



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

MODELO DE PLANIFICACIÓN CORTO PLAZO PARA OPTIMIZAR FLOTA DE  
CARGUÍO Y TRANSPORTE

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

JOSÉ FRANCISCO MUÑOZ CID

PROFESOR GUÍA:  
ENRIQUE JOFRÉ ROJAS

MIEMBROS COMISIÓN:  
GERARDO DÍAZ RODENAS  
GUILLERMO HOHMANN VILLAROEL

SANTIAGO DE CHILE  
2024

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:  
MAGISTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS  
POR: JOSÉ FRANCISCO MUÑOZ CID  
FECHA: 2024  
PROFESOR GUÍA: ENRÍQUE JOFRÉ ROJAS**

Este estudio trata del proceso de carguío y transporte de la operación mina de Compañía Minera Lomas Bayas, ubicada en la Región de Antofagasta, Chile. El objetivo es profundizar en el proceso de carguío y transporte, centrándose en el rendimiento, indicador con bajo desempeño respecto a lo comprometido en planes de presupuesto. Se busca estandarizar el análisis y control de este parámetro, identificando los factores que influyen en éste para medir y determinar donde hay que colocar esfuerzos para mejorar el rendimiento del proceso.

La metodología parte por abordar el rendimiento del proceso, identificando los parámetros que determinan éste, basado en la data histórica. Se ha generado un modelo de control tipo árbol de valor, que indique que parámetros se cumplen y cuales no, útil para generar acciones enfocadas en donde el cumplimiento sea bajo. Luego se ha desarrollado un análisis para determinar las potenciales capacidades de carguío y transporte más un análisis de costos de ambos procesos, de manera tal de encontrar oportunidades que mejoren la eficiencia del proceso, y se ha generado un análisis de riesgo para ver si existen impactos negativos asociados a la aplicabilidad de las oportunidades identificadas, y proponer medidas de mitigación para éstos.

Como resultado, se ha obtenido que el rendimiento del proceso de carguío depende del tiempo de carguío, de aculatamiento y el periodo en que la pala permanece inactiva. En base a la data histórica se ha generado un análisis que correlaciona estos tiempos con el rendimiento, estimándose que el tiempo de carguío total de los equipos mayores (se priorizan palas de cable, para optimizar el desempeño de éstos por ser más productivos) es de 3.35 min para la flota P&H 4100 y de 5.43 min para la flota P&H 2800, y que el rendimiento potencial es de 4,800 tph, y de 3,200 tph respectivamente. En transporte, se ha concluido que los factores que determinan el rendimiento son el factor de carga, la distancia recorrida y la velocidad. Respecto a la capacidad, se ha obtenido que la de la flota de camiones es 99.7 Mtpa y la de carguío 109.6 Mtpa, siendo el transporte el limitante del proceso global. También se ha obtenido que la flota de palas de cable - con capacidad de cargar 101.2 Mt – puede por sí sola utilizar la flota completa de camiones. Respecto al análisis de costo, se ha obtenido que el costo de la flota de cargadores es de 1.32 US\$/t el cual, comparado con 0.25 US\$/t de la flota P&H 4100 XPC y 0.40 US\$/t de la flota P&H 2800 XPB, es más alto por gran diferencia. Conociendo que la flota de palas por sí sola satisfacen el requerimiento de carga de los camiones, los cargadores se deben utilizar lo menos posible, priorizando su uso para mantener la alimentación a chancado en caso de falla de alguna pala o para preparar patios de perforación.

Por último, buscando convertir lo anterior en práctica, se propone generar reuniones diarias de análisis de datos, discretizando el rendimiento en los parámetros determinados con un esquema tipo árbol de valor, para identificar cuáles cumplen y cuales no, para generar planes de trabajo enfocados específicamente donde no hay cumplimiento. De esta forma se enfocan los esfuerzos donde corresponde, buscando una mejora continua y eficaz del proceso de carguío y transporte.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.1.	OBJETIVO PRINCIPAL .....	3
2.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2.2.	METODOLOGÍA.....	3
3.	ANÁLISIS Y CONTEXTO ESTRATÉGICO .....	5
4.	DIAGNÓSTICO Y SITUACIÓN ACTUAL .....	7
5.	MODELAMIENTO DEL PROCESO DE CARGUÍO Y TRANSPORTE .....	9
5.1.	MODELO DE CARGUÍO.....	9
5.2.	MODELO DE TRANSPORTE.....	14
6.	CAPACIDAD PROCESO CARGUÍO Y TRANSPORTE.....	16
7.	DESCRIPCIÓN COSTO-BENEFICIO DE LA PROPUESTA.....	19
8.	ANÁLISIS DE RIESGO .....	23
9.	PLAN DE IMPLEMENTACIÓN .....	24
10.	CONCLUSIÓN .....	26
11.	BIBLIOGRAFÍA .....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

DISTRIBUCIÓN DEL COSTO UNITARIO MINA .....	6
MOVIMIENTO TOTAL MINA MES ENERO 2020.....	7
GRÁFICO TONELAJE CARGADO POR HORA.....	8
GRÁFICO RENDIMIENTO EFECTIVO V/S TIEMPO DE CARGUÍO PALAS P&H 2800 ....	11
GRÁFICO RENDIMIENTO EFECTIVO V/S TIEMPO DE CARGUÍO PALAS P&H 4100....	12
ÁRBOL DE VALOR TIEMPO DE CARGUÍO FLOTA DE PALAS P&H 4100 .....	13
ÁRBOL DE VALOR TIEMPO DE CARGUÍO FLOTA DE CAMIONES KMS 930 E-5.....	15

## ÍNDICE DE TABLAS

CAPACIDAD TOTAL FLOTA DE CARGUÍO .....	16
CAPACIDAD TOTAL FLOTA DE TRANSPORTE.....	18
DISTRIBUCIÓN DE COSTO MINA .....	19
MOVIMIENTO MINA ANUAL POR TIPO DE EQUIPO DE CARGUÍO .....	19
HORAS OPERATIVAS ANUALES POR TIPO DE EQUIPO DE CARGUÍO .....	20
COSTO POR TONELADA DE CADA FLOTA DE EQUIPOS DE CARGUÍO .....	21
MOVIMIENTO MINA DEL PERIODO POR TIPO DE FLOTA DE TRANSPORTE .....	21
HORAS OPERATIVAS ANUALES POR FLOTA DE TRANSPORTE .....	21
COSTO POR TONELADA DE CADA FLOTA DE EQUIPOS DE TRANSPORTE.....	22

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se desarrolla dentro de Compañía Minera Lomas Bayas, perteneciente a la multinacional Glencore plc, donde se extrae mineral de depósitos cupríferos masivos de baja ley (0.27 %CuT) mediante la explotación de dos rajos llamados Lomas I y Lomas II. El mineral extraído se procesa mediante lixiviación en pilas – proceso llamado HEAP -, donde el mineral pasa por procesos de conminución que comprende chancado primario, secundario y terciario, para luego ser transportado por una serie de correas hasta un apilador que distribuye el mineral uniformemente sobre la pila en construcción. El segundo proceso es la lixiviación del mineral en pilas ROM (run of mine), que quiere decir que el mineral se procesa con la granulometría dada por la tronadura, sin pasar por procesos de reducción como sucede en el proceso HEAP.

La solución rica obtenida de ambos procesos se procesa en una planta de extracción por solventes, para después ser procesado en una planta de electroobtención, donde se obtiene el producto comercial que son cátodos de cobre de alta pureza.

La explotación minera se hace mediante el método de explotación a cielo abierto, trabajando dos rajos llamados Lomas I y Lomas II, donde las operaciones mineras se subdividen en tres áreas a saber: Perforación y Tronadura, Carguío y Transporte, y Servicios Mina. En el año en transcurso está el desafío de mover 98 Mt de roca, lo que equivale a mover diariamente 269,810 t, cifra superior a lo que se ha logrado hasta ahora.

Para esto se cuenta con la siguiente flota, a saber:

### 1) Carguío:

- i) 2 palas P&H 2800XPB de 46 yd<sup>3</sup>
- ii) 2 palas P&H 4100XPC\_AC de 77 yd<sup>3</sup>
- iii) 2 cargadores frontales CAT 994F de 23 yd<sup>3</sup>
- iv) 1 cargador frontal Le Torneau 2350 de 46 yd<sup>3</sup>

### 2) Transporte

- i) 27 camiones Komatsu 930-E, con capacidad de 292 t
- ii) 4 camiones CAT 793-F con capacidad de 215 t

La productividad se cuantifica en base a tres parámetros que son la disponibilidad, su uso y el rendimiento. Disponibilidad: Este indicador expresa en términos porcentuales el tiempo que el equipo estará disponible para operar, destinándose el resto a labores de mantenimiento. Uso de la disponibilidad: Este indicador expresa en términos porcentuales el tiempo que efectivamente el equipo estará operando, destinándose el tiempo remanente a labores de carguío de combustible, inspección, colaciones, cambios de turno entre otras demoras o reservas. Rendimiento: Este indicador, expresado en tonelada movida por hora (tph), indica cuanto tonelaje se mueve desde la mina a los distintos destinos (botaderos, chancado primario, pila ROM) por hora transcurrida.

