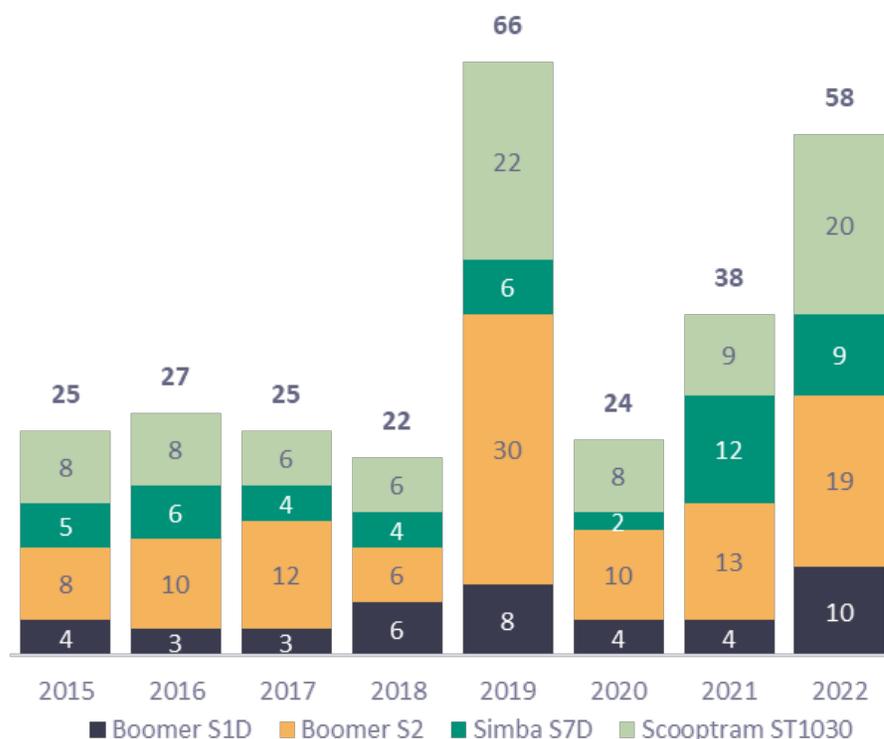


Ilustración 5. Tendencia histórica de demanda nacional en equipos EPIROC. Fuente. Yamana Supply Estrategy Equipment.

Por otra parte, los requisitos para empresas proveedoras de servicios que operan áreas de desarrollo y producción subterránea en Chuquicamata subterránea o Teniente incluyen equipos nuevos y stand-by para asegurar la producción, los cuales no son operados más de 4 años y con baja utilización. No obstante, una vez concluidos estos contratos, se genera una oferta atractiva en equipos usados para arrendamiento o compra de segunda mano, alternativas que también serán evaluadas como una opción de reemplazo al equipo nuevo.

En los últimos 3 años, Minera Florida ha iniciado un ambicioso proceso de renovación y aumento de flota debido a una internalización de un contrato de desarrollo de túneles y un aumento de la capacidad productiva (aumento del 52 % equipos) En total, a la fecha se cuenta con 91 equipos distribuidos en 13 flotas o tipo de equipos (ver Tabla 1):

<i>Flota / tipo de equipo</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Modelos equipos</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio [USD]</i>	<i>Cantidad</i>
Simba	EPIROC	SIMBA S7D, S7C	Equipos de perforación radial de producción.	646.798	9
Boomer Avance	EPIROC	BOOMER 282, S2C	Equipos de perforación frontal de dos brazos para desarrollo de túneles.	901.802	9
Boomer Fortificación	EPIROC	BOOMER 281, S1D	Equipos de perforación frontal de un brazo para instalación de pernos fortificación.	532.000	5
LHD	EPIROC	SCOOPTRANS 1030	Cargador bajo perfil de 10 ton para movimiento y carguío de material.	676.577	16
Dumper	CAT	DUMPER AD30	Camión de bajo perfil de 30 ton transporte material.	805.000	6
Cargador Frontal	VOLVO	L120 F	Cargador convencional de 6 ton para carguío de material.	262.650	6
Acuñadores	CAT	416 F2	Retro-excavadora acondicionada para acuñadura mecanizada.	122.850	6
Shotcrete	NORMET	Mixer tornado, Alpha 20	Equipos para mezcla y proyección de Shotcrete.	250.000	4
Grúas	MANITOU	MT 1030	Manipulador telescópico utilitario.	102.000	19
Motoniveladora	CAT	UG20M	Motoniveladora bajo perfil para túneles.		1
LHD Servicios	EPIROC	SCOOPTRANS 710	Cargador bajo perfil de 7 ton para mantención de caminos y transporte de componentes.		2
Compresores	ATLAS COPCO	XATS 900	Suministro aire mina.		6
Generadores	ATLAS COPCO		Respaldo eléctrico mina.		2
Total, equipos					91

Tabla 1. Resumen equipos Minera Florida. Fuente: El autor con información de ERP JDEwards.

Para el año 2022 en curso, de un total de \$USD 47,6 Millones en Bugdet de OPEX mina (ver Ilustración 6), el gasto en equipos móviles (Operación y Mantenimiento) representa aproximadamente 40,5%, monto que asciende a \$USD 19,3 Millones. Del cual un 61 % corresponde a Mantenimiento y un 39 % a Operaciones (ver ilustración 6).

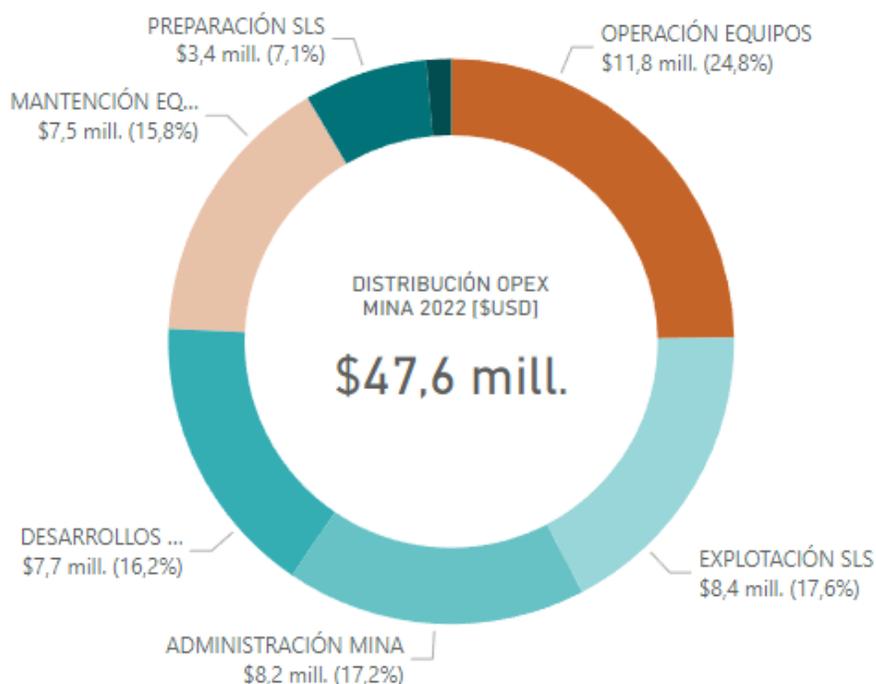


Ilustración 6. Distribución de gastos mina 2022. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.

Del OPEX un 24,8 % (\$USD 11,8 Millones) corresponde a operación de equipos (ver Ilustración 7), el cual incluye ítems como:

- Remuneraciones de operadores.
- Insumos operacionales (Diésel, neumáticos, baldes, entre otros).
- Uso de instalaciones y transporte de operadores.
- Contratos de arriendo de perforadoras hidráulicas.
- Repuestos y componentes asociados a fallas operacionales.
- Entre otros.

Además, un 15,8 % (\$USD 7,5 Mill) corresponde a gastos de mantenimiento de equipos (ver Ilustración 7), los cuales incluyen ítems como:

- Remuneraciones de mantenedores.
- Insumos de mantenimiento (Aceites y grasas principalmente).
- Uso de instalaciones y transporte de mantenedores.
- Contratos de apoyo al mantenimiento.
- Repuestos y componentes.
- Entre otros.



Ilustración 7. Distribución de gastos en equipos mina 2022. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.

Las flotas principales (ver Ilustración 8), incluidas en el alcance de esta tesis (LHD, Boomer y Simba) representan el 59 % del gasto (\$USD 11,4).

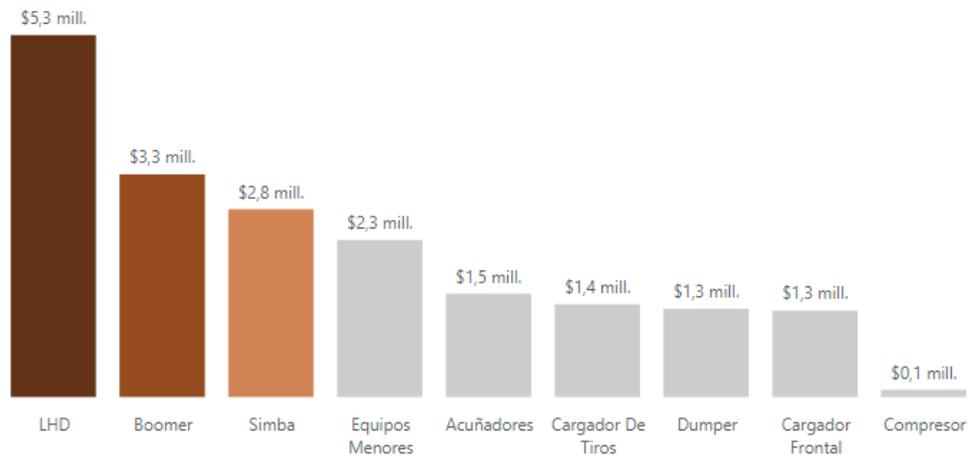


Ilustración 8. Distribución de gastos en equipos mina 2022 por flota. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.

Con el propósito de enfocar este estudio en la determinación del intervalo óptimo de reemplazo de equipos que tenga un mayor impacto en la operación y rentabilidad del proceso, se han considerado los siguientes parámetros de selección:

- Costo del activo CAPEX (*Tabla 1: Resumen equipos Minera Florida*).
- Costo operativo OPEX (Ilustración 8: Distribución de gastos en equipos mina 2022 por flota.).
- Impacto a la operación (costo de oportunidad en la detención del activo).

Para el presente análisis, se seleccionará la flota de LHD, la cual presenta la mayor cantidad de equipos y el mayor gasto en el área Mina. Asimismo, es la flota que ha experimentado el mayor dinamismo en lo que refiere a inversiones por reemplazo de equipos.



Cargadores de bajo perfil (LHD SCOOP TRANS1030 EPIROC).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Análisis de datos.

El análisis de datos es el proceso de extraer información valiosa sin procesar, lo cual posibilita la toma de decisiones estratégicas en diversos contextos comerciales, científicos y sociales. El propósito primordial consiste en descubrir patrones, tendencias, relaciones y otras características ocultas en sus datos. Esto implica varios pasos, como definir el objetivo (o problema a resolver), recopilación de datos, limpieza de datos, exploración de datos, modificación de datos, modelado de datos y evaluación de los resultados (Ilustración 9). Los pasos a ejecutar se llevan a cabo mediante diversas técnicas estadísticas y de aprendizaje automático, en función del propósito del análisis.

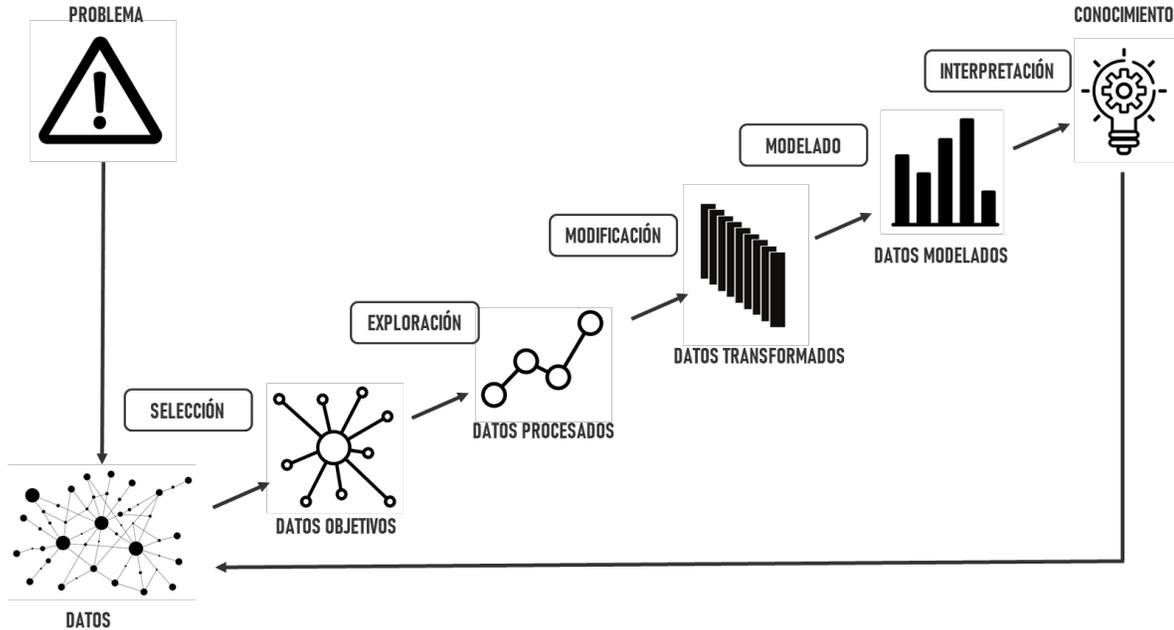


Ilustración 9. Proceso de análisis de datos. Fuente: Velásquez, J. D. (2021). Material docente curso Transformación Digital y Machine Learning. Universidad de Chile.

Selección de datos: es el proceso de recopilación de datos de diversas fuentes, incluidas bases de datos, archivos, encuestas, sensores, etc. La limpieza de datos es el proceso de identificar y corregir errores, valores atípicos y datos faltantes en los datos recopilados.

Exploración de datos: es la aplicación de técnicas estadísticas y visuales para comprender la estructura y propiedades de los datos. Esto incluye identificar patrones y tendencias en los datos e identificar relaciones entre diferentes variables.

Modificación de datos: es la representación de datos según características útiles utilizando transformaciones o técnicas de reducción de dimensionalidad para limitar el número efectivo de variables a considerar o encontrar una representación invariante de los datos.

Modelado de datos: es la creación de modelos estadísticos o de aprendizaje automático para analizar y predecir el comportamiento de los datos. Estos modelos se pueden utilizar para hacer predicciones y tomar decisiones informadas basadas en los resultados del análisis.

Interpretación de resultados: muestra los resultados del análisis en un formato que es fácil de entender y accesible para los usuarios finales. Esto incluye visualización de datos, informes detallados, acciones recomendadas basadas en los resultados del análisis y más.

Ciclo de vida en activo.

El ciclo de vida de un activo físico en la minería es un proceso que involucra diversas etapas, desde la planificación y adquisición hasta la disposición final (ver Ilustración 10). Este proceso es crucial para garantizar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras, así como para minimizar los impactos ambientales.

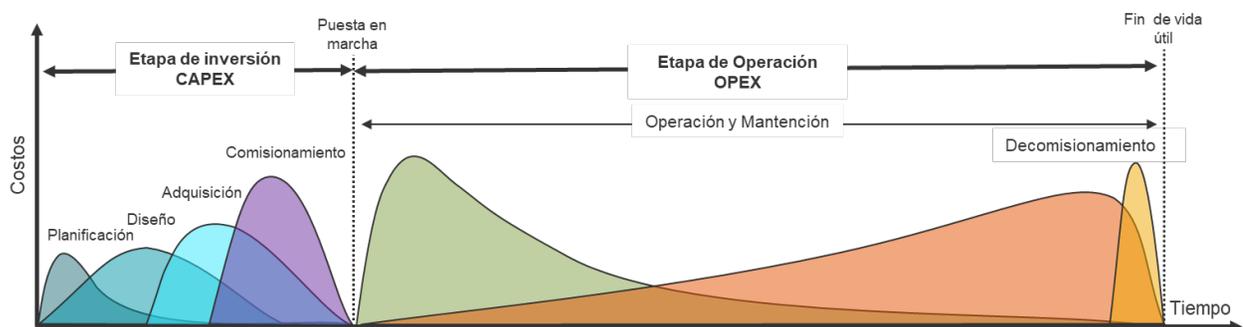


Ilustración 10. Etapas del ciclo de vida de un activo. Fuente: Manual de Infraestructura crítica CODELCO (2023).

Planificación: La fase de planificación es el fundamento de una gestión de activos exitosa, donde se determinan las necesidades a largo plazo y los objetivos estratégicos. Durante esta etapa, se lleva a cabo un análisis profundo para definir el alcance del activo, establecer los requerimientos y las especificaciones necesarias para cumplir con las metas de rendimiento esperadas. La planificación incluye la consideración de factores como la vida útil del activo, los costos de mantenimiento y operación, riesgos potenciales y contexto operativo existente. Este proceso exhaustivo asegura que se identifiquen todas las variables relevantes para una toma de decisiones informada y una asignación de recursos efectiva.

Diseño: En la fase de diseño, se concretan los detalles técnicos y se elaboran los planos y especificaciones del activo físico. El proceso de diseño es crucial para asegurar que el activo cumplirá con todas las normativas de seguridad y rendimiento requeridas. Se suele efectuar una evaluación de su viabilidad técnica y económica, además, se toman decisiones sobre la elección de materiales, tecnologías a implementar y procedimientos de construcción o fabricación. El diseño debe también facilitar la futura operación, mantenimiento y posible expansión o actualización del activo.

Adquisición: La fase de adquisición se refiere a la compra o fabricación del activo físico. Es en este punto donde se elige al proveedor o fabricante y se negocian los términos del contrato, incluyendo precios, plazos de entrega y garantías. Las decisiones tomadas en la fase de adquisición tienen un impacto significativo en el costo total de propiedad del activo y pueden influir en la calidad y la confiabilidad de este. Por tanto, es esencial considerar el historial y la reputación del proveedor, así como la compatibilidad de sus productos o servicios con los requerimientos especificados durante la planificación y el diseño.

Comisionamiento: El comisionamiento es la etapa en la que el activo se instala y se prepara para su funcionamiento dentro del proceso productivo. Incluye probar todas las funciones del activo para asegurar que trabajen como se espera y cumplan con los criterios de diseño y operación. Durante el comisionamiento, se deben identificar y rectificar cualquier problema o desviación antes de que el activo entre en plena operación. Adicionalmente, esta fase incluye la formación y capacitación del personal que va a operar y mantener el activo, asegurando que están completamente preparados para las tareas que les esperan.

Mantenimiento: Mantenimiento se refiere a todas las actividades necesarias para que un activo físico conserve su capacidad operativa y seguridad a lo largo de su vida útil. Incluye ejecutar procedimientos de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo para evitar fallas o deterioros prematuros. El mantenimiento preventivo se realiza según un programa predeterminado, mientras que el mantenimiento predictivo se basa en el seguimiento constante de las condiciones del activo, y el correctivo responde a fallas inesperadas. Una gestión de mantenimiento eficiente minimiza los tiempos de inactividad, maximiza la eficiencia operativa y contribuye a la seguridad global de las operaciones.

Operación: La operación de un activo físico implica su uso efectivo y eficiente conforme a su propósito designado. Durante esta fase se lleva a cabo la función para la cual fue adquirido el activo, ya sea producción, servicios o cualquier otro fin. La fase de operación debe ser monitoreada cuidadosamente para asegurar que el activo está cumpliendo con los estándares de rendimiento y eficiencia y que se están siguiendo las prácticas operativas recomendadas. Cualquier desvío de los parámetros normales puede indicar la necesidad de ajustes o mantenimiento para prevenir daños o fallas.

Decomisionamiento: El decomisionamiento, o disposición final es la última fase del ciclo de vida de un activo físico, y tiene lugar cuando se ha decidido que el activo ha llegado al final de su vida útil operativa. Se trata de retirar de servicio, desmontar y desechar el activo y sus componentes de manera segura y ecológicamente responsable. Una planificación y ejecución adecuadas de esta fase son importantes para minimizar el impacto ambiental, maximizar la recuperación de materiales y cumplir con las regulaciones legales. Esto puede incluir la venta o reciclaje de partes, así como el saneamiento del sitio si es necesario.

Esta última etapa se encuentra directamente relacionada con el estudio desarrollado en este documento, principalmente en el cálculo del intervalo de reemplazo óptimo de un activo para su fin de vida útil.

3.2. LCC – Life cycle cost

El costo del ciclo de vida (LCC, por sus siglas en inglés Life Cycle Cost) es un concepto fundamental en la gestión de activos físicos en la industria minera. Este método consiste en evaluar todos los costos asociados con la adquisición, operación, mantenimiento y eventual retiro o reemplazo de un equipo o sistema a lo largo de su vida útil.

En el LCC, las empresas mineras pueden tomar decisiones más informadas sobre la adquisición de equipos, planificación de mantenimientos, renovaciones y estrategias de optimización de recursos, con el objetivo de reducir costos operativos y aumentar la rentabilidad sin comprometer la seguridad ni la eficiencia. Este enfoque integral nos permite evaluar escenarios financieros a largo plazo y ajustar las estrategias de gestión de activos de acuerdo con los objetivos empresariales o los ciclos económicos del sector.

Composición de los Costos en la Minería.

Los activos físicos en la minería, como maquinaria pesada, vehículos de transporte y equipos de procesamiento, representan inversiones significativas para cualquier operación. Estos activos son críticos para la extracción y procesamiento de minerales y, por lo tanto, su selección y manejo tienen un impacto directo en la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

Los costos asociados a estos activos usualmente se dividen en las siguientes categorías:

Costos de capital (CAPEX, Capital Expenditures), involucra los costos de las etapas del ciclo de vida del activo de planificación, diseño, adquisición y comisionamiento.

Costos operativos (OPEX, Operating Expenses) involucra:

- Costos de operación como combustible, insumos operacionales, energía y mano de obra.
- Costos de mantenimiento como repuestos, componentes, servicios y mano de obra.
- Costos al final de la vida útil como desmantelamiento, reciclaje o venta.

La identificación y previsión de estos costos permite a las empresas mineras planificar y asignar presupuestos apropiados durante el transcurso del ciclo de vida del activo, con el propósito de preservar la eficiencia operativa y financiera.

Metodología del Cálculo del LCC en Minería

La metodología para calcular el LCC en minería es compleja y requiere la consideración de múltiples factores a lo largo de todo el ciclo de vida del activo. Esto implica evaluar costos iniciales de inversión, los gastos operativos y de mantenimiento proyectados, así como el valor residual o de desecho al final de su uso. Los modelos de cálculo suelen basarse en el análisis de datos históricos, pronósticos de costos futuros y estimaciones de rendimiento y durabilidad del equipo.

Para cuantificar los resultados del mantenimiento, primero debemos establecer los resultados globales, para ello debemos considerar el Ciclo de Vida del Activo en forma completa.

Tendremos un Ingreso de Ciclo de Vida (ICV), que será la sumatoria de todos los ingresos generados por el uso del activo a lo largo de su ciclo de vida, también el Costo de Ciclo de Vida (CCV) ya mencionado, y la diferencia de ambos será el Beneficio de Ciclo de Vida (BCV), que es lo que tendremos que maximizar para optimizar nuestro negocio.

$$BCV = ICV - CCV$$

Un indicador clave para evaluar los resultados es el Retorno sobre los Activos, el cual se calcula como el cociente entre el Beneficio de Ciclo de Vida y el Valor de los Activos (VA), según muestra la fórmula a continuación:

$$ROA = BCV - VA$$

El Costo de Ciclo de Vida se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$CCV = CI + N(CO + CM + CP + CD)$$

Donde:

- CCV: es el Costo de Ciclo de Vida.
- CI: es el Costo de Inversión (incluye costos tales como máquinas, edificios, calles, instalaciones, repuestos, herramientas, equipos de mantenimiento, documentos y entrenamiento, entre otros.

- CO: es el Costo de Operación (incluye personal, energía, materiales, insumos, transporte, entrenamiento del personal y calidad).
- El Costo de Mantenimiento (incluye los costos de personal, materiales y repuestos, en mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, así como también los cambios en los diseños originales, además del entrenamiento del personal).
- CP: es el Costo de Parada, que se expresa por la ecuación:

$$CP = NP \times TPM \times CPP$$

- NP: es la Frecuencia de Paradas.
- TMP: es el Tiempo Medio de Paradas.
- CPP: es el Costo Perdido de Producción por hora.
- CD: es el costo de desincorporación del activo.
- N es el Factor de Valor Actual, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$N = \frac{(1 + r)^n - 1}{r \times (1 + r)^n}$$

- r: la tasa de interés
- n: el número de años considerado.
- N es el Factor de Valor Actual, el cual se calcula de la siguiente forma:

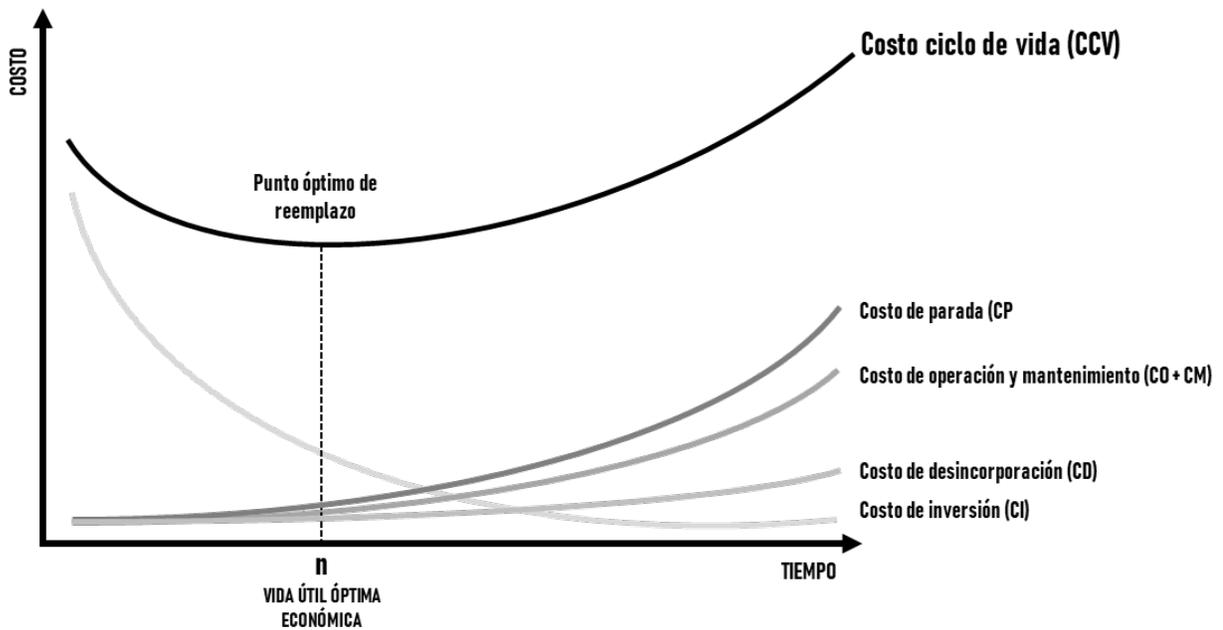


Ilustración 11. Costo del ciclo de vida de un activo. Fuente: Estrategia para Optimizar el uso de los Activos. <https://predictiva21.com/ciclo-vida-remanente-activo/>

La vida útil óptima (año de reemplazo) corresponde donde la curva CCV presenta el punto más bajo (ver Ilustración 11).

Beneficios de la aplicación del LCC

El uso del LCC en la minería trae beneficios tangibles que van más allá del simple análisis de costos. Al aplicar este enfoque, las empresas pueden optimizar la selección de equipo, eligiendo aquellos con menor costo total de propiedad y mejor rendimiento a largo plazo. Esto, a su vez, conduce a decisiones más estratégicas en la adquisición de maquinarias y planificación del capital.

La planificación de mantenimientos también se beneficia del análisis LCC, ya que permite identificar puntos de intervención que minimizan interrupciones y prolongan la vida útil de los equipos. La implementación de un plan de mantenimiento basado en LCC puede reducir los tiempos de inactividad no programados y los costos de emergencia, mejorando la confiabilidad operativa y la seguridad en el entorno de trabajo.

Limitaciones de la metodología del LCC

Esta metodología es útil para comparar dos alternativas similares, sin embargo, cuando las alternativas de reemplazo a evaluar presentan ciclos de vida diferentes, no es posible el cálculo de forma directa, ya que los beneficios esperados (VPN) de los diferentes flujos de caja, se ven impactados por el número de periodos considerados (años – tiempo de ciclo de vida). Para estas circunstancias es más acertado utilizar la metodología costo anual equivalente uniforme (CAUE), este genera una opción para poder comparar estrategias de mejora en ciclos de vida diferentes.

3.3. Costo anual uniforme equivalente (CAUE).

El CAUE, acrónimo de Costo Anual Uniforme Equivalente, es un indicador financiero utilizado para evaluar las inversiones y reemplazo de inversiones cíclicas. Su función es convertir los costos y beneficios variables de un activo o proyecto a lo largo del tiempo en una serie uniforme de flujos de caja durante toda su vida útil, de manera que se puedan comparar las alternativas durante estos periodos, independiente del horizonte de tiempo de evaluación.

El CAUE puede ayudar a las empresas con uso intensivo de activos físicos, como la minería, a determinar el momento óptimo para sustituir equipos o maquinarias, equilibrando el gasto de capital necesario para la sustitución con los beneficios esperados en términos de aumento de la productividad, reducción de los costos de mantenimiento y mejora de la seguridad. Al tener en cuenta el CAUE, las empresas pueden asegurarse de que están maximizando el rendimiento de su inversión, al tiempo que minimizan el riesgo de falla del equipo y el tiempo de inactividad. Sin embargo, es importante señalar que la decisión de sustituir el equipo no debe basarse únicamente en la comparación del CAUE. También deben tenerse en cuenta otros factores, como la antigüedad, obsolescencia, estado del equipo, desempeño, rendimientos, disponibilidad de repuestos o componentes y el presupuesto global de la organización.

Este indicador Financiero presenta un valor óptimo (CAUE mínimo), el cual optimiza la inversión para una vida útil (años) en específico (ver Ilustración 11).

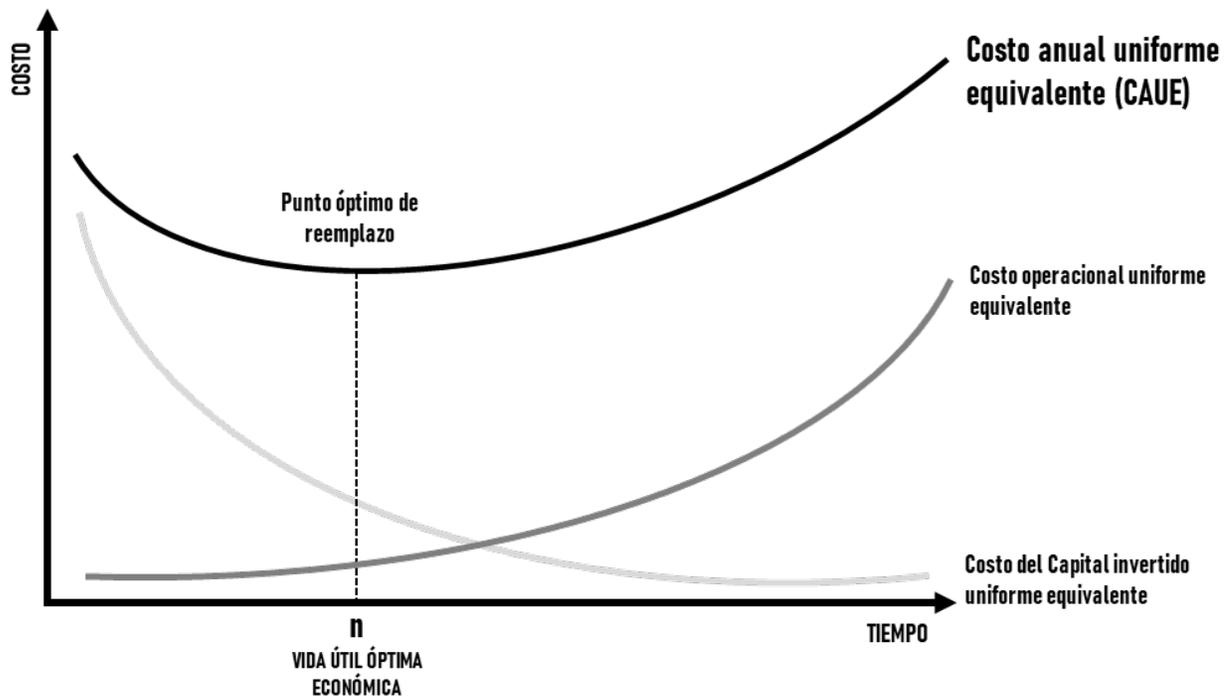


Ilustración 12. Representación gráfica del CAUE. Autor: Kettlun L., A. (2022). Material docente Formulación y Evaluación de Proyectos Mineros. Universidad de Chile.

¿Cómo se calcula el CAUE?

El cálculo del CAUE implica la determinación del valor actual de todos los costos y beneficios asociados a un activo a lo largo de su vida útil, incluidos los costos de adquisición, operación, mantenimiento y disposición final. A continuación, este valor actual se divide por el factor de anualidad, que es una fórmula matemática utilizada para calcular el pago anual equivalente necesario para cubrir todos los costos y beneficios a lo largo de la vida del activo.

$$CAUE = VPN \times FRC$$

Donde:

VPN: es el valor presente neto del flujo de caja, del periodo a evaluar, del ciclo de vida del activo. La fórmula para el cálculo es:

$$VPN = \sum_{i=1}^n FC_i$$

Donde:

n: es el número de periodos.

FC_t: es el flujo de caja a valor presente neto en un periodo t, el cual se puede representar como mediante la siguiente expresión.

$$FC = C_{cap} + C_{oper}$$

Donde:

C_{cap}: Costo del capital invertido.

C_{oper}: Costo operacional.

Por otra parte.

FRC: es el factor de recuperación de capital, el cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$FRC = \frac{(1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1}$$

Donde:

n: es el número de periodos.

r: es la tasa de interés

t: es el año o periodo por evaluar.

Costo del capital invertido

Contablemente, se incurre en la reducción del valor del activo año a año debido a la aplicación de la depreciación (que de acuerdo con ciertos parámetros contables puede ser lineal o acelerada). Para el mercado, este activo también tiene valor de reventa, el cual es afectado por el tiempo de utilización, condiciones operacionales, variables de mercado, etc.

La depreciación lineal representa la disminución del valor libro de manera lineal y uniforme conforme pasan los años del activo. Tiene una tasa de depreciación constante y se calcula como:

$$D = VI \times \frac{1}{t}$$

Donde:

D: es la depreciación anual lineal.

t: es el número de periodos contables a depreciar por libro.

Por lo tanto, aplicando la depreciación lineal anual para un periodo t, se puede obtener el valor contable mediante la siguiente expresión:

$$VC = VI - \sum_{i=1}^n (D \times n)$$

$$VC = VI - VI \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t} \times n \right)$$

$$VC = VI \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t} \times n \right) \right)$$

Donde:

VC: es el valor contable

Por otra parte, el valor residual representa el valor de reventa en el mercado del activo y este puede variar de acuerdo con el contexto del país, internacional, industria, mercado, entre otros. Sin embargo, puede ser estimado como:

$$VR = \left(\frac{2}{3} \right)^n \times VI$$

Donde:

VI: es el valor inicial de la inversión.

VR: es el valor de reventa en el tiempo t.

n: es el número de periodos a evaluar.

Este valor va disminuyendo al pasar los años tendiendo a 0 a largo plazo.

En el caso de la venta del activo, tenemos 2 situaciones posibles:

- El valor contable es superior al valor de venta: En este caso habrá un perjuicio contable correspondiente a la diferencia entre estos valores. El perjuicio contable deberá ser restado de la renta tributable (crédito contable).
-
- El valor contable es inferior al valor de venta: Para esta situación habrá un lucro contable que será sumado a la renta tributable, o sea, sobre este lucro incidirá el Impuesto de Renta.

El costo del capital invertido se obtiene a

$$C_{cap} = \left(VI - (VR - (VR - VC) \times I) \times \frac{1}{(1+r)^n} \right)$$

Donde:

I: es el impuesto a la renta en casos donde el valor contable es inferior al valor de venta.

Reemplazando las variables y simplificando podemos obtener la expresión para el cálculo de costo del capital invertido a valor presente neto como:

$$C_{cap} = \left(VI - \left(VI \times \left(\frac{2}{3} \right)^n - \left(VI \times \left(\frac{2}{3} \right)^n - VI \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t} \times n \right) \right) \right) \right) \times I \right) \times \frac{1}{(1+r)^n}$$

$$C_{cap} = VI \times \left(1 - \left(\left(\frac{2}{3} \right)^n - \left(\frac{2}{3} \right)^n - \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t} \times n \right) \right) \right) \times I \right) \times \frac{1}{(1+r)^n}$$

Costos operacionales.

Los costos operacionales están representados como la suma del costo de operación más el costo de mantenimiento del activo, donde:

$$C_{oper} = \sum_{i=1}^n \left((CO + CM + CP + CD) \times \frac{1}{(1+r)^n} \right)$$

Donde:

CO: es el Costo de Operación (el cual incluye personal, energía, materiales, insumos, transporte, entrenamiento del personal y calidad).

CM: es el Costo de Mantenimiento (incluye los costos de personal, materiales y repuestos, en mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, así como también los cambios en los diseños originales, además del entrenamiento del personal).

CP: es el costo de parada o costo de oportunidad por el impacto en el negocio de la detención del activo.

CD: es el costo de desincorporación del activo.

Expresión final para el cálculo del CAUE:

$$CAUE = \left(VI \times \left(1 - \left(\left(\frac{2}{3} \right)^n - \left(\frac{2}{3} \right)^n - \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t} \times n \right) \right) \right) \times I \right) \times \frac{1}{(1+r)^n} \right) + \sum_{i=1}^n \left((CO + CM + CP + CD) \times \frac{1}{(1+r)^n} \right) \times \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Para la estimación de los costos operacionales futuros, es posible usar la información histórica de horas de utilización, materiales, mano de obra y servicios presentes en el presupuesto de mantenimiento con basado en plan de mantenimiento anual y de producción. Con esta información es posible calcular el costo unitario (costo/horas de operación).

Los costos de producción en los próximos años se calculan según la evolución histórica de los costos unitarios y las horas operativas estimadas en el plan de producción. Esto permite estimar el flujo de costos futuros. También, es posible obtener información de costos futuros a través de información de proveedor del activo o activos similares, ajustados al contexto de operación del sitio a evaluar.

Decisión de Reemplazo de Activos

La decisión de reemplazar los equipos mineros es más difícil que simplemente comparar dos CAUE. Una correcta interpretación de los resultados requiere un análisis en profundidad que abarque factores estratégicos, operativos y económicos.

1. El primer paso consiste en calcular el CAUE del equipo en operación o “defensor”. Este cálculo incluye todos los costos operativos descritos anteriormente.
2. El segundo paso consiste en calcular el CAUE del nuevo activo o “retador”, de forma similar al defensor. Una consideración importante es el potencial de mejora de la eficacia y de reducción de los costos de funcionamiento que puede proporcionar el nuevo equipo.
3. Cuando el CAUE del activo nuevo es inferior al del activo actual, indica que el costo de adquirir y operar el nuevo activo será menor que mantener el antiguo. Sin embargo, antes de tomar la decisión definitiva se debe considerar el impacto de la transición, la disponibilidad de financiamiento, los tiempos de entrega y adaptación del equipo nuevo.

Comparando el CAUE del defensor y del retador, las empresas mineras pueden tomar decisiones informadas sobre cuándo sustituir el equipo y qué opciones proporcionarán el mayor rendimiento de la inversión. Esto puede ayudar a minimizar los costos y maximizar la eficiencia operativa, lo que entrega como resultado a una mayor rentabilidad para la empresa.

Además, se debe considerar factores adicionales que influyen en la decisión de reemplazo como la volatilidad del precio de los *commodities*, cambios potenciales en las regulaciones mineras, mejoras tecnológicas, adaptación del personal y consideraciones medioambientales, son todos factores críticos que deben ser evaluados. Estos elementos pueden afectar tanto al desempeño futuro del equipo como a su vida útil, alterando significativamente los cálculos del CAUE.

Análisis de Sensibilidad en el CAUE

La evaluación de decisiones de inversión, como el reemplazo de equipos, no es estática ni inmune a cambios del mercado, por lo tanto, llevar a cabo un análisis de sensibilidad es un paso imprescindible. Este análisis implica modificar sistemáticamente las variables económicas clave como; inflación, impuestos, costos de materiales o insumos, tasas de interés y precios de venta, para evaluar cómo afectan al CAUE y a la decisión de reemplazo.

Desventajas de la decisión de Activos mediante el CAUE

Como toda metodología, la decisión del reemplazo mediante al CAUE presenta debilidades y desventajas que deben ser conocidas para obtener un análisis lo más cercano a la realidad. Entre las principales podemos nombrar:

- **Acceso a información de calidad:** La falta de información histórica de costos consistente y que involucre todos los requerimientos de la metodología es difícil, generalmente se debe optar por estimaciones que pueden afectar la certeza de los resultados.
- **Estimaciones y suposiciones:** Se fundamenta en estimaciones de costos futuros, ingresos y valores residuales que pueden ser inciertos y conducir a decisiones no acertadas para el negocio.
- **Tasa de interés:** El resultado del CAUE es sensible a cambios en la tasa de interés, la selección adecuada es crítica y puede ser difícil de determinar. Una tasa incorrecta puede sesgar los resultados generando decisiones de reemplazo no óptimas.
- **Vida útil del equipo:** Determinar la vida útil exacta de un equipo puede ser complicado y errores en esta estimación pueden afectar significativamente el cálculo del CAUE.
- **Cambio en la tecnología:** La metodología no considera de manera explícita los cambios tecnológicos que podrían hacer que un equipo quede obsoleto antes de lo previsto.

- **Costos de oportunidad:** Es difícil cuantificar el costo de oportunidad de la detención de un activo, más aún, cuando no son activos parte de un proceso en línea. Por ejemplo, en equipos móviles.
- **Costos ocultos:** Puede haber costos indirectos o intangibles, como el impacto en la productividad o en la seguridad y medioambiente, que no se reflejan fácilmente en el análisis del CAUE.
- **Flexibilidad operativa:** El CAUE asume un escenario estático y no toma en cuenta la flexibilidad operativa que podría tener un activo frente a diferentes cambios en condiciones de mercado como:
 - Cambios en el mercado (inflación, tasas de interés, entre otros)
 - Cambios en las legislaciones y políticos.
 - Eventos disruptivos de alcance global (ej: COVID-19).
 - Cambios en empresas y organizaciones.
 - Cambios tecnológicos.
 - Cambios en el contexto de operación de los activos.
 -
- **Valor residual:** La estimación del valor residual al final de la vida útil del activo puede ser inexacta, lo que afectaría el cálculo del CAUE.
- **Enfoque en lo financiero:** El CAUE es principalmente una herramienta financiera y no considera factores cualitativos como la seguridad, el impacto ambiental o la alineación con los objetivos estratégicos de la empresa.
- **Comparaciones limitadas:** El CAUE es más efectivo cuando se compara entre alternativas de inversión similares. Dado que las opciones son sumamente diversas, el análisis puede resultar menos preciso.
- **Decisiones a largo plazo:** El CAUE se centra en los costos a largo plazo, lo que puede ser una desventaja para las empresas que necesitan resultados a corto plazo o tienen restricciones de flujo de caja.

Para mitigar estas desventajas, es necesario combinar el CAUE con otros métodos de evaluación y análisis cualitativos que consideren todos los aspectos relevantes para la toma de decisiones sobre reemplazo de Activos.

El propósito de este estudio consiste en introducir herramientas estadísticas y de modelación en las variables principales que afectan el CAUE con el fin de ajustar el cálculo más cercano a la situación operativa del activo y adoptar decisiones con niveles de certeza.

3.4. Simulación de Montecarlo.

La simulación de Montecarlo, también conocida como método de Montecarlo o simulación de probabilidad múltiple, es una técnica matemática que permite comprender el comportamiento de sistemas complejos mediante la generación de variables aleatorias. La técnica se utiliza en una gran variedad de campos, desde la física hasta la economía, y es especialmente útil para evaluar riesgos y tomar decisiones bajo incertidumbre.

Este método fue desarrollado por John von Neumann y Stanislaw Ulam durante la Segunda Guerra Mundial para mejorar la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre, por ejemplo, cuando se buscaban métodos eficientes para modelar escenarios complejos y realizar cálculos de física nuclear. Su nombre hace referencia a un famoso barrio de Mónaco, "Montecarlo", conocido por sus casinos e inspirados en los juegos de azar y la aleatoriedad involucrada en ellos, similar al juego de la ruleta.

El desarrollo histórico de las simulaciones de Montecarlo ha estado marcado por los avances en informática y matemáticas. Desde sus primeras aplicaciones en proyectos de física durante la guerra hasta su uso en las finanzas modernas, la metodología ha crecido exponencialmente. Los trabajos de las décadas de 1940 y 1950 sentaron las bases, con científicos que utilizaban algoritmos estocásticos para resolver integrales y problemas de probabilidad. A medida que se disponía de ordenadores más potentes, en los años siguientes se amplió su uso en diversos campos, como la ingeniería, las finanzas y las ciencias climáticas, donde la capacidad de simular numerosos escenarios posibles se convirtió en una herramienta valiosa en la resolución de problemas matemáticos.

Desde su introducción, las simulaciones de Montecarlo han evaluado el impacto del riesgo en diversas situaciones de la vida real, como la inteligencia artificial, los precios de las acciones, la previsión de ventas, la gestión de proyectos y la fijación de precios. También ofrecen varias ventajas sobre los modelos predictivos con entradas fijas, como la capacidad de efectuar análisis de sensibilidad o calcular correlaciones de entrada. El análisis de sensibilidad permite a los responsables de la toma de decisiones ver el

impacto de las entradas individuales en un resultado específico, mientras que la correlación les ayuda a comprender las relaciones entre las variables de entrada.

Cómo funciona

La simulación de Montecarlo predice un conjunto de resultados basados en un rango estimado de valores frente a un conjunto fijo de valores de entrada. En términos sencillos, una simulación de Montecarlo crea un modelo de posibles resultados utilizando una distribución de probabilidad, como una distribución uniforme o normal, para cualquier variable que tenga incertidumbre inherente. A continuación, recalcula los resultados repetidamente, utilizando cada vez un conjunto diferente de números aleatorios entre los valores mínimo y máximo. En un experimento Monte Carlo típico, este ejercicio puede repetirse miles de veces para generar un gran número de resultados probables.

Las simulaciones de Montecarlo también se utilizan para predicciones a largo plazo debido a su precisión. A medida que aumenta el número de entradas, también crece el número de predicciones, lo que permite realizar proyecciones más precisas en el futuro. Cuando una simulación de Montecarlo concluye, proporciona una variedad de resultados posibles con la probabilidad de que cada resultado se produzca.

Un ejemplo sencillo de simulación de Montecarlo es considerar el cálculo de la probabilidad de lanzar dos dados estándar. Hay 36 combinaciones al lanzar los dados. En función de esto, puede calcular manualmente la probabilidad de un determinado resultado. Usando una simulación Montecarlo, puede simular el lanzamiento de los dados 10 000 veces (o más) para lograr predicciones más precisas.