Con la flota anteriormente descrita se ha programado mover en promedio 270 ktpd durante el año en curso, meta hasta ahora lo conseguida en el transcurso de este periodo, y solo contando con un antecedente histórico, donde en el mes de octubre de 2021 se logro una tasa de movimiento diario de 273 ktpd. Este constante problema que se da periodo tras periodo motiva la confección de la presente tesis con el objetivo de conseguir respuesta a las siguientes preguntas, a saber: ¿Cuál es la capacidad máxima de movimiento mina que se puede obtener con la flota actual?, ¿Y cuáles son los parámetros asociados de control y gestión que debemos identificar para lograr el mejor desempeño con la flota actual? La respuesta a esta última pregunta constituye la herramienta de gestión para el área de Planificación de Corto Plazo, de manera de programar y guiar a la operación minera en pos de obtener el mejor desempeño de la flota.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

Determinar la capacidad máxima de movimiento mina con las condiciones actuales e identificar los parámetros que modelan el proceso de carguío y transporte, y que permitan gestionar el proceso por parte del área de Planificación Corto Plazo para guiar a la operación minera a lograr el mejor desempeño con la flota actual.

### **2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Determinar los indicadores de desempeño que inciden en el resultado del rendimiento tanto de la flota de carguío como de transporte.
- 2) En base a datos históricos recopilados, determinar la capacidad de carguío y capacidad de transporte por separado. Determinar qué proceso unitario limita la operación conjunta de carguío y transporte.
- 3) Generar un análisis de costos del proceso de carguío y transporte.
- 4) Identificar – en base a los puntos 2 y 3 – oportunidades que permitan mejorar la eficiencia del proceso tanto en desempeño operativo como en costos.
- 5) Generar un plan de implementación que permita abordar lo identificado en el punto anterior en la programación de corto plazo mina.

## **2.2. METODOLOGÍA**

A continuación, se describe la metodología propuesta para abordar el siguiente estudio:

En primer lugar, se aborda el estudio rendimiento de los procesos de carguío y transporte. En el caso del proceso de carguío se identifican los parámetros que determinan el rendimiento, y se correlacionan éstos con el rendimiento en base a la data histórica. En base a lo anterior y a los tiempos de carguío de cada flota, se obtiene el potencial valor para cada flota de equipos de carguío mediante gráficos de dispersión e interpolación de líneas de tendencia. En el caso del proceso de transporte, se identifican de igual forma los parámetros que determinan el rendimiento de la flota pero, a diferencia del proceso de carguío, el rendimiento depende del origen y destino de los distintos materiales que son variables en el tiempo, por lo que no sería correcto en este caso emplear la data histórica para determinar potenciales rendimientos. Si se identifican los parámetros de los que depende el rendimiento. El periodo considerado para el análisis de la data histórica es el intervalo anual agosto 2021 – julio 2022.

Conocidos los parámetros de los cuales depende el resultado de rendimiento de los equipos de carguío y transporte, se modela un esquema de control tipo árbol de valor, que grafique los resultados de rendimiento y de los parámetros que lo componen. La idea es generar un modelo de reporte diario que indique fácilmente a que parámetro se deben dirigir acciones para mejorar el rendimiento.

Hecho lo anterior, se procede a determinar la capacidad de carguío, la capacidad de transporte y el match entre ambos procesos, con el objetivo de determinar cuál limita el proceso global de carguío y transporte. Esto se hace modelando cada proceso en base a la data histórica del periodo anteriormente definido para este estudio.

Después se procede a generar el análisis de costo de los procesos de carguío y transporte. Como dato se cuenta con el costo unitario total de cada proceso y no por los distintos tipos de flota. Para determinar esto último, se modelan estos costos en base al tonelaje movido por flota en el periodo en análisis y en las horas utilizadas por flota en el mismo.

En base al análisis de capacidad del proceso de carguío y transporte y al análisis de costo de éste, se identifican oportunidades en caso de existir que permitan mejorar la eficiencia del proceso, y se genera un análisis de riesgo que determinen si existen impactos negativos asociados a la aplicabilidad de las oportunidades identificadas, y proponer medidas de mitigación para estos impactos.

Por último, se genera un plan de implementación de este estudio, buscando un mecanismo que permita abordar por las áreas de planificación y operaciones mina el desempeño de los parámetros que modelan el rendimiento del proceso de carguío y transporte, con el objetivo de analizar e identificar acciones que permitan mejorar el proceso continuamente.



### 3. ANÁLISIS Y CONTEXTO ESTRATÉGICO

El tema por desarrollar en la presente tesis se enmarca en los lineamientos estratégicos tanto de Glencore como de Compañía Minera Lomas Bayas, específicamente en el enfoque en el control de costos y la eficiencia operacional. Glencore busca incrementar el valor de sus negocios mejorando las competencias de sus activos enfocándose en la administración de costos y las capacidades logísticas, operando con seguridad y eficiencia. En línea con este objetivo, uno de los desafíos de Compañía Minera Lomas Bayas es maximizar el uso de sus activos, asegurando el cumplimiento del plan de producción y crear valor, a través de la optimización de costo, disciplina operacional, productividad y crecimiento.

El presente estudio se enmarca específicamente dentro del proceso de carguío y transporte. La motivación que lleva al autor a desarrollar este tema es la falta de estandarización de la definición de los parámetros de desempeño de los equipos del proceso, estandarización que debe responder a los requerimientos de la planificación y al óptimo uso de los equipos por parte del área de operaciones mina.

Dentro de los parámetros de desempeño, generalmente disponibilidad física, uso de la disponibilidad, y rendimiento, éste último es el parámetro cuyas metas no se han definido adecuadamente, determinándose semana a semana prácticamente en acuerdos entre las áreas de operaciones y planificación, obteniéndose como resultado constante bajos resultados respecto a los programas de presupuesto, principalmente por no contar con metodologías y rutinas de análisis adecuadas para generar acciones que conduzcan a mejoras.

Dentro de los objetivos del presente estudio, están la definición de valores de rendimiento enfocados principalmente en la flota de palas de cable (P&H 2800 XPB y P&H 4100 XPC) y el determinar los parámetros que definen en su conjunto el rendimiento de los equipos de carguío y transporte. Esto en su conjunto entrega un esquema útil para la planificación minera, estandarizando el rendimiento y descomponiendo éste para determinar donde hay que generar acciones para mejorar.

También es importante conocer que proceso limita el conjunto carguío - transporte, para determinar si en el proceso que tiene holguras hay equipos que se están programando y utilizando innecesariamente, utilizando recursos del proceso limitante, obteniendo como resultado bajos desempeños en las flotas en forma general.

Otro punto para abordar es la evaluación del costo unitario de las flotas de equipos en forma independiente (no sólo como proceso global), y con esto determinar desde una óptica económica que flota de equipos debemos priorizar en uso.

Lo anteriormente expuesto como objetivos del presente estudio, tiene como objetivo global buscar ser un aporte para la compañía en términos de eficiencia operacional, buscando estandarizar los parámetros operacionales óptimos de los equipos de carguío y fijando metas a la operación en términos de rendimiento para obtener la mejor utilización de la flota. Esta mejora de rendimiento debiese impactar en el rendimiento de los camiones al disminuir el tiempo de espera en el punto de carguío. El efecto conjunto debiese reflejarse en una disminución del costo unitario de carguío y transporte, operación unitaria que en conjunto representa el 60% del costo unitario total mina (Figura 1)

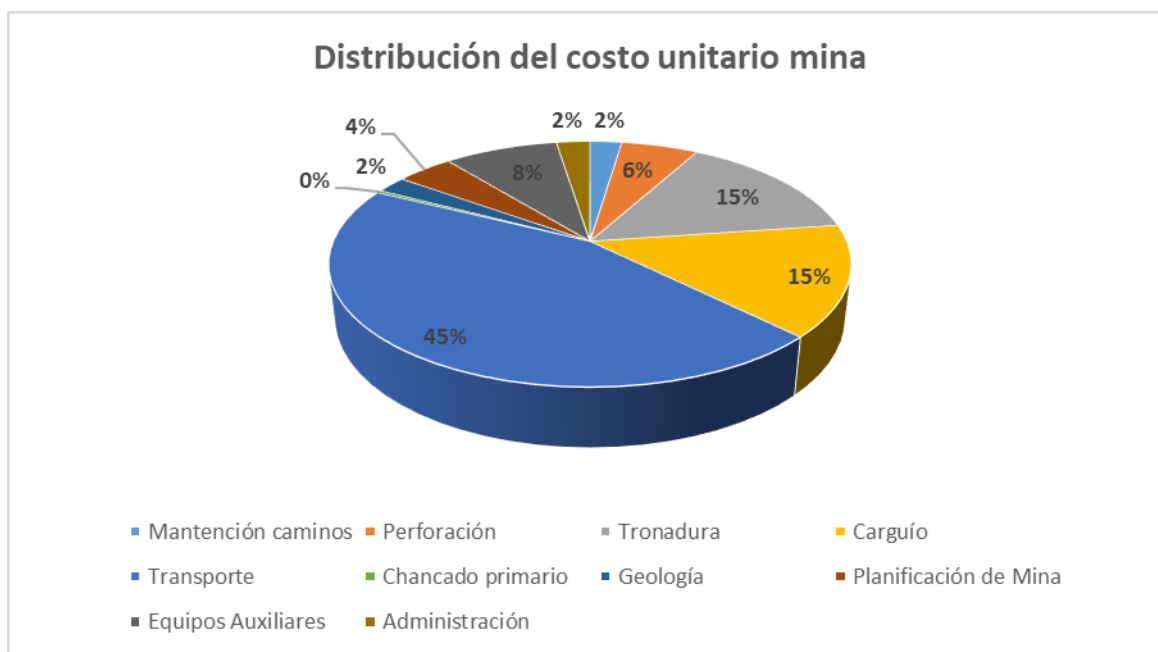


Figura 1: Distribución del costo unitario mina

La figura anterior (Figura 1) muestra el gran impacto del proceso de carguío y transporte en el total del costo unitario mina, por lo que resulta prácticamente un deber mejorar la gestión en desempeño de este proceso si se quiere ser eficiente en términos de costos. Para esto resulta fundamental, aparte de generar estándar y determinar parámetros de desempeño, generar reportabilidad e instancias diarias de análisis para generar acciones que generen mejoras en términos de desempeño y correcto uso de los equipos. Las rutinas deben ser diarias, para no perder continuidad en el análisis del desempeño.

En resumen, el trabajo en equipo debe fortalecerse con instancias de análisis de resultados, para que las acciones generadas por éste tengan foco en las actividades que muestren bajo desempeño principalmente. De esta forma, sin duda se verán mejoras encaminadas al cumplimiento de la producción planificada, en la maximización del uso de los activos, y se verán reflejadas en el control de costos.

#### 4. DIAGNÓSTICO Y SITUACIÓN ACTUAL

Actualmente la planificación minera en Compañía Minera Lomas Bayas no cuenta con valores estándares de rendimiento para la programación de los equipos de carguío (palas eléctricas y cargadores frontales). Los rendimientos se configuran de acuerdo con la tendencia de los valores reales obtenidos en el proceso de carguío, absorbiendo automáticamente las ineficiencias propias de la operación en la programación. Estos valores muchas veces son cuestionados por la operación mina, modificándose principalmente en la programación semanal llegando a determinar valores consensuados entre operaciones mina y planificación. En consecuencia, no hay una meta estándar a lograr en el proceso de carguío, y cualquier merma en rendimiento se justifica muchas veces por causas sin asidero. Esta falta de gestión en el proceso de carguío afecta directamente al transporte principalmente en el tiempo de espera en el punto de carga, generándose muchas veces grandes colas.

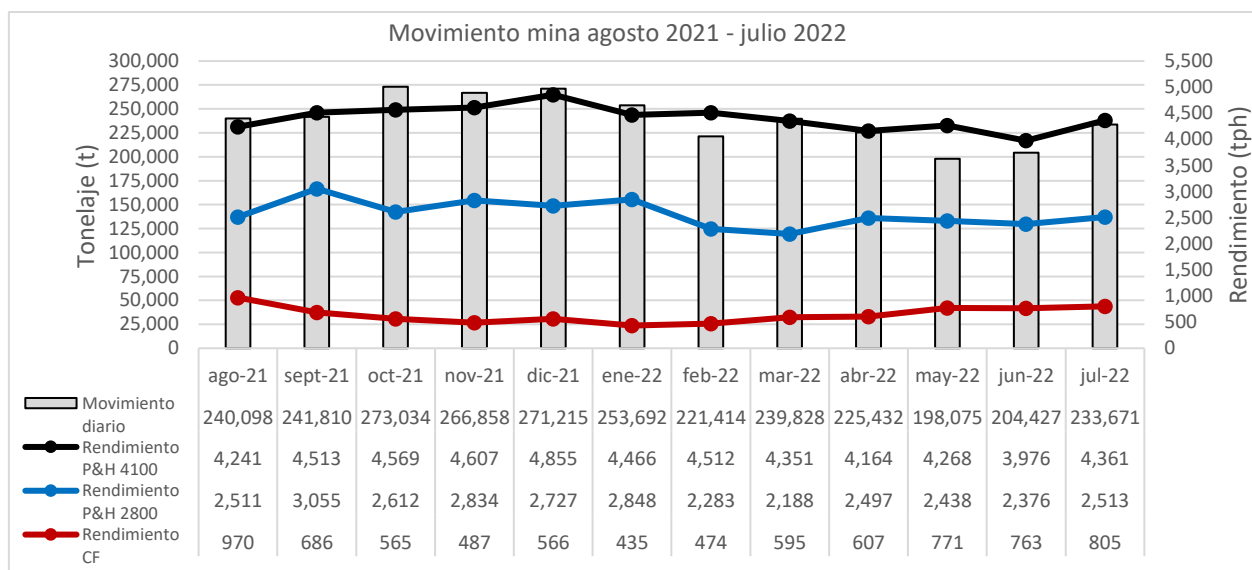


Figura 2: Movimiento total mina mes enero 2020

- i) Tonelaje de la primera y última hora del turno: se han hecho variaciones en el proceso de cambio de turno, con el objetivo de disminuir el tiempo entre que el camión se detenga y vuelva a reanudar marcha.
- ii) Relevos en horario de colación y tronadura: el tiempo de colación (4 horas) se reparte de tal forma que se van sacando operadores de camión y de equipos de carguío parcialmente, cubriendo los que tienen mayor prioridad según lo indicado por planificación mina. En el horario de tronadura (1 h) se mantienen en marcha a los equipos que están fuera de la zona de despeje, y se trabaja en la coordinación del despeje de forma tal de minimizar la detención de los equipos afectados por el evento de tronadura.
- iii) Reportabilidad: Se ha generado un gráfico que muestra el tonelaje movido por hora transcurrida v/s el tonelaje exigido por plan. Este reporte se puede revisar y actualizar en cualquier momento, permitiendo revisar el desempeño horario de la flota CAEX y reaccionar anticipadamente para mejorar el resultado (Figura 3).

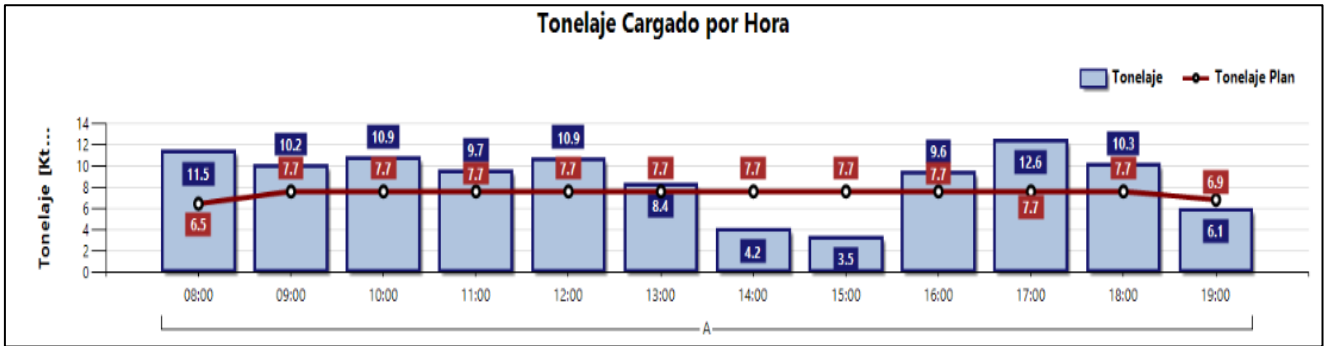


Figura 3: Gráfico tonelaje cargado por hora

Lo anterior ha permitido aumentar el uso de la flota de camiones desde 80% a 83. Más importante aún, hay un trabajo diario de mejora y captura de oportunidades para obtener el mejor uso posible. Contar con una métrica motiva la continua búsqueda de oportunidades y generación de buenas prácticas para mejorar continuamente el desempeño. Esto es lo que busca el modelo de carguío y transporte desarrollado en esta tesis: Servir como métrica para determinar los KPI, generar reportabilidad y trabajar diariamente basado en el espíritu del mejoramiento continuo.