Metodología de Simulación de Montecarlo.

El proceso para llevar a una simulación de Montecarlo cuenta de 7 pasos (ver Ilustración 13) y se puede definir como:

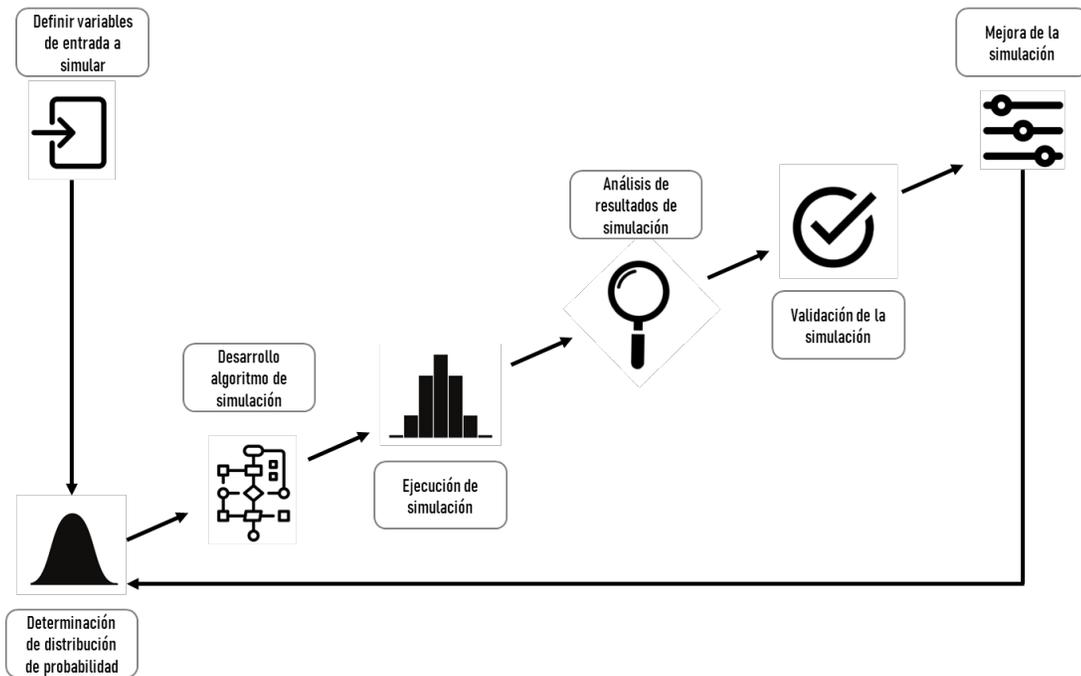


Ilustración 13. Proceso de simulación de Montecarlo. Fuente: El autor con información de Manual de Usuario de Crystal Ball.

Definir Variables de Entrada.

En esta etapa se listan todas las variables clave que afectan al modelo, posteriormente se recopila los de datos históricos, estimaciones o suposiciones con base en criterio experto para cada variable. Por último, se determinan las interrelaciones entra cada variable.

Determinación de Distribuciones de Probabilidad

En esta etapa se elige una distribución de probabilidad adecuada para cada variable (normal, log-normal, uniforme, triangular, etc.) de acuerdo con análisis de histogramas, pruebas de bondad de ajuste (como la prueba de Kolmogorov-Smirnov) o ajuste teórico de datos observados de acuerdo con criterios expertos. Posteriormente, se estiman los parámetros de estas distribuciones (media, desviación estándar, etc.) y se justifica la elección de cada distribución con datos o conocimiento experto.

Desarrollo del Algoritmo de Simulación

El propósito de esta etapa es traducir el modelo matemático (ecuaciones, decisiones, supuestos, entre otros) a un algoritmo computacional. Posteriormente, se codifican las relaciones entre variables (correlaciones) y las distribuciones de probabilidad en el software elegido. Por último, se implementan pruebas para verificar que el algoritmo refleja correctamente el modelo.

Ejecución de la Simulación

En la etapa de ejecución se realizan múltiples iteraciones (miles o más) para simular escenarios generando valores aleatorios para las variables de entrada en cada iteración, esto nos da como resultado múltiples valores de salida con una tendencia a un valor objetivo (nivel de certeza).

Análisis de Resultados de la Simulación.

En esta etapa se recopila y organiza los datos de salida de todas las iteraciones, ayudados por visualizaciones gráficas como histogramas o gráficos de densidad para representar los resultados y su mejor interpretación. Se calculan estadísticas descriptivas (media, mediana, varianza u otras), se analiza el rango de resultados posibles y sus probabilidades asociadas, identificando escenarios extremos y su frecuencia. Por último, se evalúan los resultados en el contexto del problema real y se sugieren decisiones basadas en riesgos y probabilidades.

Validación del Modelo

El propósito de esta etapa es comparar los resultados de la simulación con datos reales o conocimiento experto para validar el modelo, haciendo pequeños ajustes a la simulación para mejorar su precisión. Además, se llevan a cabo análisis de sensibilidad para entender el impacto de las diferentes variables y se toman decisiones sobre cambios o modificaciones del modelo.

Mejora de la simulación

En esta etapa se refinan distribuciones de probabilidad o el algoritmo según los resultados obtenidos con el propósito de ajustar el modelo al comportamiento real del proceso a estudiar, con base en datos históricos o criterio experto. Posteriormente, se repite la simulación con el modelo ajustado para obtener resultados más precisos. Este proceso

se continúa de forma iterativa hasta lograr un nivel de satisfacción con los resultados esperados. Cada uno de estos pasos es crucial para asegurar que la simulación Monte Carlo sea válida y útil para el propósito previsto. La clave está en la iteración y refinamiento continuo con el fin de acercarse lo más posible a una representación precisa del proceso o fenómeno a simular.

4. METODOLOGÍA

El propósito de este estudio es modelar determinística y estocásticamente los factores que inciden en la determinación del intervalo de reemplazo óptimo para equipos Mineros, y cómo este último tiene un impacto en la previsión de equipos requeridos en un ejercicio LOM. Para este estudio se definen 5 etapas de trabajo (ver Ilustración 14).



Ilustración 14. Metodología del estudio. Fuente: El autor.

4.1. Definición del problema.

En esta etapa se diseña el marco de trabajo del estudio. Incluye los siguientes pasos:

1. **Identificación del problema a modelar:** Este paso describe de manera clara cuál es el problema que se pretende abordar con el modelo. Se identifican las variables relevantes, se recopilan los datos necesarios y se comprende a fondo la naturaleza del problema.
2. **Establecer hipótesis del modelo:** Este paso plantea una hipótesis sobre el desarrollo esperado de la variable a analizar con base en el criterio experto y el comportamiento observado en la realidad. También, propone la forma más adecuada de abordar el problema.

3. **Determinar límites y suposiciones del modelo:** Este paso establece los límites y suposiciones del modelo, lo cual implica establecer las restricciones o condiciones que rigen el modelo. También, se identifica las limitaciones de los datos y se establecen las suposiciones necesarias para aplicar el modelo.

4.2. Levantamiento de información.

En esta etapa se detallará el origen, alcance y supuestos de los datos requeridos. Incluye los siguientes pasos:

1. **Definir variables claves:** Este paso establece las variables más relevantes para el problema que se quiere abordar. Estas variables son fundamentales para la construcción del modelo y tienen relación directa con las hipótesis planteadas. Por ejemplo, costo unitario de un equipo productivo en el supuesto que los costos aumentan durante su vida útil.
2. **Recopilar datos históricos:** En este paso se recopilan datos históricos relevantes para las variables identificadas en el paso anterior. Estos datos proporcionarán la base empírica necesaria para la construcción y validación del modelo. Establece un período de tiempo para recopilar datos que sean relevantes de la situación actual y futura del problema a modelar. Por ejemplo, intervalo de tiempo con datos operativos de equipos de tecnologías y rendimientos similares, dejando fuera información equipos obsoletos que presentan un comportamiento distinto al actual y futuro proyectado.
3. **Determinar interrelación de variables:** Este paso se enfoca en el análisis de la relación entre las variables identificadas, con el propósito de comprender cómo interactúan entre sí, basándose en criterios expertos y la observación de datos históricos.
4. **Construcción de base de datos:** Este paso implica la creación de una base de datos que contenga la información recopilada y organizada de manera que sea adecuada para su posterior análisis. Esta base de datos servirá como punto de partida para la creación del modelo y en el caso de este estudio se utilizarán planillas de cálculo en Microsoft EXCEL.

4.3. Análisis de datos.

Esta fase se lleva a cabo mediante un análisis de los datos históricos obtenidos en concordancia con los criterios establecidos en el capítulo Marco teórico - Análisis de datos. Incluye los siguientes pasos:

1. **Selección de datos:** En este paso se seleccionan las variables que pueden tener un mayor impacto en el modelo, las cuales generalmente se encuentran distribuidas en distintas columnas de la base de datos.
2. **Exploración de datos:** Una vez identificados los datos objetivos, se emplean técnicas de análisis estadístico para comprender su estructura, identificando patrones, tendencias y correlaciones. Para este estudio se definió:
 - Realización de histogramas para analizar la estructura y distribución de datos (Ver Ilustración 15).

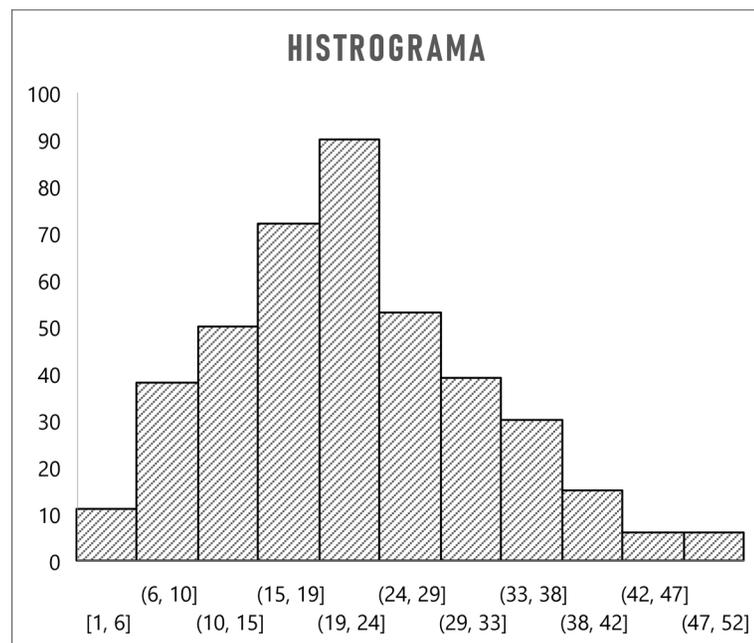


Ilustración 15. Ejemplo gráfico Histograma. Fuente: El autor.

- Análisis gráfico Boxplot para visualizar la tendencia central de los datos e individualizar datos atípicos que podrían afectar el modelo (Ver Ilustración 16).

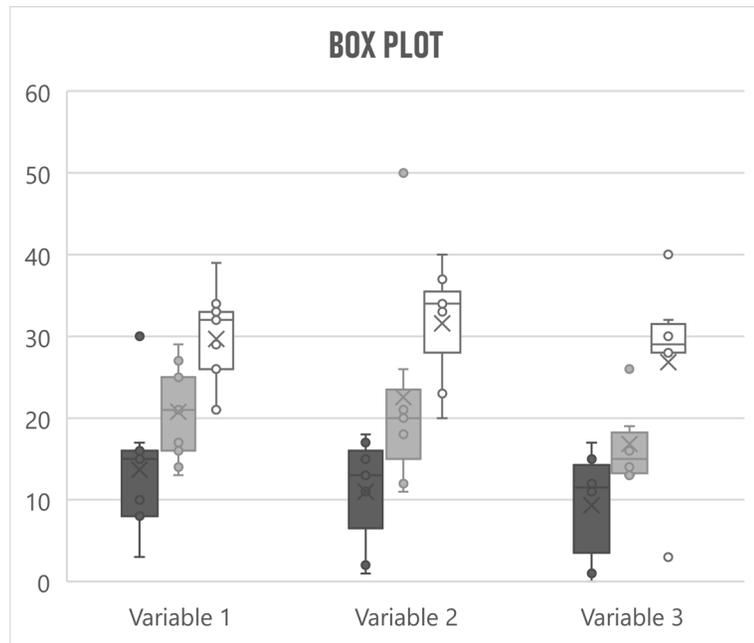


Ilustración 16. Ejemplo gráfico Boxplot. Fuente: El autor.

- Análisis de correlación entre variables y el tiempo, con el fin de verificar tendencias (Ver Ilustración 17).
- Análisis de correlación entre variables para determinar interacciones en conjunto, por ejemplo (Ver Ilustración 17).

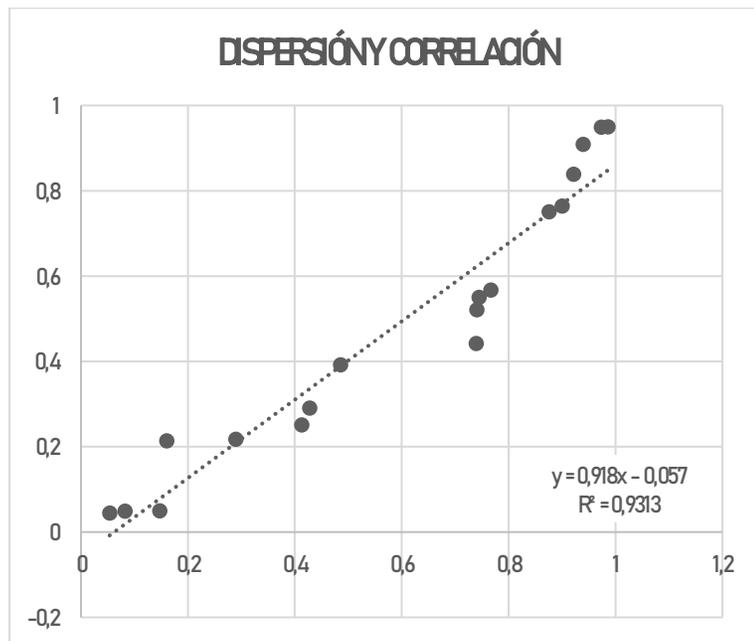


Ilustración 17. Ejemplo gráfico análisis de correlación. Fuente: El autor.

3. **Modificación de datos:** Una vez completada la fase de exploración de datos, se procede a modificar la base de datos, eliminando los datos atípicos con base en el criterio experto, tales como los datos erróneos o mal recopilados, o no forman parte de los comportamientos observados en los datos históricos. Es factible crear una normalización de datos mediante la utilización de tenencias como un promedio móvil o para evidenciar tendencias y disminuir su variabilidad, manteniendo el comportamiento esperado.
4. **Modelado de datos:** En esta etapa se aplican las fórmulas matemáticas definidas para el modelo para predecir el comportamiento de los datos. En el caso de este modelo se definió:
 - Definición de ecuaciones que representan el comportamiento de esperado en un equipo tipo (equipo que representa el comportamiento promedio de todos los equipos de una flota), en variables como: costos unitarios (operación, mantenimiento y detención) y horas de operación.
 - Generar una proyección a varios años de valores modelados de las variables de costos unitarios y horas de operación.
 - Aplicación de ecuación para el cálculo del Costo anual uniforme equivalente (CAUE) anual para el periodo de tiempo de evaluación.
5. **Interpretación de resultados:** en esta etapa se analiza el resultado final del CAUE mínimo y se verifica si el resultado obtenido es coherente a lo esperado en relación con criterios expertos y observación de datos históricos. En casos de resultados no aceptables, se procede a efectuar un ajuste del modelo desde la fase de selección de datos, seguido de un proceso repetitivo hasta validar el resultado obtenido.

4.4. Simulación de datos

La simulación del modelo se lleva a cabo mediante la utilización de la metodología Montecarlo, conforme a lo establecido en el capítulo Marco teórico – Simulación de Montecarlo. Esta aplicación se basa en hojas de cálculo Microsoft Excel, la cual permite la creación de modelos predictivos y el análisis de riesgo. Incluye los siguientes pasos:

1. **Definir Variables de Entrada:** En esta etapa se seleccionan las variables que se modelarán en la simulación como una distribución de probabilidad. Aunque el modelo definido tiene varias variables de entrada definidas, no todas son candidatas o requieren entrar al algoritmo de simulación como valores posibles de una distribución de probabilidad. A estas se les llamará “Rango de suposiciones” de acuerdo con el software Crystal Ball.
2. **Determinación de Distribuciones de Probabilidad:** Una vez seleccionadas las variables de entrada a la simulación, se procederá a establecer una distribución estadística mediante pruebas de bondad de ajuste, tales como la prueba de Kolmogorov-Smirnov, en relación con los datos históricos utilizando la funcionalidad de ajuste de Crystal Ball (ver Ilustración 18). En caso de no contar con datos fiables o no obtener resultados satisfactorios en las pruebas de bondad, es posible ajustar las distribuciones de las variables según un criterio experto o información de fenómenos similares.

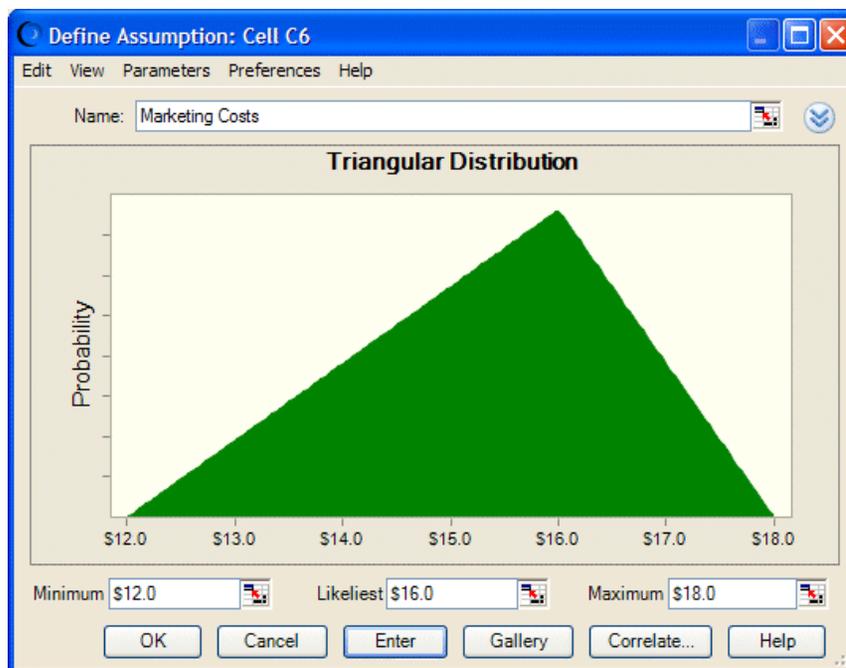


Ilustración 18. Ejemplo de una definición de distribución estadística a una variable de entrada en Crystal Ball. Fuente: Manual de Usuario de Crystal Ball.

3. **Desarrollo del Algoritmo de Simulación:** El propósito de esta etapa es traducir el modelo matemático (ecuaciones, decisiones, supuestos, entre otros) a un algoritmo computacional. Posteriormente, se codifican las relaciones entre variables (correlaciones) y las distribuciones de probabilidad en el software elegido. Por último, se implementan pruebas para verificar que el algoritmo refleja correctamente el modelo.

El algoritmo requerido en *Crystal Ball* para ejecutar la simulación del modelo requiere los siguientes elementos:

- **Rango de suposiciones:** son las variables de entrada con una asignación de distribución estadística, definidas en las etapas anteriores. Estas se asignan a celdas específicas en la hoja de cálculo.
- **Rangos de previsión:** Corresponde a la salida del modelo, generalmente es una fórmula en la celda en la hoja de cálculo que contiene la función objetivo a evaluar. En el caso de este estudio corresponde al CAUE mínimo.
- **Correlaciones:** Son las dependencias en pares de suposiciones que pueden ser calculadas correlacionando los datos históricos de cada variable de entrada, utilizando *Crystal Ball*. También es posible introducir factores de correlación de forma manual de acuerdo con criterio experto o análisis de tendencias en los datos observados.

4.5. Ejecución de la Simulación

Antes de ejecutar la Simulación, es necesario definir el número máximo de pruebas antes de detener el proceso. Además, es posible definir configuraciones de muestreo como usar la misma secuencia de números aleatorios en cada simulación (repetir resultados) e introducir un valor de inicialización, el cual determina el primer número de la secuencia. Otras configuraciones posibles están asociadas a la definición de la velocidad de ejecución, almacenamiento de datos de la simulación, preferencias estadísticas y resultados mostrados (gráficos de previsión, sensibilidad, tendencia, dispersión, entre otros). Posterior a la configuración de la simulación es posible iniciar el proceso.

1. **Análisis de Resultados de la Simulación:** Crystal Ball crea un gráfico de previsión para cada celda definida (datos de salida). Los gráficos condensan toda la información en un espacio reducido para su análisis. Para analizar los gráficos de previsión podemos seguir los siguientes pasos:

- 1.1. Observe cada gráfico de previsión como si lo hiciera desde un punto de vista elevado. Estudie la forma de la distribución:

- ¿Se distribuye con normalidad o se sesga de forma negativa o positiva?
- ¿Es “plano” (se extiende a ambos lados de la media) o “en punta” (con la mayoría de los valores de agrupados alrededor de la media)?

- ¿Tiene solamente un modo (valor más probable) o es bimodal con varias puntas o jorobas?
- ¿Es continuo o hay varios grupos de valores separados del resto, o incluso valores extremos que quedan fuera del rango de visualización?

1.2. Observe el nivel de certeza, la probabilidad de obtener valores en un determinado rango. Puede introducir un rango, por ejemplo, todos los valores mayores a 0 \$, si va a analizar los beneficios, y ver la certeza de que queden dentro del rango (de 0 \$ a + infinito, en este caso). También puede introducir una certeza, por ejemplo, un 75 % y ver qué rango de valores sería necesario para llegar a ese nivel.

2. **Validación de la simulación:** El resultado de la simulación entregará un valor o un intervalo de resultados con un nivel de certeza, dependiendo de la selección de un nivel de riesgo definido para el ejercicio. En caso de obtener un resultado cercano al comportamiento real esperado, sé válida la simulación y se continúa con el desarrollo de las conclusiones.

En caso de resultados no satisfactorios es necesario efectuar ajustes y repetir la simulación. Por ejemplo, podemos obtener el costo total para un equipo tipo multiplicando el CAUE por el periodo de años en evaluación y comparar este valor con el costo real a valor presente de equipos similares, se debería esperar valores dentro del mismo orden de magnitud para definir los resultados como válidos.

3. **Mejora de la simulación:** El criterio para definir un resultado óptimo es la variabilidad de los datos de salida de la previsión. Si los datos de salida de la previsión exhiben un gráfico plano o con diversas puntas (bimodal), resulta difícil alcanzar niveles de certeza elevados en relación con el valor objetivo. Por lo tanto, es necesario revisar suposiciones y correlaciones para disminuir la variabilidad. Podemos considerar los siguientes criterios para mejorar la previsión:

- **Cambios en las distribuciones de probabilidad en las suposiciones:** es probable que la selección de la distribución no sea la adecuada o sus valores de tendencia central (promedios y desviaciones estándar).
- **Definir límites en las colas de las distribuciones:** es posible que la distribución de probabilidad considere valores que en la realidad no sean válidos, *Crystal Ball* permite sesgar las colas de las distribuciones, concentrando las simulaciones en valores posibles.

- **Cambios en correlaciones:** existe la posibilidad de que existan correlaciones no identificadas en el inicio o un ajuste en factor asignado.
- **Cambios en los ajustes de simulación:** es posible modificar factores como el número de pruebas o configuraciones de muestreo, estos pueden afectar los resultados finales.

La mejora de la simulación es un proceso iterativo de ajuste, el cual se concluye cuando los resultados son óptimos (la previsión se ajusta al comportamiento esperado y real).