## 5. MODELAMIENTO DEL PROCESO DE CARGUÍO Y TRANSPORTE

### 5.1. MODELO DE CARGUÍO

El modelo de carguío que se usa en la planificación minera se basa en cuatro indicadores claves, a saber:

- 1) Disponibilidad física (DF): Indica la cantidad de horas, expresado en porcentaje, de un día en el cual el equipo estará disponible para operar, ocupándose las horas restantes en labores de mantenimiento.
- 2) Uso de la disponibilidad (USO): Indica la cantidad de horas, expresado en porcentaje, del tiempo disponible en el cual el equipo estará operando efectivamente, ocupándose las horas restantes en las siguientes actividades: cambio de turno, colación, tronadura y traslados largos (movimientos programados en función de la planificación minera). También se considera el tiempo en el que el equipo está en reserva.
- 3) Factor operacional (FO): Indica la cantidad de horas, expresado en porcentaje, del tiempo efectivo en el cual el equipo no está operando por trabajos que requieren la detención temporal del equipo en cuestión. El factor operacional considera las siguientes detenciones:
  - i) Arreglo de piso
  - ii) Cambio de sitio
  - iii) Relevos operador
  - iv) Preparación de frente
  - v) Instrucción
  - vi) Topografía
  - vii) Cambio tendido eléctrico
  - viii) Preparación de banco
  - ix) Movimiento de cables
  - x) Traslado corto (movimiento del equipo de carguío dentro de la misma fase)
  - xi) Chequeo de equipo
  - xii) Movimiento del equipo de carguío en la misma frente de extracción
  - xiii) Espera de camión
  - xiv) Servicios higiénicos

El valor definido para este factor como meta es de 90%.

Con estos parámetros se puede calcular el tiempo operativo del equipo en cuestión, en base a la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo operativo (TO) h} = \text{Tiempo Nominal (TN) h} * \%DF * \%USO * \%FO$$

Si consideramos que el tiempo nominal de un día en horas son 24, la expresión queda de la siguiente forma:

$$TO (h) = 24 * \%DF * \%USO * \%FO$$

El calculo del tiempo operativo es importante para el cálculo del rendimiento el equipo de carguío.

- 4) Rendimiento efectivo (Ref): este indicador se expresa en toneladas movidas por hora (t/h), y nos indica la cantidad de material que es posible extraer con la flota de carguío por hora operativa. Este indicador está en función de los siguientes parámetros, a saber:
- i) Tiempo de carguío (TC): Tiempo medido en minutos que demora el equipo de carguío en excavar el material y cargarlo en el camión de extracción.
  - ii) Tiempo de inactividad (TI): Tiempo medido en minutos en que el equipo de carguío queda en espera de camiones de extracción.
  - iii) Tiempo de aculatamiento (TA): Tiempo medido en minutos en el cual el camión de extracción se posiciona en retroceso en el punto donde será cargado.

El tiempo de ciclo del proceso de carguío (TCC) se compone de la suma de los parámetros anteriormente definidos, de la forma:

$$TCC = TC+TI+TA$$

El rendimiento efectivo se calcula entre el cuociente entre las toneladas cargadas por ciclo (T) y el tiempo del ciclo de carguío en horas, de la forma

$$Ref= T*60/TCC$$

El tiempo de ciclo de carguío depende de la capacidad de los camiones de extracción, ya que esta define cuantas baldadas debe depositar el equipo de carguío para copar la capacidad del camión. En este caso en particular, están la flota de camiones CAT 793F DE 215 t de capacidad y la flota Komatsu 930E-5 DE 292 t de capacidad, lo que genera un problema a la hora de calcular el rendimiento del equipo de carguío de la forma expuesta, ya que no hay una asignación fija de un modelo de camión por equipo de carguío, sino que en la práctica la asignación es dinámica en función del requerimiento de camiones por los equipos de carguío (palas eléctricas principalmente) en cada instante, llegando los tres tipos de camiones de extracción a los diferentes puntos de carguío. Para abordar este cálculo, utilizaremos la data histórica del año en transcurso considerando los siguientes criterios:

- i) Se considerará a las palas eléctricas como los equipos de carguío por definición, dejando de lado a los cargadores frontales en este análisis. El objetivo es minimizar el uso de cargadores frontales buscando un rendimiento “optimo” de la flota de palas eléctricas.
- ii) Los tiempos de ciclo de carguío de los dos tipos de palas eléctricas tienen un valor objetivo ya definidos, a saber:
  - 1. Palas eléctricas P&H 2800 (camiones 173 t) = 3.38 min
  - 2. Palas eléctricas P&H 2800 (camiones 215 t) = 3.85 min
  - 3. Palas eléctricas P&H 4100 (camiones 173 t) = 2.34 min
  - 4. Palas eléctricas P&H 4100 (camiones 215 t) = 2.63 min

Para eliminar la variable tipo de camión, considerando que en la práctica no hay asignación de camiones a las palas eléctricas por tamaño, se estimará el tiempo de ciclo ponderando el tiempo de ciclo por el número de camiones clasificados por capacidad.

Considerando que hay 4 camiones de 215 t y 27 camiones de 292 t, el tiempo de ciclo de carguío de cada modelo de pala eléctrica es:

1. TCC palas eléctricas P&H 2800 = 5.43 min
2. TCC palas eléctricas P&H 4100 = 3.35 min

En base a los tiempos de ciclo definidos como meta más la base de datos histórica del presente año, se definirá el rendimiento efectivo de las palas eléctricas que se tomará como base para la planificación minera. El procedimiento utilizado para esta estimación fue el siguiente: se recopiló la información histórica de los rendimientos efectivos, tiempos de carguío, inactividad y aculatamiento del año en transcurso. Se sumaron los tiempos para determinar el tiempo de ciclo de carguío y se ha generado un gráfico de dispersión que muestra la relación entre el rendimiento efectivo del equipo de carguío versus el tiempo de ciclo de carguío. Se ha trazado una línea de tendencia lineal con el fin de obtener una expresión algebraica con la cual se pueda estimar el rendimiento efectivo en base a los tiempos de ciclo determinados anteriormente.

Para las palas P&H 2800 se han recopilado 353 datos históricos del periodo comprendido entre el 01 de agosto de 2021 y el 31 de julio de 2022. Con estos datos se ha generado un gráfico de dispersión que relaciona el tiempo de ciclo con el rendimiento efectivo que se muestra a continuación (figura 4).

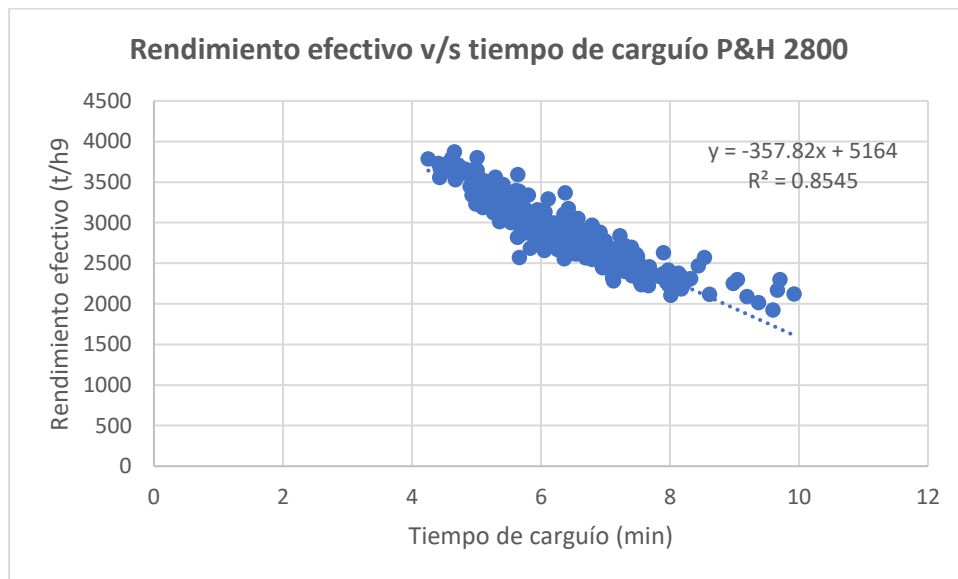


figura 4: Gráfico rendimiento efectivo v/s tiempo de carguío palas P&H 2800

Se ha trazado una línea de tendencia con un valor de  $R^2$  de 0.8545, que valida la relación entre estas dos variables. La expresión que permite relacionar linealmente las variables analizadas es:

$$\text{Ref (t/h)} = -357.82 * \text{TCC (min)} + 5,164$$

Tomando el tiempo de carguío estándar de 5.43 min para las palas P&H 2800 y evaluándolo en la expresión, se obtiene que el rendimiento efectivo es de 3,221 t/h. Redondeando la cifra, se puede establecer que el rendimiento efectivo estándar para las palas eléctricas P&H 2800 es de 3,200 t/h.

Para las palas P&H 4100 se han recopilado 130 datos históricos del periodo comprendido entre el 01 de agosto de 2021 y el 31 de julio de 2022. Siguiendo el mismo proceder anteriormente descrito, se ha obtenido una relación gráfica entre el rendimiento efectivo y el tiempo de ciclo que se muestra a continuación (figura 5).