4.6. Análisis de resultados.

En esta etapa se examinan los datos y resultados obtenidos de la simulación para identificar patrones, tendencias y conclusiones relevantes. busca comprender el comportamiento del sistema modelado y obtener información significativa que pueda ser utilizada para la toma de decisiones.

1. **Verificación de hipótesis:** Durante este paso se evalúan las hipótesis planteadas al inicio del proceso de modelamiento y simulación. Se procede a verificar si los resultados obtenidos respaldan las suposiciones iniciales y se examina si existen desviaciones significativas que requieran una revisión de las hipótesis planteadas.
2. **Definir limitaciones del modelo:** En este paso se identifican y documentan las limitaciones del modelo utilizado en el proceso de simulación. Se consideran aspectos como; la precisión de las suposiciones de entrada, las simplificaciones realizadas en el modelo o restricciones que puedan afectar la representación fiel del sistema real.
3. **Desarrollo de recomendaciones:** En este paso se generan recomendaciones fundamentadas en los análisis de resultados y la verificación de hipótesis. Estas recomendaciones pueden incluir ajustes al modelo, modificaciones en el proceso real y modificaciones al proceso de modelado.

5. DESARROLLO

En esta etapa se desarrolla el estudio de acuerdo con lo definido en la metodología (ver ilustración 19).

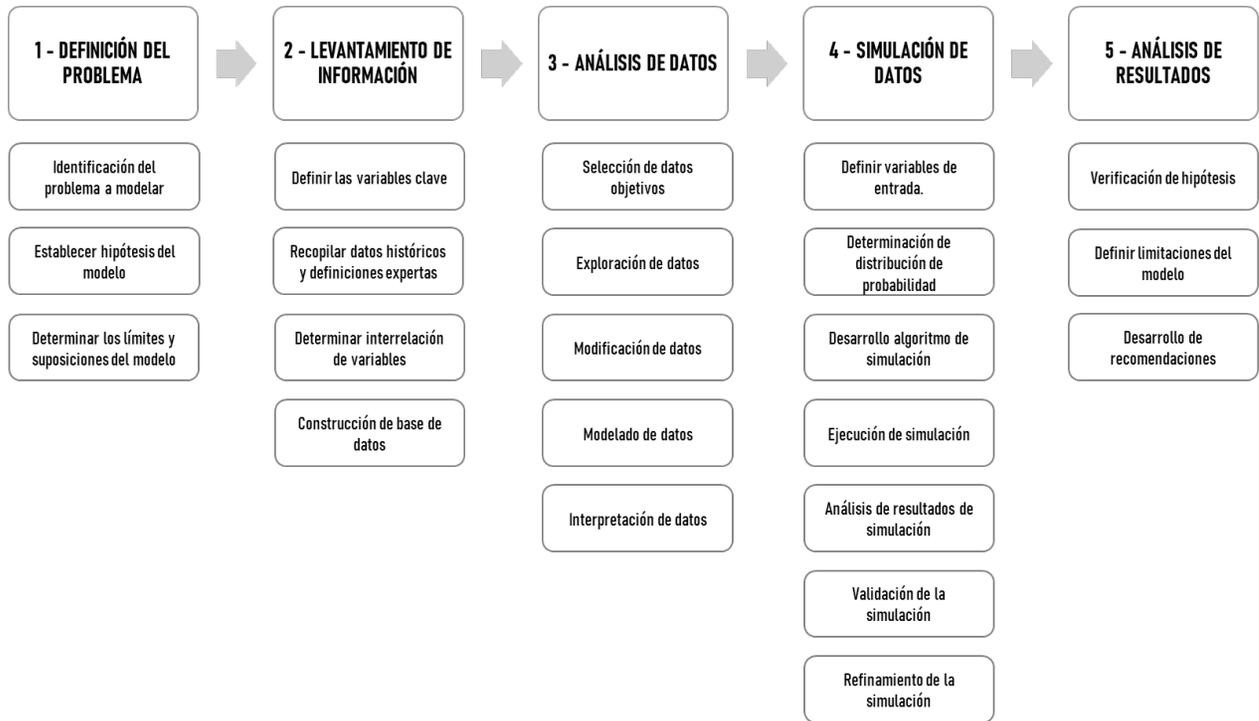


Ilustración 19. Metodología del estudio. Fuente. El autor.

5.1. Definición del problema

La definición del intervalo óptimo de reemplazo de un equipo minero (Económico y técnico) es una variable relevante al momento de elaborar planes de inversión a largo plazo, especialmente cuando se refiere a inversiones sistemáticas y similares, como ocurre con equipos de transporte o carguío, entre otros. Permite, por un lado, generar pronósticos robustos y a la vez optimizar las inversiones evitando sobre gastos a futuro. Contar con un plan de inversión a largo plazo permite:

- Negociar contratos de compra de equipos a largo plazo.
- Integración con socios OEM claves para aprovisionamiento de componentes, repuestos e insumos críticos.

- Definir la cantidad de equipos óptimos para el plan de producción, incluyendo certeza de esta decisión.
- Mejoras en la estrategia de mantenimiento con una mirada económica. Un cambio en la vida útil de un equipo puede significar modificaciones en la estrategia de Mantenciones Mayores (*Overhaul*) y programa de cambio de componentes.
- Facilitar la incorporación de nuevas tecnologías.

Actualmente, en la industria la definición del reemplazo óptimo de un activo se realiza con base en criterios expertos, Costo del ciclo de vida útil o utilizado el indicador financiero CAUE (Costo anual uniforme equivalente). Este estudio se centra en evaluar el CAUE como herramienta para calcular el intervalo de reemplazo óptimo. Sin embargo, este presenta algunas limitaciones principales como:

- Acceso a información de calidad.
- Estimaciones y suposiciones de costos futuros.
- Tasa de interés estática.
- Precisión en la determinación de Vida útil del equipo.
- No supone cambio en la tecnología.
- Otras, definidas en Marco Teórico - Costo anual uniforme equivalente (CAUE).

5.1.1. Identificación del problema.

El propósito de este estudio y el problema que busca resolver es como mejorar la certeza del cálculo del intervalo óptimo de reemplazo, incorporando herramientas de simulación de escenarios. Estas no permiten ajustar el cálculo al contexto real de operación de los equipos y establecer niveles de certeza en torno a un valor objetivo. Para este estudio en específico, se centró en la flota de LHD EPIROC 1030 por ser la más importante en cantidad y proyección de inversión a futuro.

5.1.2. Establecer hipótesis del modelo

Se espera que el costo del capital invertido y el costo operacional disminuyan año tras año debido a la pérdida de valor de un activo con base en su depreciación contable y pérdida de valor en el mercado.

Por otro lado, se espera que los costos operacionales vayan aumentando año tras año producto del envejecimiento, desgaste, mayor requerimiento de recursos en un equipo para mantener su estándar operativo. Además, estos valores anualizados y distribuidos de manera equivalente durante el período a evaluar presenten un valor mínimo, el cual optimiza el costo total del ejercicio (vida útil económica).

Para abordar este estudio se plantea la determinación de un equipo tipo, que represente el comportamiento esperable promedio de la flota anual. Este equipo tipo servirá de base para el cálculo y simulación del modelo.

5.1.3. Determinar límites y suposiciones del modelo.

Se establecen los siguientes límites al modelo:

- Este modelo se encuentra establecido al contexto operación de un LHD EPIROC 1030 operando en Minera Florida, por lo cual no es representativo para otros modelos de LHD o tipos de equipos, incluso el equipo, pero operando en otro contexto operacional (ej. otra faena).
- El periodo de datos históricos está constituido entre el 01-11-2017 hasta 01-08-2022 y son de naturaleza mensual.
- Este estudio está realizado bajo la premisa del reemplazo de un equipo por otro nuevo, no considera otras alternativas como *Overhaul*, compra de equipos usados o arriendos. Sin embargo, se puede utilizar para comparar individualmente el reemplazo de un equipo específico, evaluando distintas alternativas de inversión.
- Para el cálculo de los costos del capital invertido se considera una depreciación lineal.

Se establecen las siguientes suposiciones al modelo con base en lo observado en el comportamiento real de la flota:

- El valor de un equipo nuevo la decreciendo año tras año producto de la disminución de valor de un activo con base en su depreciación contable y pérdida de valor en el mercado.

- Los costos operacionales aumentan año tras año producto del envejecimiento, desgaste y un mayor requerimiento de recursos en un equipo para mantener su estándar operativo.
- La disponibilidad de los equipos decrece año tras año producto de un aumento horas de mantenimiento correctivo (aumente de fallas y confiabilidad) y horas de mantenimiento preventivo (de cambio en componentes mayores y *Overhaul*).
- Como espera que la disponibilidad de los equipos decrezca año tras año, también disminuirán las horas de operación esperadas, lo cual en algún punto de su vida útil generaría una pérdida de horas operativas que deben ser cubiertas por horas asociadas a un equipo nuevo o en arriendo. Esto genera un costo de oportunidad por detención o lucro cesante.

5.2. Levantamiento de información.

La información requerida para el estudio proviene principalmente de 3 fuentes:

1. **JDEwards**, es el ERP corporativos que almacena la información de todos costos, horas hombres, órdenes de trabajo, presupuestos y otros.
2. **COM (Centro de operaciones mina)**, almacena la información operativa como las lecturas de los odómetros de equipos, toneladas transportadas, tiempos de operación, mantenimiento, pérdida operacionales y reservas. Además, de esta fuente se obtiene KPI's de desempeño como Disponibilidad, Utilización efectiva, MTBF, MTTR, entre otros.
3. **Otras fuentes**, información financiera como Tasa de descuento, Tasas de impuestos, Depreciación, valor de los equipos, entre otras.

5.2.1. Definir variables claves

De acuerdo con la expresión para el cálculo de CAUE las principales variables son:

- **r**: tasa de descuento, se obtiene de la tasa usada por a la compañía para evaluación de proyectos.
- **l**: tasa de impuesto, es el impuesto que grava renta en caso de un beneficio por la venta de un equipo.

- VI: valor inicial de la inversión (costo de un equipo nuevo), se obtiene de las últimas compras realizadas por la empresa.
- CO: costos unitarios de operación.
- CM: costo unitario de mantenimiento.
- CP: costo de parada.
- CD: es el costo de desincorporación del activo, en este ejercicio no se considera por ser un gasto despreciable.
- Horas de operación, corresponde a lo registrado en los odómetros de equipos.

5.2.2. Recopilar datos históricos:

Dentro de los gastos asociados a la vida útil de un activo en el ERP tenemos Clasificación, Categorías y Tipos de gastos.

Clasificación, se define como la unidad de negocio superior donde se cargan los gastos, están definidos como:

- **Gastos de operación:** incluye todos los gastos asociados a la operación de los equipos.
- **Gastos de mantenimiento:** incluye todos los gastos asociados a los trabajos de mantenimiento de los equipos.

Categorías, corresponden a la naturaleza del gasto y están definidos como:

- **Gastos de repuestos y componentes:** gastos en repuestos usados por el área de mantenimiento para mantener o reparar un equipo.
- **Gastos de Insumos:** corresponde a gastos en productos necesarios para la operación y mantenimiento de equipos como Diesel, aceites lubricantes, grasas, entre otros.

- **Gastos de mano de obra:** costo en horas de nómina de personal para la operación y mantenimiento de los equipos. Corresponde solo a mano de obra directa, no incluye supervisión y administrativos.
- **Gastos de contratos y servicios:** es el gasto usado en servicios externos que prestan apoyo al mantenimiento y operación. Entre esto están mano de obra externa, asesorías, servicios especiales de los proveedores del equipo, entre otras.

Tipo de gastos define la naturaleza de cómo se imputan en el ERP:

- **Gastos Directos:** son gastos cargados a través de una orden de trabajo directamente a un activo creado en el ERP.
- **Gastos Indirectos:** Son gastos cargados a la flota, lo que dificulta su individualización en los activos. En estos casos se toma la siguiente definición:
 - Gastos indirectos operaciones prorrateados por horas de operación de equipos.
 - Gastos indirectos de mantenimiento prorrateados por horas hombres asociadas a trabajos de mantenimiento en los equipos.

Las horas de operación y otros datos operativos se obtienen de los reportes de turno que realiza cada operador al final de su turno, esta información se procesa, válida y almacena en las bases de datos del COM (Centro de operaciones mina), con esta información se calculan indicadores como Disponibilidad, Utilización, OEE, MTBF, MTTR, entre otros.

En última instancia, los costos conjuntos se logran dividiendo los gastos operacionales por las horas de operación. Este procedimiento se lleva a cabo mediante un informe en *Power BI*, de donde extraen los datos históricos utilizados en este estudio (ver figuras 20 y 21)

INFORME MINA - COSTOS UNITARIOS EQUIPOS

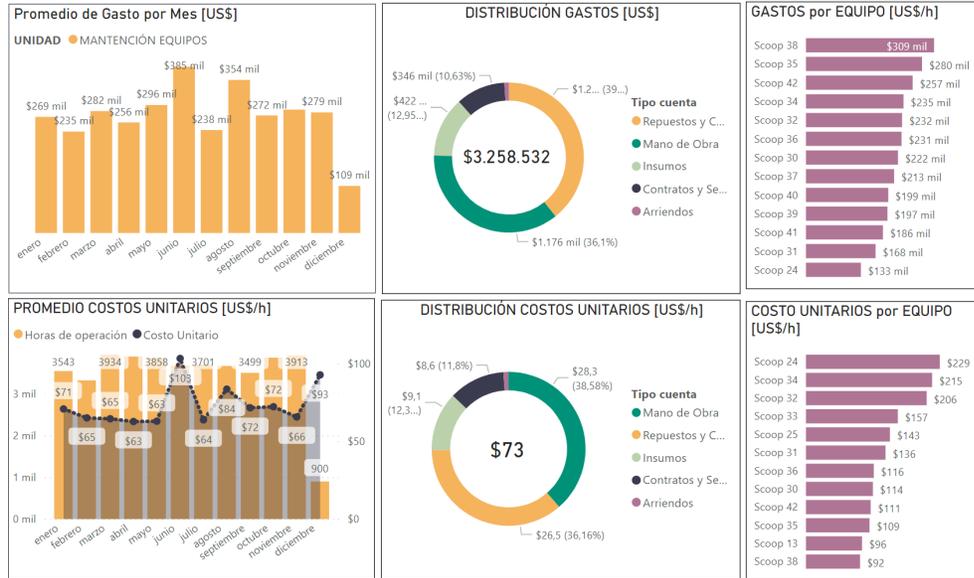


Ilustración 20. Reporte de gastos y costos unitarios de mantenimiento. Fuente: Reportes costos mina, Minera Florida.

INFORME MINA - COSTOS UNITARIOS EQUIPOS



Ilustración 21. Reporte de gastos y costos unitarios de mantenimiento. Fuente: Reportes costos mina, Minera Florida.

5.2.3. Determinar interrelación de variables.

Conforme a la observación y criterio experto, podemos definir las siguientes suposiciones de correlación a estudiar en las siguientes etapas:

1. **Correlación entre vida útil en años y los costos de mantenimiento:** al aumentar las horas de operación (años en vida útil) se espera un aumento de los costos unitarios de mantenimiento.
2. **Correlación entre vida útil en años y la disponibilidad de flota:** al aumentar las horas de operación (años en vida útil) se espera una disminución en la disponibilidad de los equipos.
3. **Correlación entre las Horas de operación y la vida útil en años:** al correr los años disminuya las horas de operación por una disminución de la disponibilidad.

5.2.4. Construcción de base de datos:

Las bases de datos necesarias para este estudio se construyen en Microsoft Excel, ya que software de simulación trabaja bajo esta misma plataforma. La base de datos contiene la siguiente estructura y se construye para cada una de las variables estudiadas:

Variable 1

Mes-Año	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Equipo 4	Equipo 5	Equipo
-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2. Ejemplo de construcción de Base de datos para modelo. Fuente: El autor.

Se construyen las siguientes bases de datos:

- Horas de operación.
- Disponibilidad de equipos.
- Costos de mantenimiento.
- Costos de operación.

5.3. Análisis de datos.

5.3.1. Selección de datos:

Para este análisis se seleccionan los datos de las variables definidas anteriormente, sin embargo, de desde el 01-021-2020 debido a que la información anterior es inconsistente en cuanto a costos, no se encuentra disponible para todos los equipos.

Además, se definen otras variables del modelo como:

Variable	Descripción	Valor
r	Tasa de descuento.	8 %
I	Impuesto a la renta.	27 %
VI	Valor inicial de la inversión.	\$USD 660.000

Tabla 3. Valores de variables estáticas del Modelo. Fuente: El autor.

5.3.2. Exploración y modificación de datos:

La exploración de los datos es realizada con base en edad de equipos, no en tiempo calendario en el cual fue cargado el gasto en el ERP. Lo anterior significa que agrupamos las variables de costos, disponibilidad y horas de operación anuales de equipos con edades similares, independientemente que correspondan a la fecha de captura de la información. Por ejemplo, podemos tener el costo de mantenimiento de un equipo a los 4,5 años capturado en el año 2020 y el costo de mantenimiento de otro equipo a los mismos 4,5 años, pero capturado el 2021. En conclusión, se busca observar la tendencia de las variables en función de su edad, independientemente de la fecha de captura.

Para el análisis se realizan 3 tipos de gráficos:

- Gráfico de dispersión por equipos para observar su comportamiento individual.
- Gráfico de dispersión general para ver el comportamiento de la flota.
- Gráfico Boxplot para identificar valores atípicos.

Una vez realizada la exploración de datos, se modifican las bases de datos y se generan los gráficos con los análisis finales. Ambas etapas del proceso se llevarán a cabo en conjunto para cada variable definida.

5.3.3. Modelado de datos.

Basándonos en el análisis anterior se define un equipo prototipo que representa el comportamiento de la flota (ver Ilustración 22), la proyección de las variables asociadas a este equipo será utilizada en el cálculo del CAUE.

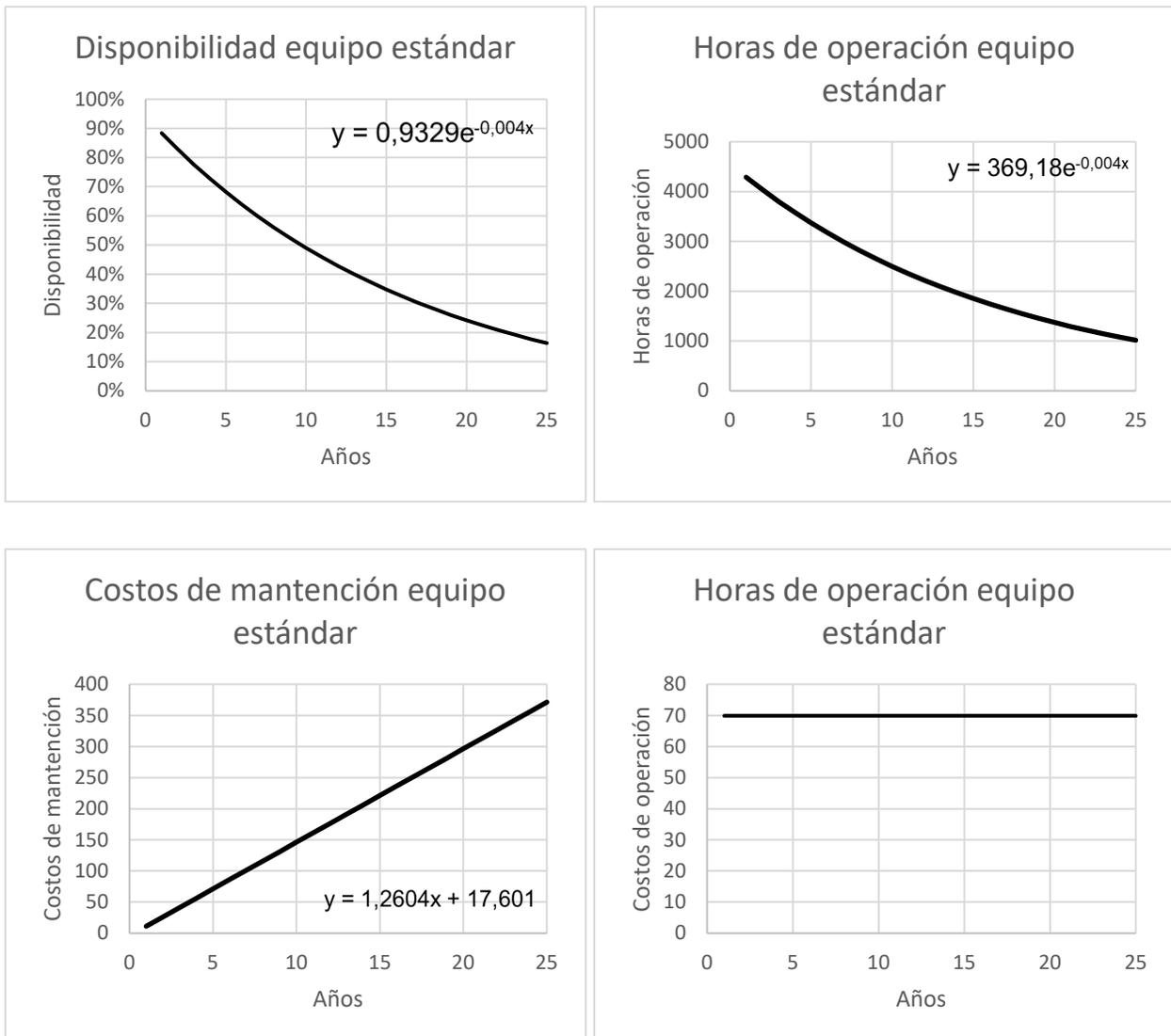


Ilustración 22. Ecuaciones del modelo que representan un equipo prototipo que representa la flota.
Fuente: El autor.

Costo de parada

En el caso de los LHD, la detención de un equipo no impactaría de forma importante los resultados por tener una configuración de fraccionamiento (cada equipo colabora con los resultados en un porcentaje igual). Además, estos son equipos fáciles de adquirir en el mercado, en caso de necesidad es posible arrendar o comprar uno usado para compensar las horas de operación perdidas.

Por lo tanto, el costo de parada se asocia al costo de reponer las horas de operación perdidas después de un límite basándose en un criterio experto (horas de operación comprometidas en los planes de producción). Para modelar el costo de parada se realizan las siguientes consideraciones:

- Se define un límite inferior de disponibilidad donde existe una pérdida de horas operativas que tendrán un impacto en los resultados finales. Para este modelo se fijó de un 52 % de disponibilidad (con base en criterio experto), lo que significa 2.654 horas de operación anuales.
- El costo se calculará multiplicando el costo de mantenimiento para un año por la diferencia entre las 2.654 horas y las horas correspondientes a la edad de equipo en evaluación.

Ejemplo:

Un equipo estándar a los 12 años se proyecta una disponibilidad de un 43 % y horas de operación de 2.217 horas. Para calcular el costo de parada, se resta el valor límite con el proyectado y se multiplica por el costo de mantenimiento.

$CP = (\text{horas oper límite} - \text{horas oper para edad evaluada}) \times \text{costos de mantenimiento edad}$

$$CP = (\$ 2.654 - \$ 2.217) \times \$ 176$$

$$CP = \$ 77.030$$

Cálculo del CAUE

Para el cálculo del CAUE se considera un periodo de vida de equipo de 25 años y se divide en tres etapas: Cálculo del Costo del Capital Invertido, Cálculo del Costo Operacional anual uniforme equivalente y Cálculo del CAUE.

Cálculo del Costo del Capital Invertido:

Para la proyección de este cálculo (ver Tabla 4) se considera una tasa de descuento de un 8 % y una Inversión inicial de 660.000 [USD].