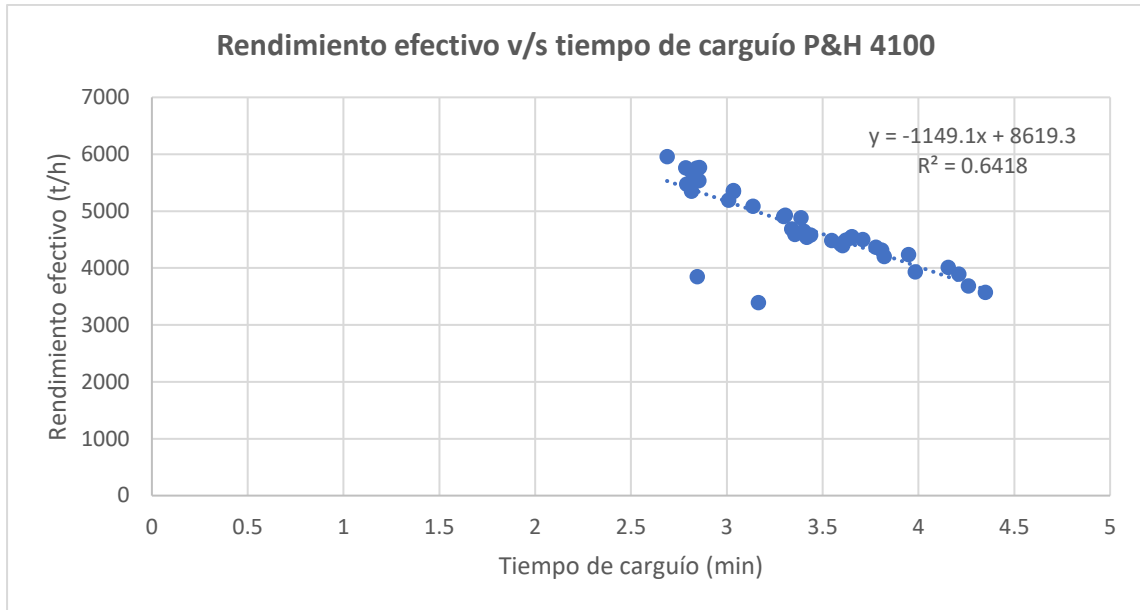


figura 5: Gráfico rendimiento efectivo v/s tiempo de carguío palas P&H 4100

Se ha trazado una línea de tendencia con un valor de  $R^2$  de 0.64 que valida la relación entre estas dos variables. La expresión que permite relacionar linealmente las variables analizadas es:

$$\text{Ref (t/h)} = -1,149.1 * \text{TCC (min)} + 8,619.3$$

Tomando el tiempo de carguío estándar de 3.35 min para las palas P&H 4100, y evaluándolo en la expresión, se obtiene que el rendimiento efectivo es de 4,769 t/h. Redondeando la cifra, se puede establecer que el rendimiento efectivo estándar para las palas eléctricas P&H 4100 es de 4,800 t/h.

De esta forma, se han definido los valores de rendimiento efectivo para cada tipo de pala eléctrica en función de los tiempos de carguío estándar definidos por la compañía.

Los gráficos reflejan la dependencia del rendimiento de los equipos con el tiempo de carguío, lo que indica que es importante controlar el tiempo de carguío como medida de gestión para mantener o mejorar el rendimiento.



El tiempo de carguío se puede descomponer en tres parámetros, a saber:

- 1) Tiempo de carguío: El tiempo que requiere el equipo para cargar el camión. Para los equipos de carguío P&H 2800 se ha definido de 3.23 min, mientras que para los equipos P&H 4100 se ha definido en 1.65 min.
- 2) Tiempo de inactividad: Tiempo en el cual el equipo está detenido por no tener camiones disponibles en la frente para cargar. Para los equipos de carguío P&H 2800 se ha definido de 1.35 min, mientras que para los equipos P&H 4100 se ha definido en 0.85 min.
- 3) Tiempo de aculatamiento: Tiempo que toma el camión en posicionarse para ser cargado, cuyo valor objetivo se ha definido en 0.85 min.

El descomponer el tiempo de carguío nos permite hacer gestión en el proceso, colocando acento en el punto donde existen desviaciones relevantes. Es recomendable revisar en los diálogos de desmepeño diario el comportamiento de éstos, que pueden ser modelados mediante un árbol de valor, donde se muestre el tiempo total de carguío y la descomposición de éste en los tres tiempos mencionados junto con un valor objetivo que se busque cumplir.

La siguiente figura (Figura 6) muestra como ejemplo una estructura de árbol de valor donde se ve el desempeño respecto del valor objetivo definido.

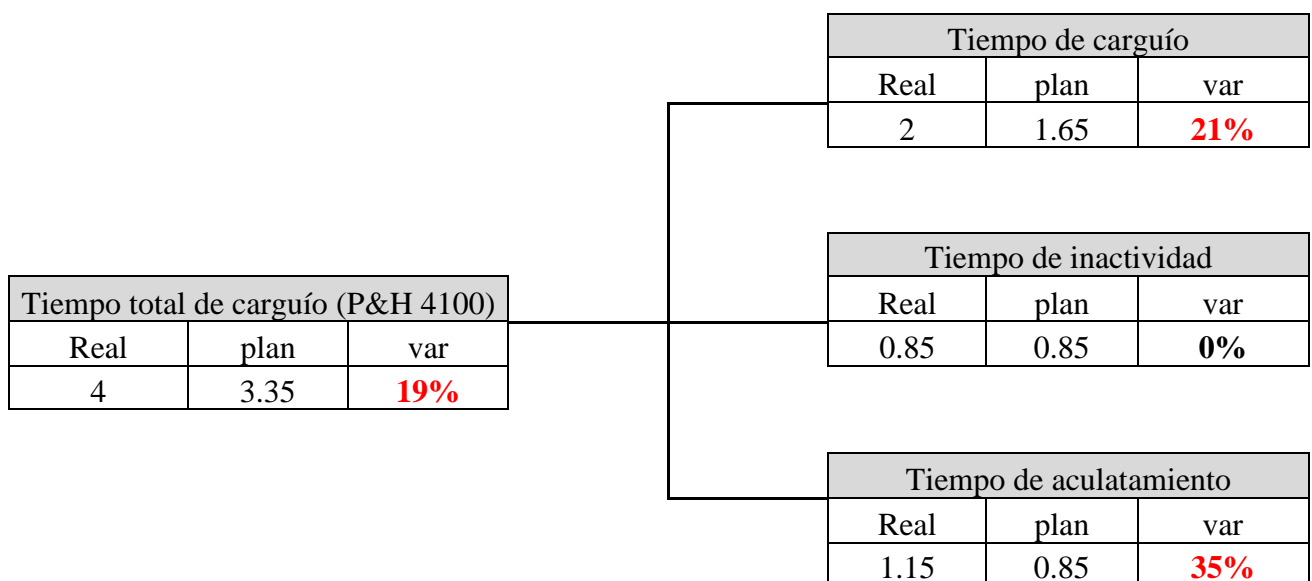


Figura 6: Árbol de valor tiempo de carguío flota de palas P&H 4100

## 5.2. MODELO DE TRANSPORTE

El modelo de transporte que se usa en la planificación minera se basa en cuatro indicadores claves, a saber:

- 1) Disponibilidad física (DF): Indica la cantidad de horas, expresado en porcentaje, de un día en el cual el equipo estará disponible para operar, ocupándose las horas restantes en labores de mantenimiento.
- 2) Uso de la disponibilidad (USO): Indica la cantidad de horas, expresado en porcentaje, del tiempo disponible en el cual el equipo estará operando efectivamente, ocupándose las horas restantes en las siguientes actividades: cambio de turno, colación, tronadura y traslados largos (movimientos programados en función de la planificación minera). También se considera el tiempo en el que el equipo está en reserva.
- 3) Factor operacional (FO): Indica la cantidad de horas, expresado en porcentaje, del tiempo efectivo en el cual el equipo no está operando por trabajos que requieren la detención temporal del equipo en cuestión. El factor operacional considera las siguientes detenciones:
  - i) Arreglo de piso
  - ii) Cambio de sitio
  - iii) Polución
  - iv) Relevo operador
  - v) Preparación de frente
  - vi) Instrucción
  - vii) Topografía
  - viii) Preparación de banco
  - ix) Obstáculo en la vía
  - x) Movimiento de cables
  - xi) Traslado corto (movimiento del equipo de carguío dentro de la misma fase)
  - xii) Chequeo de equipo
  - xiii) Movimiento de pala (movimiento del equipo de carguío en la misma frente de extracción)
  - xiv) Abastecimiento de petróleo
  - xv) Servicios higiénicos

Con estos parámetros se puede calcular el tiempo operativo del equipo en cuestión, en base a la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo operativo (TO) h} = \text{Tiempo Nominal (TN) h} * \%DF * \%USO * \%FO$$

Si consideramos que el tiempo nominal de un día en horas son 24, la expresión queda de la siguiente forma:

$$TO (h) = 24 * \%DF * \%USO * \%FO$$

El cálculo del tiempo operativo es importante para el cálculo del rendimiento el equipo de transporte.

- 4) Rendimiento efectivo: este indicador se expresa en toneladas movidas por hora (t/h), y nos indica la cantidad de material que es posible extraer con la flota de transporte por hora operativa. Este indicador está en función de los siguientes parámetros, a saber:
- i) Distancia recorrida
  - ii) Perfil de velocidades: La velocidad del camión varía si tránsito en pendiente positiva, negativa u horizontal, y si el camión va cargado o vacío.
  - iii) Puntos de cambio de dirección de tránsito o Switchbacks: En estos puntos, generalmente horizontales, se debe considerar una reducción de la velocidad del camión.
  - iv) Tiempo de carguío
  - v) Tiempo de aculatamiento
  - vi) Tiempo de descarga
  - vii) Tiempo de espera (en punto de carguío o botadero)
  - viii) Tiempo de transporte: en base a los tres primeros puntos mencionados se estima este tiempo.
  - ix) Factor de carga del camión (tonelaje transportado por cada viaje de camión).

Al igual que en el caso del carguío, es importante controlar estos tiempos respecto a lo programado (velocidad – distancia recorrida) o definido (factor de carga, tiempos de carguío, aculatamiento, descarga, espera). Estos pueden ser modelados mediante un árbol de valor, donde se muestre el tiempo de transporte y la descomposición de éste en los distintos parámetros con su respectivo valor objetivo, lo que nos permitirá ver donde existe mayor desviación para destinar recursos para mejorar este indicador.

La siguiente figura (Figura 6) muestra como ejemplo una estructura de árbol de valor donde se ve el desempeño respecto del valor objetivo definido.

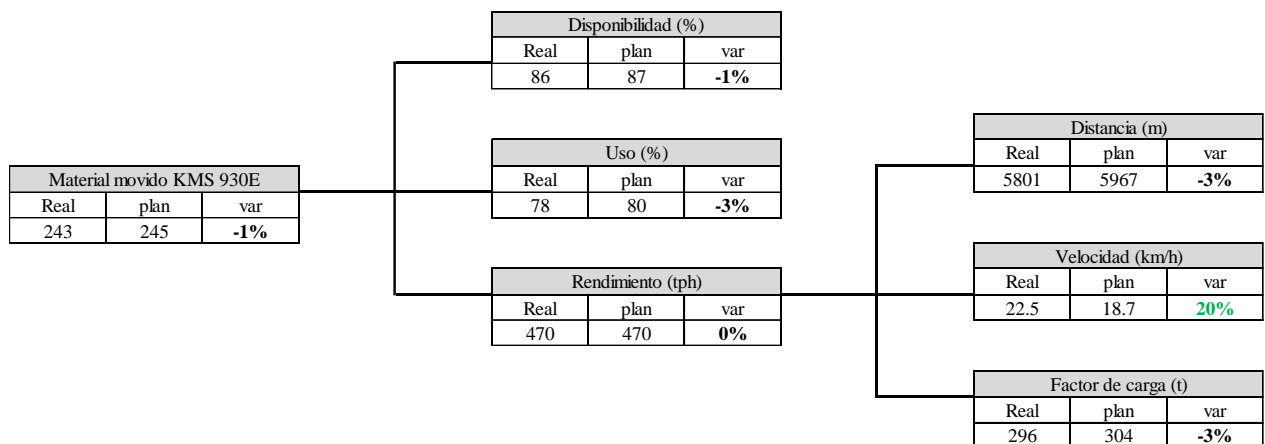


Figura 7: Árbol de valor tiempo de carguío flota de camiones KMS 930 E-5

## 6. CAPACIDAD PROCESO CARGUÍO Y TRANSPORTE

Ya hecho el modelamiento, es importante estimar la capacidad del proceso de carguío y transporte en su conjunto, determinando cual es el proceso que limita la capacidad y ver si existen holguras que pudiesen ser objeto de mejora en gestión.

Para estimar la capacidad de carguío disponible, se ha considerado la disponibilidad física y utilización de los equipos considerada en el periodo analizado. El rendimiento de las palas de cable (P&H 4100 y P&H 2800) se extrae del análisis hecho en este estudio en el capítulo 5.1.

Respecto a la flota de CF, se ha considerado la disponibilidad física y el uso de la flota en el periodo analizado. Para el rendimiento consideraremos el valor medio del periodo analizado - 650 tph -, ya que estos equipos cumplen diversas funciones (carguío en frente, carguío en stock y otros) que condicionan el rendimiento del equipo.

En función de estos criterios, la estimación de la capacidad de carguío se muestra en la siguiente tabla (Tabla 1).

Tabla 1: Capacidad total flota de carguío

<b>P&amp;H 4100</b>	Días	365
	DF	85
	Uso	85
	Rendimiento	4,800
	N° equipos	2
	Tonelaje	60,759,360
<b>P&amp;H 2800</b>	Días	365
	DF	85
	Uso	85
	Rendimiento	3,200
	N° equipos	2
	Tonelaje	40,506,240
<b>Cargadores Frontales</b>	Días	365
	DF	70
	Uso	70
	Rendimiento	650
	N° equipos	3
	Tonelaje	8,370,180
<b>Capacidad total</b>		<b>109,635,780</b>

La tabla anterior (Tabla 1) indica que la capacidad de la flota de carguío actual es de 109.6 Mt.

En el caso de la capacidad de transporte, ésta depende de la capacidad de carga del camión, de la distancia recorrida y del perfil de ésta, que define la velocidad media de la flota en el circuito programado.

Se han tomado datos del periodo en análisis para estimar la capacidad de transporte, que se detallan a continuación:

i)	Distancia media recorrida (DMR)	= 4,200 m
ii)	% Distancia en rampa (%R)	= 55%
iii)	Velocidad subiendo cargado (V <sub>SC</sub> )	= 12.2 km/h
iv)	Velocidad bajando cargado (V <sub>BC</sub> )	= 22 km/h
v)	Velocidad subiendo vacío (V <sub>SV</sub> )	= 24.8 km/h
vi)	Velocidad bajando vacío (V <sub>BV</sub> )	= 28.1 km/h
vii)	Velocidad horizontal cargado (V <sub>HC</sub> )	= 14.7 km/h
viii)	Velocidad horizontal vacío (V <sub>HV</sub> )	= 31.4 km/h
ix)	Factor de carga camión KMS 930 E	= 292 t
x)	Factor de carga camión CAT 793 F	= 215 t
xi)	Tiempo de carguío (TC)	= 3.38 min
xii)	Tiempo de descarga (TD)	= 1.3 min
xiii)	Tiempo de acuatamiento (TA)	= 1 min
xiv)	Tiempo de espera (TE)	= 2.7 min
xv)	Unidades camión KMS 930 E	= 27
xvi)	Unidades camión CAT 793 F	= 4

Con estos datos se ha procedido a estimar la capacidad de transporte. En primer lugar, se ha estimado la velocidad media considerando la velocidad por tramos y el porcentaje de rampa en base a la siguiente expresión:

$$\text{Velocidad media (VM)} = \frac{((1-\%R)*(V_{HC}+V_{HV}) + \%R*(V_{SC} + V_{BC} + V_{SV} + V_{BV}))}{((1-\%R)*2 + \%R*4)} \quad (\text{km/h})$$

Con los datos de velocidades listados anteriormente, el resultado indica una velocidad media de transporte de 22.15 km/h.

Con la velocidad media estimada, más la distancia y los tiempos fijos (carguío + descarga + acuatamiento), se ha estimado el tiempo de ciclo medio en base a la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo de ciclo medio} = \frac{DMR*2/1000}{VM/60} + TC + TD + TA + TE \quad (\text{min})$$

En base a la expresión anterior, el tiempo de ciclo medio es de 31.13 min

Con el tiempo de ciclo medio conocido, se puede estimar el rendimiento de cada flota mediante el cociente entre el factor de carga del camión y el tiempo de ciclo medio ya conocido. Para la flota Komatsu 930 E – de 292 t – el rendimiento estimado es de 562 tph y para la flota CAT 793 F – de 215 t-, el rendimiento estimado es de 414 tph.

Con estos datos más la disponibilidad física y el uso de la flota en base al periodo en análisis, se ha procedido a estimar la capacidad de transporte, que se muestra en la siguiente tabla (Tabla 2)

Tabla 2: Capacidad total flota de transporte

<b>Komatsu 930E</b>	Días	365
	%DF	85
	%Uso	80
	Rendimiento	562
	N° equipos	27
	Tonelaje (t)	90,388,483
<b>CAT 793 F</b>	Días	365
	%DF	80
	%Uso	80
	Rendimiento	414
	N° equipos	4
	Tonelaje (t)	9,284,198
<b>Capacidad total (t)</b>		<b>99,672,682</b>

En la tabla anterior (Tabla 2) se indica que la capacidad de transporte es de 99.7 Mt, menor a la de carguío (109.6 Mt), por lo que la capacidad de transporte es la que limita el proceso. Lo interesante de este análisis es que sumando las capacidades de las palas de cable - P&H 4100 + P&H 2800 (Tabla 1) suman 101.2 Mt, lo que indica que basta con estas palas para lograr copar la capacidad de los camiones, sin la necesidad de usar los cargadores frontales.