INVERSIÓN							
Edad	Valor Anual Uniforme de la inversión	Valor Contable	Valor de Residual	Lucro (+) /Prejuicio (-) Contable	Valor Residual Presente neto	Valor Residual Anual Uniforme Equivalente	Costo del Capital Anual Uniforme Equivalente
1	\$712.800	\$528.000	\$440.000	-\$88.000	\$407.407	\$440.000	\$272.800
2	\$370.108	\$396.000	\$293.333	-\$102.667	\$251.486	\$141.026	\$229.082
3	\$256.102	\$264.000	\$195.556	-\$68.444	\$155.238	\$60.238	\$195.864
4	\$199.268	\$132.000	\$130.370	-\$1.630	\$95.826	\$28.932	\$170.336
5	\$165.301	\$0	\$86.914	\$86.914	\$59.152	\$14.815	\$150.486
6	\$142.768	\$0	\$57.942	\$57.942	\$36.514	\$7.898	\$134.870
7	\$126.768	\$0	\$38.628	\$38.628	\$22.539	\$4.329	\$122.439
8	\$114.850	\$0	\$25.752	\$25.752	\$13.913	\$2.421	\$112.429
9	\$105.653	\$0	\$17.168	\$17.168	\$8.588	\$1.375	\$104.278
10	\$98.359	\$0	\$11.445	\$11.445	\$5.301	\$790	\$97.569
11	\$92.450	\$0	\$7.630	\$7.630	\$3.272	\$458	\$91.992
12	\$87.579	\$0	\$5.087	\$5.087	\$2.020	\$268	\$87.311
13	\$83.504	\$0	\$3.391	\$3.391	\$1.247	\$158	\$83.347
14	\$80.056	\$0	\$2.261	\$2.261	\$770	\$93	\$79.963
15	\$77.107	\$0	\$1.507	\$1.507	\$475	\$56	\$77.052
16	\$74.565	\$0	\$1.005	\$1.005	\$293	\$33	\$74.532
17	\$72.355	\$0	\$670	\$670	\$181	\$20	\$72.336
18	\$70.423	\$0	\$447	\$447	\$112	\$12	\$70.411
19	\$68.724	\$0	\$298	\$298	\$69	\$7	\$68.717
20	\$67.222	\$0	\$198	\$198	\$43	\$4	\$67.218
21	\$65.889	\$0	\$132	\$132	\$26	\$3	\$65.887
22	\$64.701	\$0	\$88	\$88	\$16	\$2	\$64.700
23	\$63.639	\$0	\$59	\$59	\$10	\$1	\$63.638
24	\$62.685	\$0	\$39	\$39	\$6	\$1	\$62.685
25	\$61.828	\$0	\$26	\$26	\$4	\$0	\$61.828

Tabla 4. Cálculo del Costo del Capital Invertido. Fuente: El autor.

Cálculo del Costo Operacional.

Para calcular el costo operacional (ver Tabla 5) se multiplica el costo unitario de mantenimiento y operación por las horas de operación anuales definidas para la edad del equipo estándar.

COSTOS OPERACIONALES											
	Disp.	Horas de operación	Costo unitario mantenimiento	Costo unitario operaciones	Costo unitario total	Horas de operación pérdidas	Costo de parada	Total Costos Operacionales	Valor Presente Neto de Costos Operacionales	Valor Acumulativo Neto de Costos Operacionales	Costo Operacional Anual Uniforme Equivalente
1	88%	4289	11	70	81	0	\$0	\$347.628	\$321.878	\$321.878	\$347.628
2	83%	4039	26	70	96	0	\$0	\$387.974	\$332.625	\$654.503	\$367.025
3	78%	3804	41	70	111	0	\$0	\$422.442	\$335.348	\$989.852	\$384.096
4	73%	3583	56	70	126	0	\$0	\$451.580	\$331.925	\$1.321.776	\$399.072
5	68%	3374	71	70	141	0	\$0	\$475.891	\$323.884	\$1.645.660	\$412.166
6	64%	3177	86	70	156	0	\$0	\$495.839	\$312.463	\$1.958.123	\$423.572
7	60%	2992	101	70	171	0	\$0	\$511.850	\$298.660	\$2.256.783	\$433.466
8	56%	2818	116	70	186	0	\$0	\$524.315	\$283.271	\$2.540.054	\$442.007
9	52%	2654	131	70	201	0	\$0	\$533.592	\$266.929	\$2.806.983	\$449.341
10	49%	2499	146	70	216	155	\$22.595	\$562.605	\$260.595	\$3.067.578	\$457.160
11	46%	2354	161	70	231	300	\$48.376	\$592.247	\$254.005	\$3.321.583	\$465.275
12	43%	2217	176	70	246	437	\$77.030	\$622.482	\$247.196	\$3.568.779	\$473.559
13	40%	2088	191	70	261	566	\$108.271	\$653.274	\$240.207	\$3.808.986	\$481.920
14	37%	1966	206	70	276	688	\$141.834	\$684.591	\$233.077	\$4.042.062	\$490.289
15	35%	1852	221	70	291	802	\$177.478	\$716.403	\$225.840	\$4.267.902	\$498.617
16	32%	1744	236	70	306	910	\$214.983	\$748.680	\$218.533	\$4.486.435	\$506.863
17	30%	1642	251	70	321	1012	\$254.145	\$781.397	\$211.187	\$4.697.622	\$514.998
18	28%	1547	266	70	336	1107	\$294.780	\$814.526	\$203.834	\$4.901.457	\$522.996
19	26%	1457	281	70	351	1197	\$336.718	\$848.045	\$196.502	\$5.097.959	\$530.838
20	24%	1372	296	70	366	1282	\$379.804	\$881.930	\$189.216	\$5.287.175	\$538.510
21	22%	1292	311	70	381	1362	\$423.897	\$916.160	\$182.000	\$5.469.176	\$546.000
22	21%	1217	326	70	396	1437	\$468.870	\$950.715	\$174.875	\$5.644.051	\$553.298
23	19%	1146	341	70	411	1508	\$514.605	\$985.576	\$167.859	\$5.811.909	\$560.397
24	18%	1079	356	70	426	1575	\$560.996	\$1.020.725	\$160.968	\$5.972.877	\$567.292
25	16%	1016	371	70	441	1638	\$607.946	\$1.056.146	\$154.216	\$6.127.093	\$573.979

Tabla 5. Cálculo del Costo Operacional. Fuente: El autor.

Cálculo del CAUE

En esta etapa se calcula el CAUE como la suma del Costo del capital invertido + el Costo operacional, ambos anualizados, uniformes y equivalentes.

Como resultado, el mínimo valor del CAUE (Vida útil económica) se obtiene a los 9 años con un valor de 553.619 [\$USD] (ver Ilustración 23).

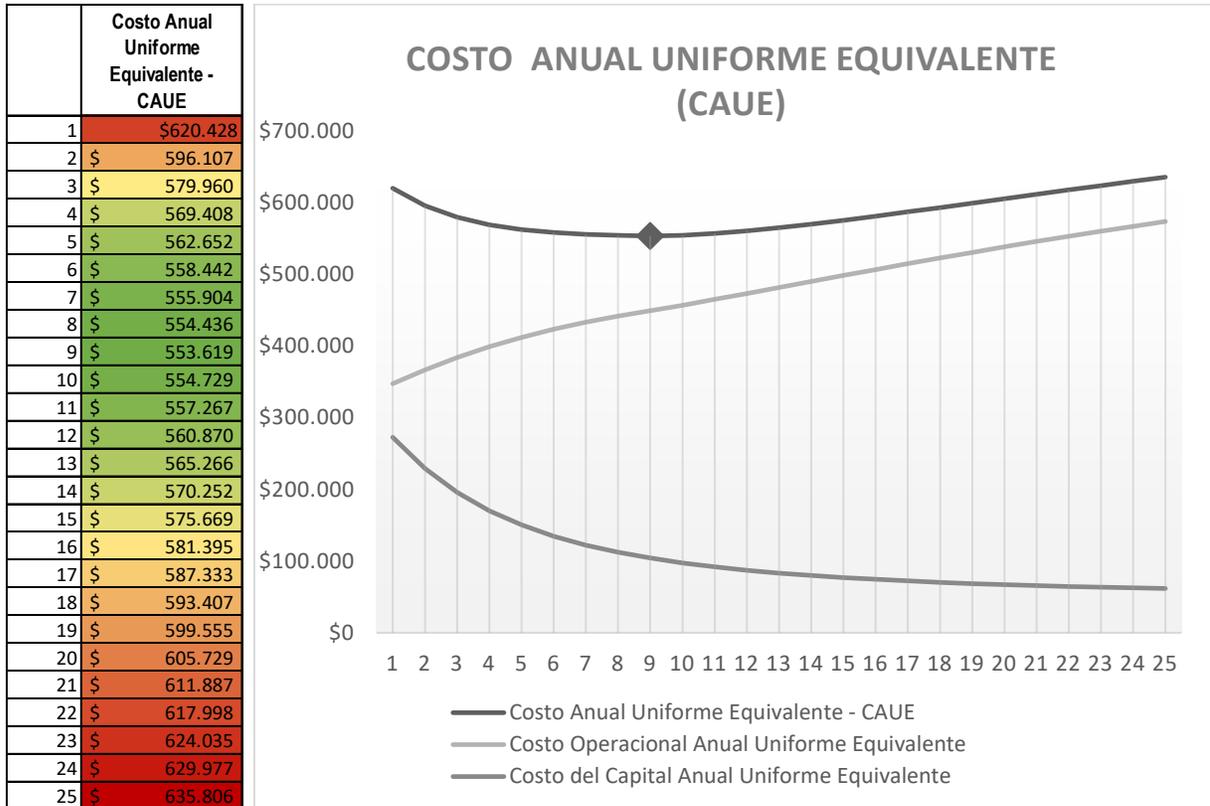


Ilustración 23. Cálculo del CAUE. Fuente: El autor.

5.3.4. Interpretación de los resultados.

El costo operacional real promedio para el año 2021 fue de 513.539 [\$USD], el cual se encuentra dentro del rango del costo operacional del modelo (ver Ilustración 24 y Tabla 6), esto valida las suposiciones y cálculo del modelo (No considera el mes de diciembre por huelga de trabajadores, por lo cual se anualizó el gasto de 11 meses a 12 meses).

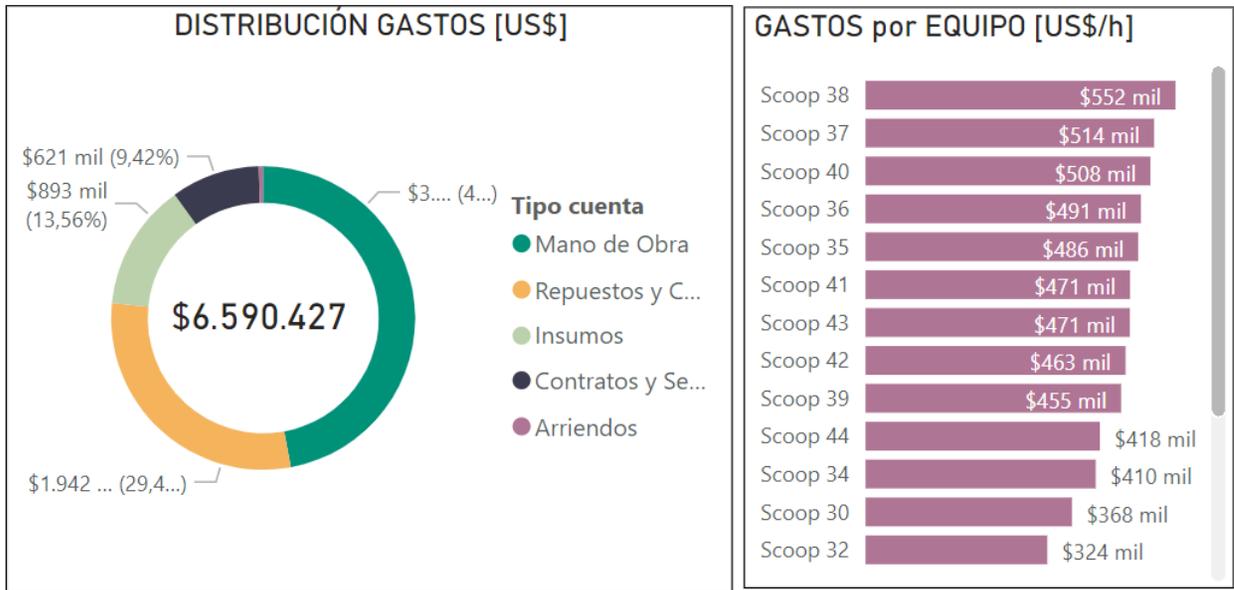


Ilustración 24. Gasto LHD real año 2021. Fuente: Reporte de costos mina, Minera Florida.

Edad	Total Costos Operacionales
1	\$347.628
2	\$387.974
3	\$422.442
4	\$451.580
5	\$475.891
6	\$495.839
7	\$511.850
8	\$524.315
9	\$533.592
10	\$562.605
11	\$592.247
12	\$622.482
13	\$653.274
14	\$684.591
15	\$716.403
16	\$748.680

Tabla 6. Total costos operacionales modelados. Fuente: El autor.

Por otro lado, el intervalo óptimo calculado (9 años) es menor a la vida útil promedio de los últimos equipos dados de baja de 13 años (ver Tabla 7). Además, al momento del desarrollo del estudio existes dos equipos operativos con una vida superior al intervalo óptimo (LHD 30 con 10 años y LHD 31 con 10,3 años respectivamente). Esto significa que existe un potencial importante de ahorro en costos por ejecutar reemplazo de equipos en su intervalo óptimo.

Equipo	Fecha ingreso	Fecha baja	Vida útil
LHD 16	oct - 2007	sep - 2020	13,7
LHD 24	mar - 2009	jun - 2022	12,4
LHD 25	mar - 2010	nov - 2021	12,8
Promedio			13

Tabla 7. Intervalo de reemplazo de LHD histórico Minera Florida. Fuente: El autor.

El cambio del intervalo de reemplazo de equipos de 13 años a 9 años implica un ahorro de \$US 11.648 anual en términos de CAUE. No obstante, proyectando el resultado a 9 años para una mejor comparación, genera un beneficio de \$US 104.823 (ver Tabla 8). Además, suponiendo que en ese periodo de tiempo se realiza un reemplazo completo de la flota (16 equipos), el beneficio total podría llegar a \$US 1.677.216, esto equivale a 2,5 equipos nuevos.

Intervalo de reemplazo	CAUE	Costo total vida útil	Costo total vida útil ajustada a 9 años
9	\$553.619	\$4.982.569	\$4.982.569
13	\$565.266	\$7.348.463	\$5.087.398
Beneficio por ahorro en vida útil			\$104.829

Tabla 8. Diferencia en costo total entre intervalo de reemplazo óptimo e intervalo histórico. Fuente: El autor.

5.4. Simulación

En esta etapa se simula el cálculo del CAUE mínimo, asignando distribuciones de probabilidad a las principales variables del modelo.

5.4.1. Definir variables de entrada.

Para esta etapa se utilizarán las mismas variables de entrada del modelo. Sin embargo, solo se les asignará una distribución de probabilidad a las siguientes variables:

- Horas de operación anuales.
- Costo unitario de mantenimiento.
- Costo unitario de operación.

5.4.2. Determinación de la distribución de probabilidad.

Para determinar la distribución de probabilidad se utiliza la funcionalidad de ajuste de datos de *Crystal Ball*. Sin embargo, encontrar la distribución que represente las variables durante varios años no es representativa, ya que los datos tienen tendencias a aumentar o disminuir conforme pasar los años.

Por lo tanto, se opta por definir una distribución de cada variable para cada año, esto se logra buscando la forma de la distribución para un año representativo y generar las distribuciones para cada año usando un factor de ajuste de los valores de tendencia central (Media y Desviación estándar).

Este factor se calcula dividiendo la desviación estándar por la media, considerando que la media como el valor objetivo para cada año en evaluación. Por lo tanto, multiplicando el valor objetivo (media) por el factor podemos estimar la desviación estándar para cada año. Este método cumple también con lo observado en la etapa de análisis de datos, donde la variabilidad de estos aumenta al aumentar la edad de los equipos.

Distribución de probabilidad para horas de operación.

De los análisis realizados se seleccionó una distribución Lognormal, Esta distribución cumple con la hipótesis $P > \alpha = 0,05$ (nivel de significancia) y de acuerdo con criterio experto modela de mejor forma distribuciones de tiempos en equipos, asegurando valores positivos (ver Ilustración 25). Además, un cambio en la variable en cualquier punto de un proceso es una proporción aleatoria del valor previo de la variable. Los valores obtenidos fueron: una media de 354.76 y una desviación estándar de 24.74, lo que nos da un factor de ajuste de 0.069.

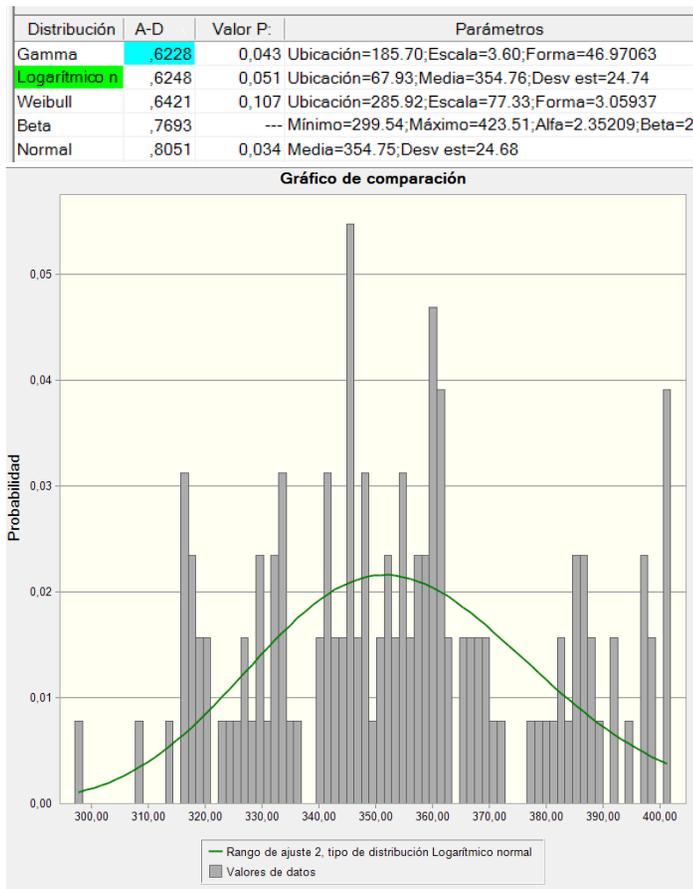


Ilustración 25. Definición de distribución para horas de operación. Fuente: El autor.

Distribución de probabilidad de costos de mantenimiento.

De los análisis realizados se seleccionó una distribución Lognormal con una media de 12.75 y una desviación estándar de 6.09 (ver Ilustración 26). No obstante, en este caso la distribución está calculada para datos mensuales no anuales, como exige el modelo, por lo cual se estima que la variabilidad anual debería ser menor que mensual. Para

resolver esta diferencia se divide la desviación estándar de datos mensuales por la raíz cuadrada de 12, para normalizar a una desviación estándar anual.

Como los valores de costos presentan una mayor variabilidad año a año, se opta por calcular el factor de ajuste por edad y promediar para mejorar su representatividad en el modelo (ver Tabla 9).

Ítem	Edad							
	1	2	3	4	5	6	7	Prom.
Promedio Costo de mantenimiento	11,3	24,9	42,1	65,9	101,2	104,8	136,4	
Desviación estándar mensual	7,0	7,5	8,9	35,5	27,6	14,3	28,6	
Desviación estándar anual	2,0	2,2	2,6	10,2	8,0	4,1	8,3	
Factor de ajuste	0,178	0,087	0,061	0,155	0,079	0,040	0,061	0,094

Tabla 9. Cálculo de factor de ajuste de distribución. Fuente: El autor.

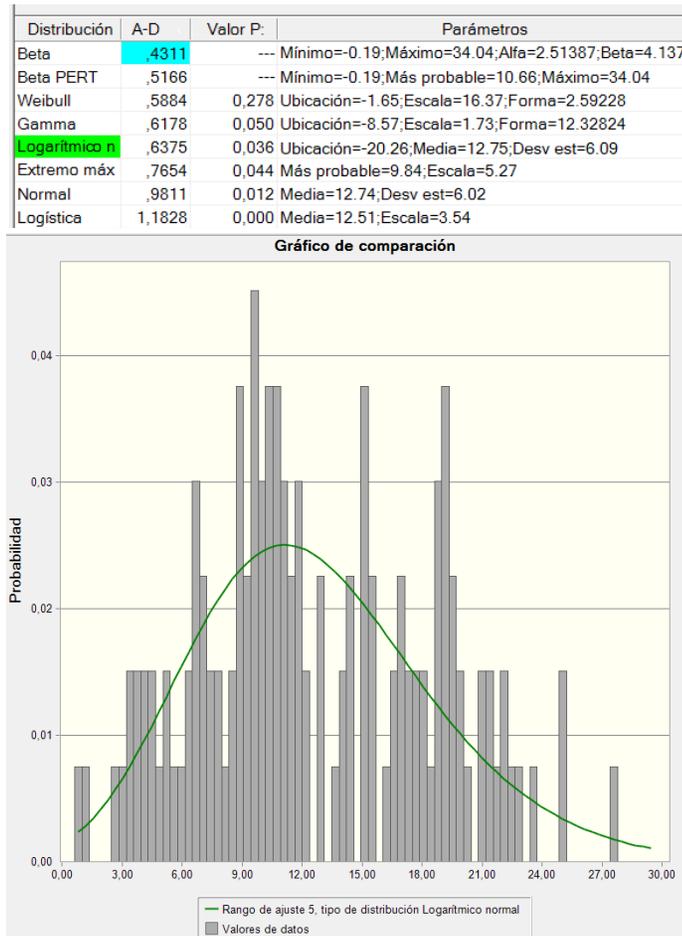


Ilustración 26. Definición de distribución para costo de mantenimiento. Fuente: El autor.

Distribución de probabilidad para costos de operación.

Para los costos de operación se define con base en criterio experto una distribución triangular con una media de \$70, valor mínimo de \$57 y un valor máximo de \$86.

5.4.3. Desarrollo de algoritmo de simulación.

Utilizando la misma planilla del modelo para el cálculo del CAUE se incorporan las suposiciones en las variables seleccionadas para cada año (ver Ilustración 27 y 28).

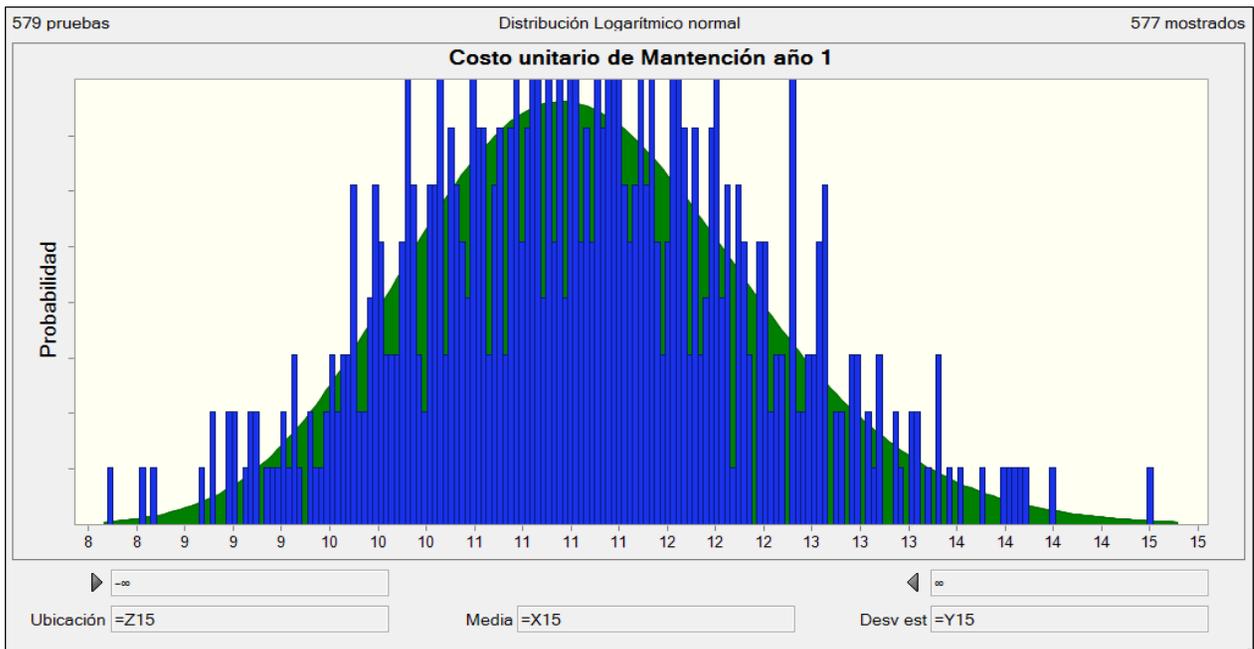


Ilustración 27. Definición de suposiciones para Costos unitarios de mantenimiento. Fuente: El autor.

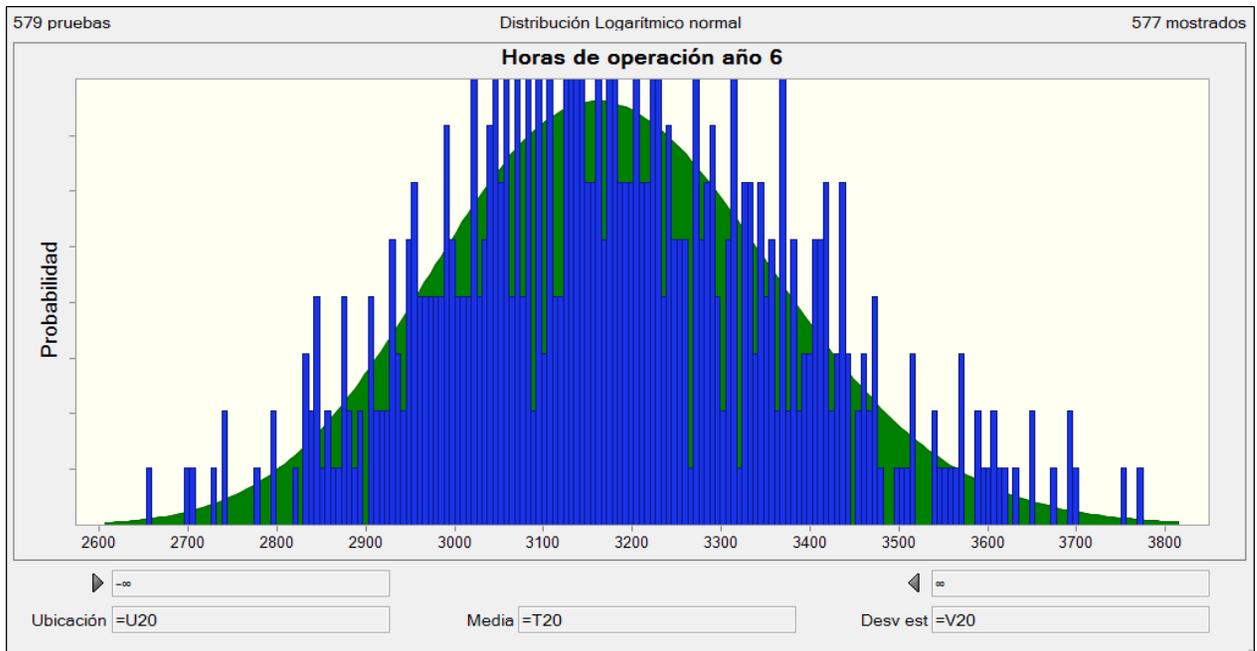


Ilustración 28. Definición de suposiciones para Horas de operación. Fuente: El autor.

Durante las pruebas de simulación del modelo se observa el fenómeno de un valor de CAUE sin una tendencia, ya que los valores año a año pueden subir o bajar. En consecuencia, se generó una correlación de 1 entre la misma variable de un año y el año siguiente, lo que permitió mantener y limitar que el valor obtenido va a tener una tendencia a aumentar o disminuir. Por ejemplo, mantener la tendencia de que el costo unitario aumento a aumentar la edad el equipo.

Para el algoritmo final se genera un campo de previsión que calcula el valor mínimo y la edad a la cual corresponde, dentro del rango del resultado del CAUE por edad (función a simular).

5.4.4. Ejecución de la simulación

Para ejecutar la simulación se consideraron 1000 pruebas con el siguiente resultado (ver Ilustración 29):

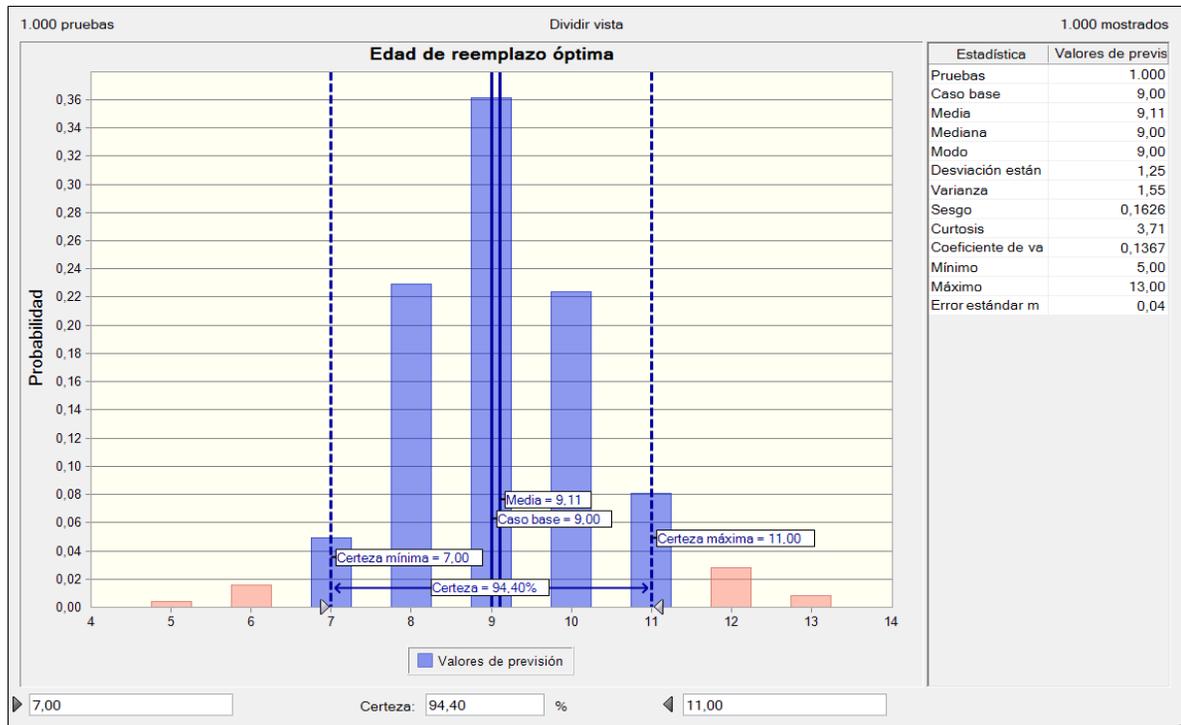


Ilustración 29. Ejecución de simulación. Fuente: El autor.

5.4.5. Análisis de resultados

En los resultados se puede observar que los valores de vida útil económica se concentran entre los 7 y 11 años, con una certeza de un 94,4 %, lo cuales es un rango esperable y cercando el comportamiento real esperado.

También se puede calcular la certeza que tiene el modelo de que un equipo sobrepase cierta da edad (ver Tabla 10), por ejemplo:

Edad	Certeza
< 8 años	93,1 %
< 9 años	70,2 %
< 10 años	34,1 %

Tabla 10. Niveles de certeza para intervalos de reemplazo. Fuente: El autor.

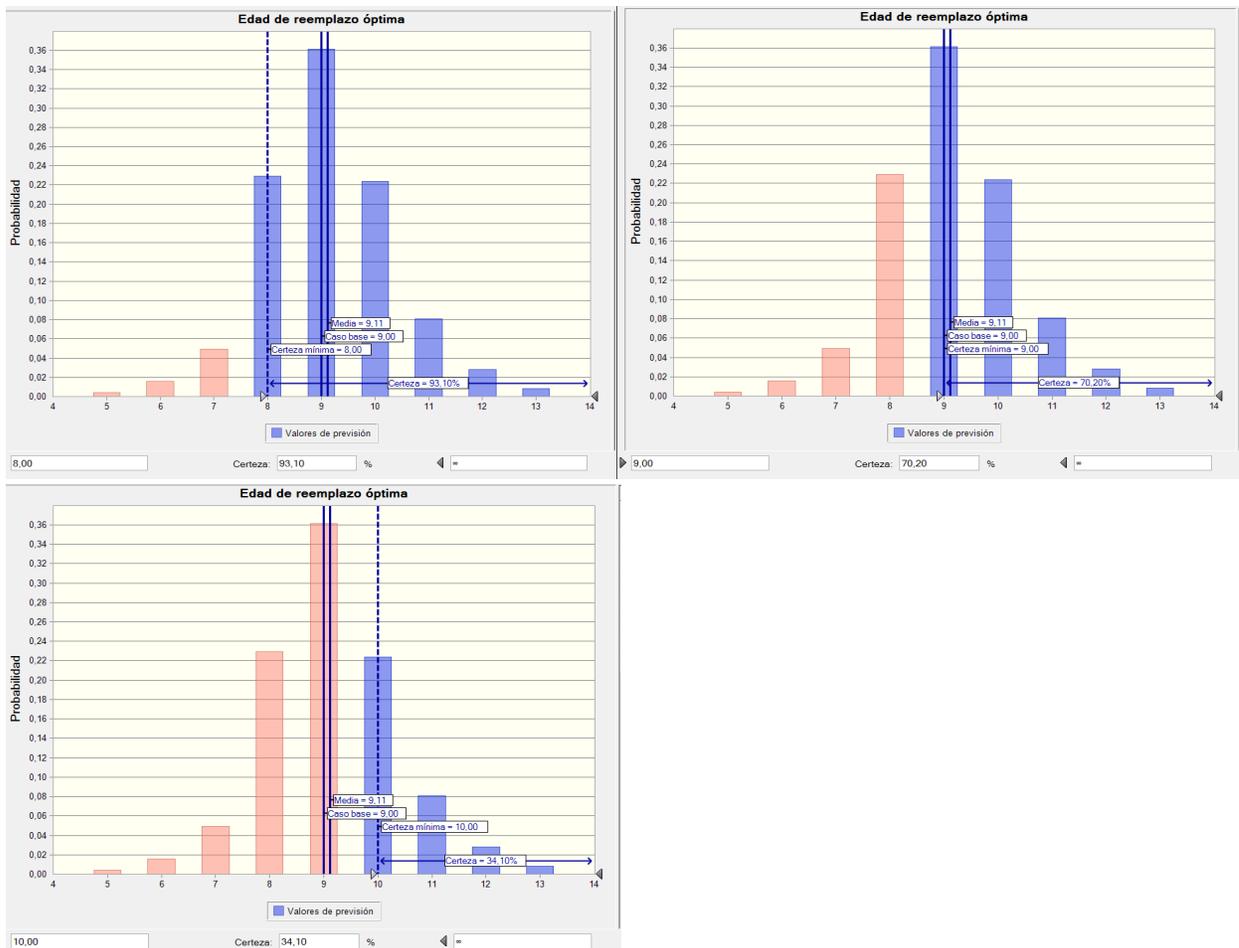


Ilustración 30. Niveles de certeza al aumentar la edad del equipo. Fuente: El autor.

Es importante tener en cuenta que hasta el año 9 se ha constatado una certeza aceptable (70,2 %) de obtener un valor mínimo de CAUE que optimice el costo del ciclo de vida del activo. Posterior a los 9 años, la certeza de tener un mínimo baja a un 34,1 % (ver Ilustración 30).

5.4.6. Validación de la Simulación y Refinamiento de simulación.

Este estudio muestra los resultados finales del proceso de simulación, posterior a su validación y refinamiento. Dentro de las mejoras incluidas para lograr el modelo final fueron:

- Definición y ajuste de correlaciones.
- Escalar datos mensuales a anuales para controlar variabilidad.
- Estratificación de variables por año. El modelo inicial se construyó con distribuciones que abarcaban distintos años, generando una alta variabilidad que imposibilitaba determinar resultados con certeza.
- Entre otros.

5.5. Análisis de resultados

5.5.1. Verificación de la hipótesis.

Los resultados de la simulación son satisfactorios, manteniendo una tendencia alrededor de los 9 años similar al cálculo del modelo no simulado, donde la simulación tiene como resultado valor mínimo de CAUE son se optimizan los costos y se obtiene una mayor rentabilidad de la inversión.

También, se aprecia que intervalo histórico de reemplazo de equipos de Minera Florida de 13 años, tiene una muy baja probabilidad de ser un intervalo de reemplazo económicamente óptimo, validado el modelo y la simulación.

5.5.2. Definir limitaciones del modelo.

La metodología del reemplazo de equipos mediante el cálculo del CAUE presenta varias limitaciones definidas en el marco teórico. Con el desarrollo de este estudio podemos mejorar la precisión y mitigar algunas limitaciones del modelo como:

- **Estimaciones y suposiciones:** El modelo propuesto genera una mayor certeza en lo que refieren estimaciones de costo futuros, al ajustar el cálculo al contexto de Minera Florida.
- **Costos de oportunidad:** El modelo cuantifica el costo de oportunidad como las horas de operación perdidas. Al simular esta variable entrega niveles de certeza que nos permite precisar un costo de oportunidad mas cercano a la realidad.
- **Costos ocultos:** Puede haber costos indirectos o intangibles, como el impacto en la productividad o en la seguridad y medioambiente, que no se reflejan fácilmente en el análisis del CAUE.

Sin embargo, una de las principales limitaciones del modelo es la cantidad y calidad de información necesaria para realizar un buen análisis.

Es posible modelar otras variables para generar un modelo más robusto como:

- La tasa de Interés.
- Disponibilidad.

- Valor inicial de la inversión (el valor de los equipos es dinámico, cambia año tras año).
- Entre otros.

5.5.3. Desarrollo de recomendaciones.

En resumen, aunque los resultados del modelo y la simulación coinciden con la realidad y lo esperado, es importante reforzar la decisión mediante un enfoque técnico. No obstante, los resultados de la simulación sugieren que un equipo, a partir del año 7 de edad, debe ser evaluado su reemplazo (económico y técnicamente) con el objetivo de realizar inversión dentro del rango de años donde el CAUE es menor, maximizando el retorno sobre la inversión.

También, es importante incluir este tipo de análisis dentro de los casos de negocio para inversiones en equipos móviles, buscando generar un mayor rentabilidad y retorno sobre el activo.

Como parte de un análisis subsecuente es posible modelar el comportamiento de varias inversiones en paralelo y en serie, calculando el mayor beneficio como flota.

6. CONCLUSIÓN

Los resultados del modelo son altamente satisfactorios, permitiendo calcular un punto óptimo de reemplazo de equipos mina que minimiza los costos y maximiza la inversión en activos. La simulación de variables como costos unitarios y horas de operación permite obtener resultados que se acercan al contexto real de operación en una empresa minera, lo que añade un valor significativo a la precisión del modelo.

Además, se han comprobado las hipótesis y suposiciones del modelo, confirmando que el costo unitario de un equipo aumenta con el paso de los años, y que el valor de la inversión tiende a decaer. Estos hallazgos respaldan la validez y relevancia del enfoque.

Como resultado del trabajo, se observan rangos con niveles de certeza aceptables para tomar decisiones informadas sobre el reemplazo de equipos. Esta metodología permite proactividad al evaluar técnica y económicamente un activo en el momento adecuado. En conclusión, esta aproximación ofrece la capacidad de tomar decisiones más sólidas en función de consideraciones técnicas y económicas, respaldadas por un análisis de riesgo, en lo que respecta a las inversiones a mediano y largo plazo en la renovación de la flota en la industria minera.

Como continuación de este trabajo, es posible mejorar el modelo mediante la simulación de otras variables que impactan el proceso, como la tasa de descuento, el valor de la inversión y la disponibilidad. Esto permite acercar aún más el modelo al comportamiento real, mitigando las desventajas y limitaciones inherentes al uso del CAUE como herramienta financiera para estimar el intervalo de reemplazo óptimo de un activo.

Otra aplicación interesante sería incluir la variabilidad del intervalo de reemplazo de la inversión en procesos de presupuestos quinquenales o a largo plazo. Esta aplicación podría proporcionarnos una inversión objetivo a largo plazo y los niveles de certeza para su cumplimiento, lo que permitiría llevar a cabo ajustes para optimizar la inversión en una flota a lo largo de varios años.

En términos financieros, históricamente en Minera Florida, por criterios netamente técnicos en promedio reemplaza los LHD alrededor de los 13 años. De acuerdo con los resultados de este estudio, reemplazando los equipos al intervalo óptimo (9 años), es posible reducir el gasto por equipo en \$US 11.648 anual a valor presente (Diferencia entre

CAUE a 13 años y CAUE a 9 años) y \$US 104.829 a un periodo de evaluación de 9 años. Considerando una flota de 16 equipos, el beneficio en un ejercicio a 9 años, el beneficio total podría llegar a \$US 1.677.261, esto equivale a 2,5 equipos nuevos.

Es importante destacar que, hasta el momento, en YAMANA GOLD no se han efectuado estudios bajo la metodología propuesta, ni es común en la industria. Por lo tanto, se espera que este trabajo represente un aporte significativo al desarrollo de pronósticos para equipos en planes de largo plazo, así como en el cálculo del intervalo de reemplazo óptimo.

Además, este trabajo podría sentar las bases para un proyecto más amplio (fuera del alcance de esta tesis) que aborde la modelación de decisiones estratégicas en inversiones relacionadas con otros tipos de equipos o áreas.

En resumen, los resultados obtenidos y las consecuencias potenciales de este trabajo evidencian que esta metodología tiene la capacidad de generar un beneficio en la toma de decisiones relacionadas con la inversión en equipos mineros, así como en otros ámbitos estratégicos en el ámbito minero e industrial.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Arancibia C., S. (2021). Material docente curso Métodos Cuantitativos para el Análisis. Universidad de Chile.
2. Arata, A., & Furlanetto, L. (2005). Manual de Gestión de activos y mantenimiento. RIL.
3. Brandimarte, P. (2014 in Monte Carlo Simulation: Applications in Financial Engineering, Risk Management, and Economics. Wiley.
4. Campbell, J. D., Jardine, A. K. S., & McGlynn, J. (2010). Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions, Second Edition. CRC Press.
5. Campbell, J. D., & Reyes-Picknell, J. V. (2015). Strategies for Excellence in Maintenance Management. Productivity Press.
6. Galar, D., Sandborn, P., & Kumar, U. (2017). Maintenance Costs and Life Cycle Cost Analysis. CRC Press.
7. Kettlun L., A. (2022). Material docente Formulación y Evaluación de Proyectos Mineros. Universidad de Chile.
8. Salas Salinas, L. V. (2016). Análisis técnico-económico de la gestión de activos mineros. Universidad de Chile.
9. Society for Maintenance and Reliability Professional. (2013). Maintenance and Reliability body of Knowledge (4th ed.). SMRP.
10. Velásquez, J. D. (2021). Material docente curso Transformación Digital y Machine Learning. Universidad de Chile.
11. <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-de-activos-y-ciclo-de-vida>

ANEXO A DESARROLLO DE EXPLORACIÓN Y MODIFICACIÓN DE DATOS EN LAS VARIABLES SELECCIONADAS.

ANEXO A.1 Exploración y modificación de datos de horas de operación.

Horas de operación por equipos: Se observa una disminución en los dos primeros meses de operación producto del proceso de puesta en marcha, a menudo los equipos nuevos presentan fallas prematuras por deficiencias en su armado, solturas, asentamiento de partes y repuestos (mortalidad infantil). Generalmente, ese proceso se realiza en conjunto con el proveedor del servicio y cubierto por procesos de garantía, haciendo que los tiempos de detención sean más extensos (ver Ilustración 31).

También se aprecia un comportamiento atípico en el LHD 42, este equipo fue adquirido de segunda mano y presentó un rendimiento menor que el resto de los equipos a la misma edad por fallas no esperadas.

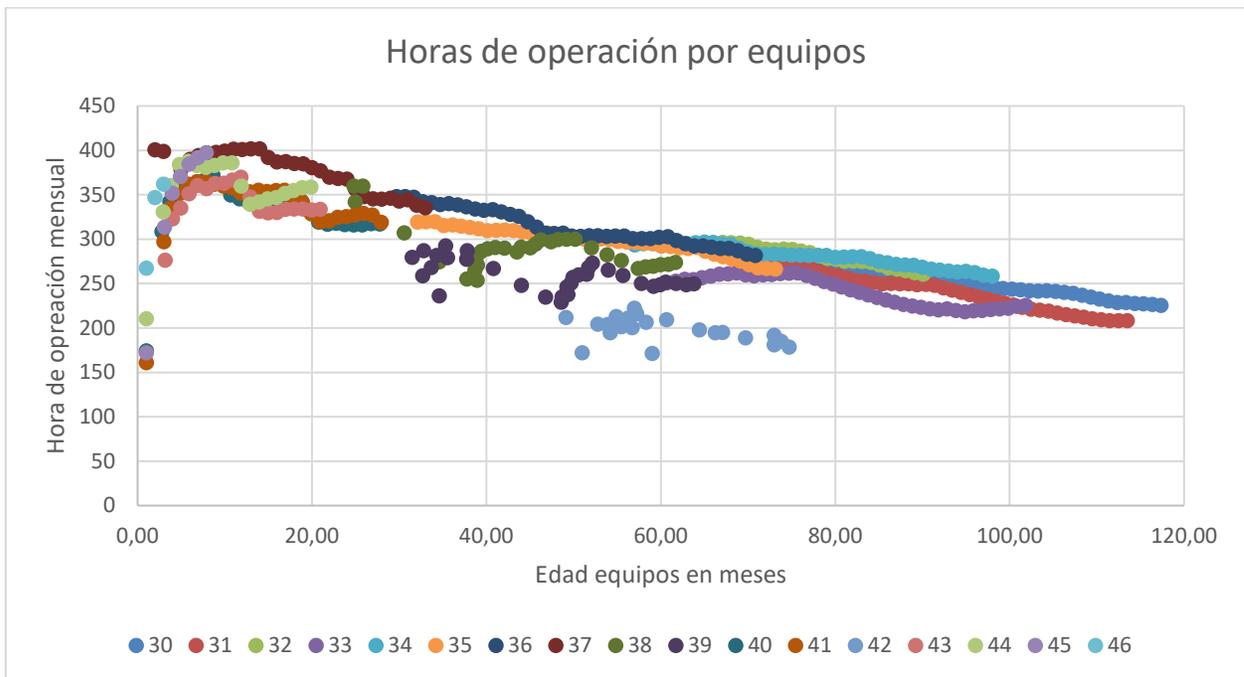


Ilustración 31. Horas de operación por equipos. Fuente: El autor.

Horas de operación por flota: en este gráfico se puede apreciar una tendencia clara de disminución de las horas de operación mensuales al aumentar la edad del equipo, en concordancia con las suposiciones definidas (ver Ilustración 32).

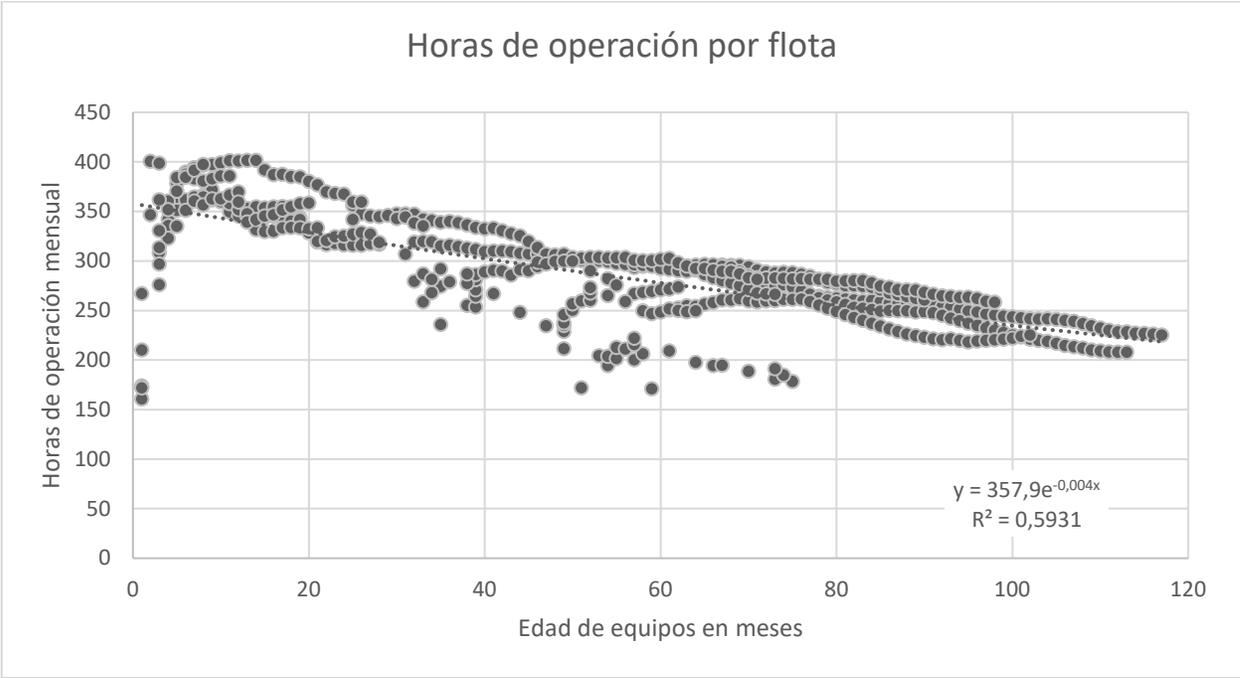


Ilustración 32. Horas de operación por flota. Fuente: El autor.

Boxplot de horas de operación: este gráfico se realiza agrupando los datos en categorías de edad por año debido a la tendencia decreciente de los datos, evitando falsos valores atípicos. Se visualizan valores atípicos en los primeros meses debido al proceso de puesta en marcha, además entre el 5 y 6 años por el ingreso del LHD 42 (ver Ilustración 33).

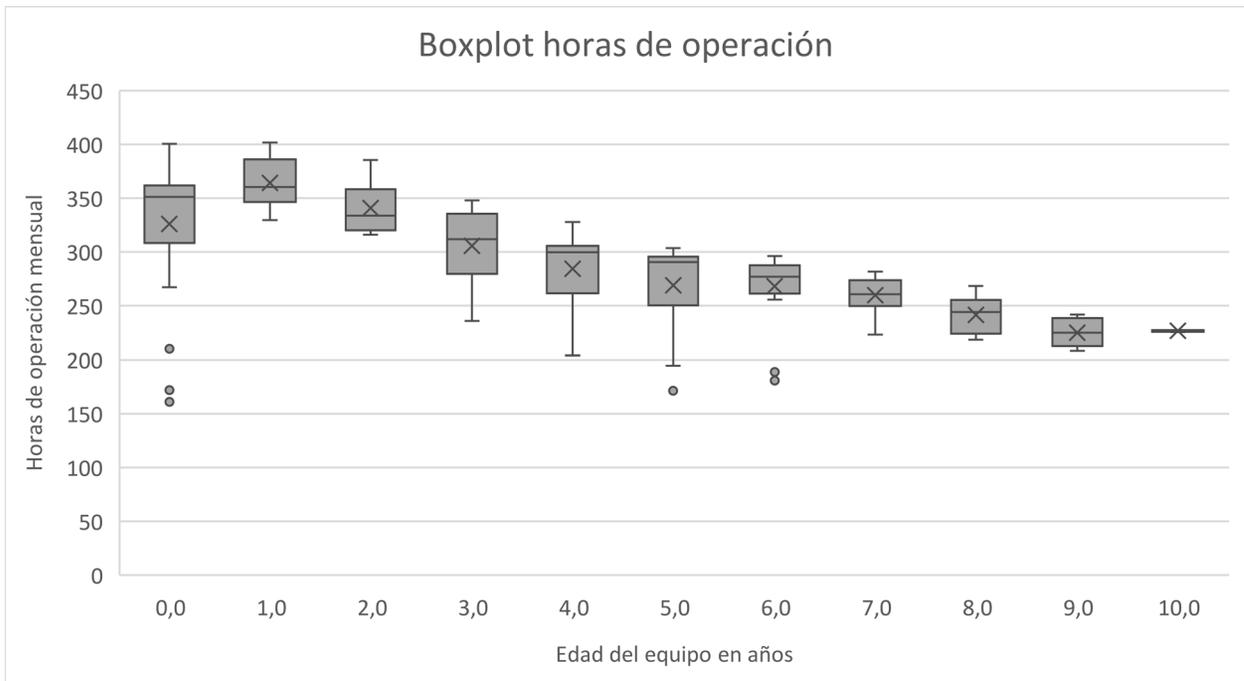


Ilustración 33. Boxplot de horas de operación. Fuente: El autor.

Conclusión:

Para mejorar la proyección y regresión se suprimen de la base de datos los valores atípicos resultando (ver Ilustración 34 y 35):

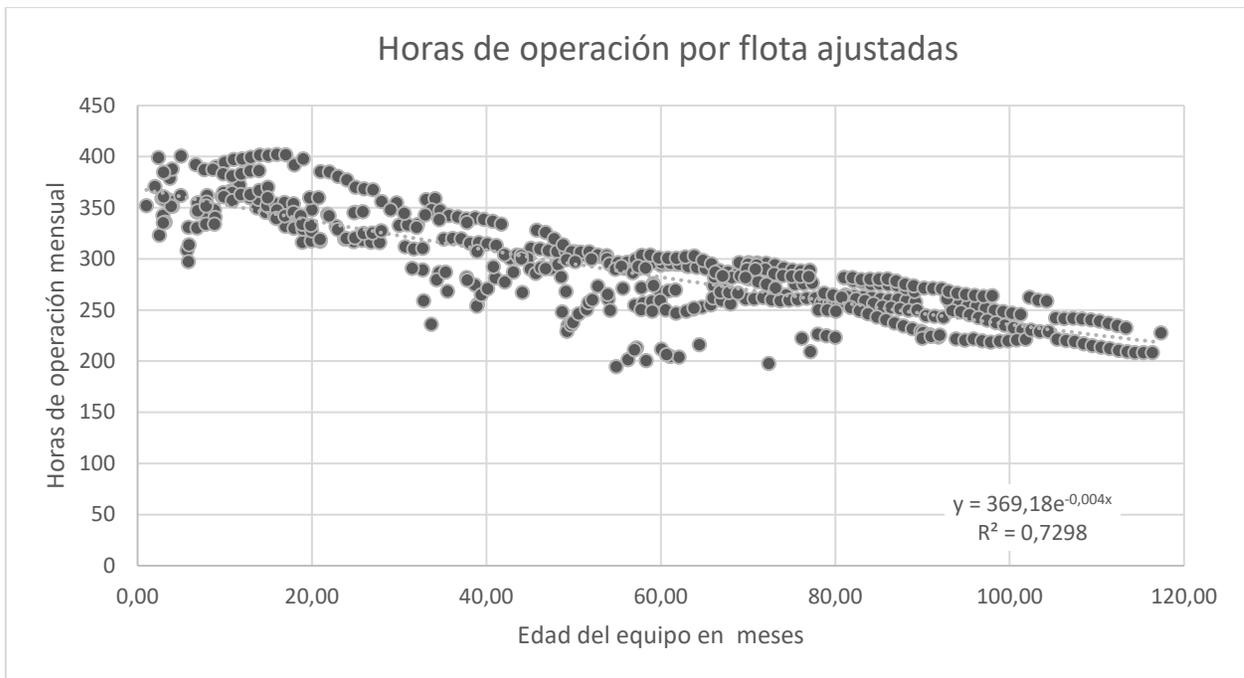


Ilustración 34. Horas de operación por flota ajustada. Fuente: El autor.

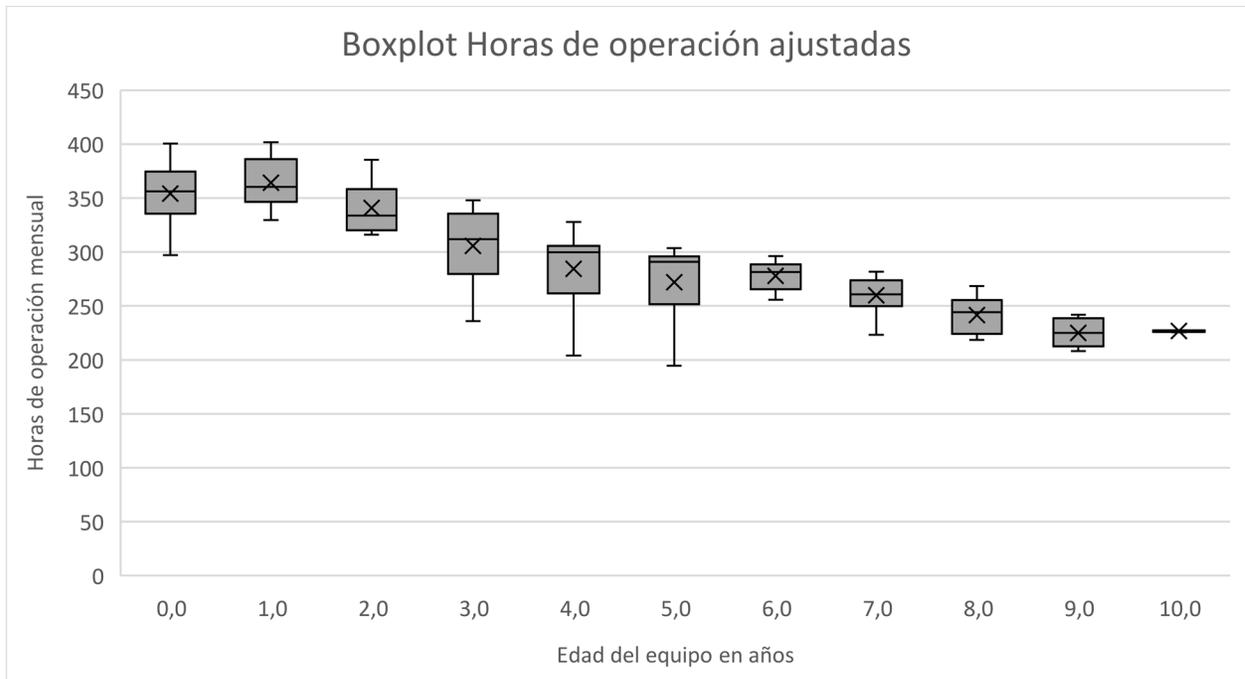


Ilustración 35. Boxplot de horas de operación ajustada. Fuente: El autor.

ANEXO A.2 Exploración y modificación de datos de Disponibilidad.

Disponibilidad por equipos: se observa un comportamiento atípico en el LHD 31 y LHD 33 debido a mantenencias mayores realizadas en proveedores externos, estas presentaron problemas en la calidad afectando su desempeño (ver Ilustración 36).

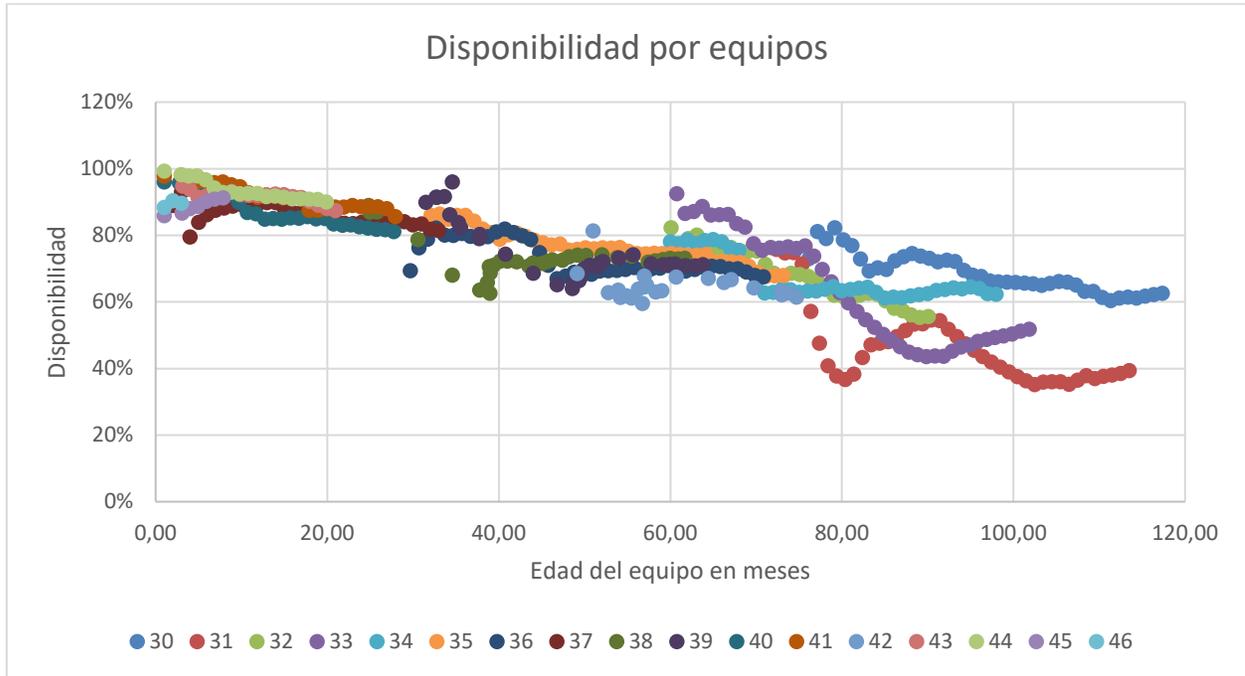


Ilustración 36. Disponibilidad por equipo. Fuente: El autor.

Disponibilidad por flota: en este gráfico se puede apreciar una tendencia clara de disminución de la disponibilidad al aumentar la edad del equipo, en concordancia con las suposiciones definidas. Además, existe un aumento en la variabilidad de los datos a mayor edad, principalmente por distinto contexto de operación en los equipos, daños operacionales o calidad en mantenencias mayores (ver Ilustración 37).

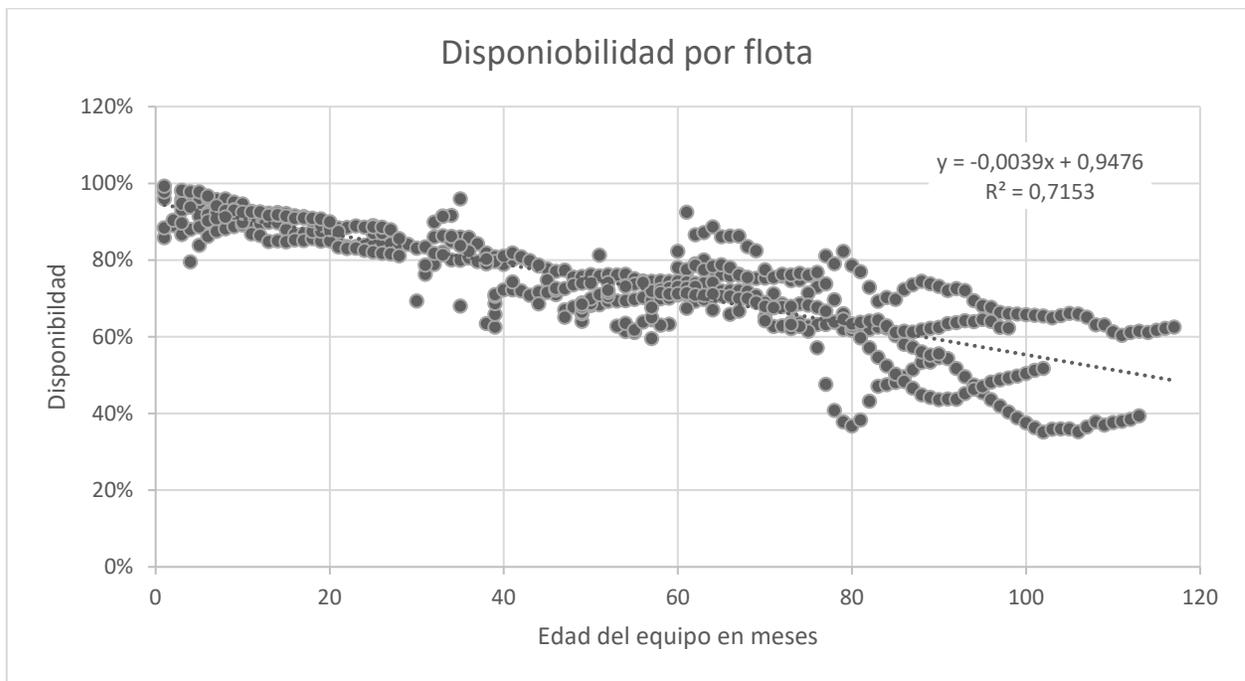


Ilustración 37. Disponibilidad por flota. Fuente: El autor.

Boxplot de Disponibilidad: se visualizan valores atípicos en los años 3 y 4 por compra de equipos de segunda mano (LHD 38 y LHD 39) que tuvieron desempeño inicial menor a lo esperado en comparación al resto de la flota (ver Ilustración 38). También, se aprecian en el año 6 por un bajo desempeño LHD 31 y 33, estos equipos fueron sometidos a mantenciones mayores en empresas externas que demoraron más de lo presupuestado por disponibilidad de componentes en el mercado, además, presentaron problemas en su puesta en marcha impactando negativamente el resultado de la flota.

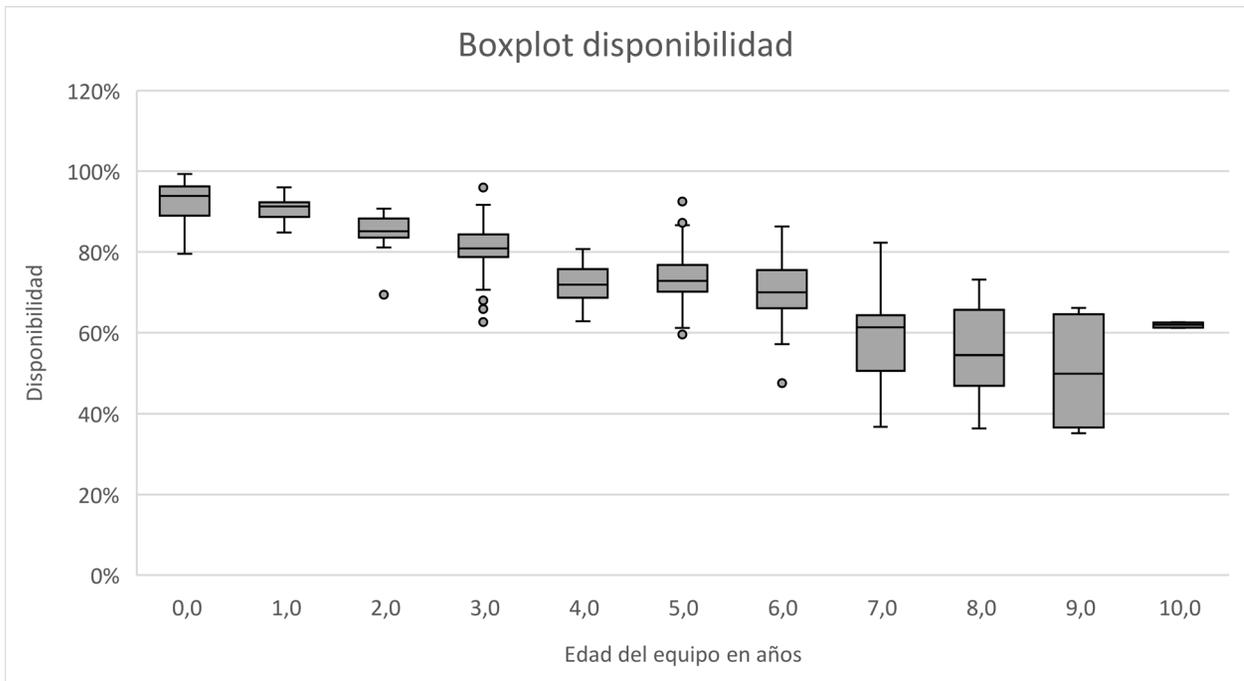


Ilustración 38. Boxplot de disponibilidad. Fuente: El autor.

Conclusión:

Para mejorar la proyección y regresión se suprimen de la base de datos los valores atípicos y valores asociados al LHD 31 y 33 (ver Ilustraciones 39 y 40).

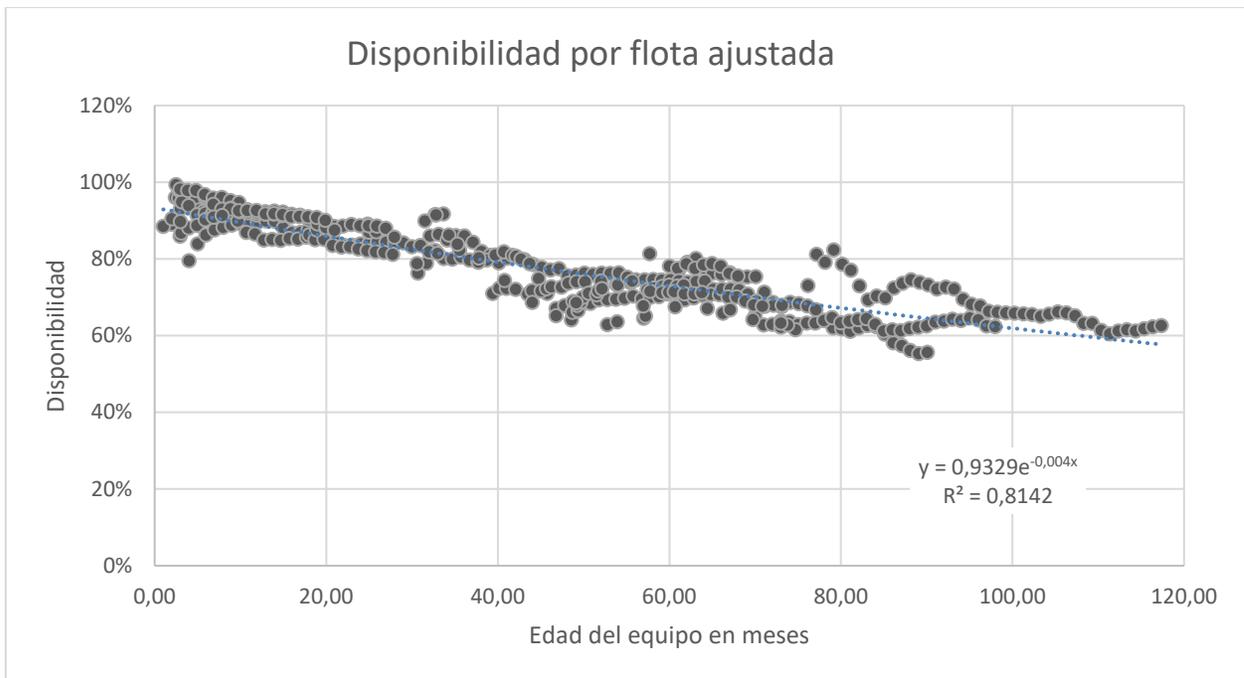


Ilustración 39. Disponibilidad por flota ajustada. Fuente: El autor.

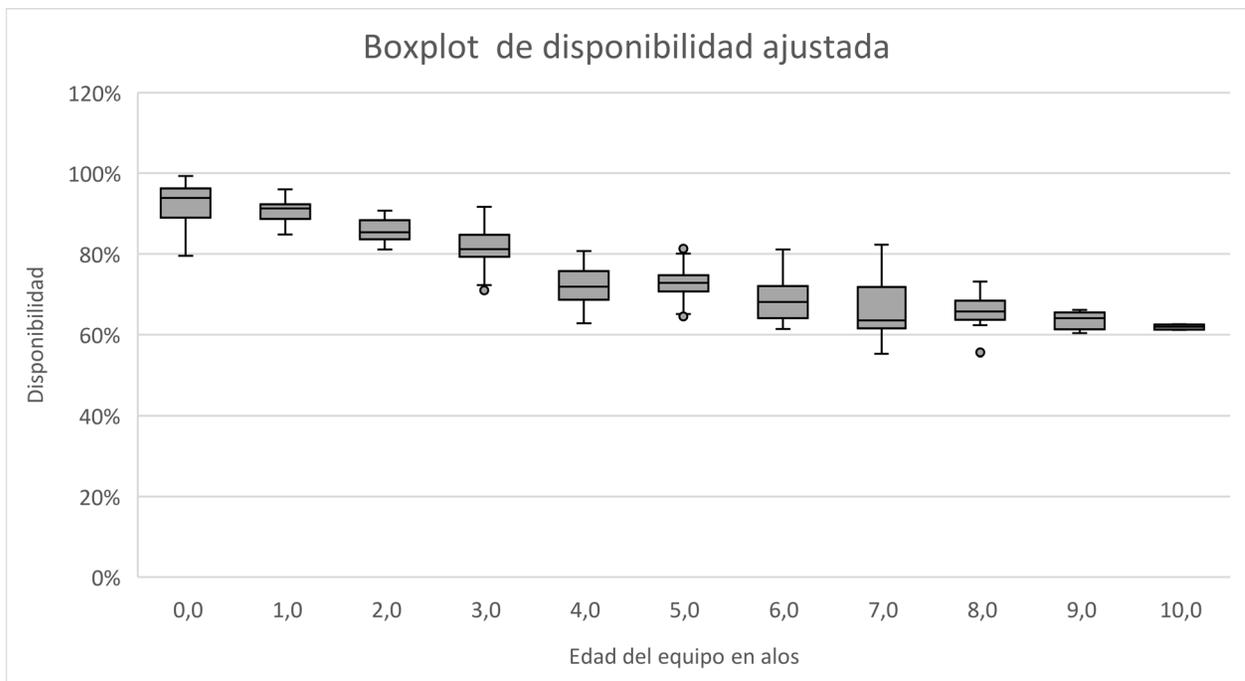


Ilustración 40. Boxplot de disponibilidad ajustado. Fuente: El autor.

ANEXO A.3 Exploración y modificación de datos de costos de Mantenimiento.

Costo de mantenimiento por equipos: Se observa una tendencia de aumento en los costos de mantenimiento y en la variabilidad a partir del año 6 (ver Ilustración 41). Debido a mantenciones mayores y gastos en recuperar el estado de la flota (Campaña de cambios de componentes principales en equipos de mayor edad). Además, impacta en los costos la habilitación de equipos de segunda mano (LHD 38, 39 y 42).

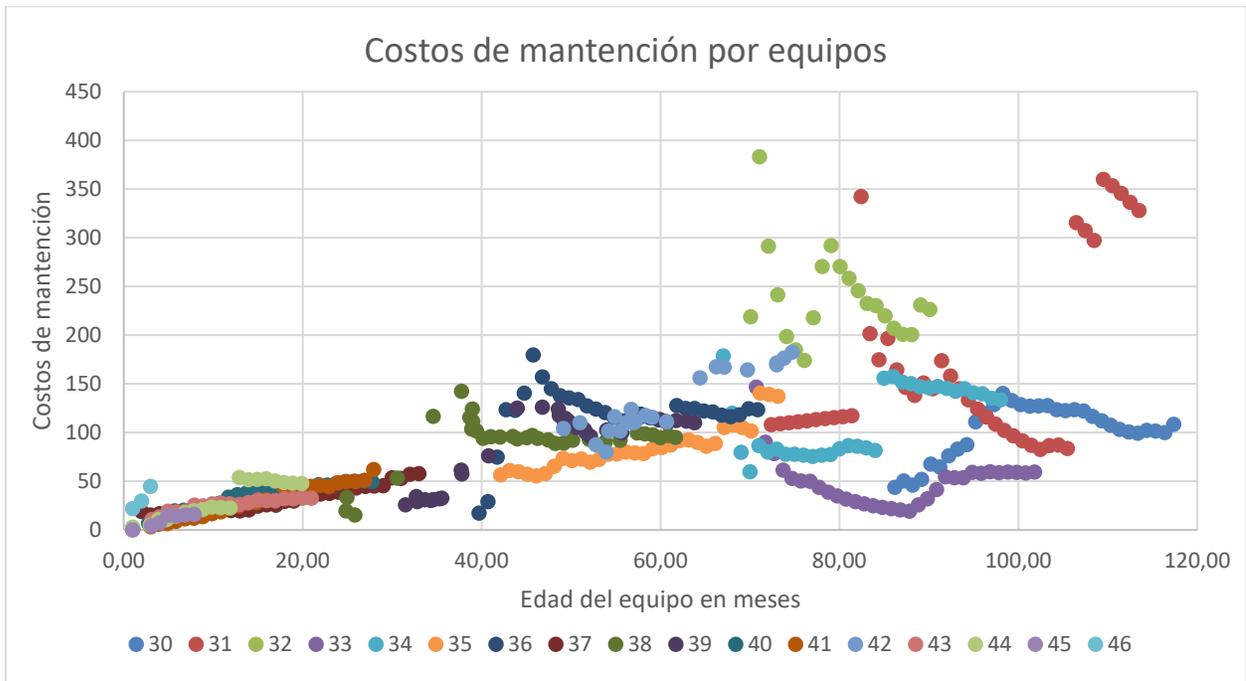


Ilustración 41. Costos de mantenimiento por equipos. Fuente: El autor.

Costo de mantenimiento por flota: La variabilidad de los datos de costos en edades superiores a los 6 años generan un resultado de regresión no satisfactorio (ver Ilustración 42).

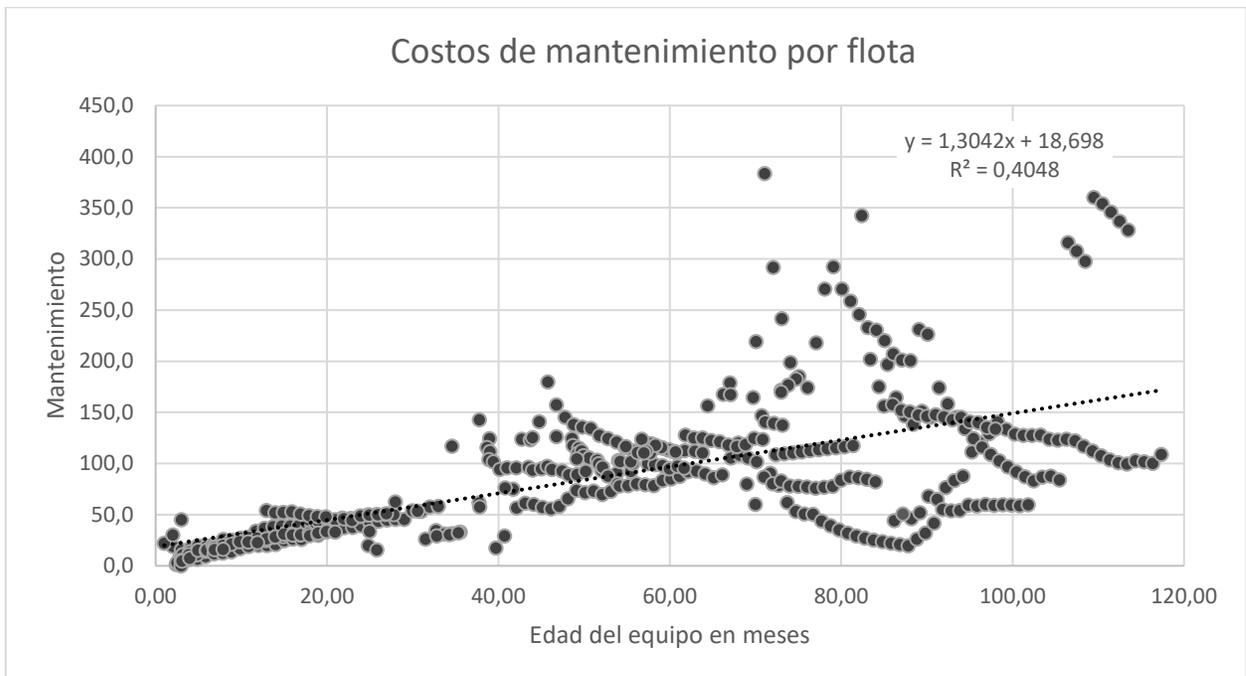


Ilustración 42. Costos de mantenimiento por flota. Fuente: El autor.

Se observan valores atípicos en los años 1, 2, 5 y 6, sin embargo, la variabilidad de los datos a partir del año 6 es el factor que más influye en el resultado.

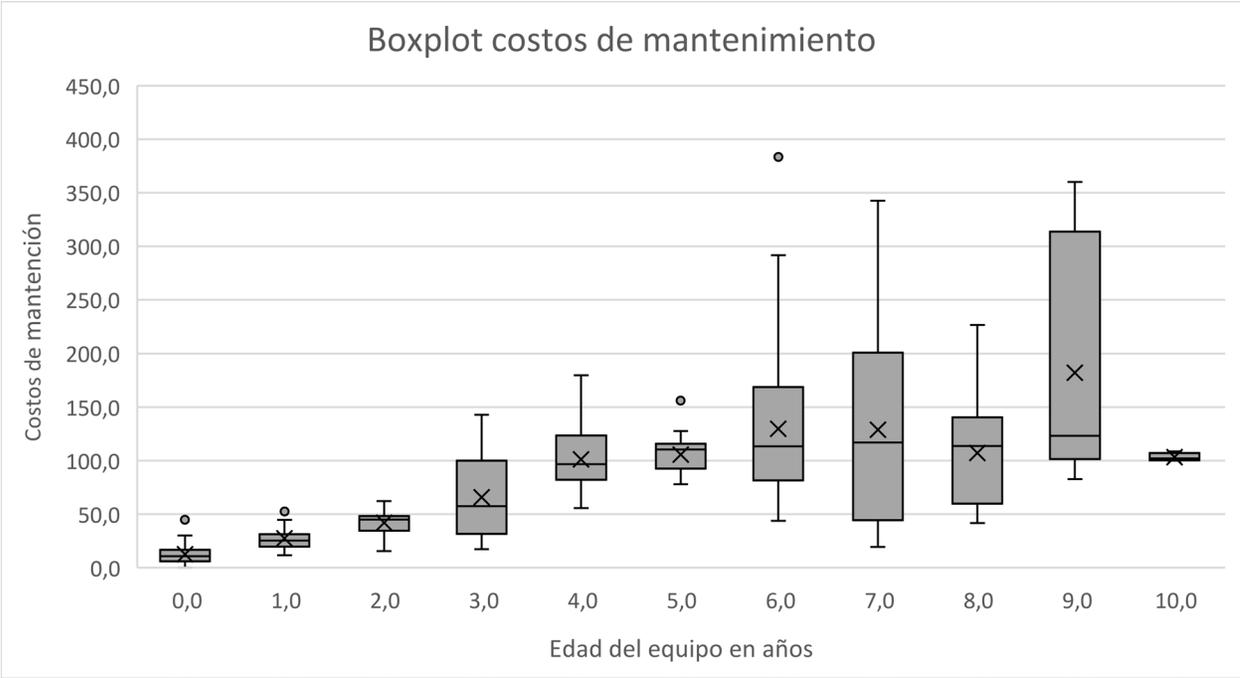


Ilustración 43. Boxplot de Costos de mantenimiento. Fuente: El autor.

Conclusión:

Para mejorar la proyección y regresión se suprimen datos de los LHD 30, 31, 32, 33 y 34. Estos equipos fueron parte de una campaña de recuperación de condición de flota donde se destinó un mayor presupuesto por deficiencias en el mantenimiento de los años anteriores (ver Ilustraciones 44 y 45).

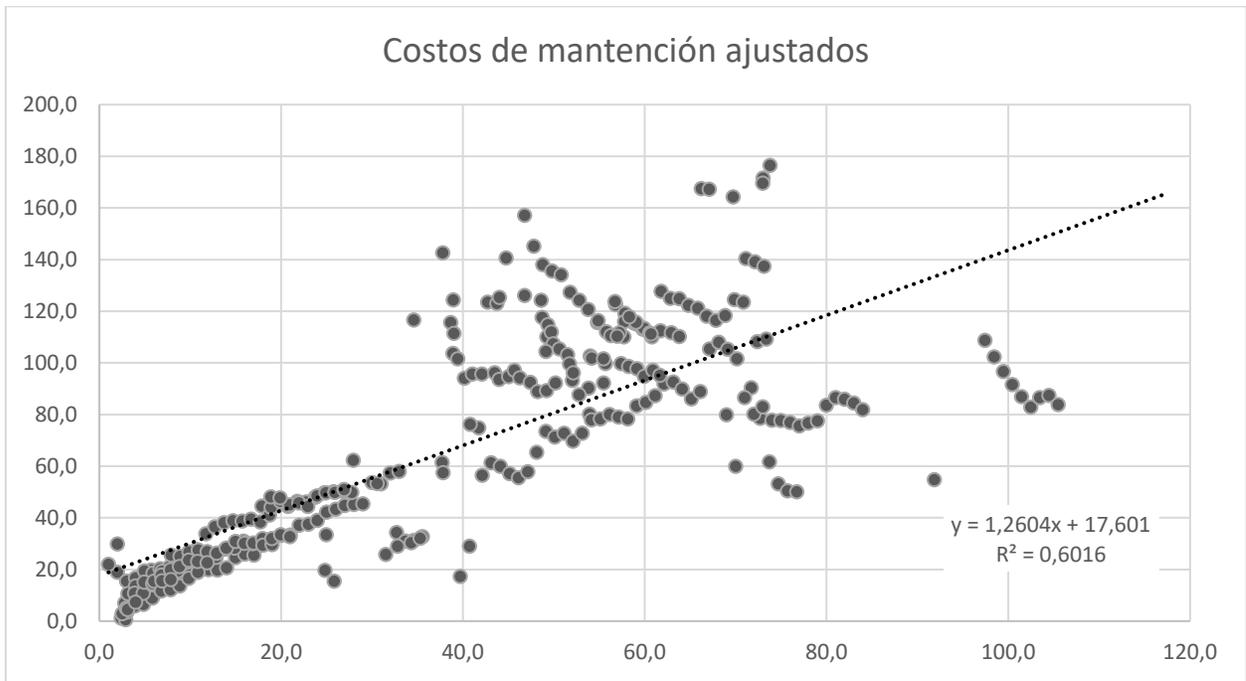


Ilustración 44. Costos de mantenimiento por flota ajustado. Fuente: El autor.

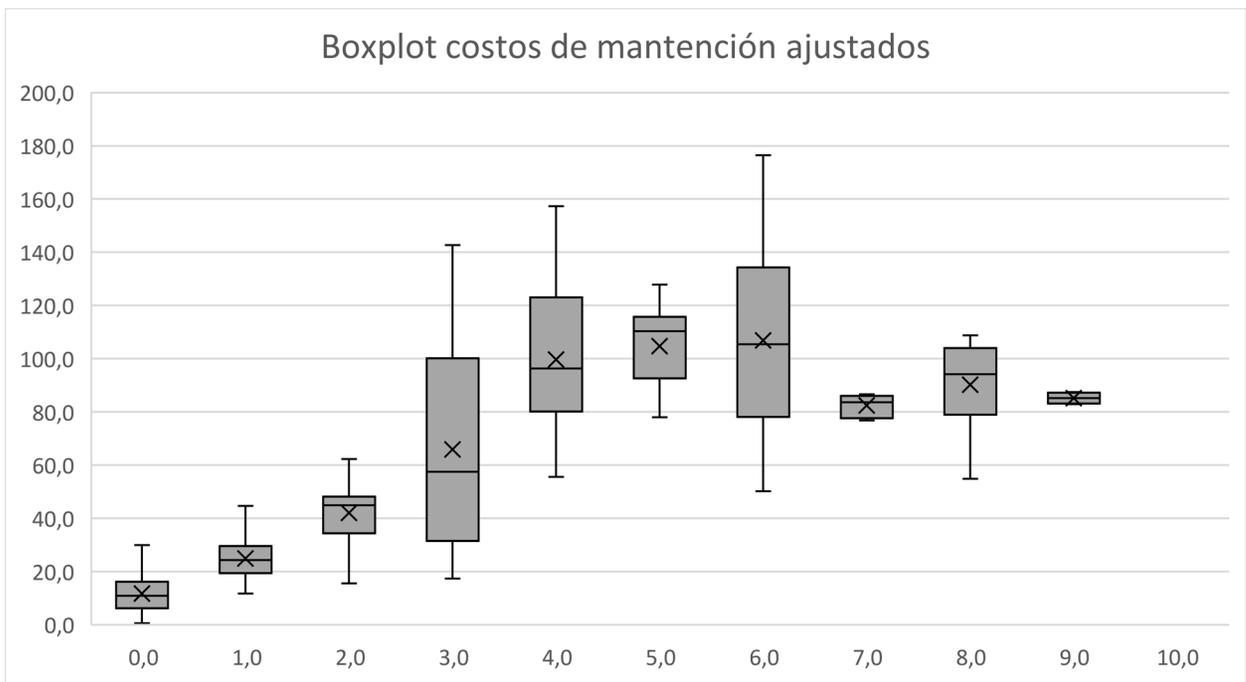


Ilustración 45. Boxplot de Costos de mantenimiento ajustado. Fuente: El autor.

ANEXO A.4 Exploración y modificación de datos de costos de Operación.

En lo que refiere los costos de operación, estos no presentan un comportamiento o tendencia clara (ver Ilustraciones 46 y 47), por lo cual se define el valor de tendencia central en torno a 70 [\$USD/h].

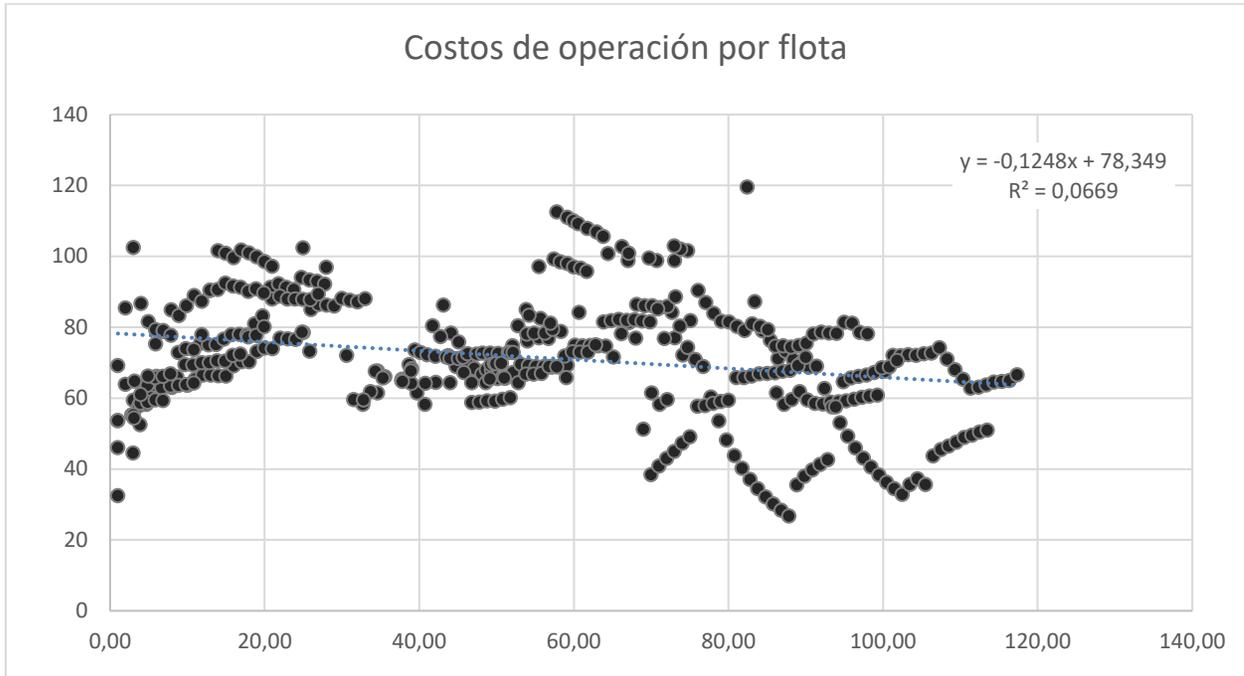


Ilustración 46. Costos de operación por flota. Fuente: El autor.

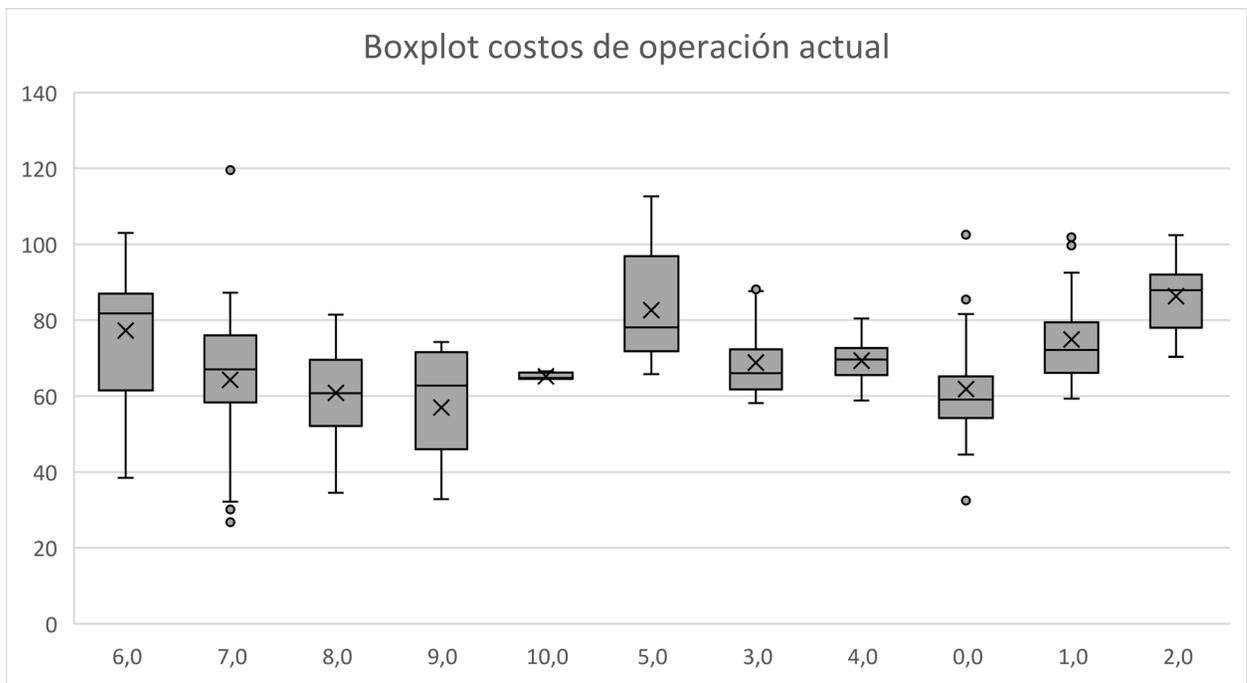


Ilustración 47. Boxplot de Costos de operación. Fuente: El autor.