## 7. DESCRIPCIÓN COSTO-BENEFICIO DE LA PROPUESTA.

El presente trabajo busca generar mayor eficiencia en el proceso de carguío y transporte, lo que debe reflejarse en una disminución del costo unitario del proceso. La estructura de costos considerada en este estudio se muestra a continuación (Tabla 3):

Tabla 3: Distribución de costo mina

<b>Movimiento mina</b>	t	82,126,904
<b>Costo mina</b>		
Perforación	kUS\$	15,475
Tronadura	kUS\$	17,945
Carguío	kUS\$	33,449
Transporte	kUS\$	80,057
Administración	kUS\$	18,252
Total Costo Mina	kUS\$	165,178
<b>Costo Unitario Mina</b>	<b>US\$/t</b>	<b>2.01</b>

La tabla anterior (Tabla 3) describe el costo de cada proceso unitario de la mina, donde el costo del proceso de carguío (33,449 kUS\$) y transporte (80,057 kUS\$) son los datos relevantes para el presente estudio. Estos no están clasificados por tipo de equipo, lo que es importante dimensionar para gestionar el uso de estos equipos de manera eficiente en términos productivos y económicos.

Para determinar el costo de carguío por tipo de flota, se ha hecho un tratamiento de los costos de carguío y transporte, considerando las horas operativas y el tonelaje cargado en el periodo del cual se extraen los costos, que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4: Movimiento mina anual por tipo de equipo de carguío

<b>Movimiento mina</b>	t	82,126,904
<b>P&amp;H 4100 XPC</b>	t	44,421,837
<b>P&amp;H 2800 XPB</b>	t	31,857,859
<b>Flota CF (Le Torneau 2800 + CAT 994)</b>	t	5,847,208

Tabla 5: Horas operativas anuales por tipo de equipo de carguío

<b>Horas operativas proceso carguío</b>	h	31,846
<b>P&amp;H 4100 XPC</b>	h	11,270
<b>P&amp;H 2800 XPB</b>	h	12,831
<b>Flota CF (Le Torneau 2800 + CAT 994)</b>	h	7,744

Para prorratear el costo del proceso de carguío, se han considerado las horas operativas (Tabla 5) del periodo analizado. Se considera que las horas son más representativas que el tonelaje cargado por flota, ya que la capacidad de cada una de éstas es diferente.

Dividiendo las horas operativas de cada flota por el total, se han obtenido los factores que se indican a continuación:

$$\begin{aligned}
 \text{i)} \quad & \text{Flota P\&H 4100} & = & 11,270 \text{ h} / 31,846 \text{ h} = 0.354 \\
 \text{ii)} \quad & \text{Flota P\&H 2800} & = & 12,831 \text{ h} / 31,846 \text{ h} = 0.403 \\
 \text{iii)} \quad & \text{Flota Cargadores Frontales} & = & 7,744 \text{ h} / 31,846 \text{ h} = 0.243
 \end{aligned}$$

Con los factores ya determinados, se ha procedido a prorratear el costo por flota de equipos ponderando el total por cada factor. Considerando que el costo total del proceso de carguío es 33,449 kUS\$, los resultados obtenidos son:

$$\begin{aligned}
 \text{i)} \quad & \text{Flota P\&H 4100} & = & 33,449 \text{ kUS\$} * 0.354 = 11,840.95 \text{ kUS\$} \\
 \text{ii)} \quad & \text{Flota P\&H 2800} & = & 33,449 \text{ kUS\$} * 0.403 = 13,479.95 \text{ kUS\$} \\
 \text{iii)} \quad & \text{Flota Cargadores Frontales} & = & 33,449 \text{ kUS\$} * 0.243 = 8,128.10 \text{ kUS\$}
 \end{aligned}$$

Por último, dividiendo el costo de cada flota por el tonelaje extraído correspondiente (Tabla 4), se obtiene el costo unitario por tonelada, índice que permite comparar la eficiencia en términos de costo de cada flota de carguío. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 6).



Tabla 6: Costo por tonelada de cada flota de equipos de carguío

	Costo carguío (kUS\$)	Tonelaje cargado (t)	Costo por tonelada (US\$/t)
<b>Total proceso carguío</b>	31,846	82,126,904	0.39
<b>Flota P&amp;H 4100 XPC</b>	11,270	44,421,837	0.25
<b>Flota P&amp;H 2800 XPB</b>	12,831	31,857,859	0.40
<b>Flota CF (Le Torneau 2800 + CAT 994)</b>	7,744	5,847,208	1.32

En la tabla anterior (Tabla 6) se muestran los valores obtenidos de costo por tonelada de cada flota de equipos de carguío. Lo primero que salta a la vista es la gran diferencia entre el costo de la flota de cargador frontal versus las palas de cable, con un valor 5 veces más caro que la flota P&H 4100 XPC y 3 veces más caro que la flota de palas P&H 2800 XPB. De igual forma, se aprecia que el costo de la flota P&H 2800 XPB es 1.6 veces mayor que el costo de la flota P&H 4100 XPC. Por lo tanto, debiese priorizarse el desarrollo de la mina priorizando el uso de la flota de palas P&H 4100 XPC, luego la flota P&H 2800 XPB, y por último la flota de cargadores frontales. Resulta importante en función de estos resultados priorizar en la planificación este orden, ya que de esta forma la eficiencia del proceso estará directamente integrada en la planificación minera de corto plazo.

Para el proceso de transporte, se ha procedido de la misma forma, considerando el movimiento por flota de equipos y las horas operativas del periodo en análisis. Estos datos se muestran en las siguientes tablas (Tabla 7 y Tabla 8).

Tabla 7: Movimiento mina del periodo por tipo de flota de transporte

<b>Movimiento mina</b>	t	82,126,904
<b>Flota Komatsu 930 E5</b>	t	79,578,970
<b>Flota Caterpillar 793 F</b>	t	2,309,613

Tabla 8: Horas operativas anuales por flota de transporte

<b>Horas operativas proceso transporte</b>	h	166,336
<b>Flota Komatsu 930 E5</b>	h	159,056
<b>Flota Caterpillar 793 F</b>	h	7,280

Dividiendo las horas operativas de cada flota por el total, se han obtenido los factores que se indican a continuación:

$$\begin{aligned} \text{i)} \quad & \text{Flota Komatsu 930 E5} & = & 159,056 \text{ h} / 166,336 \text{ h} = 0.956 \\ \text{ii)} \quad & \text{Flota Caterpillar 793 F} & = & 7,280 \text{ h} / 166,336 \text{ h} = 0.044 \end{aligned}$$

Con los factores ya determinados, se ha procedido a prorratear el costo por flota de equipos ponderando el total por cada factor. Considerando que el costo total del proceso de carguío es 80,057 kUS\$, los resultados obtenidos son:

$$\begin{aligned} \text{i)} \quad & \text{Flota Komatsu 930 E5} & = & 80,057 \text{ kUS\$} * 0.956 = 76,534.49 \text{ kUS\$} \\ \text{ii)} \quad & \text{Flota Caterpillar 793 F} & = & 80,057 \text{ kUS\$} * 0.044 = 3,522.51 \text{ kUS\$} \end{aligned}$$

Por último, dividiendo el costo de cada flota por el tonelaje extraído correspondiente (Tabla 7), se obtiene el costo unitario por tonelada, índice que permite comparar la eficiencia en términos de costo de cada flota de carguío. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 9).

Tabla 9: Costo por tonelada de cada flota de equipos de transporte

	Costo transporte (kUS\$)	Tonelaje cargado (t)	Costo por tonelada (US\$/t)
<b>Total proceso transporte</b>	80,057	82,126,904	0.97
<b>Flota Komatsu 930 E5</b>	76,534	79,578,970	0.96
<b>Flota Caterpillar 793 F</b>	3,523	2,309,613	1.53

En la tabla anterior (Tabla 9) se muestran los valores obtenidos de costo por tonelada de cada flota de equipos de transporte. Se aprecia que la diferencia entre el costo unitario de cada flota es fuerte, con una diferencia de 0.57 US\$/t mayor de la flota Caterpillar 793 F. Considerando que son 4 camiones y que sólo ha movido un poco más de dos millones de toneladas en el periodo de análisis, es importante analizar si se requiere el uso del equipo o si existe espacio para absorber este tonelaje con la flota de camiones Komatsu 930 E5 para evitar incurrir en ineficiencias en términos de costo de transporte. Se debe estimar en el proceso de planificación si es necesario o no recurrir al uso de la flota Caterpillar 793 F y, en caso de requerirse, buscar que su utilización sea tal que mejore el costo unitario respecto a lo expuesto en la Tabla 9.

Ahora viendo el proceso de carguío y transporte en su totalidad, y basándose en lo concluido en el análisis de capacidad del proceso (capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se puede concluir en lo siguiente: Como el proceso de carguío y transporte está limitado por la capacidad de transporte, la cual es cubierta por las palas de cable, los cargadores frontales no debiesen utilizarse por su mayor costo unitario (1.32 US\$/t) respecto al uso de la flota P&H 4100 (0.25 US\$/t) y a la flota P&H 2800 (0.40 US\$/t), y por qué no son necesarios para cubrir la capacidad de transporte, ya que las palas de cables lo pueden cubrir por sí mismas.

## 8. ANÁLISIS DE RIESGO

Como primera conclusión que deriva de los resultados obtenidos en los capítulos 6 y 7, es que no es necesario utilizar la flota de cargadores frontales, ya que sólo con las palas se puede cubrir el uso de la flota disponible de transporte, y por qué el uso de los cargadores frontales genera un aumento en el costo unitario del proceso (capítulo 7). Sin embargo, es importante analizar esta premisa en términos de estrategia operacional antes de tomar decisiones.

En primer lugar, si bien la flota de palas cable cubren el uso de la flota de transporte, es importante enfocar el análisis en la continuidad del proceso aguas abajo. Uno de los parámetros importantes de control es el tonelaje diario de mineral enviado a chancado primario, el cual, en caso de falla de la pala que esté alimentando, se ve afectado al no contar con un equipo que cubra la continuidad en la alimentación, impactando aguas abajo directamente en el resultado global de la compañía, al generar atrasos en los procesos de lixiviación, que impactarán a su vez al proceso de extracción por solventes y electroobtención, obteniéndose como resultado menor producción de cátodos de cobre, objetivo principal de la compañía. Para cubrir estos eventos y garantizar continuidad en la alimentación de mineral, es importante disponer de un cargador frontal, que puede rápidamente continuar la alimentación a chancado primario ya sea de la frente de extracción o de algún stock de mineral generado para estos casos.

Otro caso para considerar es el trabajo de preparación de patios de perforación, donde generalmente hay que levantar pretilos y cargar material producto de los trabajos de saneamiento y logros de líneas de programa. El cargar este material con las palas generaría ineficiencia por la baja altura de carga y el constante movimiento del equipo. Aquí vuelve a cobrar relevancia el uso del cargador frontal, el cual limpia estos materiales rápidamente, asegurando el adecuado ritmo de preparación de patios de perforación para asegurar la secuencia de extracción programada. Sin embargo, existen experiencia donde se utiliza el sistema bulldozer – pala cable para cargar estos materiales. El bulldozer genera montones ordenados de material para luego ser cargado con la pala que esté en el sector con movimientos puntuales para cargar éstos, disminuyendo la ineficiencia asociada al carguío de estos materiales. En términos económicos, considerando que el costo unitario del uso de bulldozer es de 0.15 US\$/t, el sistema pala – bulldozer es equivalente a un costo unitario de 0,40 US\$/t (P&H 4100) o 0.55 US\$/t (P&H 2800), marcando una diferencia importante con el costo del uso del cargador frontal de 1.32 US\$/t.

Lo último propuesto es una propuesta para evaluar, manteniéndose el uso de cargador para estos trabajos. Por tanto, es importante mantener como mínimo un cargador frontal para abordar estos casos.

## 9. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

Después de los respectivos análisis, es importante determinar cómo implementar las acciones propuestas. En este caso, afortunadamente se cuenta con una base de datos robusta y una buena reportabilidad. Lo que falta son las instancias de análisis de resultados y enfocar la reportabilidad en medir los parámetros propuestos en este estudio (capítulo 5).

En función de lo anterior y en pos de generar instancias de mejoramiento continuo, se proponen las siguientes actividades a implementar:

- 1) Dentro de la reportabilidad actual, generar un apartado que contenga los árboles de valor propuestos en este estudio (capítulo 5) para cada flota de equipos de carguío y transporte.
- 2) Coordinar una instancia diaria de reunión entre las áreas de operaciones y planificación mina para revisar los resultados obtenidos, identificar donde están las mermas y generar acciones para contrarrestarlas en conjunto.
- 3) Esta reunión debe realizarse lo más temprano posible, para que las acciones acordadas se puedan comenzar a ejecutar comenzando el turno. Se propone el horario de 7:30 a 8:00 AM, después de terminar las actividades de cambio de turno.
- 4) Las acciones acordadas deben traducirse en compromisos con fecha de ejecución y persona responsable individualizada, quien hará las gestiones necesarias para desarrollar las actividades comprometidas
- 5) Deben estar presentes en la reunión las siguientes personas:
  - 1) Superintendente de Planificación de la Producción
  - 2) Superintendente de operaciones Mina
  - 3) Planificador Corto Plazo Mina
  - 4) Jefe de Operaciones Mina
  - 5) Jefe de Servicios Mina

Este sería el esquema requerido, donde los superintendentes de cada área son importantes para validar los compromisos acordados. El esquema propuesto es simple, para centrar la reunión en este tema y no pasarse del tiempo programado.

- 6) El planificador Corto Plazo Mina mediará la reunión y llevará una minuta, que debe compartir diariamente por correo con los participantes de la reunión, donde se detallarán los compromisos acordados con nombre y fecha de ejecución. Durante el día debe hacer seguimiento a las actividades acordadas.
- 7) Diariamente se debe revisar el cumplimiento de las actividades comprometidas al inicio de cada reunión.

Esta rutina diaria con foco en el desempeño diario de los equipos de carguío y transporte permite identificar y trabajar los parámetros que impactan negativamente en el desempeño de los equipos.

A esta rutina debiese agregarse otra mensual, donde se revisen los parámetros de desempeño – rendimiento específicamente – y se acuerden entre el área de planificación y operaciones los rendimientos de las flotas de equipos de carguío a programar, sustentando el análisis en la data real y en los objetivos del plan de presupuesto. De esta reunión debiesen salir como producto los parámetros para la planificación mensual y de proyección anual que debe considerar como base el planificador.

Estos ejercicios de análisis permiten generar acciones de mejora continua, con fechas y compromisos claros, y parámetros consensuados entre las áreas de operación y planificación, consenso basado en el análisis de datos como fuente de información.

## 10. CONCLUSIÓN

En base a los datos del periodo en análisis (01 de agosto de 2021 y el 31 de julio de 2022), se ha determinado que el rendimiento de las palas P&H 4100 a considerar para la planificación es de 4,800 tph. En el caso de las palas P&H 2800, el rendimiento a considerar es de 3,200 tph.

La capacidad total de carguío de la flota es de 109.6 Mt y la total de transporte es de 99.7 Mt, por lo que se concluye que el proceso de transporte es el que limita la capacidad global de carguío y transporte.

La capacidad de las palas de cable (P&H 4100 + P&H 2800) suman 101.2 Mt, lo que indica que son suficientes para cubrir el requerimiento de transporte sin la necesidad de usar los cargadores frontales.

Del análisis de costos unitarios, se obtiene que el costo de las palas P&H 4100 es de 0.25 US\$/t, de las palas P&H 2800 de 0.40 US\$/t, y de los cargadores frontales de 1.32 US\$/t.

De las conclusiones anteriores se recomienda programar favoreciendo el desarrollo de la mina priorizando el uso de las palas P&H 4100, luego de las P&H 2800 y por último los cargadores frontales. Considerar estos últimos para tareas como dar continuidad a la alimentación a chancado primario o para la preparación de patios de perforación. Se recomienda no programar estos equipos en el desarrollo de frentes de explotación, priorizando siempre el uso de palas cables.

Para el desarrollo de este estudio, se ha generado un mecanismo de estimación de los costos unitarios para las distintas flotas de carguío y transporte. Se recomienda registrar los costos clasificados por las distintas flotas, ya que es un indicador importante a la hora de generar acciones de mejoramiento del proceso. Esto también es importante para las otras operaciones unitarias, como perforación y tronadura, por ejemplo.

Buscando minimizar el uso de los cargadores frontales, se recomienda explorar el uso de bulldozer y pala cable para la limpieza de patios de perforación y remates de banco. En términos de costo unitario, considerando que el costo unitario del uso de bulldozer es de 0.15 US\$/t, el sistema pala – bulldozer es equivalente a un costo unitario de 0,40 US\$/t (P&H 4100) o 0.55 US\$/t (P&H 2800), marcando una diferencia importante con el costo del uso del cargador frontal de 1.32 US\$/t.

Por último, buscando generar prácticas de gestión que materialicen lo anterior, se propone generar reuniones diarias de análisis de datos, discretizando el rendimiento global en los parámetros determinados en esta tesis (capítulo 5) con un esquema tipo árbol de valor. De esta manera, se puede identificar cuales parámetros se cumplen y cuales no, generando planes de trabajo enfocados en los parámetros cuyos valores no se cumplen. Esta rutina permite ganar eficiencia en el uso de los recursos ya que, gracias al análisis de datos, se conoce específicamente donde se deben enfocar las acciones de mejora, y también hacer seguimiento a éstas diariamente. De esta forma se enfocan los esfuerzos donde corresponde, buscando una mejora continua y eficaz del proceso de carguío y transporte.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- 1) GONZÁLEZ, V. 2018. Modelo evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en Compañía Doña Inés de Collahuasi. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- 2) QUIROGA, P. 2016. Diseño de herramienta computacional para control de KPI de operadores de carguío y transporte – Mina los Bronces. . Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- 3) ORTIZ, M. 2018. Modelo de mejoramiento del negocio en Teck QB. Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial.
- 4) VALENZUELA, C. 2018. Diseño de un programa de competitividad y costos para Minera Centinela. Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial.