



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

**MODELO EVALUATIVO PARA EL CÁLCULO DE FLOTA DE EQUIPOS DE
CARGUÍO Y TRANSPORTE EN COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE
COLLAHUASI**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

VALERIA PAZ GONZÁLEZ VARGAS

PROFESOR GUÍA
JUAN MONTES ABALLAY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
JORGE PALMA VILLAGRÁN
FABIÁN MANRÍQUEZ LEÓN

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: VALERIA PAZ GONZÁLEZ VARGAS
FECHA: ABRIL 2018
PROF. GUÍA: JUAN MONTES ABALLAY**

MODELO EVALUATIVO PARA EL CÁLCULO DE FLOTA DE EQUIPOS DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

En la gran minería, uno de los mayores desafíos son las oportunidades de mejora en operación y planificación, pues presentan un gran ahorro para la compañía.

El estudio realizado en esta memoria se lleva a cabo en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, ubicada en la comuna de Pica, región de Tarapacá. En él se planteó el desarrollo de un modelo de cálculo de equipos de carguío y transporte. El primero, para determinar si con la capacidad de carguío disponible se lograban los planes de corto plazo con una buena adherencia e inclusive, para modificar la asignación de palas a las fases, para ir en busca de lo anterior. El segundo, para determinar la cantidad de camiones que requería el movimiento de dichos tonelajes, como información retroactiva al plan mensual.

Se obtuvo que para el modelo de cálculo de equipos de carguío de asignación manual el tonelaje alcanzado era de 94.7% con respecto al reportado, con una variación en el tonelaje no mayor a 10% por fase. En cuanto al modelo de carguío de asignación automática posee un tonelaje de 102.4% con respecto al planificado, con un límite de cumplimiento inferior de 95% y superior de 118% en todas las fases. Cabe mencionar que estos modelos se diferencian entre sí en el enfoque que poseen: el primero busca verificar una capacidad de carguío dada una asignación de palas, mientras que el segundo pretende generar una asignación óptima en base a la adherencia del tonelaje de las fases y total.

Con respecto al modelo de cálculo de camiones, se obtuvo una variación en la cantidad de estos (considerando el tonelaje proveniente del modelo de carguío manual) al ser comparados con los asignados por despacho de -9.0%. Posteriormente, se toma esta cantidad como base para calcular los camiones asignados por el modelo automático, obteniéndose una disminución en la flota hasta lograrse un -4.8%. A pesar de que estas cantidades generan una variación no menor en la cantidad de camiones por fase, se considera que el modelo fue capaz de cumplir los objetivos establecidos utilizando las herramientas disponibles y tomando en cuenta la cantidad de variables que influyen en él.

Por último, se plantea que con una precisión mayor al 90% en todos los modelos generados, estos servirán como apoyo para el usuario en su labor diaria, pero deben ser usados de manera criteriosa por parte de este.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF MINING ENGINEER
BY: VALERIA PAZ GONZÁLEZ VARGAS
DATE: APRIL 2018
THESIS ADVISOR: JUAN MONTES ABALLAY**

EVALUATIVE MODEL FOR THE CALCULATION OF LOADING AND HAULAGE EQUIPMENT IN DOÑA INÉS DE COLLAHUASI MINING COMPANY

In large-scale mining, one of the greatest challenges is the opportunity for improvement in operation and planning, since they represent a great saving for the company.

The study was carried out at Doña Inés de Collahuasi Mining Company, located in Pica, region of Tarapacá. In it, the development of a model for calculating loading and haulage equipment has been made. The first one, was made to determine if, with the available loading capacity, short-term plans can be achieved with good adherence. Even the allocation of shovels to phases could be modified, looking for more adherence. The second one, was made to determine the quantity of trucks that was required to achieve the tonnage in certain stages and as retroactive information to the monthly plan.

It was obtained that for the model of loading equipment for manual assignment, the tonnage reached was 94.7% compared to the reported one, with a variation in tonnage not greater than 10% per phase. Respecting to the automatic allocation loading model, it has a tonnage of 102.4% compared to the planned one, with an achieving minimum limit of 95% and maximum limit of 118% in all phases. It should be mentioned that these models differ in their approach: the first one aims to verify a loading capacity given a shovel allocation, while the second one seeks to generate an optimal allocation based on the adherence of the tonnage of the phases and total.

Respecting to the truck calculation model, a variation in the quantity of these was obtained (considering the tonnage coming from the manual loading model) when compared with those assigned by dispatch of -9.0%. Subsequently, this amount is taken as a basis to calculate the trucks assigned by the automatic model, obtaining a decrease in the fleet of -4.8%. Although these quantities generate a considerable variation in the number of trucks per phase, it is considered that the model achieved the established objectives using the available tools and taking into account the number of variables that influence it.

Finally, it is stated that with a precision of more than 90% in all the models generated, these will serve as support for the user in their daily work, but they should be used in a judicious manner by him.

Agradecimientos

Primero que todo, quisiera agradecer a mi familia. Ellos son lo más importante en mi vida y en particular los que me aguantan. A mi madre por su amor incondicional, locuras y rigidez en los estudios. A Carolina por sus consejos de vida, aunque a veces no me gusten. A Marcela por la sencillez con que ve la vida. Y a mi padre por su paciencia... Infinita paciencia.

Dentro de las personas que también considero mi familia, quisiera agradecer a la Olivia, por ser la figura materna que a veces me falta en casa y la persona que hace mis días más agradables; y a Luis Felipe, por su perseverancia infinita y lecciones que me ayudan a ser una mejor persona.

También quisiera agradecer a mis amigos de la universidad Ada, Jose, Giselle, Jo, Dani y Esteban por todas las risas y reflexiones de vida con las que pasamos tantas juntas.

Además, agradezco a los profesores integrantes de la comisión por su ayuda y consejos durante el desarrollo de esta memoria.

Por último, pero no menos importante, quisiera agradecer a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, por la oportunidad de realizar mi memoria. En particular, quisiera agradecer a todos los personajes de la Superintendencia de Planificación Corto Plazo y de Despacho, por la buena onda, la ayuda de G. Muñoz y los “dichos” de cierta persona parecida a Rey León. Muchas gracias, muchachos, sin ustedes este trabajo de título probablemente no sería posible.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2	OBJETIVOS	4
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3	ALCANCES	5
1.4	METODOLOGÍA	6
1.5	ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	8
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	PROCESO MINERO	9
2.2	PLANIFICACIÓN MINERA	12
2.2.1	TIPOS DE PLANIFICACIÓN SEGÚN NIVEL DE GESTIÓN	12
2.2.1.1	Planificación Estratégica	12
2.2.1.2	Planificación Táctica o Conceptual	12
2.2.1.3	Planificación Operativa	12
2.2.2	TIPOS DE PLANIFICACIÓN SEGÚN HORIZONTE DE EVALUACIÓN	13
2.2.2.1	Planificación de Largo Plazo	13
2.2.2.2	Planificación de Mediano Plazo	13
2.2.2.3	Planificación de Corto Plazo	13
2.2.3	RELACIÓN ENTRE TIPOS DE PLANIFICACIÓN POR NIVELES DE GESTIÓN Y POR HORIZONTES DE EVALUACIÓN	13
2.3	MODELOS PARA SELECCIÓN DE EQUIPOS MINEROS	16
2.3.1	MODELOS DE SELECCIÓN DE EQUIPOS	17
2.3.1.1	Métodos Heurísticos	17
2.3.1.2	Programación de Números Enteros (Integer Programming)	17
2.3.1.3	Inteligencia Artificial	20
2.3.2	MODELOS DE PRODUCTIVIDAD PALA – CAMIÓN	22
2.3.2.1	Teoría del Factor de Acoplamiento (<i>Match Factor</i>)	22
2.3.2.2	Teoría de Colas	23
2.3.2.3	Teoría de la Agrupación (<i>Bunching Theory</i>)	26
2.3.3	DISCUSIÓN ACERCA DE LOS MODELOS DE SELECCIÓN DE EQUIPOS	27
2.4	FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CAMIONES	28
3	MARCO TEÓRICO	29
3.1	OPERACIONES UNITARIAS DEL PROCESO MINERO	29
3.2	TIEMPO DE CICLO	31
3.3	NORMA ASARCO E INDICADORES OPERACIONALES	32
3.3.1	DEFINICIÓN DE TIEMPOS PARA NORMA ASARCO	33
3.3.2	DEFINICIÓN DE INDICADORES OPERACIONALES	34
3.4	SISTEMA DE DESPACHO DISPATCH®	37
3.4.1	OPERACIÓN DEL SISTEMA	37
3.4.2	DISPATCH® COMO UNA HERRAMIENTA DE PRODUCTIVIDAD	37
3.4.3	ALGORITMO DEL SISTEMA DISPATCH®	38
3.4.4	FACTOR DE ASIGNACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL	38

3.5	SOFTWARE VULCAN® Y HERRAMIENTA HAULAGE PROFILE®	40
4	<u>ANTECEDENTES</u>	41
4.1	MINERÍA CHILENA DEL COBRE	41
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA FAENA	45
4.2.1	ANTECEDENTES GENERALES DE LA FAENA.....	45
4.2.2	GEOLOGÍA.....	49
4.2.3	PROCESO DE EXPLOTACIÓN ACTUAL.....	52
4.2.4	PROCESAMIENTO DE MINERALES.....	55
4.2.5	CADENA DE VALOR DE LA COMPAÑÍA.....	57
4.3	PLAN MENSUAL DE PRODUCCIÓN	59
5	<u>DESARROLLO DEL MODELO DE CÁLCULO DE EQUIPOS DE CARGUÍO</u>	60
5.1	ANÁLISIS DE DATOS DE INDICADORES OPERACIONALES DE EQUIPOS DE CARGUÍO	60
5.1.1	RENDIMIENTO OPERATIVO.....	61
5.1.1.1	Palas Modelo HR.....	62
5.1.1.2	Palas Modelo P&H.....	63
5.1.1.3	Palas Modelo PC.....	63
5.1.1.4	Cargadores Frontales.....	64
5.1.2	UTILIZACIÓN OPERATIVA.....	65
5.2	DESARROLLO DE MODELOS DE CÁLCULO DE EQUIPOS DE CARGUÍO	67
5.2.1	MODELO DE ASIGNACIÓN MANUAL DE EQUIPOS DE CARGUÍO.....	67
5.2.1.1	Parámetros de Entrada.....	68
5.2.1.2	Resultados del Modelo.....	68
5.2.1.3	Uso del Modelo.....	68
5.2.2	MODELO DE ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE EQUIPOS DE CARGUÍO.....	69
5.2.2.1	Conjuntos.....	70
5.2.2.2	Parámetros de Entrada.....	70
5.2.2.3	Variables del Modelo.....	71
5.2.2.4	Parámetros de Salida del Problema de Optimización.....	71
5.2.2.5	Formulación del Problema de Optimización.....	73
5.3	MODELO DE CÁLCULO DE EQUIPOS DE TRANSPORTE	74
5.3.1	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE CICLO DE CAMIONES.....	75
5.3.2	COMBINACIONES DE MATCHS PALA – CAMIÓN.....	75
5.3.3	APLICACIÓN DE FILTROS.....	77
5.3.3.1	Tiempos de Aculatamiento y Carguío por la Pala o Cargador Frontal.....	77
5.3.3.2	Tiempos de Descarga + Inactividad.....	79
5.3.3.3	Tiempo de Cola.....	81
5.3.3.4	Demoras No Programadas.....	82
5.3.4	GENERACIÓN DEL MATCH PALA – CAMIÓN.....	83
5.3.5	INCORPORACIÓN DE LOS TIEMPOS DE MATCH PALA – CAMIÓN A HAULAGE PROFILE.....	84
5.3.6	DESARROLLO DEL MODELO DE CÁLCULO DE CAMIONES.....	87
6	<u>RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL MODELO</u>	92
6.1	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL MODELO DE ASIGNACIÓN MANUAL DE EQUIPOS DE CARGUÍO	92
6.2	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL MODELO DE ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE EQUIPOS DE CARGUÍO	101

6.3	COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES OPERACIONALES MODELADOS CON LOS REPORTADOS EN EL RESUMEN EJECUTIVO.....	103
6.4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL MODELO DE CÁLCULO DE EQUIPOS DE TRANSPORTE	105
7	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u>	<u>107</u>
7.1	CONCLUSIONES DEL MODELO DE CÁLCULO DE EQUIPOS DE CARGUÍO.....	107
7.1.1	RECOMENDACIONES.....	110
7.2	CONCLUSIONES DEL MODELO DE CÁLCULO DE EQUIPOS DE TRANSPORTE.....	111
7.2.1	RECOMENDACIONES.....	112
8	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>113</u>
9	<u>ANEXOS.....</u>	<u>116</u>
9.1	DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS ASARCO PARA EQUIPOS DE CARGUÍO Y TRANSPORTE.....	116
9.2	TIEMPOS DE ACULATAMIENTO MÁS CARGUÍO	118
9.2.1	CRITERIOS DE FILTRO DE TIEMPOS DE ACULATAMIENTO Y CARGUÍO	118
9.2.2	CAMIÓN KMS – PALA P&H.....	119
9.2.3	CAMIÓN KMS – PALA HR.....	120
9.2.4	CAMIÓN KMS – PALA PC.....	121
9.2.5	CAMIÓN LBH – PALA P&H.....	122
9.2.6	CAMIÓN LBH – PALA HR.....	123
9.2.7	RESULTADOS TIEMPOS DE ACULATAMIENTO MÁS CARGUÍO.....	124
9.3	TIEMPOS DE DESCARGA + INACTIVIDAD.....	125
9.3.1	CRITERIOS DE FILTRO DE TIEMPOS DE DESCARGA E INACTIVIDAD.....	125
9.3.2	CAMIÓN KMS - PALA P&H, LOCACIÓN CHANCADO ROSARIO	125
9.3.3	CAMIONES KMS Y LBH – PALA P&H, LOCACIÓN BOTADERO.....	126
9.3.4	CAMIÓN KMS – PALA P&H, LOCACIÓN STOCK.....	127
9.3.5	CAMIÓN KMS – PALA HR, LOCACIÓN CHANCADO ROSARIO.....	128
9.3.6	CAMIÓN KMS – PALA HR, LOCACIÓN BOTADERO.....	129
9.3.7	CAMIÓN KMS – PALA HR, LOCACIÓN STOCK	130
9.3.8	CAMIÓN LBH – PALA HR, LOCACIÓN BOTADERO	131
9.3.9	CAMIÓN KMS – PALA PC, LOCACIÓN CHANCADO ROSARIO	132
9.3.10	CAMIÓN KMS – PALA PC, LOCACIÓN STOCK	133
9.3.11	RESULTADOS TIEMPOS DE DESCARGA MÁS INACTIVIDAD.....	134
9.4	TIEMPO DE COLA.....	136
9.4.1	CRITERIOS DE FILTRO DE TIEMPOS DE COLA.....	136
9.4.2	RESULTADOS TIEMPOS DE COLA	137
9.5	DEMORAS NO PROGRAMADAS.....	138
9.5.1	CRITERIOS DE FILTRO DE DEMORAS NO PROGRAMADAS	138
9.5.2	RESULTADOS TIEMPOS DE DEMORAS NO PROGRAMADAS.....	139
9.6	PORCENTAJE DEL MES QUE EL EQUIPO DE CARGUÍO ESTUVO EN CADA FASE	140

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1 Factor de Acoplamiento	22
Ecuación 3.1 Tiempo de Ciclo.....	31
Ecuación 3.2 Cumplimiento del tonelaje movido vs planeado	34
Ecuación 3.3 Cumplimiento del tonelaje movido por fase vs planeado	34
Ecuación 3.4 Cumplimiento de remanejos vs planeado	34
Ecuación 3.5 Disponibilidad Física.....	35
Ecuación 3.6 Utilización Operativa	35
Ecuación 3.7 Rendimiento Operativo	35
Ecuación 3.8 Producción del Equipo de Carguío.....	36
Ecuación 3.9 Capacidad Equivalente de Camiones	36
Ecuación 3.10 Rendimiento de Camiones.....	36
Ecuación 3.11 Flota de Camiones.....	36
Ecuación 5.1 Variable de decisión $X_{p,f}$	71
Ecuación 5.2 Variable $P_{f,g}$	71
Ecuación 5.3 Producción real alcanzada	72
Ecuación 5.4 Producción real alcanzada para f igual a g	72
Ecuación 5.5 Producción real alcanzada para f distinto de g	72
Ecuación 5.6 Función Objetivo.....	73
Ecuación 5.7 Primera Restricción.....	73
Ecuación 5.8 Segunda Restricción.....	73
Ecuación 5.9 Tercera Restricción	73

Índice de Figuras

Figura 2.1 Etapas del Proceso Minero. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 2.2 Pirámide de información. Fuente: Apuntes de Gestión de Evaluaciones Mineras, 2015.	14
Figura 2.3 Pirámide de obtención de datos. Fuente: Apuntes de Gestión de Evaluaciones Mineras, 2015.	15
Figura 2.4 Distribución de la literatura y técnicas aplicadas para la selección de equipos. Fuente: Burt, 2008.	16
Figura 2.5 Heurística de selección de equipos. Fuente: Burt, 2008.	17
Figura 2.6 Sistema de Colas Básico. Fuente: Monoforms.com	24
Figura 2.7 Representación esquemática de una operación pala – camión. Fuente: Carmichael, 2006.	24
Figura 3.1 Operaciones Unitarias del Proceso Minero. Fuente: CMDIC, 2013.	30
Figura 3.2 Factores de Asignación y Priorización de la Programación Lineal y Prioridad de Palas. Fuente: Curso de Despacho.	39
Figura 4.1 Mapa de la Gran Minería. Fuente: Consejo Minero de Chile	43
Figura 4.2 Ubicación general de faena Collahuasi. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.	45
Figura 4.3 Instalaciones en Área Cordillera (Rajo Rosario). Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.	46
Figura 4.4 Instalaciones en Área Cordillera (Ujina). Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.	47
Figura 4.5 Instalaciones en Área Terminal Marítimo. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.	48
Figura 4.6 Geología Regional de Quebrada Blanca - Distrito Collahuasi. Fuente: Compilado de Vergara 1975, Vergara y Sato 1976, Junt et al. 1980, Vergara y Thomas 1984, Martini 1984, Davidson 1992.	51
Figura 4.7 Esquema de Orígenes y Destinos considerados en el Modelo. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 4.8 Proceso Productivo Simplificado Collahuasi. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.	55
Figura 4.9 Flowsheet Detallado de la Etapa de Molienda. Fuente: Martínez, 2016.	56
Figura 4.10 División Administrativa de CMDIC. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2017.	57
Figura 4.11 Organigrama Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 5.1 Esquema Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 5.2 Esquema Modelo de Asignación Automática de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 5.3 Combinaciones posibles consideradas para calcular Matches Pala – Camión. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 5.4 Definición de Rutas en Haulage Profile. Fuente: Haulage Profile.	85
Figura 5.5 Datos de Salidas de Haulage Profile. Fuente: Haulage Profile.	86
Figura 5.6 Esquema del Modelo de Cálculo de Camiones. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 5.7 Alternativas de ingreso y salida a Fase 09. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura 5.8 Esquema de Entradas al Modelo de Cálculo de Camiones. Fuente: Elaboración propia.	90

Índice de Gráficos

Gráfico 2.1 Factor de Acoplamiento. Fuente: Burt, 2013.	22
Gráfico 4.1 Producción de cobre 2006 - 2015, millones de toneladas. Fuente: SERNAGEOMIN.	42
Gráfico 5.1 Rendimientos Operativos Palas HR. Fuente: Elaboración propia.	62
Gráfico 5.2 Rendimientos Operativos Palas P&H. Fuente: Elaboración propia.	63
Gráfico 5.3 Rendimientos Operativos Palas PC. Fuente: Elaboración propia.	64
Gráfico 5.4 Rendimientos Operativos Cargadores Frontales. Fuente: Elaboración propia.	64
Gráfico 5.5 Utilización Operativa Palas HR. Fuente: Elaboración propia.	65
Gráfico 5.6 Utilización Operativa Palas P&H. Fuente: Elaboración propia.	65
Gráfico 5.7 Utilización Operativa Palas PC. Fuente: Elaboración propia.	66
Gráfico 5.8 Utilización Operativa Cargadores Frontales. Fuente: Elaboración propia.	66
Gráfico 5.9 Histogramas de Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Match Camión KMS - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.	79

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Norma ASARCO. Fuente: Bonzi, 2016.	32
Tabla 3.2 Norma ASARCO para CMDIC. Fuente: Índices Operacionales, CMDIC	32
Tabla 4.1 Valores de embarques de exportación (millones US\$ FOB), años 2011- 2015. Fuente: Banco Central de Chile.	41
Tabla 4.2 Indicadores Económicos del Cobre, años 2006-2015. Fuente: (1) SERNAGEOMIN - (2) COCHILCO.	41
Tabla 4.3 Producción Acumulada a junio de 2016 de las Principales Operaciones Mineras Chilenas. Representatividad de la muestra: 89.0%. Fuente: SERNAGEOMIN, 2015.	44
Tabla 4.4 Coordenadas UTM de la faena Collahuasi. Huso 19 Sur. Datum: WGS 84. Fuente: Google Earth, 2018.	49
Tabla 4.5 Resumen Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 4.6 Resumen Equipos de Transporte. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 4.7 Resumen Locaciones de Origen. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 4.8 Resumen Locaciones de Destino. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 4.9 Resumen Tipos de Material. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 5.1 Indicadores Operacionales Históricos de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.	61
Tabla 5.2 Combinaciones de Match para Tiempos de Acuatamiento y Carguío. Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 5.3 Resultados Tiempos de Acuatamiento + Carguío. Fuente: Elaboración propia.	78
Tabla 5.4 Histogramas de Tiempo de Acuatamiento + Carguío, Match Camión KMS - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 5.5 Combinaciones de Match para Tiempos de Descarga e Inactividad. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 5.6 Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 5.7 Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala HR. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 5.8 Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala PC. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 5.9 Resultados Tiempos de Cola. Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 5.10 Resultados Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 5.11 Match Pala - Camión Mineral. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 5.12 Match Pala - Camión Stocks. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 5.13 Match Pala - Camión Estéril. Fuente: Elaboración propia.	84
Tabla 6.1 Resultados del Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío. Disponibilidad Física Real. Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 6.2 Comparación de los Tonelajes Modelados con DF Real. Fuente: (1) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017, (2)Elaboración propia.	94
Tabla 6.3 Resultados del Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío. Disponibilidad Física Planificada. Fuente: Elaboración propia.	96
Tabla 6.4 Comparación de los Tonelajes Modelados con DF Planificada. Fuente: (1) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017, (2) Elaboración propia.	97
Tabla 6.5 Comparación entre DF Real y Planificada. Fuente: Resumen Ejecutivo CMDIC agosto de 2017.	97
Tabla 6.6 Variación en los Tonelajes Modelados por Fase. Fuente: Elaboración propia.	98
Tabla 6.7 Resultados del Modelo de Asignación Automática de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.	101
Tabla 6.8 Comparación de los Tonelajes Modelados con el Reportado. Fuente: (1) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017, (2) Elaboración propia.	102

Tabla 6.9 Comparación entre Utilizaciones Modeladas y Reales. Fuente: (1) Elaboración propia, (2) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017.	103
Tabla 6.10 Comparación entre Rendimientos Modelados y Reales. Fuente: (1) Elaboración propia, (2) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017.	104
Tabla 6.11 Comparación de los Camiones Modelados Manualmente con los asignados por el Sistema de Despacho. Fuente: (1) Elaboración propia, (2) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017.	105
Tabla 6.12 Comparación en los Camiones Asignados por el Modelo de Asignación Automática y el Manual. Fuente: Elaboración propia.	106
Tabla 6.13 Comparación en los Tonelajes Calculados por el Modelo de Asignación Automática y el Manual. Fuente: Elaboración propia.	106

Anexos

Anexo 1 Distribución de Tiempos ASARCO para Camiones. Fuente: CMDIC, 2017.	116
Anexo 2 Distribución de Tiempos ASARCO para Palas. Fuente: CMDIC, 2017.	116
Anexo 3 Distribución de Tiempos ASARCO para Cargadores Frontales. Fuente: CMDIC, 2017.	117
Anexo 4 Detalle Criterio de Filtro de Tiempos de Acuatamiento y Carguío. Fuente: Elaboración propia.	118
Anexo 5 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión KMS - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.	119
Anexo 6 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión KMS - Pala HR. Fuente: Elaboración propia.	120
Anexo 7 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión KMS - Pala PC. Fuente: Elaboración propia.	121
Anexo 8 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión LBH - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.	122
Anexo 9 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión LBH - Pala HR. Fuente: Elaboración propia.	123
Anexo 10 Detalle Resultados Tiempos de Acuatamiento + Carguío. Fuente: Elaboración propia.	124
Anexo 11 Detalle Criterio de Filtro de Tiempos de Descarga + Inactividad. Fuente: Elaboración propia.	125
Anexo 12 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala P&H, Locación Chancado Rosario. Fuente: Elaboración propia.	125
Anexo 13 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS y LBH - Pala P&H, Locación Botadero. Fuente: Elaboración propia.	126
Anexo 14 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala P&H, Locación Stock. Fuente: Elaboración propia.	127
Anexo 15 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala HR, Locación Chancado Rosario. Fuente: Elaboración propia.	128
Anexo 16 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala HR, Locación Botadero. Fuente: Elaboración propia.	129
Anexo 17 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala HR, Locación Stock. Fuente: Elaboración propia.	130
Anexo 18 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión LBH - Pala HR, Locación Botadero. Fuente: Elaboración propia.	131
Anexo 19 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala PC, Locación Chancado Rosario. Fuente: Elaboración propia.	132
Anexo 20 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala PC, Locación Stock. Fuente: Elaboración propia.	133
Anexo 21 Detalle Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.	134
Anexo 22 Detalle Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala HR. Fuente: Elaboración propia.	134
Anexo 23 Detalle Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala PC. Fuente: Elaboración propia.	135
Anexo 24 Detalle Criterios de Filtros Tiempo de Cola. Fuente: Elaboración propia.	136
Anexo 25 Tiempos de Cola. Fuente: Elaboración propia.	136
Anexo 26 Tiempos de Cola, continuación. Fuente: Elaboración propia.	137
Anexo 27 Detalle Resultados Tiempos de Cola. Fuente: Elaboración propia.	137
Anexo 28 Detalle Criterios de Filtros de Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.	138
Anexo 29 Tiempo de Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.	138
Anexo 30 Tiempo de Demoras No Programadas, continuación. Fuente: Elaboración propia.	139
Anexo 31 Detalle Resultados Tiempos de Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.	139

Anexo 32 Porcentaje del mes que el Equipo de Carguío estuvo en cada Fase. Valores en porcentaje del tiempo nominal. Fuente: Elaboración propia.

140

1 Introducción

La minería es una actividad económica del sector primario representada por la explotación o extracción de los minerales (metálicos y no metálicos) que se han acumulado en el suelo y subsuelo en forma de yacimientos.

Dependiendo del tipo de mineral a extraer la actividad se divide como sigue:

- Minería metálica: extracción de cobre, oro, plata, aluminio, plomo, hierro, mercurio, entre otros. Estos materiales son empleados como materias primas básicas para la fabricación de productos industriales.
- Minería no metálica, también denominada de cantera y construcción: extracción de arcilla, cuarzo, zafiro, esmeralda, granito, mármol, mica, entre otros. Estos materiales son utilizados en construcción, materia prima de joyería y ornamentación, y generación de productos industriales.
- Extracción de minerales energéticos o combustibles: empleados principalmente para generar energía, como por ejemplo petróleo, gas natural y carbón.

Por otro lado, según Morales (2009), la planificación minera surge como necesidad de presentar a la administración de un proyecto minero documentos bancables que se requieren para conseguir financiamiento y justificar inversiones. Esta se realiza previo a la obtención de la concesión de explotación y posterior a planes laborales anuales, los cuales permiten ejercer control por parte del directorio de la compañía y del Estado, el cual, en Chile, es dueño de las riquezas del subsuelo. En consecuencia, la planificación surge como el proceso de Ingeniería de Minas que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo, definiendo una promesa productiva alineada con los objetivos estratégicos de las empresas mineras e integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno.

La planificación minera se puede separar en tres grandes áreas según el horizonte de evaluación: largo, mediano y corto plazo. Todas se alinean con los objetivos estratégicos y se coordinan entre sí, pero debido a que poseen diferentes horizontes de tiempo, utilizan distintas herramientas según los niveles de detalle requerido (Jofré, 2012).

El presente documento hace referencia a los procesos de Planificación de Corto Plazo de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), una explotación a cielo abierto perteneciente a Anglo American, Glencore y Japan Collahuasi Resources B.V. Collahuasi es una compañía minera dedicada a la extracción de minerales y producción de concentrado de cobre y de molibdeno. A diciembre del año 2015, la Compañía es la tercera mayor operación de cobre en el mundo y uno de los mayores depósitos de recursos minerales de cobre del planeta, con 9,964 millones de toneladas.

En una operación a cielo abierto, la Planificación de Corto Plazo se encarga de dar una secuencia de extracción del mineral en períodos de tiempo que van desde el plan diario al anual¹, planificando y evaluando las metas establecidas por los Planes y Programas de Mediano y Largo Plazo, desde el punto de vista operacional y retroalimentando a las áreas de planificación ya mencionadas.

En función del plan minero se desarrolla esta memoria, la cual consta del desarrollo de un modelo para el cálculo de flota de equipos mineros de carguío y transporte requeridos para cumplir dicho plan. Para esto se considera data histórica de los indicadores operacionales correspondientes (disponibilidad física, utilización operativa y rendimiento) y el tonelaje requerido por el Plan de Producción Mensual realizado por la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo.

¹ Caso particular de CMDIC. En otras compañías el horizonte de tiempo puede abarcar desde el Plan Diario al Mensual.

1.1 Descripción del Problema

El cálculo y asignación de la flota de equipos de carguío y transporte en minería a cielo abierto es un proceso de planificación recursivo. Desde el punto de vista operacional, nuevos proyectos mineros, expansiones de éstos o fluctuaciones en el precio de los metales implican cambios en la demanda que se verán reflejados en variaciones de los planes mineros y, por consecuencia, modificaciones en la planificación del proceso de carguío y transporte de corto y mediano plazo. Esto genera un impacto en el tamaño de la flota de equipos de transporte.

Esta memoria se genera con motivo de estimar si la capacidad de carguío estipulada en el plan es alcanzable en la operación, pues está afecta a las condiciones de la mina y a indicadores operacionales relevantes, tales como la Disponibilidad Física, la Utilización Operativa y el Rendimiento Operativo. Además, se plantea como segundo objetivo el estimar la cantidad de camiones requeridos para transportar la capacidad de carguío que se logre.

Cabe mencionar que la flota de camiones, por tratarse de un resultado de un modelo teórico, debería estar optimizada, es decir, corresponde a la cantidad mínima de equipos de transporte necesarios para acarrear el material que puede ser cargado por las palas, motivo por el cual se podrían generar discrepancias con la flota que efectivamente utiliza la operación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo corresponde a proponer un modelo de cálculo de flota de equipos mineros de carguío y transporte (palas, cargadores frontales y camiones, respectivamente) con tal de asegurar el cumplimiento del Plan de Producción Mensual generado por la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

1.1.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo de título se enlistan a continuación:

1. Diseñar un modelo de cálculo de equipos de carguío que verifique si, con los equipos que se poseen y con los indicadores operacionales de cada uno de ellos (Utilización Operativa, Disponibilidad Física y Rendimiento Operativo), es posible cumplir el plan mensual y determinar el porcentaje de adherencia de dicho cumplimiento.
2. Diseñar un modelo de cálculo de equipos de carguío que asigne los equipos de manera óptima y automática, con el objetivo de maximizar la adherencia al plan.
3. Diseñar un modelo de cálculo de equipos de transporte necesarios por fase y por período que incorpore los indicadores operacionales antes nombrados.
4. Analizar datos históricos de los indicadores operacionales de equipos mineros de la faena en cuestión, puesto que son datos de entrada a la herramienta de cálculo.
5. Generar una base de datos de tiempos de ciclo de camiones en la cual se base el modelo de cálculo de estos. Dicha base se generará a partir de los resultados obtenidos por una aplicación del software minero Vulcan® denominada Haulage Profile®.

1.3 Alcances

En la presente investigación se resuelve el problema de dimensionamiento de flota de equipos de carguío y transporte, ambas flotas heterogéneas en cuanto al modelo; para los ciclos de transporte que se generan entre un equipo de carguío (palas o cargadores frontales) y uno de transporte (camiones). Para la resolución del problema se ocupa el software Vulcan con la herramienta Haulage Profile, la cual permite obtener los tiempos de ciclo y distancias de los diferentes pares origen – destino; mientras que para realizar el cálculo de equipos se utiliza el software Excel y su herramienta Solver para el modelo de cálculo de equipos de carguío optimizado.

Por otro lado, el trabajo presentado se enmarca en los siguientes límites de batería:

1. Planificación Minera de Corto Plazo para una mina a cielo abierto, orientada al cumplimiento del plan mensual.
2. El caso de estudio corresponde al yacimiento Rosario, ubicado en CMDIC.
3. Se analizarán exclusivamente las operaciones de Carguío y Transporte.
4. Para la flota de carguío se estudiarán las palas eléctricas, hidráulicas y cargadores frontales.
5. La flota de transporte se considera mixta, compuesta por 6 camiones Liebherr T282C y 86 camiones Komatsu 930E. Se considera que el primer modelo posee una carga efectiva de 300 toneladas, mientras que el segundo es de 340 toneladas. Parámetros como la capacidad de la tolva y capacidad nominal se consideran implícitos en los datos utilizados para el análisis. Por otro lado, se excluyen del análisis valores asociados a las especificaciones técnicas de los equipos.
6. La cantidad de equipos de carguío es fija y sólo se pueden modificar la Disponibilidad Física, Utilización Operativa y Rendimiento Operativo, con tal de cumplir un tonelaje por fase determinado en el Plan Mensual. En cuanto a los equipos de transporte, la cantidad debe corresponder al mínimo tal que se cumple el tonelaje calculado en el modelo de cálculo de carguío.
7. Para la elaboración del modelo inicial se utilizaron datos del Plan Mensual de agosto de 2017, tales como los tonelajes requeridos por fase y disponibilidades de equipos de carguío y transporte. Por otro lado, para la elaboración de los análisis históricos de indicadores operacionales de pala el periodo fue de junio a agosto de 2017 y para el análisis de los tiempos de ciclo de camiones se utilizó data de enero a agosto de 2017.
8. Los orígenes considerados son las fases de extracción de mineral y stocks de sulfuros; mientras que los destinos son chancado, stocks de sulfuros, botaderos y tranque.

1.4 Metodología

La metodología de investigación en base a la cual se basa el trabajo de título es la siguiente:

1. Primero, se realiza un análisis histórico de los indicadores operacionales de los equipos de carguío. En particular, de la Utilización Operativa y el Rendimiento Operativo. Esto con el fin de generar una base de datos de dichos indicadores, puesto que corresponden a entradas para el Modelo de Equipos de Carguío. La data utilizada pertenece al período ubicado entre junio y agosto de 2017.
2. Por otro lado, otros datos de entrada al Modelo de Equipos de Carguío corresponden a la Disponibilidad Física de dichos equipos, la cual se obtiene del Plan Mensual de Mantención de Palas; y el tonelaje que se debe cumplir por fase es determinado por el Plan Mensual de Producción de Corto Plazo.
3. Con estos datos se crea el Modelo de Equipos de Carguío de asignación manual, que permite calcular el porcentaje de adherencia al plan por fase, vale decir, cuánto tonelaje se puede cumplir comparado con el estipulado en el plan, para una determinada configuración de palas en las fases. Además, permite conocer el tonelaje máximo que se puede cargar con una configuración.
4. Posteriormente, se validan los indicadores operacionales utilizados en el modelo al compararlos con los datos reales reportados por la mina en el mes de agosto de 2017.
5. Utilizando los indicadores operacionales validados, se crea un modelo análogo al anterior pero de asignación automática, el cual responde a la solución de un problema de optimización lineal. El objetivo de este modelo es otorgar una configuración de equipos de carguío que asegure una buena adherencia al plan (respetando cierta tolerancia determinada por el usuario) y que sirva al usuario como recomendación para la asignación de equipos. Para realizarlo se utilizó la herramienta Solver de Excel.
6. En cuanto al modelo de equipos de transporte, primero se realiza un análisis de los tiempos pertenecientes al ciclo de transporte de los camiones, el cual considera la aplicación de filtros a la data bruta, que corresponde al período de enero a julio de 2017, con el fin de generar los match pala – camión.
7. Los datos de match pala – camión son entradas para la herramienta Haulage Profile del software minero Vulcan, la cual permite calcular las distancias y tiempos de ciclo que poseen los camiones al recorrer una ruta, al otorgársele también los perfiles de velocidad de los camiones en condición de cargado o vacío.

8. Con la información que brinda Haulage Profile se genera una base de datos con todas las rutas de la mina.
9. Considerando esto y el tonelaje que se puede cumplir a partir del modelo de carguío manual, distribuido de acuerdo al tipo de material especificado en el Plan Pivote, se genera el Modelo de Equipos de Transporte, que calcula la flota de camiones necesaria por fase.
10. Posteriormente, se valida la cantidad de camiones modelada con los asignados por el Sistema de Despacho el mes de agosto de 2017.
11. Por último, se procede a calcular los camiones a partir del tonelaje calculado en el modelo de carguío automático.
12. Cabe mencionar que los modelos de carguío y transporte se desarrollan con el software Excel y deben ser en gran porcentaje automatizados por requerimientos de la Compañía.

1.5 Organización del Trabajo

La organización del trabajo de título se describe a continuación:

- El Capítulo 2 corresponde a una revisión bibliográfica acerca del proceso minero en sí y de los tipos de planificación minera de acuerdo a nivel de gestión y horizonte de evaluación. Además, se incorpora una revisión de los distintos modelos que existen para la selección de equipos y de la productividad pala – camión, junto a un análisis crítico de los mismos.
- En el Capítulo 3 se presenta el marco teórico, en el cual se define la norma ASARCO utilizada por la Compañía en sus operaciones, además de los indicadores operacionales relevantes para el desarrollo del trabajo de título. Por último, también se definen los softwares utilizados en el estudio, que corresponden a Vulcan de Maptek® y el Sistema Dispatch de Modular Mining Systems®.
- En el Capítulo 4 se presentan los antecedentes de la minería chilena y de la Compañía. En particular, los últimos pretenden contextualizar acerca de la ubicación geográfica de CMDIC, sus instalaciones, procesos y área donde se realizó la memoria.
- El Capítulo 5 corresponde al desarrollo del modelo de cálculo de equipos en sí. La primera parte corresponde al modelo de cálculo de equipos de carguío, la cual consta de un análisis histórico de los indicadores operacionales que corresponden a parámetros de entrada al modelo. Cabe mencionar que el modelo está compuesto por dos versiones del mismo: la primera con asignaciones de equipos de carguío manuales y la segunda con asignaciones optimizadas y automáticas. La segunda parte del capítulo corresponde al desarrollo del modelo de cálculo de equipos de transporte y el desglose de cada uno de los pasos necesarios para desarrollar el modelo.
- En el Capítulo 6 se presentan los resultados y análisis de los dos modelos de cálculo de equipos de carguío y una comparación de cada modelo con los datos reales del mes de agosto de 2017. También se presentan los resultados y análisis del modelo de cálculo de transporte y su comparación con las asignaciones realizadas por el Sistema de Despacho.
- Por último, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones para los modelos de carguío y transporte.

2 Revisión Bibliográfica

En el siguiente apartado se presentan conceptos utilizados para el desarrollo del trabajo de título. La primera parte se refiere a la definición del proceso minero con las etapas que lo componen, incluyendo la etapa de desarrollo donde se genera la planificación minera. Posterior a esto se definen conceptos de planificación minera aplicables en la operación. Luego, se comenta y compara brevemente acerca de los modelos desarrollados para selección de equipos. Por último, se mencionan los factores que, según Marambio (2010), afectan la productividad de los camiones.

2.1 Proceso Minero

Según Newman *et. al* (2010), la minería es el proceso de extraer naturalmente ocurrencias de material desde la tierra hasta la superficie.

Según Peñailillo (2009), la actividad minera se compone de seis etapas principales: prospección, exploración, evaluación del proyecto, desarrollo y construcción, producción o explotación y cierre de faenas, como se muestra en Figura 2.1.

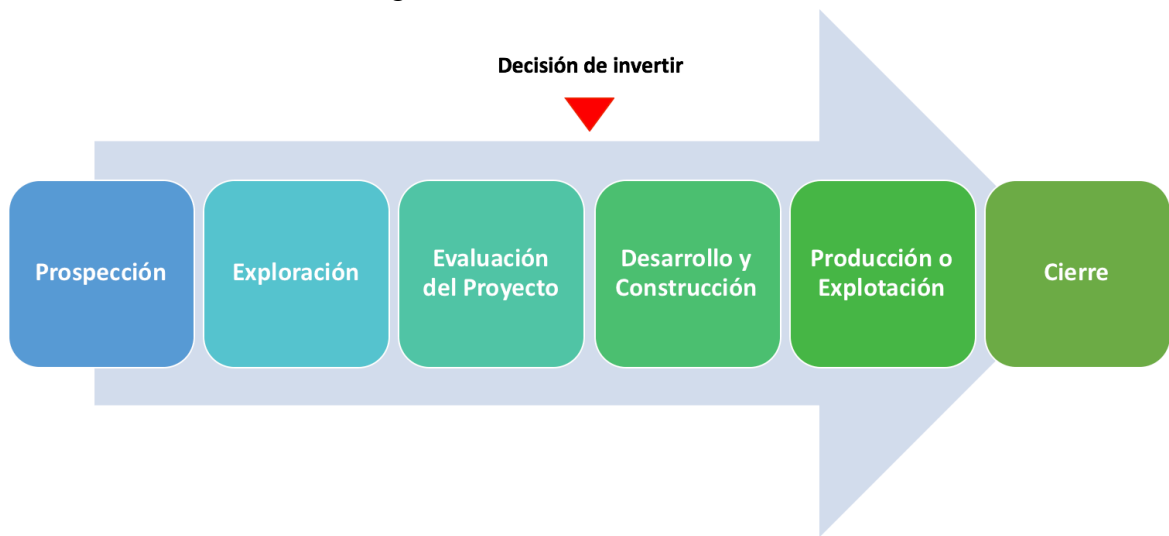


Figura 2.1 Etapas del Proceso Minero. Fuente: Elaboración propia.

La etapa de prospección se realiza para lograr un conocimiento general acerca de un área de interés geológico. Por tanto, busca localizar anomalías geológicas en la corteza terrestre, en donde posiblemente pueda existir un depósito mineral. Para esto se utilizan planos de geología regional, mapas y publicaciones de minas antiguas y recientes, planos geofísicos de superficie, fotografías aéreas e imágenes satelitales. En esta etapa se desconoce el tamaño y valor del depósito mineral.

La segunda etapa, correspondiente a la exploración, pretende lograr conocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la etapa anterior, esta vez limitándose a un área más restringida, pues lo que se busca es establecer las dimensiones exactas y el valor del depósito. En esta etapa se realiza el estudio de perfil donde deben cuantificarse los recursos mineros. La información necesaria para esto se recauda por medio de perforación de sondajes diamantinos y muestreos de túneles, zanjas y caminos; con tal de generar un modelo geológico y de recursos del depósito.

Por último, en esta etapa se realiza el estudio de prefactibilidad del proyecto, donde se plantean alternativas para la ejecución del proyecto y se evalúan los resultados técnico-económicos de ellas. Si son negativos se detiene el proceso; de lo contrario, se escoge una alternativa, el depósito toma el nombre de yacimiento y la compañía debe decidir si avanzar a la etapa siguiente.

La tercera etapa corresponde a la evaluación del proyecto. El objetivo es realizar un estudio de factibilidad, donde se desarrolla la opción escogida en el estudio de prefactibilidad y se demuestra la factibilidad técnica y económica de la alternativa.

En esta etapa se debe definir el tamaño de la mina y planta, seleccionar el método de explotación y procesamiento, estipular reservas, generar plan minero, determinar equipamiento, infraestructura, inversiones, costos de operación y comercialización, flujo de caja y rentabilidad del proyecto. Además, deben zanjarse los aspectos legales, sociales y ambientales del proyecto. Si el estudio de factibilidad es positivo, el yacimiento pasa a denominarse mina.

Finalmente, la empresa tomará la decisión de invertir si las condiciones políticas y regulatorias del país están claras, el resultado económico del estudio de factibilidad sea atractivo bajo diferentes escenarios de precios de los metales del proyecto, su Estudio de Impacto Ambiental se encuentra aprobado y posee legalmente las propiedades mineras y superficiales.

La cuarta etapa del proceso minero corresponde al desarrollo y construcción, en la cual se deben realizar los trabajos necesarios para alcanzar el cuerpo mineralizado y asegurar una alimentación constante del mineral a la planta. En general, la subetapa de construcción se realiza de forma paralela y está destinada a establecer las instalaciones para la extracción y procesamiento del mineral, accesos a la mina, abastecimiento energético del proyecto y disposición del personal. Al finalizar esta etapa el proyecto se encuentra en condiciones de comenzar su normal puesta en marcha.

En la etapa de producción o explotación se inicia la alimentación sostenida del mineral a la planta de procesamiento de acuerdo con los requerimientos establecidos en los planes de producción del proyecto. Los principales procesos que componen esta etapa son: extracción del mineral desde la mina a la planta, procesamiento del mineral y fundición y refinación del metal de interés.

Por último, la etapa final corresponde al cierre de mina, donde se preparan y ejecutan las actividades necesarias para restaurar las áreas afectadas por la explotación minera. Las estrategias definidas para mitigar los impactos posteriores pueden ser: desmantelamiento de instalaciones, recuperación de las geo-formas, compactación del terreno, reforestación, monitoreo permanente y tratamiento de efluentes de la mina (drenajes ácidos en vertederos y relaves).

2.2 Planificación Minera

Según Rubio (2006), la planificación surge como el proceso de Ingeniería de Minas que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo, definiendo una promesa productiva alineada con los objetivos estratégicos de la corporación e integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno. En particular, la planificación consiste en definir la fuente, destino y secuencia de extracción de cada unidad de mineral durante la vida de la mina.

2.2.1 Tipos de Planificación según Nivel de Gestión

Según Newman *et. al* (2010), la planificación minera se puede clasificar en tres tipos de acuerdo con el nivel de gestión al que estén asociados.

2.2.1.1 Planificación Estratégica

Su principal objetivo es sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión del dueño. Existen cinco funciones principales de la planificación estratégica: reconocimiento constante del recurso mineral, métodos de extracción, ritmos de explotación, secuencia de producción y estimación de leyes de corte. En este nivel se encuentran los gerentes.

2.2.1.2 Planificación Táctica o Conceptual

Es el proceso que delinea los recursos existentes para conducir a la meta productiva definida como parte de la Planificación Estratégica. Generalmente, la Planificación Táctica se enmarca en un ámbito de proyecto.

El producto de la Planificación Táctica es el plan minero, el cual representa el plan de negocios de la Compañía, dictando el cuándo y cómo se extraerán los recursos en cada uno de los períodos definidos en el negocio minero, estableciendo los recursos a utilizar. En este nivel se encuentran superintendentes y jefaturas.

2.2.1.3 Planificación Operativa

Cuando la mina es puesta en operación se realizan diversas actividades de optimización de equipos y procesos que conducen a la consecución del plan minero. En esta etapa se produce retroalimentación hacia la planificación conceptual de modo de redefinir algunos conceptos y generar los proyectos que permitan alinearse con el plan minero.

El aporte de la planificación operativa al proceso de planificación es fundamental desde el punto de vista de la definición de indicadores operacionales. En este nivel se encuentran los jefes de turno y operaciones.

2.2.2 Tipos de Planificación según Horizonte de Evaluación

Por otro lado, según Rubio (2006) la planificación puede clasificarse de acuerdo con el horizonte de evaluación que posea. Los horizontes de planificación se definen como herramientas para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero. Esta incertidumbre puede ser causa de factores intrínsecos al yacimiento, como las condiciones geo-minero-metalúrgicas, o factores externos como condiciones del mercado generales o las que respectan al metal de interés.

2.2.2.1 Planificación de Largo Plazo

La Planificación de Largo Plazo, a partir del tamaño, vida de la mina y reservas mineras define la envolvente económica, el método de explotación, el ritmo de extracción, la secuencia de explotación y las leyes de corte. En este nivel de planificación se incorporan varias alternativas al proyecto a realizar, con distintos niveles de riesgo, con el fin de otorgar la mayor cantidad de información a los inversionistas.

2.2.2.2 Planificación de Mediano Plazo

La Planificación de Mediano Plazo se encarga de adaptar los modelos que sustentan la Planificación de Largo Plazo. Su función es producir planes de producción que permitan conducir la operación a las metas de producción definidas por Largo Plazo. El producto que se obtiene a partir de esto es utilizado para adaptar la definición de negocios de la mina.

2.2.2.3 Planificación de Corto Plazo

La Planificación de Corto Plazo se encarga de llevar a la operación el plan definido por Mediano Plazo; además de recopilar información operacional a modo de retroalimentación para esa área. Otra función importante de Planificación de Corto Plazo es asignar recursos y tareas para cumplir con la meta productiva definida en el presupuesto. Por último, también se encarga de determinar indicadores de productividad de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación.

2.2.3 Relación entre Tipos de Planificación por Niveles de Gestión y por Horizontes de Evaluación

Es posible notar que los tipos de planificación definidos por niveles de gestión se relacionan con los clasificados por horizontes de evaluación. En general, la relación que poseen es la siguiente:

- Planificación Estratégica – Planificación de Largo Plazo
- Planificación Táctica – Planificación de Mediano Plazo
- Planificación Operativa – Planificación de Corto Plazo.

Además, los tipos de planificación se caracterizan por la cantidad de información y obtención de datos, tal como se presenta en Figura 2.2 y Figura 2.3.

El nivel estratégico, que corresponde a gerencias, es el que posee más información acerca del negocio minero. Se encarga de establecer los planes de largo plazo, que poseen un horizonte temporal mayor a cinco años, tales como la vida útil del proyecto o LOM (por sus siglas en inglés: Life of Mine). En este nivel se busca establecer la visión, objetivo y dirección del negocio. A pesar de que es un nivel que no está presente en la obtención de datos en terreno, es el que posee más información para la toma de decisiones, las cuales afectan a toda la organización.

En el nivel táctico, donde se encuentran superintendentes y jefaturas, se realizan planes para llevar a cabo las directrices definidas en el nivel anterior. Se manejan capacidades, presupuestos y uso de los recursos, generando un control de la operación para alcanzar los objetivos estratégicos. Los planes que se realizan poseen un nivel temporal de un año (como, por ejemplo, el plan Forecast) hasta cinco años (como el plan Quinquenal). También se elabora el plan Budget, el cual define los objetivos de la empresa en un horizonte de uno a cinco años, con tal de cumplir lo determinado por el nivel estratégico.

Por último, el nivel operativo corresponde a jefes de turno y operaciones. Tiene una mirada del cumplimiento del negocio más inmediata, pues en este nivel se definen las labores y metas de corto plazo que se requieren para cumplir los objetivos de mediano plazo. Es decir, en este nivel se elaboran los planes diarios, semanales y mensuales. Es el nivel que posee mayor capacidad de obtención de datos, debido a las tareas de supervisión y gestión de la operación en terreno; pero posee poca cantidad de información puesto que la toma de decisiones en este nivel se centra en gestionar directamente la operación, más que el negocio en su totalidad.

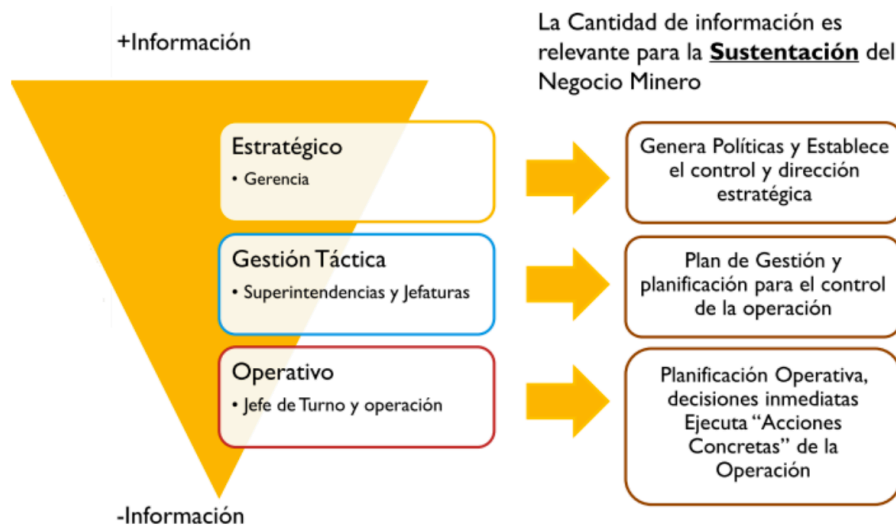


Figura 2.2 Pirámide de información. Fuente: Apuntes de Gestión de Evaluaciones Mineras, 2015.

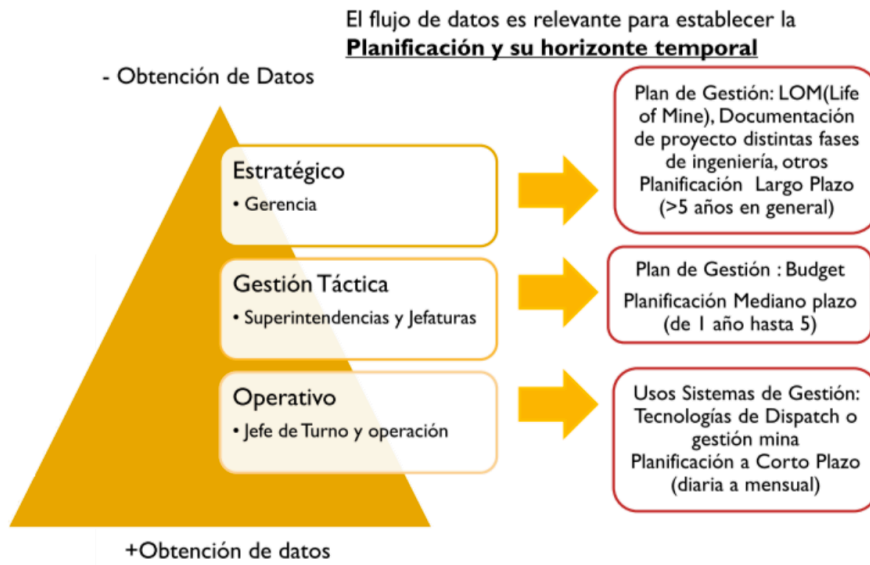


Figura 2.3 Pirámide de obtención de datos. Fuente: Apuntes de Gestión de Evaluaciones Mineras, 2015.

2.3 Modelos para Selección de Equipos Mineros

Acorde a Burt *et al.* (2008) existen tres tipos de problemas que atañen a la industria de la minería (y dos de ellos a la de la construcción, como se muestra en Figura 2.4): la selección del método de explotación, la selección de equipos y la productividad pala – camión.

El problema del método de selección se enfoca en escoger el correcto sistema de explotación para determinadas condiciones de yacimiento. Generalmente, esta selección se basa en métodos anecdóticos, donde se obtiene una solución factible más que una óptima.

Por otro lado, el problema de la selección de equipos busca determinar un apropiado set de camiones y cargadores sujetos a varios objetivos y restricciones. Se deben escoger tipo, tamaño y cantidad de los equipos (Bozorgebrahimi, Hall & Blackwell 2003, [2])

El último problema se refiere a predecir de manera precisa la productividad que se genera con flotas determinadas de palas y camiones.

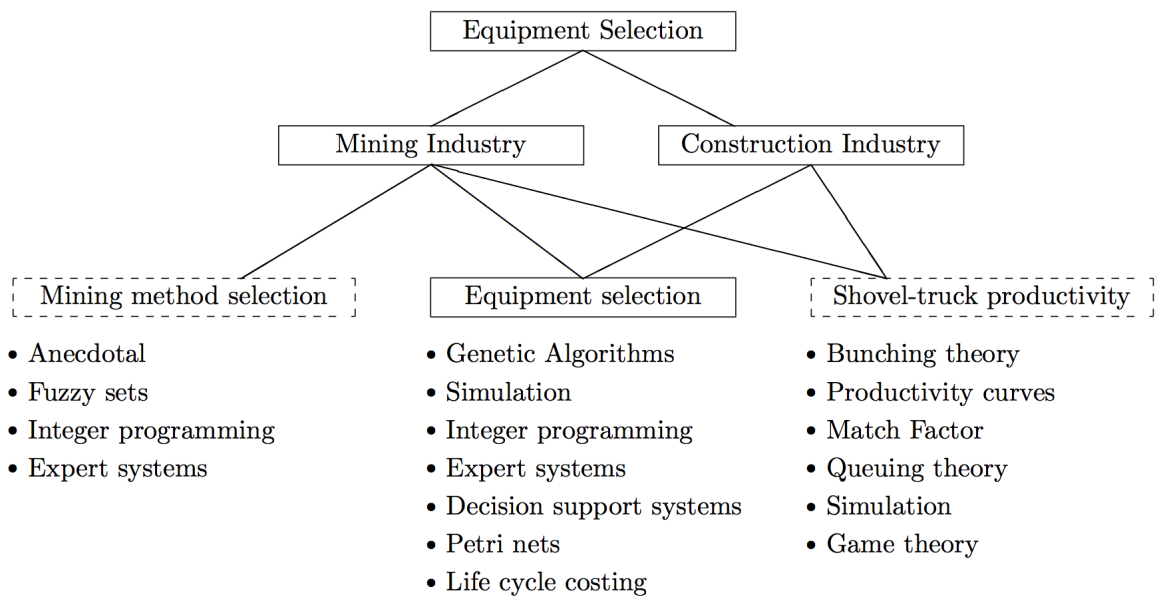


Figura 2.4 Distribución de la literatura y técnicas aplicadas para la selección de equipos. Fuente: Burt, 2008.

En el siguiente apartado se presenta una breve revisión bibliográfica acerca de los modelos más importantes destinados a la selección de equipos de carguío y transporte, tales como: Métodos Heurísticos, Programación de Números Enteros e Inteligencia Artificial. También se presentan modelos utilizados para estimar la productividad pala – camión (Factor de Acoplamiento, Teoría de Colas, Teoría de la Agrupación) puesto que guardan una expresa relación con la selección de equipos.

2.3.1 Modelos de Selección de Equipos

2.3.1.1 Métodos Heurísticos

Los métodos heurísticos, vale decir aquellos basados en la experiencia, se siguen utilizando hoy en día. Esta opción puede ser bastante arriesgada, por la diferencia en la decisión que se genera cuando dos expertos discrepan en un tema. Además, el o los expertos pueden brindar una alternativa factible pero que no necesariamente coincide con el óptimo del problema. Por esto mismo, la calidad de la decisión es difícil de evaluar.

En general, la lógica de decisión que siguen los expertos se presenta en Figura 2.5. El primer paso es haber definido el método de explotación de la mina. Posteriormente, se define un tipo de cargador y se intenta definir el camión que genere un mejor acople en términos de rendimiento. Por último, se determina la cantidad de la flota escogida de ambos equipos.

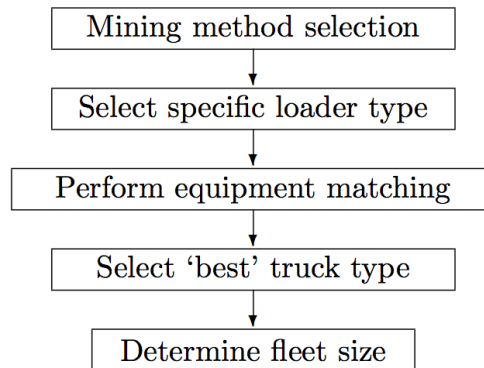


Figura 2.5 Heurística de selección de equipos. Fuente: Burt, 2008.

A pesar de que este método de selección posea una lógica de implementación, está basado en gran medida en el criterio de la persona responsable de la selección de equipos, motivo que puede ser objetado por la comunidad científica.

2.3.1.2 Programación de Números Enteros (Integer Programming)

Un problema de programación de números enteros es una optimización o programación matemática en la cual algunas de las variables están restringidas a ser enteros.

En un problema de optimización el foco está en la función objetivo, $f(x)$, cuyo propósito es medir la calidad de una decisión (Luenberger 2003, [2]). Los programas matemáticos observan el estado de un sistema y su estructura y, considerando un objetivo apropiado, determinan cómo el sistema se moverá hacia el siguiente estado.

La programación lineal se basa en la maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables sujeta a una serie de restricciones, las cuales se expresan en forma de inecuaciones o ecuaciones lineales (Valdez, 2011). Un problema genérico puede ser formulado como sigue:

$$\text{minimizar } f(x)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} h_i(x) &= 0 & i &= 1, 2, \dots, m \\ g_j(x) &\leq 0 & j &= 1, 2, \dots, r \\ x &\in S \end{aligned}$$

En un problema de programación lineal se considera el caso donde la función objetivo y todas las restricciones ($h_i(x)$ y $g_j(x)$) son lineales. Por tanto, la programación lineal es una técnica matemática que busca capturar el comportamiento de un problema con las características anteriormente nombradas.

En particular, en la programación de números enteros se tiene la restricción adicional de que todas las variables deben ser enteros y se tienen las siguientes alternativas:

- Las variables representan cantidades que solamente pueden ser enteros.
- Las variables representan decisiones que pueden tomar solo los valores 0 o 1.

Este tipo de programación se ha utilizado en áreas como la planificación de la producción, calendarización, redes de telecomunicación y redes celulares. En el caso de la minería, se utiliza para:

- Mezclar diferentes materiales con ciertas características con el fin de obtener un producto con determinadas especificaciones.
- Dada una secuencia minera, computar una programación de la producción.
- Asignar equipo a una tarea por un determinado número de horas.
- Tomar decisiones tácticas en cuanto a la producción. Por ejemplo, con respecto a enviar o no producto a molinos.
- Programar la selección de equipos mineros.

En cuanto a este último punto, se han desarrollado varios modelos de diferentes autores referentes a la selección de equipos. Webster & Reed (1971, [2]) presentaron un modelo de selección de equipos para materiales en general formulado como un problema de asignación. El modelo incorpora una matriz de utilización a la función objetivo de costo, lo cual es una meta que aún no se ha logrado en minería. Una de las limitaciones del modelo es que sólo considera un tipo de equipo, para ser designado a una tarea en particular. Es por lo mencionado anteriormente que los autores admiten que la formulación no es capaz de solucionar problemas prácticos, por los grandes requerimientos computacionales para ejecutar el comando.

Por otro lado, Hassan *et al.* (1985, [2]) extendió el modelo de Webster & Reed para combinar la selección de equipos con el problema de distribución. La función objetivo utilizada en el modelo minimiza la “suma de los costos de operación y capital por sobre todas las tareas y tipos de equipos”, vale decir, selecciona equipos para desempeñar tareas, más que buscar cumplir los requerimientos de producción.

Posteriormente, Cebesoy *et al.* (1995, [2]) desarrolló un modelo sistemático de decisiones para la selección de equipos. El paso final del modelo utilizaba programación de números enteros de tipo binaria. Este modelo consideraba un solo período de evaluación, una sola locación en la mina y flota homogénea. Utilizando el mismo tipo de programación Michiotis, Xerocostas & Galitis (1998, [2]) desarrollaron un modelo de selección de equipos que fue complementado con un modelo de estratificación de capas. El modelo minimizaba el tiempo requerido para la extracción de toda la mina, pero según Burt, no es clara la función objetivo que presentan. También menciona que el modelo se centra más en seleccionar equipos apropiados para las variables geológicas de la mina como altura de banco, densidad de roca y resistencia de la roca.

Una investigación más reciente con respecto a este tema corresponde a la realizada por Burt *et al.* (2008 y 2009), quienes estudiaron el problema de la selección de equipos con modelos basados en la programación de números enteros. El objetivo de las investigaciones era crear un programa para la selección de equipos que incorpore flota heterogénea mientras se optimizan múltiples períodos.

Los modelos mencionados poseen aspectos positivos, tales como:

- Considera flota heterogénea, pues se atañe al supuesto de que, para un correcto funcionamiento de los equipos de carguío y transporte, debe existir un estudio de la compatibilidad que se genera entre ellos.
- Permite la utilización de flota pre-existente y que puede renovarse de acuerdo a la vida útil del equipo.
- Considera múltiples períodos de tiempo para asegurar la flota escogida, pues es capaz de adaptarse a cambios que se generen en el largo plazo y que afecten el modelo.

Por otro lado, los aspectos negativos se mencionan a continuación:

- En una primera instancia, consideraron sólo una locación de carguío y una de descarga. Este modelo sólo sería apropiado para minas pequeñas, donde no exista gran distancia entre locaciones del mismo tipo (palas y botaderos) y posean rutas cortas. Por ende, no es aplicable a la realidad de CMDIC.
- Sin embargo, en publicaciones posteriores incorporaron la opción de varias locaciones de carga y descarga. Lo cual sería más apropiado para una mina del tamaño de CMDIC.
- Considera una utilización completa a lo largo del tiempo. Los autores sostienen que hay dos maneras de utilizar los equipos si se produce un superávit de ellos: (1) Operar sólo la cantidad necesaria de equipos, aumentando su utilización; (2) Operar todos los equipos pero a menor capacidad, disminuyendo su rendimiento. Los modelos desarrollados por Burt *et al.*, consideran la segunda opción, mientras que CMDIC se rige, generalmente, por la primera.

2.3.1.3 Inteligencia Artificial

Las técnicas de inteligencia artificial prevalecen en aplicaciones de minería a gran escala debido a su habilidad de encontrar soluciones factibles en un corto tiempo (Clément & Vagenas 1994, [2]). Los métodos más comunes en la literatura son:

- Sistemas Expertos (Denby & Schofield 1990, [2])
- Sistemas de Apoyo de Decisión (Bandopadhyay & Venkatasubramanian 1987, Basçetin 2004, [2])
- Algoritmos Genéticos (Haidar & Naoum 1995, Haidar & Naoum 1996, Haidar, Naoum, Howes & Tah 1999, Marzouk & Moselhi 2002^a, Marzouk & Moselhi 2002b, Xinchun, Weicheng & Youde 2004, [2]).

La visión desde sistemas expertos, utilizada de preferencia para sistemas complejos, es una estructura que intenta capturar la experiencia humana en un programa eficiente (Welgama & Gibson 1995, [2]). Amirkhanian & Baker (1992, [2]) desarrollaron un sistema experto para la selección de equipos en construcción basado en 930 reglas, las cuales incorporaban “información concerniente a las condiciones del suelo particulares del proyecto, desempeño del operador y operaciones de movimiento de tierra”. Sin embargo, no consideraban rutas ni factores propios de las unidades de transporte como perfil de velocidades.

Ganguli & Bandopadhyay (2002, [2]) también desarrollaron un sistema experto para la selección de equipos. Sin embargo, su método requiere que el usuario ingrese la “relevancia relativa de los factores”, lo cual es típicamente difícil de cuantificar. Aunque el sistema experto no brinda optimalidad a sus soluciones, sí resalta un aspecto importante en el modelamiento para selección de equipos: el subconjunto de equipos considerado en el modelo dependerá de las condiciones de minería y suelo. En este sentido, la pre-selección basada en reglas es un pre-proceso lógico para cualquier modelo de selección de equipos (Basçetin 2004, [2]).

Por otro lado, están los ejemplos de aplicaciones de Algoritmos Genéticos a la selección de equipos. Naoum & Haidar (2000, [2]) desarrollaron un modelo de este tipo que incorpora el costo descontado del equipo de acuerdo a su vida útil, lo cual está ligado al supuesto de que el equipo es utilizado desde que se compra hasta su edad de retiro oficial, y no es vendido o reemplazado antes de ese tiempo. Además, necesita de un experto para seleccionar el tipo de cargador antes de que comience el problema de optimización y está restringido a flota homogénea. Los autores argumentan que las técnicas de inteligencia son necesarias porque la programación de números enteros es incapaz de resolver un problema con más de una variable independiente. A pesar de que esto no es cierto, lo cierto es que estas técnicas deben ser requeridas cuando las restricciones del problema no son lineales, lo que puede ocurrir debido a las colas.

Por otro lado, las técnicas de inteligencia pueden ser útiles al obtener una solución factible de buena calidad, donde la programación de números enteros no puede diferenciar entre clusters o soluciones cercanas al óptimo.

Por último, los autores Marzouk & Moselhi (2002a, 2002b, 2004, [2]) diseñaron un modelo utilizando simulación y algoritmos genéticos para minimizar simultáneamente dos objetivos: tiempo y costo. Este modelo se desarrolló para la industria de la construcción, de ahí que sólo provea una solución de una flota para la duración del proyecto completo, lo cual no es realista para una operación minera con múltiples períodos y requerimientos de producción fluctuantes.

2.3.2 Modelos de Productividad Pala – Camión

2.3.2.1 Teoría del Factor de Acoplamiento (*Match Factor*)

Esta teoría se refiere a que en un sistema pala – camión el indicador más importante es aquel que refleja la relación entre la productividad de la pala y la de las unidades de transporte (Rodríguez, 2013).

Douglas (1964, [20]) determina el número de camiones necesarios a través de la utilización de este indicador entre la productividad de un cargador y la de la flota de camiones. La productividad de una unidad de carguío se define como directamente proporcional a su capacidad de carga e inversamente proporcional al tiempo de ciclo. Por su parte, el tiempo de ciclo de los vehículos es la suma del promedio de los tiempos de tránsito, carga y descarga, excluyendo los tiempos de espera producto de los efectos de la congestión.

Posteriormente, Morgan y Peterson (1968, [20]) definieron este indicador como Factor de Acoplamiento o “Match Factor” (Véanse Ecuación 2.1 y Gráfico 2.1).

$$MF = \frac{\text{Cantidad camiones}}{\text{Cantidad cargadores}} * \frac{\text{Tiempo de ciclo cargadores}}{\text{Tiempo de ciclo camiones}}$$

Ecuación 2.1 Factor de Acoplamiento

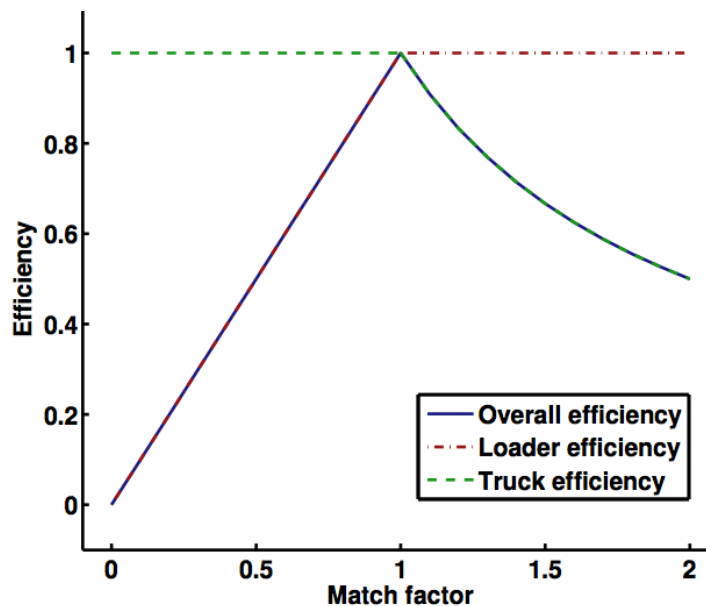


Gráfico 2.1 Factor de Acoplamiento. Fuente: Burt, 2013.

El gráfico anterior se refiere al calce que ocurre entre la productividad de la flota de cargadores y la flota de transporte para un sistema en particular. Pueden generarse tres alternativas en cuanto a este indicador:

- **MF < 1:** Sobredimensionamiento de las unidades de carguío: implica el máximo de utilización de los vehículos de transporte, pero una subutilización de las unidades de carga. En consecuencia, sugiere que el cargador no está trabajando a su capacidad de fábrica.
- **MF > 1:** Sobredimensionamiento de las unidades de transporte: implica la máxima utilización de los equipos de carguío, pero una subutilización de las unidades de transporte. Por ende, sugiere que la flota de camiones es más pequeña de lo necesario para mantener cierta productividad.
- **MF = 1:** Acoplamiento: corresponde al calce perfecto entre las productividades de las flotas de ambos equipos.

Por ende, este indicador además de brindar información en cuanto a la productividad de los equipos utilizados muestra de manera gráfica el tamaño de la flota de un equipo con respecto al otro (cargadores versus camiones o viceversa).

Cabe mencionar que las limitantes del modelo anterior son que asume flotas de camiones y palas homogéneas, tiempos de espera promedio para los ciclos de las unidades y se excluyen los tiempos de espera producto de la congestión.

En cuanto a la selección de equipos, se ha utilizado el Factor de Acoplamiento para determinar la cantidad óptima de camiones en la flota (Smith, Osborne & Forde 1995, Cetin 2004, Kuo 2004, [2]). Sin embargo, se debe mencionar que este indicador no es necesariamente preciso en cuanto a esta estimación, puesto que no considera la congestión de camiones. Además, cuando se utiliza para la selección de tamaño de flota de camiones, se simplifica la fórmula al asumir que solamente un cargador está operando en la flota (Morgan 1994, Smith *et al.* 1995, Nunnally 2000, [2]).

2.3.2.2 Teoría de Colas

La teoría de colas es el estudio matemático de los tiempos de espera medio en las colas o la capacidad de trabajo del sistema sin que colapse. Esta teoría nace desde la rama de la ingeniería de Investigación de Operaciones y es un complemento sustancial en la Teoría de Sistemas y la Teoría de Control. Por tanto, es una teoría que ve cabida en las áreas de negocios, industria, ingeniería, transporte, logística y comunicaciones.

En el caso de la ingeniería, permite modelar sistemas en los que varios clientes que demandan cierto servicio, confluyen al mismo servidor, y por tanto, pueden generarse esperas desde que un agente llega al sistema y el servidor atiende sus demandas (Véase Figura 2.6).

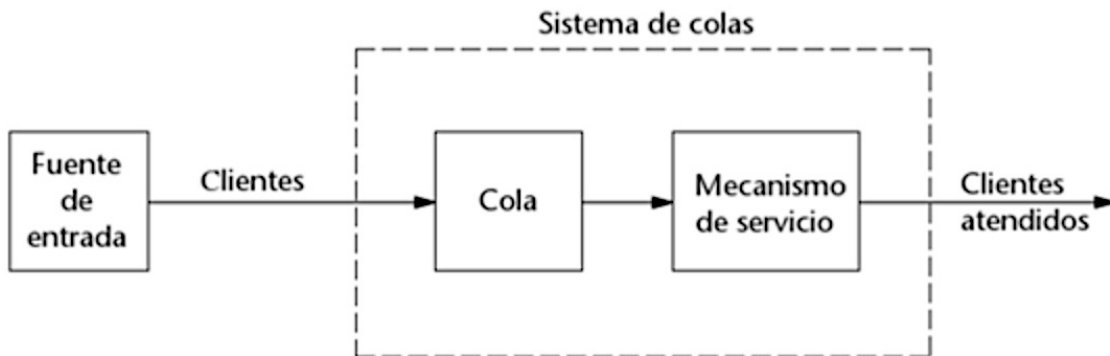


Figura 2.6 Sistema de Colas Básico. Fuente: Monoforms.com

En minería, la teoría de colas se ha guiado hacia el estudio de los tiempos de espera para camiones y equipos de carguío, con foco en la productividad que se puede generar. Según Carmichael (2006) el sistema pala – camión puede esquematizarse como muestra Figura 2.7. Los camiones hacen fila para ser cargados por la pala, luego viajan cargados a través de una ruta, descargan (en botadero o chancado) y regresan vacíos al punto de carguío para completar un ciclo. La fila se forma cuando el camión llega al sitio de carguío y encuentra a la pala ocupada cargando otro camión. Esto es resultado de un comportamiento probabilístico del total de la operación. Dado esto, la teoría de colas puede ser una herramienta analítica útil, junto con la simulación, para representar el comportamiento de la operación.

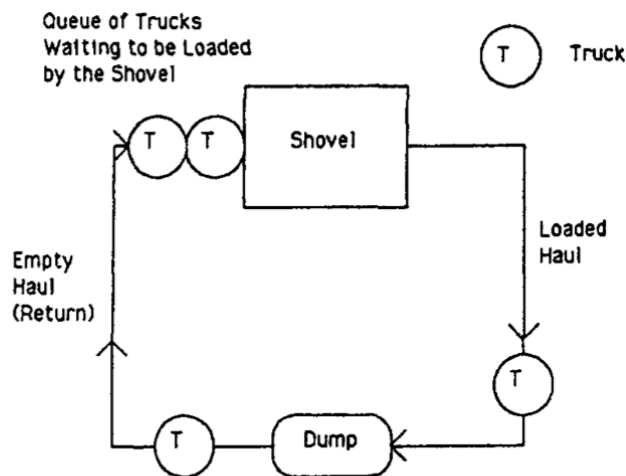


Figura 2.7 Representación esquemática de una operación pala – camión. Fuente: Carmichael, 2006.

Las bases de esta teoría se remontan a comienzos del siglo XX, pero no es hasta 1958 que Koenigsberg publica la primera investigación aplicada a la industria minera, en particular para minería subterránea del carbón.

Posteriormente, se realizaron diversas publicaciones donde se utiliza la teoría de colas en la industria minera, con foco en la representación de la distribución de los tiempos de llegada y servicio (vale decir carguío) de los camiones.

Por ejemplo, Elbrond (1979, [20]) propone una metodología para el cálculo de la capacidad de una operación a cielo abierto con diferentes circuitos cíclicos. Consideró para esta investigación un tiempo de servicio que no poseía distribución exponencial y que consideraba las etapas asociadas a tiempos de viaje como servidores finitos.

Por su parte, Barnes (1979, [20]) extiende la investigación utilizando una distribución de tipo Erlang para los tiempos de llegada y los de servicio de cada una de las etapas. Según Carmichael (1987, [20]) en las operaciones mineras no es frecuente encontrar etapas con iguales tiempos medios y que distribuyan exponencialmente. Además, publica un estudio de diferentes modelos aplicados a la minería y construcción, en los que considera tiempos entre llegadas y tiempos de servicio con distribuciones exponencial, Erlang y constantes. También discute el caso de heterogeneidad en la flota de camiones, utilizando métodos de aproximación al caso de flotas homogéneas.

Por otro lado, Czaplicki (1989, [20]) propone un enfoque distinto con respecto a los tiempos asociados a cada etapa del ciclo. Su modelo se divide en dos etapas: la primera distribuye exponencial y la segunda es una suma de tres exponenciales. El mismo autor, analiza un año después un sistema de un servidor y un determinado número de vehículos considerando un índice de confiabilidad para la flota.

Posteriormente, los autores Kappas y Yegulap analizan un sistema pala – camión en estado estacionario. Las distribuciones de los tiempos de servicio de cada etapa se suponen de una forma general. El objetivo del modelo es minimizar el error de las estimaciones de los parámetros de funcionamiento de los servidores más saturados. Además, se considera una etapa de mantención de los equipos y la transición entre etapas se rige a través de una matriz de probabilidades.

En 1996, Muduly y Yegulap desarrollan un modelo analítico basado en la teoría de colas para el sistema pala – camión considerando flota heterogénea. Concluyen que, para este tipo de flotas, se deben considerar parámetros independientes para cada clase de camión y así aumentar la confiabilidad en la predicción del rendimiento del sistema.

En la última década las publicaciones basadas en teoría de colas aplicadas a carguío y transporte han disminuido considerablemente, viéndose reemplazadas por técnicas de simulación y programación.

Sin embargo, cabe mencionar la tesis de Rodríguez (2013) donde desarrolla un modelo analítico para dimensionamiento de flota de transporte en una operación minera a cielo abierto, incluyendo las aleatoriedades propias de los procesos de llegada y carga de camiones en determinado sitio. El modelo estima la solución de mínimo costo en términos de tiempos perdidos por conceptos de

espera de cola, bajo una restricción de rendimiento del sistema de transporte. Además, permite encontrar soluciones que involucren tanto flota homogénea como heterogénea. Sin embargo, el autor menciona que no incluye factores de la flota de camiones, tales como velocidades de operación, tasas de falla o disponibilidad física.

2.3.2.3 Teoría de la Agrupación (Bunching Theory)

Los modelos de agrupación capturan la tendencia de los objetos de agruparse al moverse en una línea (Burt *et al*, 2005). Esto se debe a que algunos objetos pueden ser operados más eficientemente que otros o a la existencia de pequeñas demoras impredecibles.

Nagatani (2001, [3]) estudió el problema de modelar la tendencia de agrupación de los objetos en flujos de tráfico y rutas de autobuses. El modelo se puede extrapolar a la minería de la siguiente manera: si un camión tiene un mayor tiempo de ciclo que otro, debido a demoras en el sistema, este tiempo extra es absorbido ya sea por el tiempo de cola o por el tiempo de ciclo de la flota. Vale decir, el camión más lento causará que los demás equipos de transporte deban esperarlo, aumentando éstos últimos su tiempo de ciclo y, en consecuencia, disminuyendo su rendimiento.

2.3.3 Discusión acerca de los Modelos de Selección de Equipos

Según Burt *et. al* (2008) la mayor debilidad de estos modelos es que consideran flota homogénea, tipos de equipos preseleccionados y restricción en el número de pases del cargador a la unidad de transporte. La primera de estas afirmaciones asume que la flota de camiones debe consistir solamente en un tipo de camión, aun cuando no existe razón alguna para afirmar que una flota mixta tiene menor rendimiento que una homogénea.

Por otro lado, los autores también afirman que en la literatura no se encuentran modelos que consideren la condición de equipos preexistentes, como sí lo hace el modelo desarrollado en este trabajo de título, el cual considera las condiciones particulares de CMDIC: el hecho de que existe una flota de camiones determinada compuesta por 86 camiones Komatsu 930E y 6 Liebherr T282C. Con esto, el modelo busca determinar la cantidad de unidades de transporte necesaria para cumplir los compromisos del plan mensual. Si dicha cantidad llegara a sobrepasar a la flota existente de camiones se puede recurrir a diferentes alternativas en cuanto a cómo proceder: pueden adquirirse los camiones faltantes, estudiar las estrategias de gestión de la operación para mejorar rendimiento de la flota, solicitar mayor disponibilidad de equipos al área de Planificación de la Mantenición, entre otros. Es por lo mencionado anteriormente que la herramienta desarrollada debe considerar flota preexistente, mientras que un modelo empírico de selección de camiones sin esta opción no es apropiado para la Compañía.

Las limitantes asociadas a los modelos anteriormente descritos son superadas en el modelo desarrollado incluyendo la consideración de flota heterogénea y predefinida, indicadores operacionales de equipos de carguío y transporte (Disponibilidad Física, Utilización Operativa y Rendimiento Operativo), factores intrínsecos a la flota de camiones (como perfiles de velocidad) y tiempos de espera producto de la congestión.

Por estos motivos se considera que para generar un modelo de cálculo de carguío y transporte que sea capaz de evaluar la factibilidad del plan mensual, es necesario crear un modelo nuevo que considere la realidad de la mina en particular, vale decir, los factores mencionados anteriormente.

Sin embargo, hay partes de los modelos anteriormente descritos que sí se utilizan. Por ejemplo, para el modelo de cálculo de carguío automatizado se utiliza la programación de números enteros en la resolución del problema de optimización, pues las variables en las que se basa están restringidas a ser binarias.

Por último, cabe mencionar que no es necesario considerar múltiples períodos de tiempo, como algunos de los modelos descritos, pues no se trata de una selección de equipos basados en el secuenciamiento, sino de decidir si con la flota que se tiene es posible cumplir los requerimientos establecidos en el plan mensual.

2.4 Factores que afectan la productividad de los camiones

Según Marambio (2010) existen factores que pueden influir en la productividad real de los camiones, los cuales se mencionan a continuación:

- Diseños mineros que sean capaces de asegurar el buen funcionamiento del sistema de transporte, por ejemplo, la diferencia de productividad que se genera en camiones que deben circular por una ruta con gran cantidad de switchbacks y poca distancia a recorrer versus una ruta de mayor distancia, pero con menos switchbacks.
- Buena coordinación para la operatividad de las rampas.
- Buena condición de los caminos.
- Coordinación de movimiento con otros equipos, por ejemplo, movimiento de aéreos debidos al traslado de palas.
- La correcta estimación de velocidades, disponibilidades, utilización efectiva, distancias y factores de carga que permiten una buena estimación de la flota de transporte.
- Mantenión o aumento de las disponibilidades o utilizations efectivas comprometidas.
- Búsqueda de cumplimiento de las líneas planteadas por Planificación de Largo Plazo, especialmente los diseños de rampas.
- Cumplimiento con las inversiones en un período dado.
- Cumplimiento de las líneas entregadas por Planificación de Corto Plazo.
- Asignación eficiente de camiones.

Los factores que competen a diseño minero o a condiciones del tránsito de los camiones se consideran intrínsecos a los datos que se están utilizando, por lo que no se ahondará en ello. Sin embargo, no cabe duda de que todos los factores mencionados anteriormente afectan los tiempos de ciclo de los camiones, que corresponden a entradas para la herramienta de cálculo realizada, afectando la flota que se pueda estimar. Por tanto, se recomienda su análisis en estudios posteriores.

3 Marco Teórico

En el siguiente capítulo se presentan los tópicos pertinentes al marco teórico.

3.1 Operaciones Unitarias del Proceso Minero

El proceso minero que se describe a continuación solo considera la etapa de extracción, no de procesamiento de los minerales para posterior beneficio. La extracción corresponde al proceso en el cual se retira el material proveniente desde el yacimiento y posee tres subprocesos:

- **Perforación:** una vez definida la malla de perforación, se taladra la roca con una perforadora y se deposita el explosivo en la cavidad generada.
- **Tronadura:** corresponde al proceso donde se hace explotar el explosivo depositado, obteniéndose lo que se conoce como material tronado, el cual responde a cierta granulometría esperada.
- **Carguío:** es el proceso de carga del material tronado por medio de un equipo de carguío (pala o cargador frontal) hacia un equipo de transporte (camiones en el caso de minería a cielo abierto).
- **Transporte:** adicionalmente, debe considerarse el proceso de transporte, donde el material es retirado desde el macizo rocoso hacia el destino que le corresponda. En general, los destinos se definen en función de la ley de valioso que posea el material que se desea transportar. De esta manera, materiales de baja ley (estéril) serán transportados a botaderos, de mediana ley a stocks y de alta ley (mineral) a chancado.

Cabe señalar que las operaciones unitarias anteriormente mencionadas están asistidas por equipos de apoyo, tales como enrollacables para el movimiento de cables; motoniveladora para mantenimiento de caminos; y wheeldozer para limpieza en el sector de carguío (Véase Figura 3.1).

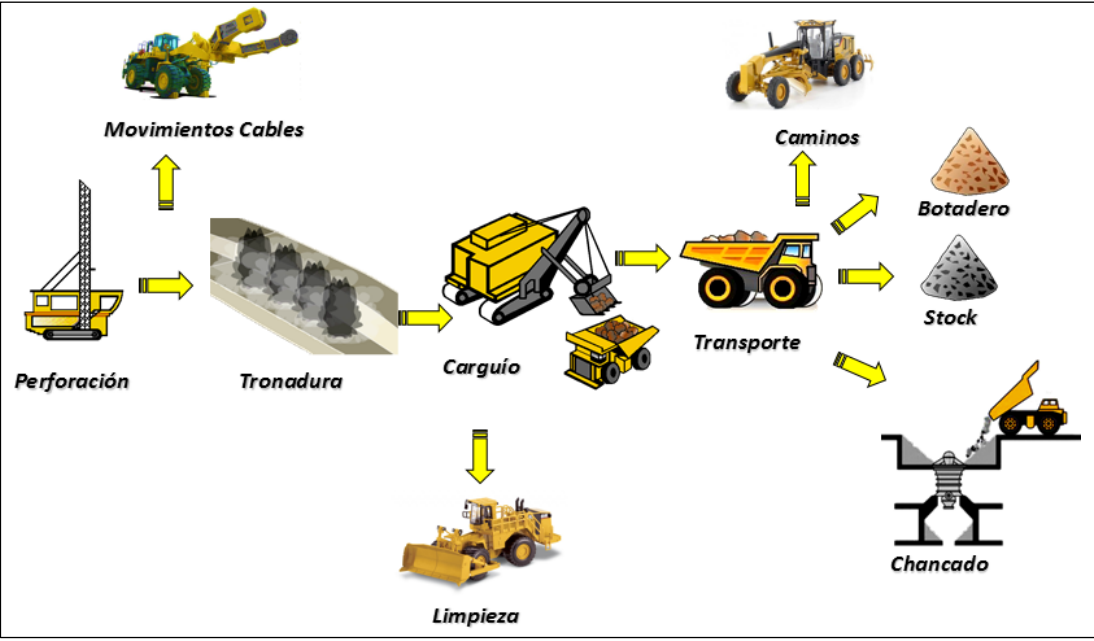


Figura 3.1 Operaciones Unitarias del Proceso Minero. Fuente: CMDIC, 2013.

3.2 Tiempo de Ciclo

Según Lineberry (1985) este concepto se define como el tiempo que le toma a cualquier equipo el completar un ciclo de operación. Para un camión este tiempo incluye los tiempos de aculatamiento y carga en el equipo de carguío, el viaje cargado al sitio de descarga, el aculatamiento y descarga en el botadero y el retorno vacío al equipo de carguío. Además, se incluyen demoras programadas y no programadas y tiempos de espera.

En Ecuación 3.1 se muestran los componentes típicos de un ciclo de carguío en una mina a cielo abierto.

$$TC = TAC + TC + TVC + TAD + TD + TVV + D$$

Ecuación 3.1 Tiempo de Ciclo

Donde

TC: Tiempo de ciclo unidad de transporte, [min].

TAC: Tiempo de aculatamiento en la unidad de carguío, [min].

TC: Tiempo de carguío, [min].

TVC: Tiempo de viaje cargado, [min].

TAD: Tiempo de aculatamiento en lugar de descarga, [min].

TD: Tiempo de descarga, [min].

TVV: Tiempo de viaje vacío, [min].

D: Demoras, [min].

En la industria, la manera más común de estimar el tiempo de ciclo de los camiones es mediante la velocidad de éstos que se obtiene por medio de guías de desempeño que otorga el fabricante (Smith, Wood & Gould 2000, [2]). Estas guías son resultado de simulaciones que consideran la potencia del motor, la eficiencia en la transmisión de la energía, el peso del camión, la capacidad, velocidad rimpull y pendientes y condiciones del camino (Blackwell 1999, [2]). También pueden utilizarse modelos de regresión para determinar estimados de los tiempos de ciclo de los camiones (Çelebi 1998, [2]).

3.3 Norma ASARCO e Indicadores Operacionales

La Norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina o instalación incurren durante la operación. Con los adecuados ajustes a la realidad operacional de la mina, pondera una serie de variables y proporciona indicadores del comportamiento y rendimiento de los equipos empleados en la extracción, beneficio e industrialización de los minerales.

La descripción gráfica de los tiempos acorde a esta norma se presenta en Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Norma ASARCO. Fuente: Bonzi, 2016.

Tiempo Nominal						
Tiempo Disponible				Fuera de Servicio (M/R)		
Tiempo Operativo				Reserva	Programadas	Imprevistos
Tiempo Efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras		Reserva	Programadas	Imprevistos
		Demoras Programadas	Demoras No Programadas			

Como es habitual en la industria minera, cada compañía define su propia nomenclatura de medición de los tiempos de operación basado en la Norma ASARCO. En Tabla 3.2 se muestra la diferenciación de tiempos para CMDIC. Un detalle de la distribución de tiempos por equipo se presenta en Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3.

Tabla 3.2 Norma ASARCO para CMDIC. Fuente: Índices Operacionales, CMDIC

Tiempo Nominal				
Tiempo Disponible				Fuera de Servicio (M/R)
Tiempo Operativo		Demoras Programadas	Reserva	
Tiempo Efectivo	Demoras No Programadas			

3.3.1 Definición de Tiempos para Norma ASARCO

A continuación, se presenta la definición de tiempos para ASARCO.

- **Tiempo Nominal:** espacio de tiempo en que se realiza la medición (espacio muestral). Éste dependerá del tiempo de continuidad de la faena productiva.
- **Fuera de Servicio:** espacio de tiempo en que el equipo no se encuentra disponible ya sea por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico. También puede llamársele “tiempo en panne”.
- **Tiempo Disponible:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra electromecánicamente habilitado para operar.
- **Reserva:** espacio de tiempo en que el equipo, estando en condiciones electromecánicas para la operación, no es utilizado en labores productivas, ya sea por falta de operador o superávit de equipos en ese momento.
- **Tiempo Operativo:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra operado en faena (con operador).
- **Demoras Programadas:** espacio de tiempo en que el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, tales como hora de colación o cambio de turno.
- **Demoras No Programadas:** espacio de tiempo en que el equipo no opera debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de ésta, tales como carga de combustible de los equipos, acomodo o limpieza de algún lugar de la faena (sitios de carguío, rampas, vías de tránsito), entre otras.
- **Pérdidas Operacionales:** espacio de tiempo en que el equipo no puede operar, debido a la espera de equipo complementario; por ejemplo: sistemas de cámaras de televisión.
- **Tiempo Efectivo:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra realizando aquellas tareas para las cuales fue adquirido y diseñado.

3.3.2 Definición de Indicadores Operacionales

Según Cox *et al.* (2003) y López (2008) los Indicadores Clave de Desempeño o KPI's (por sus siglas en inglés Key Performance Indicators) son parámetros de medición que se utilizan para dar seguimiento y evaluar el desempeño de una operación. Estos parámetros usualmente comparan el desempeño actual y el estimado en términos de eficiencia, eficacia y calidad.

Por otro lado, estos indicadores permiten identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora de la actividad en cuestión.

Estos parámetros se consideran entradas para el modelo de cálculo de equipos, excepto el rendimiento operativo del equipo el cual es un resultado de esta.

Los indicadores operacionales relevantes que se consideran son los siguientes:

1. **Cumplimiento del tonelaje total movido vs planeado:** corresponde al cociente entre las toneladas movidas ejecutadas del reporte proveniente del sistema de despacho y las toneladas planeadas a partir del plan anual de producción. Posee una frecuencia de cálculo mensual y una meta de cumplimiento de $\pm 10\%$. Se define a continuación:

$$\text{Cumplimiento del tonelaje total movido vs planeado (\%)} = \frac{\text{Toneladas movidas ejecutadas}}{\text{Toneladas movidas planeadas}}$$

Ecuación 3.2 Cumplimiento del tonelaje movido vs planeado

2. **Cumplimiento del tonelaje movido por fase vs planeado:** análogo al anterior, pero considera las toneladas movidas ejecutadas por fase versus las movidas planeadas en la misma fase. Posee una frecuencia de cálculo mensual y una meta de cumplimiento de $\pm 10\%$. Se define a continuación:

$$\text{Cumplimiento del tonelaje total movido por fase vs planeado (\%)} = \frac{\text{Toneladas movidas ejecutadas fase } f}{\text{Toneladas movidas planeadas fase } f}$$

Ecuación 3.3 Cumplimiento del tonelaje movido por fase vs planeado

3. **Cumplimiento de remanejos vs planeado:** análogo al anterior, pero considera toneladas de remanejo (stocks) versus el remanejo planeado. Posee una frecuencia de cálculo mensual y una meta de cumplimiento de $\pm 10\%$. Se define a continuación:

$$\text{Cumplimiento de remanejo vs planeado (\%)} = \frac{\text{Toneladas remanejo ejecutadas}}{\text{Toneladas remanejo planeadas}}$$

Ecuación 3.4 Cumplimiento de remanejos vs planeado

4. **Disponibilidad Física de un equipo² (DF):** corresponde al tiempo nominal en el cual dicho equipo se encuentra disponible, vale decir que no se encuentra en panne. El tiempo nominal es el tiempo total del equipo independiente de su estado; para un turno son 12 horas. Posee una frecuencia de cálculo diaria. Se define a continuación:

$$\text{Disponibilidad Física (\%)} = \frac{\sum \text{Tiempo Disponible [h]}}{\sum \text{Tiempo Nominal [h]}}$$

Ecuación 3.5 Disponibilidad Física

Para una flota completa, la disponibilidad total es la suma de todos los tiempos disponibles de los equipos, dividida por la suma de todos los tiempos nominales de los equipos.

5. **Utilización Operativa para un equipo³ (UO):** es el porcentaje del tiempo disponible en el cual dicho equipo se encuentra operativo, vale decir que no está en Reserva ni en Demora Programada. Cabe mencionar que el tiempo operativo está compuesto por Tiempo Efectivo más Demoras No Programadas. Se define a continuación:

$$\text{Utilización Operativa (\%)} = \frac{\sum \text{Tiempo Operativo [h]}}{\sum \text{Tiempo Disponible [h]}}$$

Ecuación 3.6 Utilización Operativa

Para una flota completa es la suma de todos los tiempos operativos de los equipos dividida por la suma de todos los tiempos disponibles de los equipos.

6. **Rendimiento Operativo (Rop.):** corresponde a cuánto se produce por hora. Como es rendimiento “operativo” corresponde a la producción del turno dividido en las horas operativas del turno (abreviación: Hop.).

$$\text{Rendimiento Operativo} \left[\frac{t}{\text{Hop}} \right] = \frac{\text{Producción [t]}}{\sum \text{Tiempo Operativo [h]}}$$

Ecuación 3.7 Rendimiento Operativo

El rendimiento operativo de la flota será la suma del tonelaje total del turno dividido por la suma de las horas operativas de todos los camiones.

Cabe mencionar que la producción está definida por la multiplicación entre la disponibilidad física, la utilización operativa y el rendimiento operativo.

² La Disponibilidad Física es dato entregado a Planificación de Corto Plazo por Planificación de Mantenimiento de Palas.

³ La Utilización Operativa es dato entregado por Planificación de Corto Plazo desde el Plan Mensual o Anual.

7. **Producción del Equipo de Carguío:** corresponde a cuánto puede cargar el equipo de carguío. Se obtiene como combinación de las tres ecuaciones anteriores.

$$\text{Producción Equipo de Carguío [tph]} = DF[\%] * UO[\%] * ROp \left[\frac{t}{Hop} \right] * \text{Tiempo nominal [h]}$$

Ecuación 3.8 Producción del Equipo de Carguío

8. **Capacidad Equivalente de los Camiones:** corresponde a la capacidad de una flota heterogénea en función de las capacidades unitarias de cada uno de los tipos de camión que componen la flota y su proporción en ella. Se define a continuación:

$$\text{Capacidad Equivalente [t]} = \frac{\sum_i (\text{Capacidad [t]} * N^{\circ} \text{ Camiones [-]})_{flota i}}{N^{\circ} \text{ Camiones totales [-]}}$$

Ecuación 3.9 Capacidad Equivalente de Camiones

9. **Rendimiento de los Camiones:** corresponde al tonelaje que puede transportar cada unidad de transporte (camión) en un intervalo de tiempo. Se define a continuación:

$$\text{Rendimiento Camión [tpd]} = \frac{\text{Capacidad Equivalente [t]} * DF[\%] * UO[\%]}{\text{Tiempo de Ciclo [h]}}$$

Ecuación 3.10 Rendimiento de Camiones

10. **Flota de Camiones:** corresponde a la cantidad de camiones que se necesitan para transportar cierta cantidad de material. Se define a continuación:

$$\text{Flota de camiones [-]} = \frac{\text{Tonelaje a transportar [tpd]}}{\text{Rendimiento camión [tpd]}}$$

Ecuación 3.11 Flota de Camiones

3.4 Sistema de Despacho Dispatch ®

Dispatch® es una herramienta de gestión en tiempo real que busca optimizar la asignación de camiones a palas y a sus posteriores destinos (chancado o botaderos), maximizando la utilización del tiempo y minimizando pérdidas. Dispatch® tiene varios objetivos, como, por ejemplo:

- Automatizar y optimizar asignaciones de camiones.
- Archivar datos para equipos de carguío, transporte y auxiliares.
- Asignación de combustible automáticamente.
- Recolector de datos para mantenimiento.
- Mezclar minerales.
- Reportabilidad propia y a través de PowerView® según la necesidad del cliente.
- Aumentar la productividad.
- Reducir costos de operación.

3.4.1 Operación del Sistema

Dispatch® es una herramienta que registra los eventos que se desarrollan durante los ciclos de operación. En base a esta información, el sistema de forma automática determina la ruta óptima de acarreo de material. Las operaciones básicas del sistema son:

1. Registro de eventos del ciclo de acarreo de material relevantes para la empresa.
2. Traspaso de los datos en tiempo real y posterior codificación.
3. El sistema registra los datos y guarda la información.
4. El software procesa los datos y gestiona asignaciones (rutas) óptimas de destino a los camiones.
5. Finalmente, el sistema hace un envío de la asignación al camión respectivo para que realice dicha ruta.

3.4.2 Dispatch® como una Herramienta de Productividad

Como se mencionó anteriormente, el sistema Dispatch® es una potente herramienta de gestión y control; lo que se puede traducir como un “administrador importante” de la operación minera y un optimizador de rutas. Por ende, posee funciones útiles dentro de la operación, tales como:

- Recolector de información.
- Almacenador de los datos recolectados como una base de datos.
- Genera soluciones a problemas en tiempo real.

3.4.3 Algoritmo del Sistema Dispatch®

Para comprender el algoritmo que utiliza el sistema, se debe tener en consideración que éste maneja una gran cantidad de información y variables, de manera de generar una asignación óptima y eficiente. Los principales datos que maneja son:

- Una red de ruta de acarreo que contiene cada uno de los caminos.
- Pendientes y distancias de cada uno de los caminos.
- Tiempos de viaje históricos y en tiempo real entre puntos de carga, descarga y balizas virtuales intermedias en ruta.
- Tiempos de maniobra y descarga en botaderos, stocks y chancado.
- Estatus operacionales de los equipos.
- Restricciones operativas tales como prioridad de palas (Factor de Asignación y Prioridad de la Programación Lineal), capacidad de botaderos y chancado, entre otros.
- Ranking “Match Pala – Camión”.

3.4.4 Factor de Asignación y Priorización de la Programación Lineal

El Factor de Asignación y Priorización de la Programación Lineal (abreviatura para este trabajo: Factor de Asignación), también conocido como “Utilización”⁴ se refiere al nivel de asignación de camiones que se le dará a una pala. Por ejemplo, si el FA es 100%, significa que el equipo de carguío estará saturado de camiones.

Por otro lado, el término “Nivel de Prioridad” hace referencia a la prioridad que tiene dicha pala en la asignación de camiones en cuanto a flujos de tonelaje, que es la manera que tiene el Sistema de Despacho de realizar dicha asignación. Cabe mencionar que, por tanto, es una asignación que se realiza en base a una variable continua (tonelaje) y no discreta (cantidad de camiones). Ambos son importantes, puesto que el sistema los considera al momento de realizar asignaciones.

Por último, cabe mencionar que ambos factores son datos flotantes en el sistema de despacho y que los supervisores de despacho los modifican en tiempo real para asignar los camiones de acuerdo con los requerimientos de la mina en dicho momento.

⁴ No debe confundirse el término “Utilización” con “Utilización Operativa”, puesto que el primer concepto hace referencia a la asignación de camiones por parte del Sistema de Despacho y el segundo a un indicador operacional.

Modulo Excav: PA06

Modulo Ayuda

Pala: **PA06**

Estado Operativo	Razon EN PRODUCCION	Comentario -	
Ubicacion Sitio Cargue RF6-4345-606-1	Botadero Fijo Stock RS2-GOLONDRINA/SME	Panel ID: 226	Deshabil.? NO
Ley Current: RF6-4345-606-1/SME ID 1: - ID 2: - Asignacion Fija a Botadero: NINGUNA		Material Tipo: Sul. Media Tipo 1: - Tipo 2: -	
Accion Last: Lleno Next: Cargando	Camiones Fijos - - -	Utilizacion/Prioridades Utilizacion: 100,0 Nivel de Prioridad: 2	

Figura 3.2 Factores de Asignación y Priorización de la Programación Lineal y Prioridad de Palas. Fuente: Curso de Despacho.

3.5 Software Vulcan® y Herramienta Haulage Profile®

El software minero - geológico Vulcan® es uno de los productos principales de Maptek®. Entre sus principales características, destaca su aplicación a todos los aspectos geológicos y de planificación minera; posee las herramientas necesarias para la creación del diseño, tanto para minas de cielo abierto como para subterráneas; permite el modelamiento de yacimientos metálicos, carboníferos y de metales industriales y entrega las herramientas para un completo desarrollo topográfico y de geomensura.

La herramienta de Vulcan utilizada para este proyecto fue Haulage Profile®, la cual permite al usuario la obtención de los tiempos de tránsito de un equipo de transporte en una ruta, basándose en la información de entrada: topografía de la mina, definición de las rutas de tránsito y de los equipos de carguío y transporte. En particular, para éstos últimos, la herramienta requiere los datos de perfiles de velocidad y velocidad acorde a radios de curvatura.

4 Antecedentes

4.1 Minería Chilena del Cobre

La minería de hoy en Chile se destaca por sobre las otras actividades económicas del país. En particular, el cobre lidera las ventas con un orden de magnitud más que cualquier otro producto, tal como se observa en Tabla 4.1. [11]

Tabla 4.1 Valores de embarques de exportación (millones US\$ FOB), años 2011- 2015. Fuente: Banco Central de Chile.

Tipo Mineral	2011		2012		2013		2014		2015	
	US\$	%	US\$	%	US\$	%	US\$	%	US\$	%
Cobre	42,664.0	86.6	42,322.0	93.5	39,739.0	87.8	37,969.0	88.1	30,374.0	88.7
Hierro	1,619.0	3.3	1,349.0	3.0	1,376.0	3.0	1,141.0	2.6	718	2.1
Salitre y Yodo	789.0	1.6	1,116.0	2.5	959.0	2.1	822.0	1.9	612.0	1.8
Molibdeno	1,486.0	3.0	1,248.0	2.8	868.0	1.9	1,196.0	2.8	755.0	2.2
Oro	1,487.0	3.0	1,665.0	3.7	1,416.0	3.1	1,088.0	2.5	800.0	2.3
Plata	652.0	1.3	522.0	1.2	284.0	0.6	196.0	0.5	141.0	0.4
Otros	546.9	1.1	606.0	1.3	632.0	1.4	683.0	1.6	849.0	2.5
Total Minería	49,243.9	100.0	48,828.0	100.0	45,274.0	100.0	43,095.0	100.0	34,249.0	100.0

En cuanto a los indicadores económicos del cobre, tanto la producción de este (Véase Gráfico 4.1) como las exportaciones y la participación país del metal rojo, estos se presentan en Tabla 4.2. Se observa que las exportaciones de cobre corresponden a un 48% del total país, lo cual se considera un aporte significativo a la economía chilena.

Tabla 4.2 Indicadores Económicos del Cobre, años 2006-2015. Fuente: (1) SERNAGEOMIN - (2) COCHILCO.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Producción Cobre (Miles de Toneladas)⁽¹⁾	5,382	5,602	5,364	5,412	5,457	5,257	5,485	5,851	5,793	5,833
Exportación Minera Cobre Millones US\$⁽²⁾	33,340	38,299	34,250	26,937	40,342	42,664	42,322	39,739	37,969	30,374
Exportación Total País Millones US\$⁽²⁾	58,995	68,464	67,765	53,024	71,028	80,586	78,813	77,368	76,649	63,362
Participación Cobre Sobre Total País (%)	57	56	51	51	57	53	54	51	50	48

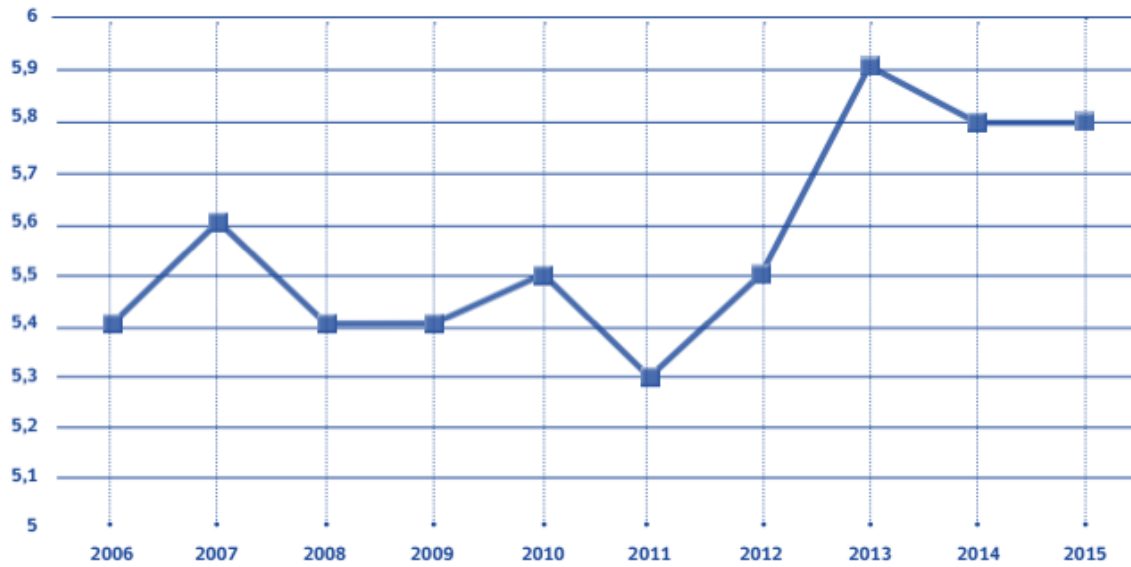


Gráfico 4.1 Producción de cobre 2006 - 2015, millones de toneladas. Fuente: SERNAGEOMIN.

Por otro lado, en Figura 4.1 se muestra un mapa con las grandes empresas mineras de Chile. Se observa que son más de 30 yacimientos en explotación, lo cual avala la gran producción de este metal en el país.

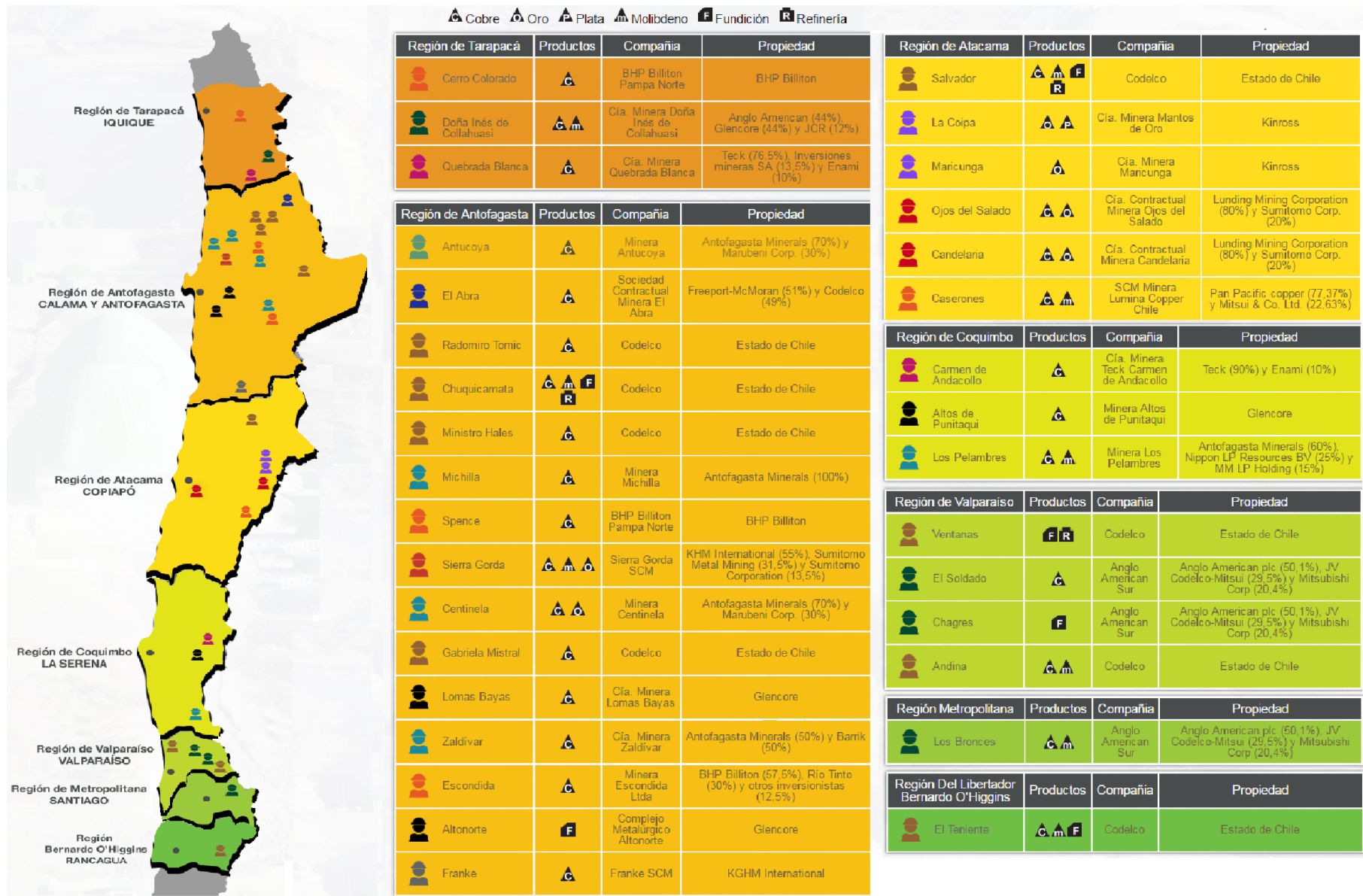


Figura 4.1 Mapa de la Gran Minería. Fuente: Consejo Minero de Chile

En Tabla 4.3 se muestran las principales operaciones de la gran minería, de las presentadas anteriormente. Se observa que CMDIC es la segunda operación con mayor producción acumulada hasta junio de 2016. [25]

Tabla 4.3 Producción Acumulada a junio de 2016 de las Principales Operaciones Mineras Chilenas. Representatividad de la muestra: 89.0%. Fuente: SERNAGEOMIN, 2015.

Operación	Principal Controlador(es)	Producción Acumulada a junio 2016	
		[ktmf Cu]	[%]
Escondida	BHP Billiton	540.0	19.5
El Teniente	Codelco	233.0	8.4
Collahuasi	Anglo American plc y Glencore	244.0	8.8
Anglo American Sur	Anglo American plc	183.0	6.6
Los Pelambres	Antofagasta Minerals	178.0	6.4
Radomiro Tomic	Codelco	156.0	5.6
Chuquicamata	Codelco	149.0	5.4
Ministro Hales	Codelco	124.0	4.5
Centinela	Antofagasta Minerals	98.0	3.6
Andina	Codelco	93.0	3.4
Spence	BHP Billiton	81.0	2.9
Candelaria	LundinMining	63.0	2.3
Gaby	Codelco	59.0	2.1
El Abra	Freeport McM	54.0	1.9
Mantos Copper	Audley Capital Advisors LLP	51.0	1.9
Zaldívar	Barrick Gold/ Antofagasta Minerals	52.0	1.9
Cerro Colorado	BHP Billiton	45.0	1.6
Salvador	Codelco	29.0	1.0
Quebrada Blanca	Teck	17.0	0.6
Otros	-	315.0	11.4
Total	-	2,764.0	100.0

4.2 Descripción de la Faena

4.2.1 Antecedentes Generales de la Faena

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) es una sociedad contractual minera perteneciente a Anglo American Plc. (44%), Glencore (44%) y Japan Collahuasi Resources B.V (12%). La faena está ubicada en la Región de Tarapacá, Provincia del Tamarugal, específicamente en la comuna de Pica. Geográficamente, Collahuasi se ubica en el altiplano chileno de la I Región, a 185 km de la ciudad de Iquique, entre los 3,800 y 4,600 msnm. En Figura 4.2 se muestra la ubicación general de la faena Collahuasi.

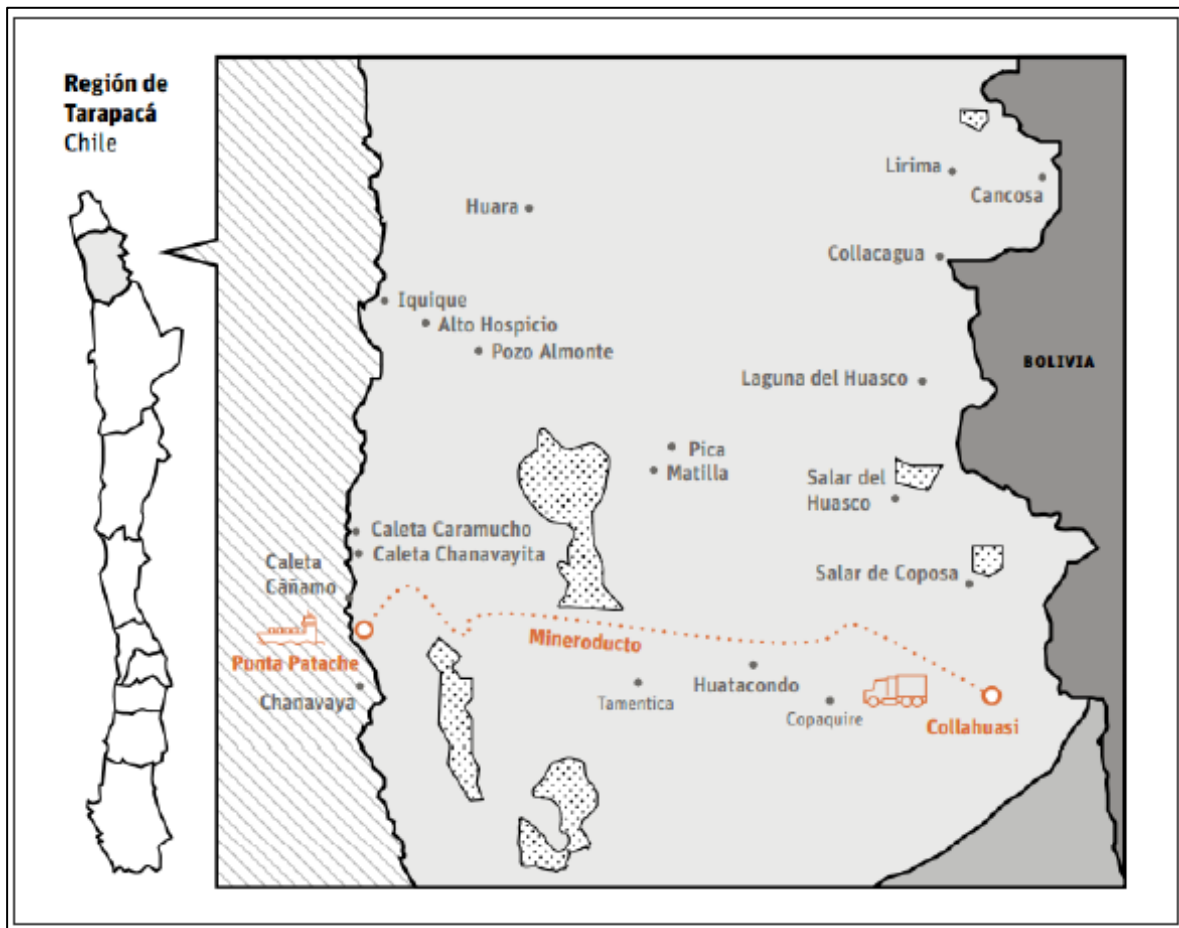


Figura 4.2 Ubicación general de faena Collahuasi. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.

Collahuasi explota desde 1998 los yacimientos pertenecientes al Distrito Minero Collahuasi, el cual se presenta en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En ella se aprecian las instalaciones de Faena Cordillera: Rosario, que es donde se ubica el rajo actualmente en explotación; y Ujina, donde se encuentra la Planta de Procesamiento y el Rajo Ujina, que no está operativo actualmente.

La explotación se realiza actualmente desde el rajo Rosario, donde se explotan principalmente minerales sulfurados (Véase Figura 4.3). Éstos se procesan en la planta concentradora (Ujina) mediante flotación convencional para producir concentrado de cobre, el cual es posteriormente enviado como pulpa a través de dos mineroductos de 203 km a la planta ubicada en Punta Patache, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, donde es filtrado y embarcado en el terminal mecanizado propiedad de Collahuasi. Como subproducto del concentrado de cobre se obtiene molibdeno, el cual es procesado en la planta ubicada en Punta Patache para ser transportado a destino final vía terrestre.



Figura 4.3 Instalaciones en Área Cordillera (Rajo Rosario). Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.

La tasa promedio de procesamiento de minerales sulfurados es de 170 ktpd, lo cual genera relaves que son depositados en el Depósito de Relaves Pampa Pabellón mediante la tecnología de deposición convencional.

Anteriormente, Collahuasi explotaba óxidos desde el Rajo Ujina, los cuales se procesaban por lixiviación. Sin embargo, este rajo no se encuentra operativo desde el año 2014 y el procesamiento de óxidos tampoco está en funcionamiento debido al costo del proceso. Estas instalaciones se muestran en Figura 4.4.

Las instalaciones anteriormente mencionadas (planta concentradora de sulfuros, Punta Patache y depósito de relaves) se muestran en Figura 4.4 y Figura 4.5.

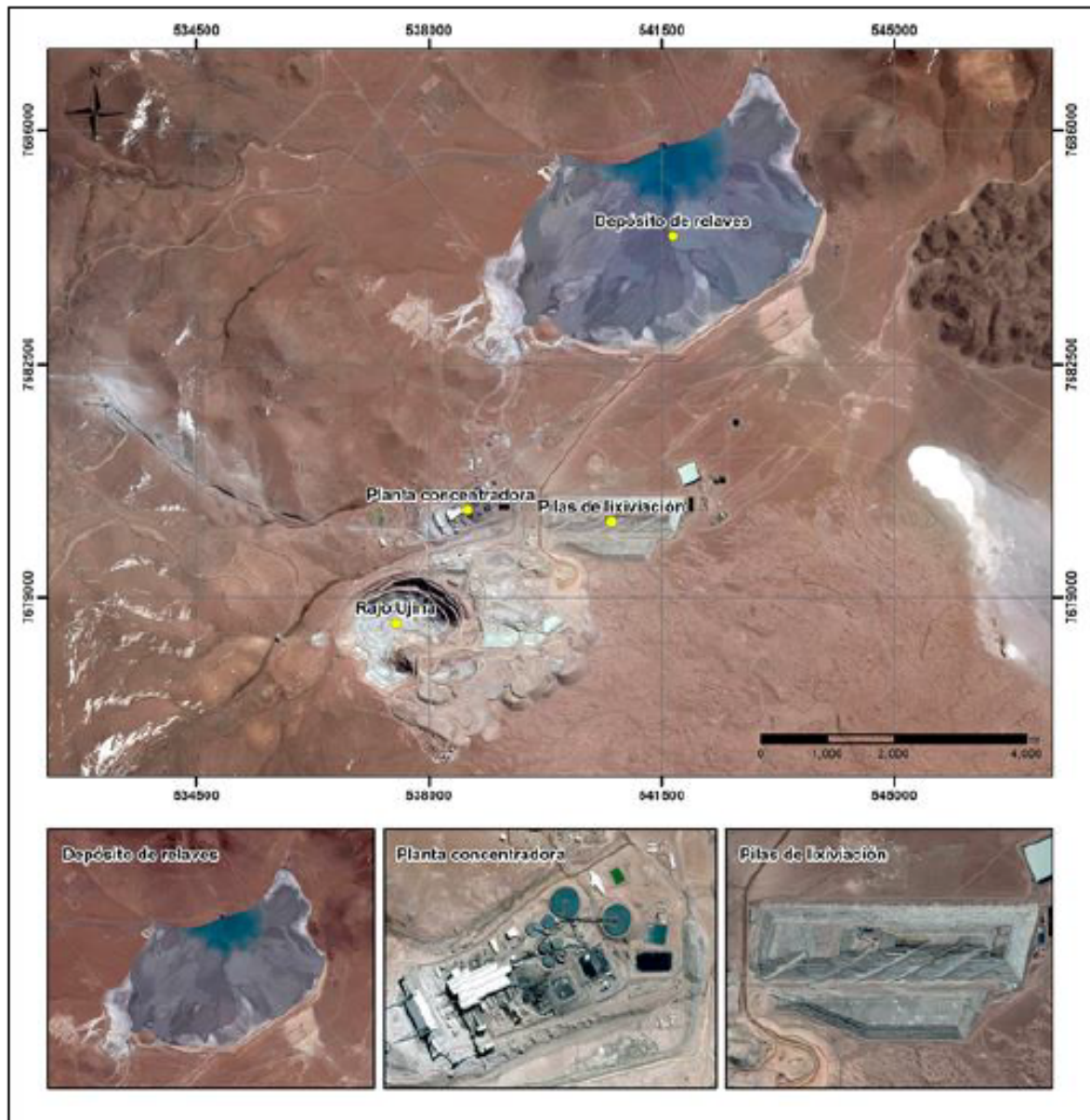


Figura 4.4 Instalaciones en Área Cordillera (Ujina). Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.

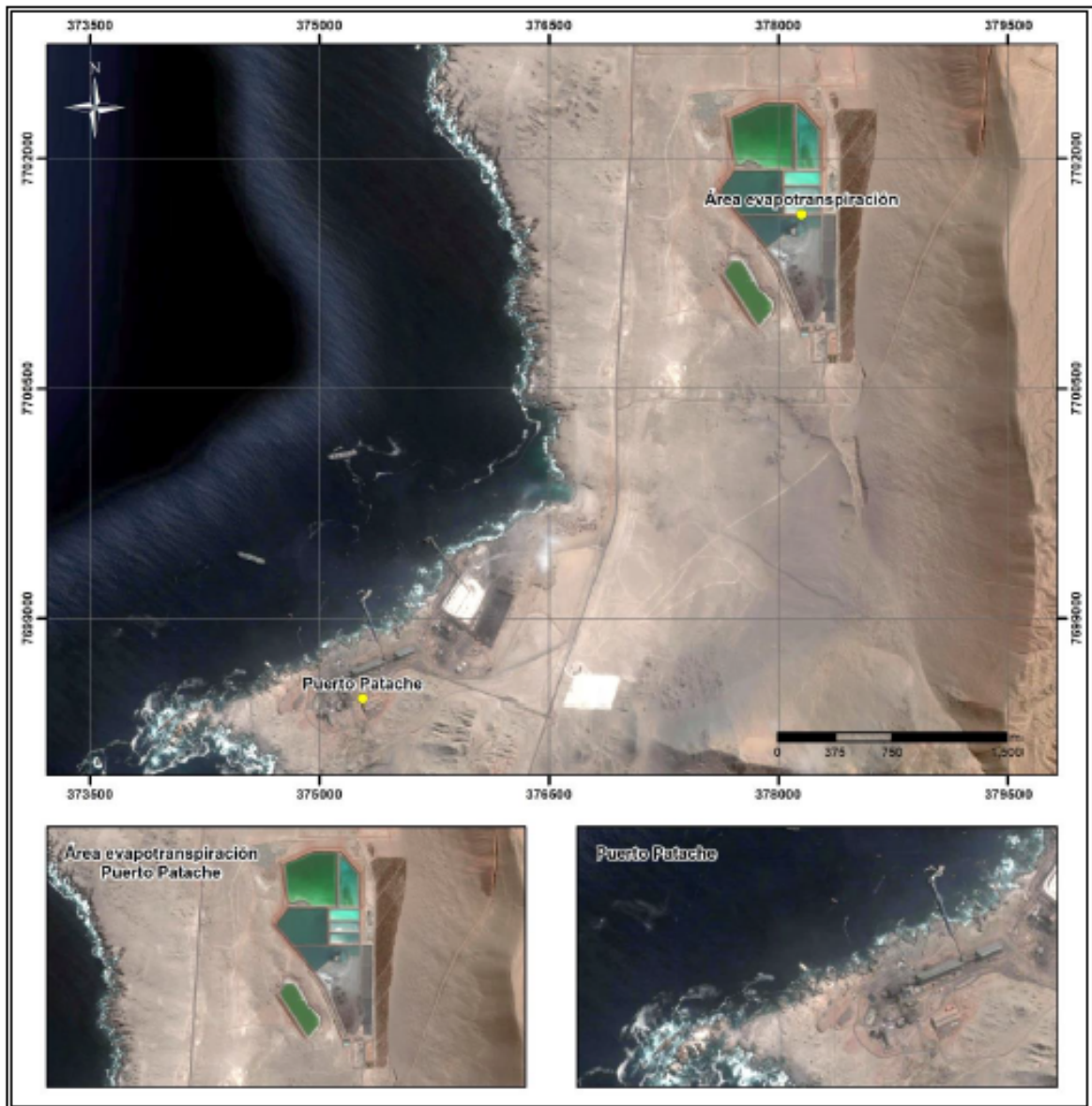


Figura 4.5 Instalaciones en Área Terminal Marítimo. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.

4.2.2 Geología

La zona donde se emplaza Collahuasi presenta el siguiente perfil transversal continental: el Cordón Montañoso Precordillerano de Collahuasi y la Depresión de los Salares, las cuales, junto con la Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicie Litoral hacia el oeste, y la alta Cordillera de los Andes y el Altiplano hacia el este, conforman este perfil.

Estas macro unidades morfo estructurales, en general con dirección N-S se habrían originado como resultado de una actividad tectónica acontecida durante el Terciario. Las fallas más notables son la Falla Oeste, la Falla Río Loa y la Falla Pampa Pabellón.

El Cordon Pre-Cordillerano corresponde a un bloque de 30 a 40 km de ancho de elongación N-S, donde se emplazan los distritos mineros de Quebrada Blanca y Collahuasi. En el borde occidental de este bloque se encuentra la denominada “Falla Domeyko (Oeste)”, megaestructura donde se emplazan otros grandes yacimientos minerales: Mansa Mina, Mina Sur, Chuquicamata, Radomiro Tomic, El Abra.

El distrito minero Collahuasi se ubica en Los Andes en el norte de Chile y posee las coordenadas UTM especificadas en Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Coordenadas UTM de la faena Collahuasi. Huso 19 Sur. Datum: WGS 84. Fuente: Google Earth, 2018.

Coordenadas UTM de la faena Collahuasi (Huso 19 Sur)		
Punto	Este [m]	Norte [m]
1	545,086.0	7,696,237.0
2	545,086.0	7,677,829.3
3	527,714.4	7,677,829.3
4	527,714.4	7,696,237.0

Se caracteriza por la presencia de un grupo de pórfidos de cobre-molibdeno mayores (Quebrada Blanca, Rosario y Ujina) y un pórfido de molibdeno (Copaquire) ubicados entre los 3,500 a 4,600 msnm. La mineralización se generó entre 39 Ma. y 33 Ma. y se encuentra relacionada a complejos de pórfidos félsicos emplazados dentro de un basamento del Paleozoico superior y estratos marino-continetales del Paleozoico superior – Mesozoico inferior.

Los depósitos de Rosario y Rosario Oeste se hallan emplazados en las volcanitas de la Formación Collahuasi, la cual es una secuencia volcano-sedimentaria de edad Permo-Triásica. Está constituida por rocas riolíticas, andesíticas y sedimentarias clásticas en una potencia de 4 km.

Los cuerpos intrusivos presentes en la zona son de composición variada, encontrándose dioritas, monzonitas, granodioritas y granitos.

En el distrito hay tres períodos de emplazamiento de intrusivos; de más antiguo a más nuevo son:

1. Pérmico – Triásico: corresponde a granitos y granodioritas que intruyen en la Formación Collahuasi
2. Cretácico superior – Terciario inferior: corresponde a dioritas cuarcíferas y granodioritas intruyendo en las formaciones Cerro Empexa, Quehuita y Collahuasi.
3. Eoceno superior – Oligoceno inferior: son intrusiones cuarzo – monzoníticas en la Formación Collahuasi. Este último evento generó los pórfidos cupríferos de Rosario y Rosario Oeste. Cabe mencionar que estos depósitos corresponden a dos ambientes de mineralización distintos: Rosario es de tipo pórfido cuprífero, mientras que Rosario Oeste es un epitermal de alta sulfidación con ocurrencia de vetas mineralizadas importantes además del mineral diseminado. Se supone que ambos ambientes se localizan adyacentes debido a la activación de una falla normal, hipótesis que aún sigue en estudio.

La geología del Distrito Quebrada Blanca – Collahuasi se muestra en Figura 4.6.

Por último, el distrito Collahuasi posee tanto recursos minerales metálicos como no metálicos. Dentro de los primeros, hay grandes cantidades de cobre, molibdeno, oro y plata; mientras que los no metálicos son depósitos de azufre y salares.

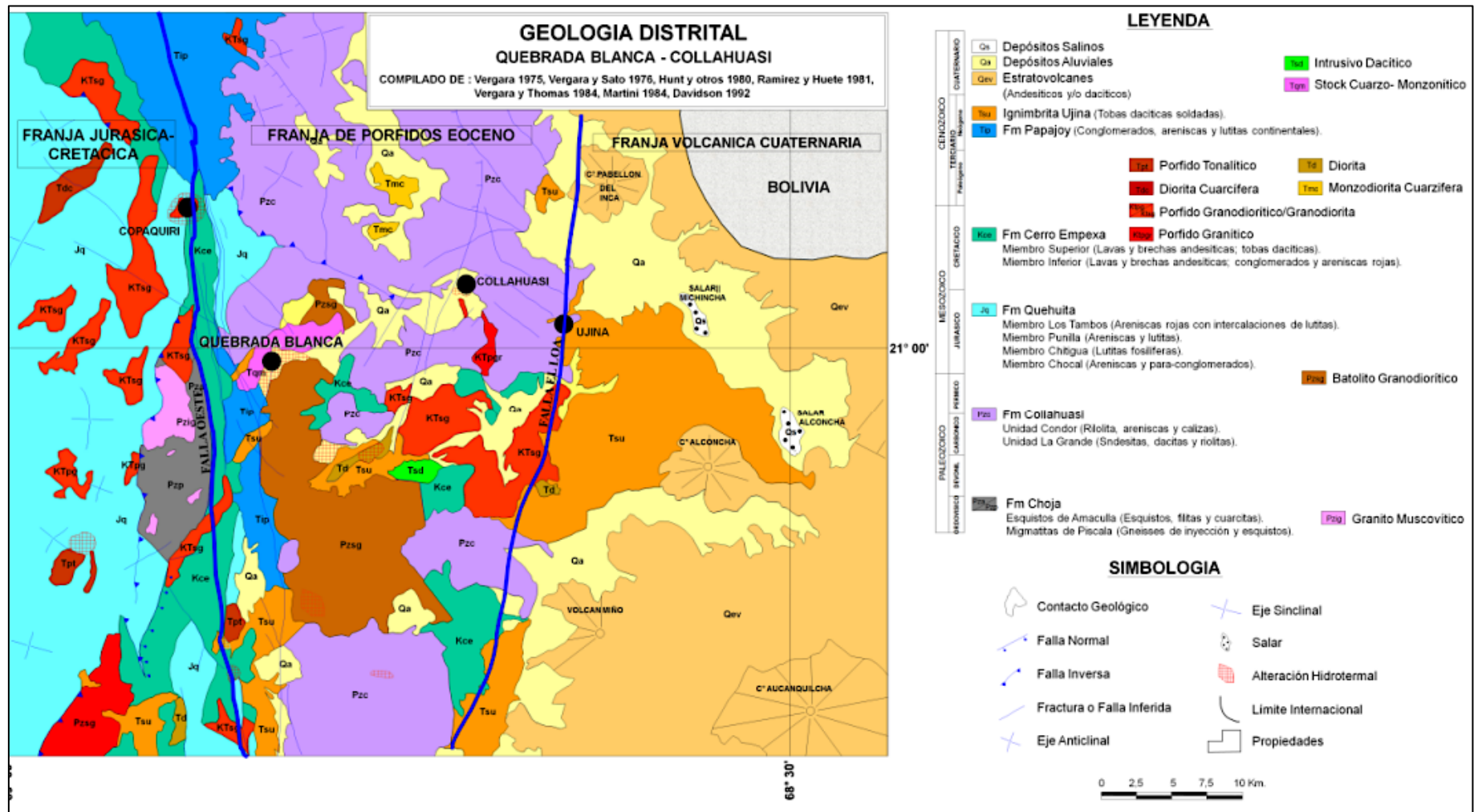


Figura 4.6 Geología Regional de Quebrada Blanca - Distrito Collahuasi. Fuente: Compilado de Vergara 1975, Vergara y Sato 1976, Junt et al. 1980, Vergara y Thomas 1984, Martini 1984, Davidson 1992.

4.2.3 Proceso de Explotación Actual

El método de explotación en rajo Rosario corresponde a un sistema tradicional de explotación a rajo abierto, el cual contempla los procesos unitarios de perforación, tronadura, carguío y transporte. Se presentan detalles de estas últimas dos operaciones.

Para el carguío de materiales se utilizan palas de cable de 73 yd³, palas hidráulicas de 36 y 73 yd³ y cargadores frontales para apoyo a la operación de 33 yd³ (Véase Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Resumen Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Equipo de Carguío	Modelo	Capacidad Balde [yd ³]	Cantidad de Equipos Operativos	Tipo de Equipo
Pala	Bucyrus 495HR	73	4	Eléctrica
	P&H 4100 XPC	73	4	Eléctrica
	Komatsu PC5500	36	2	Hidráulica
	Komatsu PC8000	56	1	Hidráulica
Cargador Frontal	Marathon LeTourneau L-1850	33	3	Hidráulico

Por otro lado, las especificaciones de la flota de equipos de transporte se presentan en Tabla 4.6. Los orígenes y destinos por los cuales transitan los camiones se muestran en Figura 4.7.

Tabla 4.6 Resumen Equipos de Transporte. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Equipo de Transporte	Modelo	Capacidad [t]	Cantidad de Equipos Operativos
Camión	Komatsu 930 E	300	86
	Liebherr T 282C	340	6

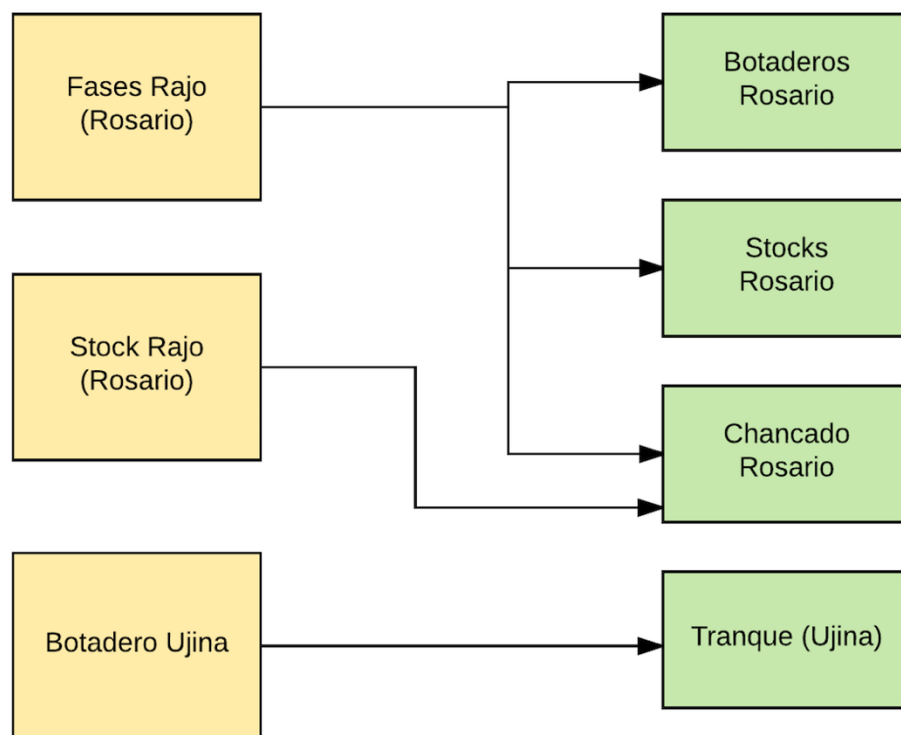


Figura 4.7 Esquema de Orígenes y Destinos considerados en el Modelo. Fuente: Elaboración propia.

Las especificaciones de cada locación de origen se detallan en Tabla 4.7, las locaciones de destino en Tabla 4.8 y las abreviaturas de los tipos de material en Tabla 4.9.

En las dos primeras tablas, la primera columna corresponde a la región a la cual pertenece la locación: Rosario o Ujina. Luego, se detalla el tipo de locación; por ejemplo: Fases Rajo, la cual está compuesta de las locaciones de origen Fase 08, Fase 09, Fase 10 y Fase 11. La última columna corresponde al tipo de material que se genera, si es una locación de origen; o al que recibe si es una locación de destino.

Tabla 4.7 Resumen Locaciones de Origen. Fuente: Elaboración propia.

Región	Tipo de Locación de Origen	Nombre de la Locación de Origen	Tipo de Material que genera
Rosario	Fases Rajo	Fase 08	SAL
		Fase 09	SME
		Fase 10	SBH
		Fase 11	SBL
	Stock Rajo	Flamenco	Estéril
Ujina	Ujina	Botadero Ujina	SME
			Estéril

Tabla 4.8 Resumen Locaciones de Destino. Fuente: Elaboración propia.

Ubicación	Tipo de Locación de Destino	Nombre de la Locación de Destino	Tipo de Material que recibe
Rosario	Chancado Rosario	Chancado Rosario	SAL SME SBH SBL (ocasionalmente)
		Stocks de Sulfuros Rosario	Flamenco
	Golondrina		SME
	Gaviota		SAL
	Parina		SME
	SBL		SBL
	Stock CR04		SME
	Suri		SBH
	Botaderos Rosario	Chinchilla	Estéril
		Guanaco Corto	
		Guanaco Medio	
		Guanaco Largo	
		Puma	
Ujina	Tranque	Zorro	Estéril
		Tranque	

Tabla 4.9 Resumen Tipos de Material. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Material	Abreviación	Definición
Estéril	Estéril	Ley Cu (%) < 0.3
Sulfuro de Baja Low	SBL	$0.3 \leq \text{Ley Cu (\%)} < 0.5$
Sulfuro de Baja High	SBH	$0.5 \leq \text{Ley Cu (\%)} < 0.7$
Sulfuro de Media	SME	$0.7 \leq \text{Ley Cu (\%)} < 1.0$
Sulfuro de Alta	SAL	$\text{Ley Cu (\%)} \geq 1.0$
Mixto	MIX	$\text{Ley Cu (\%)} > 0.45$ y $0.2 < \text{RS} < 0.45$
Óxidos	OXA	$\text{Ley Cu (\%)} > 0.4$ y $\text{RS} > 0.45$

En cuanto a la tabla anterior, cabe mencionar que, debido a que la planta de óxidos no se encuentra operativa actualmente, este tipo de materiales, incluyendo mixtos, se destinan a botadero.

4.2.4 Procesamiento de Minerales

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad no se encuentra en funcionamiento el procesamiento de óxidos desde octubre de 2015, que es cuando se enviaron los últimos stocks a lixiviación. Por ende, el proceso productivo actual sólo considera la concentración de sulfuros, los cuales son transportados desde el rajo o stocks hasta el chancador primario, el cual es de tipo giratorio.

El mineral chancado tiene un tamaño máximo de 300 mm y es enviado por medio de una correa transportadora al acopio de mineral grueso, que se ubica en el área de la planta (Ujina), donde se concentra por flotación convencional, para su posterior transporte al área de terminal marítimo (Puerto Patache) donde se filtra y se despacha al cliente.

El proceso descrito se presenta en Figura 4.8.

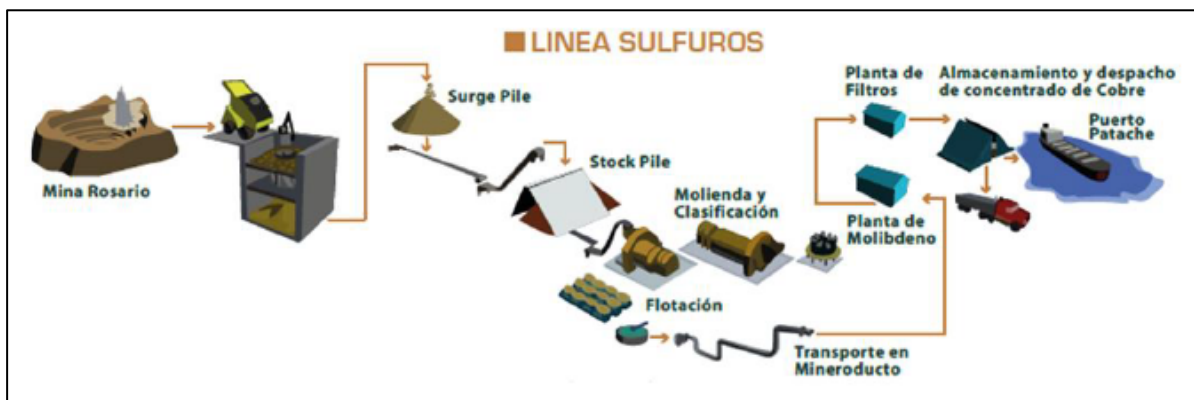


Figura 4.8 Proceso Productivo Simplificado Collahuasi. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2014.

Posteriormente el mineral proveniente de la etapa de chancado es sometido a molienda para reducir el tamaño ($P_{80} = 115 \text{ mm}$) con tal de formar una pulpa con la adición de agua al proceso.

La planta concentradora de la Compañía cuenta con 3 líneas de molienda: dos líneas compuestas cada una por un molino SAG de 32" x 20" más un molino de bolas de 22" x 36"; y la tercera línea por un molino SAG de 40" x 22" más dos molinos de bolas de 26" x 38". A esto deben sumarse 8 baterías de hidrociclones en total.

La alimentación a la planta concentradora posee un ritmo promedio anual de 126 ktpd que, descontando los tiempos de detención (5% aproximadamente) corresponde a una tasa efectiva media anual de 133 ktpd. La producción media anual de la planta es de 1.4 Mtpa promedio, alcanzando una producción total aproximada de 450 mil toneladas anuales de cobre fino. El procesamiento se muestra en Figura 4.9.

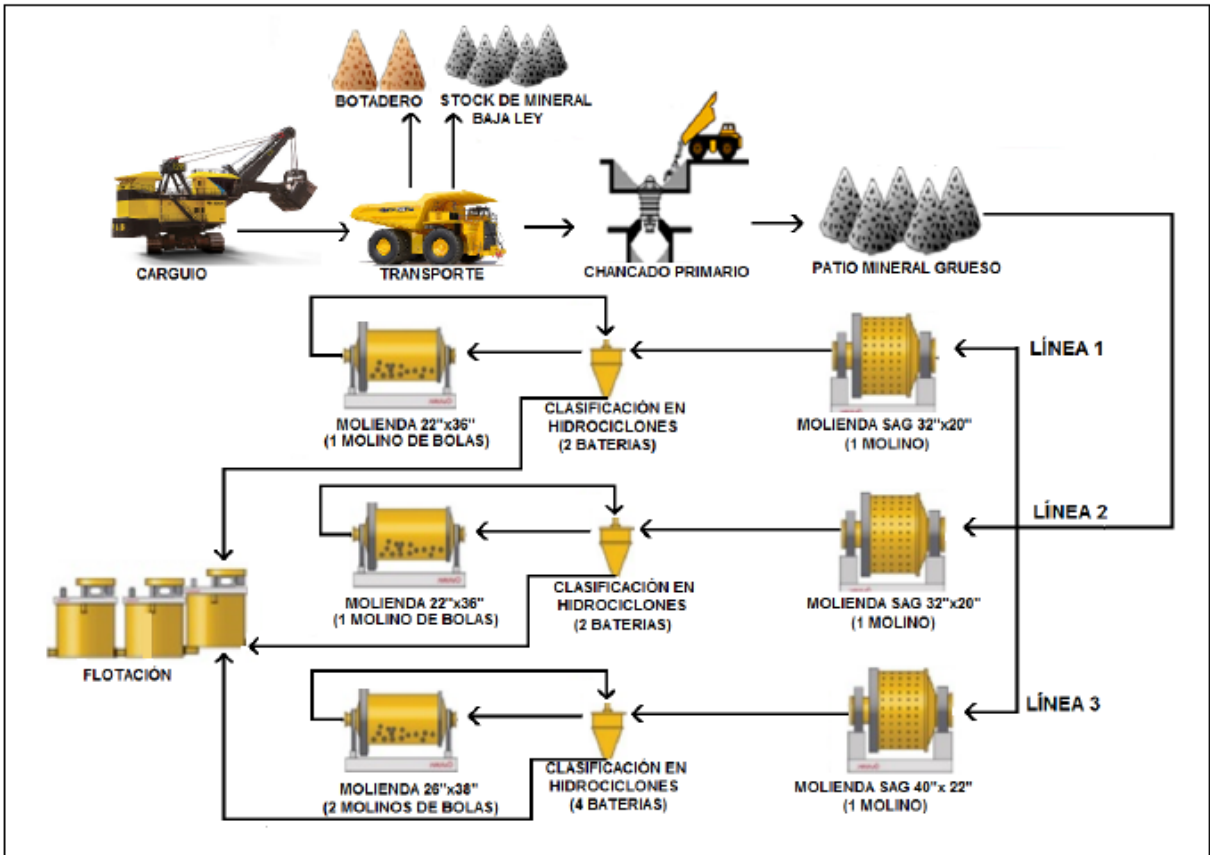


Figura 4.9 Flowsheet Detallado de la Etapa de Molienda. Fuente: Martínez, 2016.

4.2.5 Cadena de Valor de la Compañía

En Figura 4.10 se muestra la cadena de valor de Collahuasi, con sus respectivos procesos. Se resalta la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo en cuadro verde.

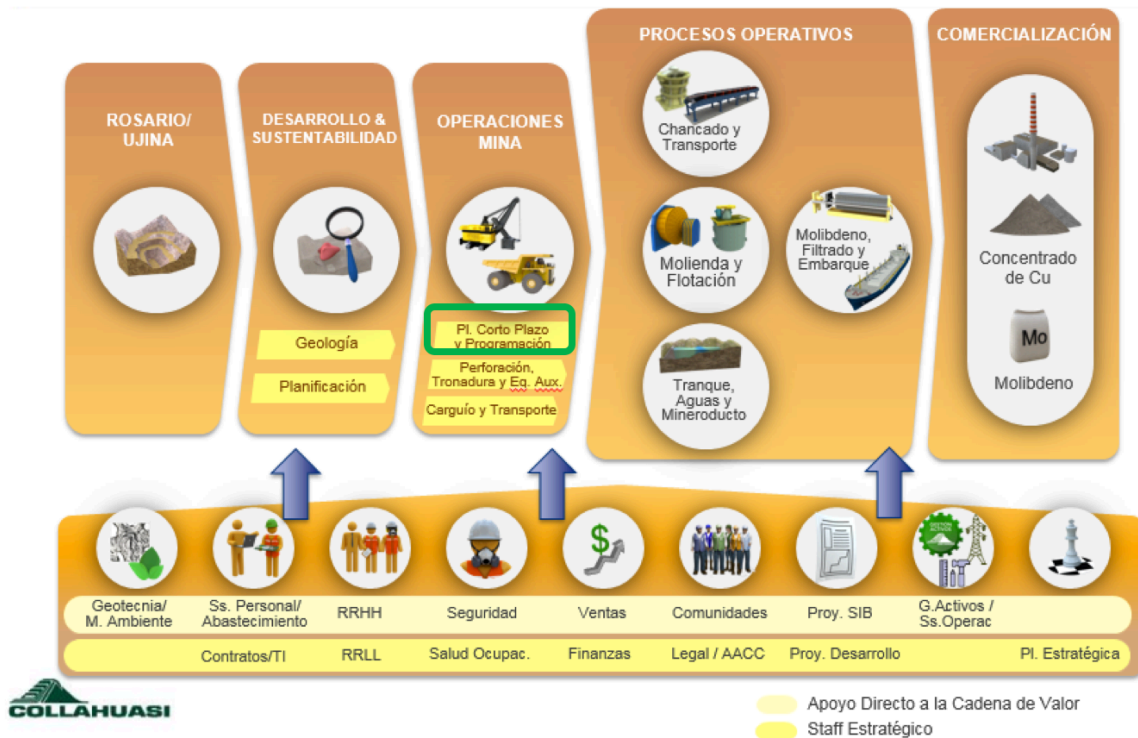


Figura 4.10 División Administrativa de CMDIC. Fuente: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, 2017.

La memoria se desarrolla en la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo, la cual reporta a la Gerencia de Gestión Mina en la Vicepresidencia Mina.

Los procesos llevados a cabo en la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo son la elaboración de planes de corto plazo (mensual, semanal, diarios) y forecast, además de controles topográficos (replanteos y levantamientos) que permitan asegurar el cumplimiento de la producción mina definida en el budget, optimizando los recursos y teniendo como prioridad el suministro de mineral a concentradora de acuerdo a la calidad y cantidad requerida; así como también la distribución de todos los demás materiales, mineral y desmonte, a sus destinos respectivos, gestionando los riesgos que permitan una operación sostenible.

Por último, se presenta el organigrama de la Compañía en Figura 4.11, desde el Presidente Ejecutivo a los Ingenieros de Planificación.

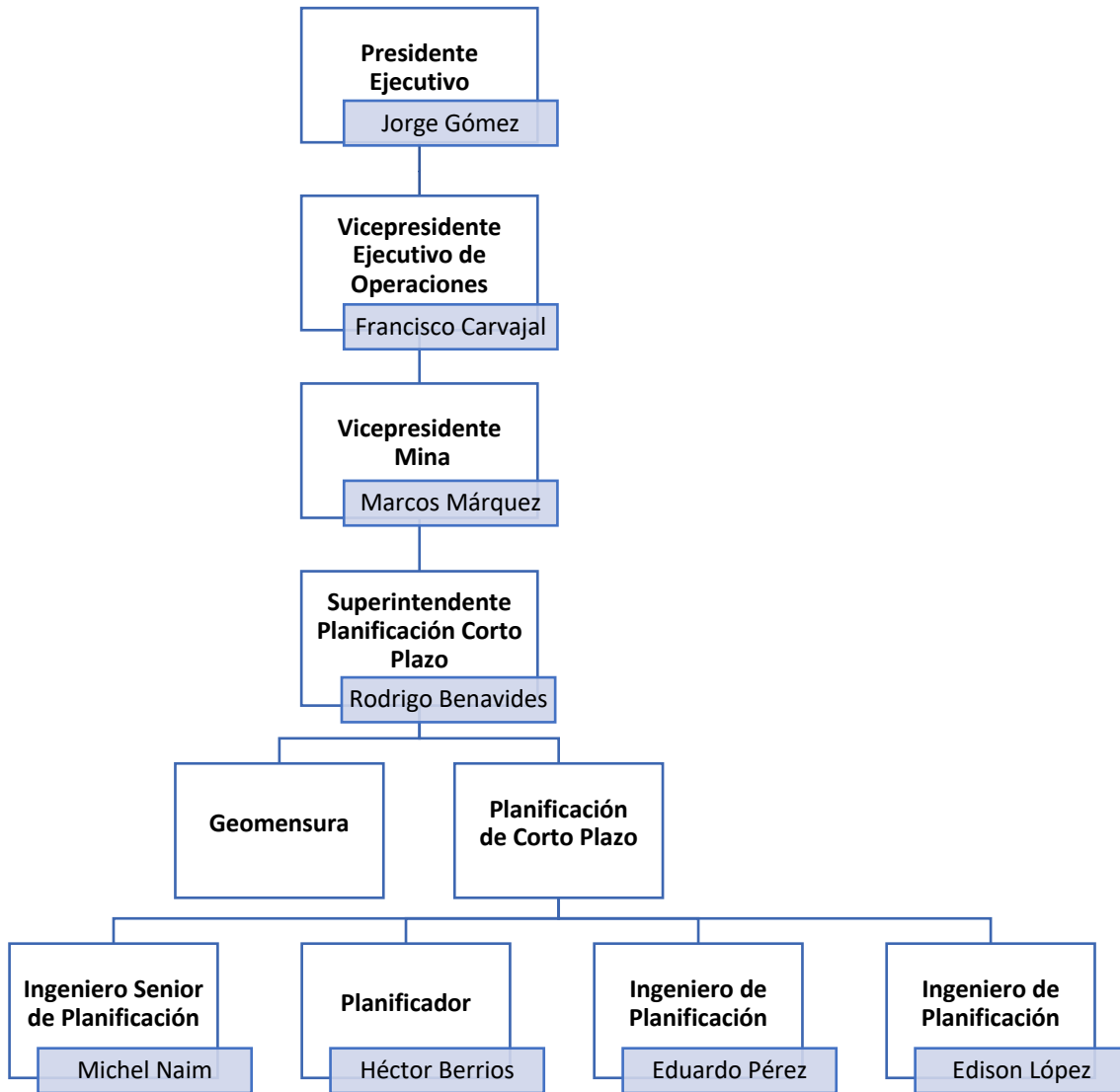


Figura 4.11 Organigrama Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Plan Mensual de Producción

El Plan Mensual de Producción es elaborado por la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo y en él se estipulan las metas que debe alcanzar la Compañía y se comparan con las establecidas en el Plan Budget.

Estos objetivos que se pretende alcanzar son importantes tanto para la mina como para la planta. Para la mina los más significativos corresponden a los tonelajes que se deben mover por fase cumpliendo una ley y el movimiento total mina. Estos datos corresponden a entradas para la planta, puesto que para obtener un fino de cobre u otro metal de interés se requiere un rango de tonelajes y leyes alimentados. Otros datos de interés para la planta es el tonelaje procesado, la cantidad de fino producido y la recuperación de metal en el proceso.

5 Desarrollo del Modelo de Cálculo de Equipos de Carguío

El objetivo principal de esta parte del modelo es verificar si la asignación de equipos de carguío del plan mensual es capaz de cumplir el tonelaje requerido por fases, también definido en el plan. Además, permite evaluar el tonelaje máximo de dicha asignación.

A continuación, se muestra el desarrollo del modelo realizado en cuanto a la operación de carguío. La primera parte corresponde al análisis previo realizado para obtener los indicadores operacionales de los equipos de carguío, puesto que corresponden a datos de entrada para el modelo. La segunda parte describe el desarrollo del modelo en sí, el cual consta de dos versiones: una donde la asignación de los equipos de carguío a la fase se realiza de manera manual y otra donde se efectúa automáticamente.

Por último, la notación utilizada para describir los tipos de equipos de carguío es la siguiente:

1. **PA:** Pala. Ejemplo: PA06
2. **HR:** Modelo de Pala Bucyrus 495 HR
3. **P&H:** Modelo de Pala P&H 4100 XPC
4. **PC:** Modelo de Pala Komatsu PC5500 (PA15 y PA16) y PC8000 (PA20)
5. **CF:** Cargador Frontal Marathon LeTorneau L-1850. Ejemplo: CF05

5.1 Análisis de Datos de Indicadores Operacionales de Equipos de Carguío

Para la operación de carguío se realizó un análisis de datos históricos de los indicadores operacionales de los equipos, en base a las ecuaciones definidas la sección 3.3.2. Los resultados obtenidos se muestran en Tabla 5.1. Los datos utilizados para el análisis de indicadores están comprendidos entre junio y agosto de 2017, pues fue en junio del mismo año en que cesaron de operar Palas 01 y 04⁵, viéndose afectados los rendimientos de los demás equipos de carguío en operación.

⁵ Marca Bucyrus Modelo 495 BII, balde de 56 yd³

Tabla 5.1 Indicadores Operacionales Históricos de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.

Pala	Modelo de Pala	UO [%]	ROp. [t/hop]
PA06	HR	63.3	3,774
PA08	HR	86.5	4,143
PA09	HR	89.1	5,168
PA10	HR	89.3	4,899
PA11	P&H	89.3	5,241
PA12	P&H	73.4	4,152
PA13	P&H	85.7	5,578
PA14	P&H	60.5	4,375
PA15	PC5500	66.9	1,698
PA16	PC5500	48.8	1,693
PA20	PC8000	62.2	1,848
CF04	CF	63.6	1,387
CF05	CF	64.9	1,298
CF06	CF	71.0	1,279

Cabe mencionar que no se calculó la Disponibilidad Física, pues ésta no se utiliza en el modelo, por considerársele un indicador sobre el cual no se pueden generar grandes cambios desde la perspectiva de la Superintendencia de Planificación de Corto Plazo, dado que es definido por la Superintendencia de Planificación de la Mantenición de Palas en su entregable (Plan Mensual de Mantenición de Palas).

A continuación, se describen las conclusiones y restricciones obtenidas del análisis de los indicadores operacionales de los equipos de carguío.

5.1.1 Rendimiento Operativo

Como primera parte del estudio, se analizaron los rendimientos operativos de los equipos de carguío agrupados por modelo:

- Palas 06, 08, 09 y 10 corresponden a Palas HR
- Palas 11, 12, 13 y 14 corresponden a Palas P&H
- Palas 15, 16 y 20 corresponden a Palas PC
- Cargadores Frontales 04, 05 y 06 corresponden a CF

5.1.1.1 Palas Modelo HR

Los rendimientos operativos de las palas modelo HR se presentan en Gráfico 5.1. Se observa que existe gran variación con respecto a los rendimientos, lo cual se debe a las condiciones de carguío particulares en las que estaban operando las palas. Por ejemplo, Palas 06 y 08 estaban cargando en Fase 11, una fase caracterizada por tener un piso más blando de material arcilloso, el cual tiende a pegarse al balde. Además, eran dos palas de 73 yd³ cargando en una fase en etapa inicial, motivo por el cual tenían menos espacio para desplazarse.

Por otro lado, Palas 09 y 10, generalmente, estuvieron cargando estéril privilegiando desarrollos, motivo por el cual su rendimiento tiende a ser mayor: 5,055 [t/hop] en promedio, comparados con Pala 06 con 3,583 [t/hop] (29.1% menor) y Pala 08 con 4,143 [t/hop] (18.1% menor).

Cabe mencionar que, a pesar de que éstos son comportamientos de las palas en los meses de evaluación, corresponden solamente a tendencias en los rendimientos de ellas, puesto que éstos valores van cambiando a medida que avanza la mina y se modifican las condiciones geológicas y mecánicas de la mina, como por ejemplo, preferencias de carguío de ciertos materiales debido al plan o presencia de fallas estructurales.

Otro factor que influye en los rendimientos es el Factor de Asignación de camiones, determinado por el Despacho, el cual determina el grado de saturación de la pala debido a los camiones. Este factor, como se mencionó anteriormente, obedece a requerimientos operacionales, como por ejemplo, saturar o no una pala de acuerdo a la condición de la frente o a los requerimientos del plan diario.

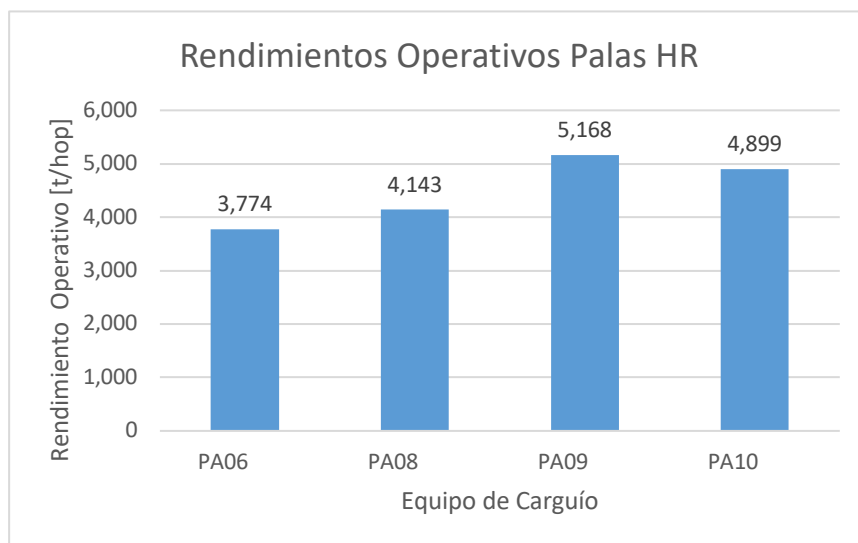


Gráfico 5.1 Rendimientos Operativos Palas HR. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2 Palas Modelo P&H

Algo similar ocurre con las palas de modelo P&H. Palas 11 y 13 tienen un rendimiento promedio de 5,403 [t/hop], bastante superior al de PA12 (4,152 [t/hop], 23.16% menor) y PA14 (4,375 [t/hop], 19.03% menor). Esto se explica debido a que PA13 está en Fase 10, que corresponde a una fase superior donde se priorizan desarrollos. Las Palas 11, 12 y 14, se encuentran en fases más profundas (Palas 11 y 14 en Fase 09 y Pala 12 en Fase 08), pero no presentan el mismo rendimiento porque Palas 12 y 14 alimentan a chancado, luego no siempre están saturadas de camiones porque deben obedecer al tonelaje y ley del plan mensual; mientras que PA11 estaba cargando mayoritariamente estéril priorizando el desarrollo de Fase 09 (Véase Gráfico 5.2).

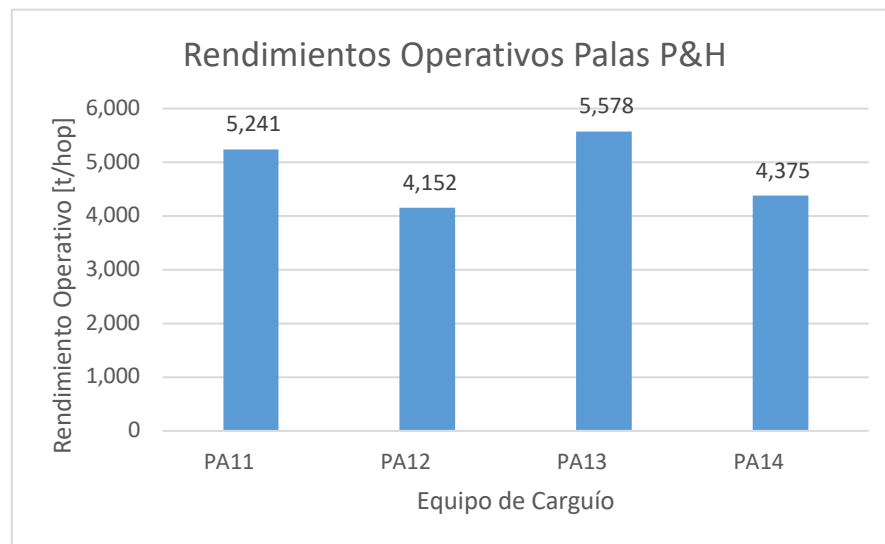


Gráfico 5.2 Rendimientos Operativos Palas P&H. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3 Palas Modelo PC

En cuanto a las Palas PC, PA15 se incorporó a la operación en marzo de 2017 y PA16 lo hizo en junio de 2017. En general, las tres palas (15, 16 y 20) poseían una buena condición de carguío, pero un Factor de Asignación distinto entre sí. PA15 se encontraba cargando en el botadero de la planta (Ujina) que transporta estéril hacia el muro del tranque de relaves, por tanto, su Factor de Asignación es cercano al 100% sólo si no faltan camiones en el rajo (Rosario).

Por otro lado, Palas 16 y 20 se encontraban generalmente en un stock cercano al chancado (Flamenco), que lo alimenta en horario de colación, cuando las demás palas de mineral se encuentran sin acceso por el despeje de la tronadura⁶, por ende, su Factor de Asignación es cercano al 100% cuando se encuentran operativas. Cabe mencionar que para las Palas 15 y 16 se calcula un rendimiento de 1,696 [t/hop], dado que pertenecen a un mismo modelo, mientras que PA20 es ligeramente más grande y, por tanto, posee un rendimiento mayor (1,848 [t/hop]). Lo anterior se ilustra en Gráfico 5.3.

⁶ Generalmente, en CMDIC se realiza la tronadura en horario de colación para minimizar las demoras programadas.

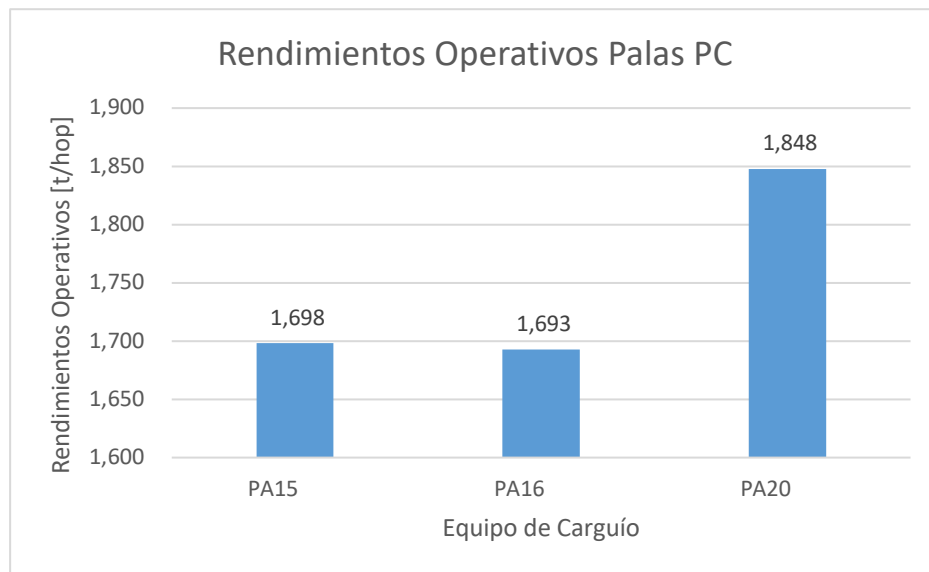


Gráfico 5.3 Rendimientos Operativos Palas PC. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.4 Cargadores Frontales

El último análisis de rendimientos que se realizó fue el de los cargadores frontales, donde se observa que los tres equipos tienen rendimientos similares (Véase Gráfico 5.4) con un promedio de 1,318 [t/Hop.]

Los cargadores frontales son considerados, en general, como equipos de carguío de apoyo, pues, al poseer mayor movilidad que las palas de tipo eléctrico, no tienen una locación de carguío definida, sino que pueden trasladarse de acuerdo a las labores que se necesite cumplir, como, por ejemplo, apoyar en el carguío de materiales o desarrollar rampas.

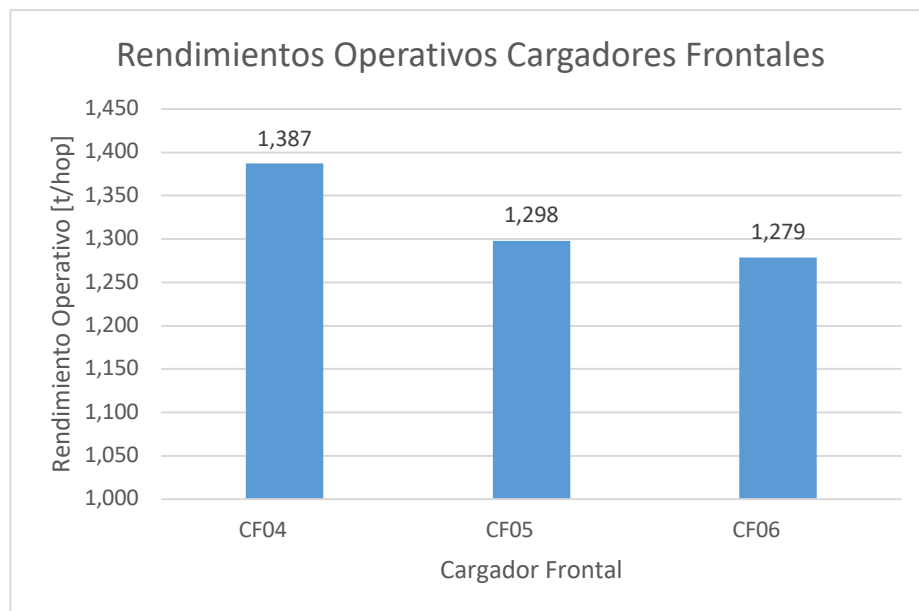


Gráfico 5.4 Rendimientos Operativos Cargadores Frontales. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Utilización Operativa

Como segunda parte del estudio se reportan las utilizaciones operativas de los equipos de carguío de acuerdo al modelo. Cabe mencionar de que, a pesar de que se encuentran entre ciertos rangos, no existe un comportamiento decisivo con respecto a este indicador, debido a que la utilización depende de las gestiones realizadas por el jefe de turno en la operación, donde los objetivos y necesidades de la misma pueden variar.

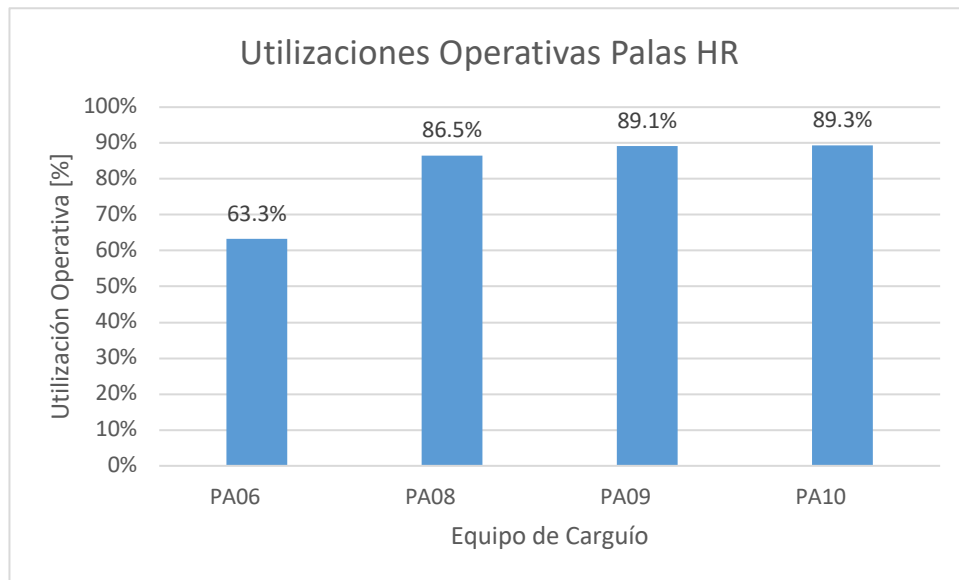


Gráfico 5.5 Utilización Operativa Palas HR. Fuente: Elaboración propia.

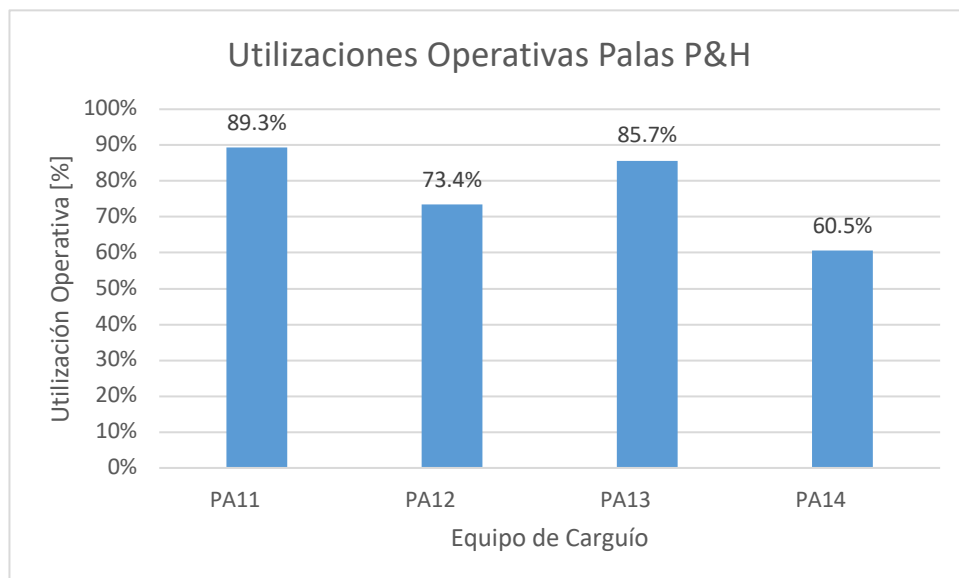


Gráfico 5.6 Utilización Operativa Palas P&H. Fuente: Elaboración propia.

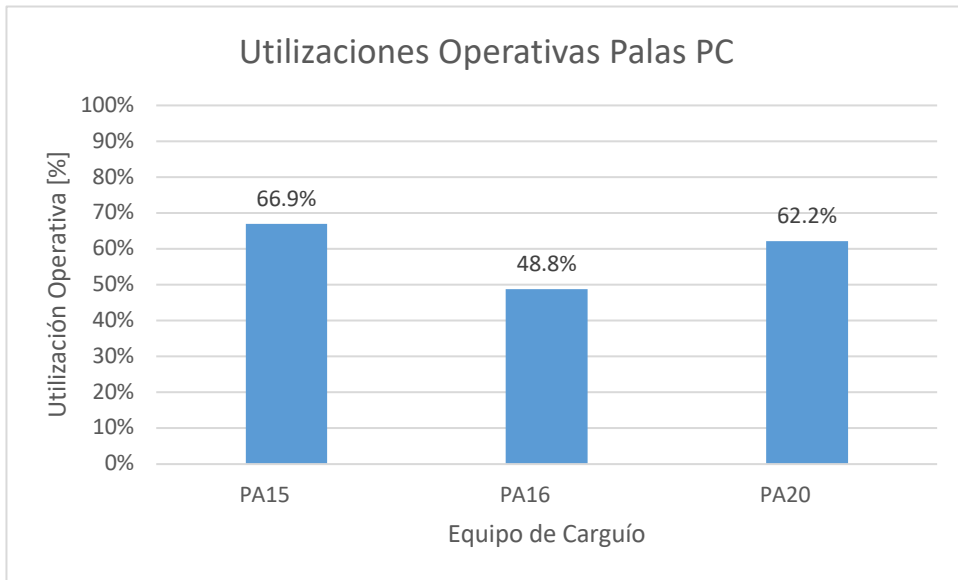


Gráfico 5.7 Utilización Operativa Palas PC. Fuente: Elaboración propia.

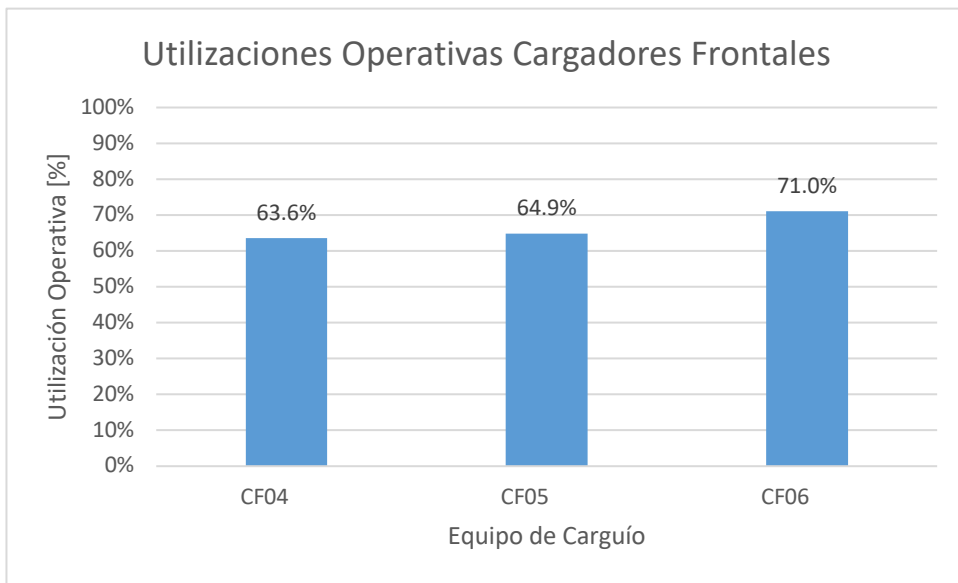


Gráfico 5.8 Utilización Operativa Cargadores Frontales. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Desarrollo de Modelos de Cálculo de Equipos de Carguío

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, se desarrollaron dos modelos de cálculos de equipos de carguío: el primero considera las asignaciones de los equipos de forma manual y el segundo, de manera automática y optimizada.

5.2.1 Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío

El modelo de cálculo de equipos de carguío con asignación manual se presenta en Figura 5.1, donde los cuadros rosados representan las entradas al modelo y los verdes las salidas de éste.

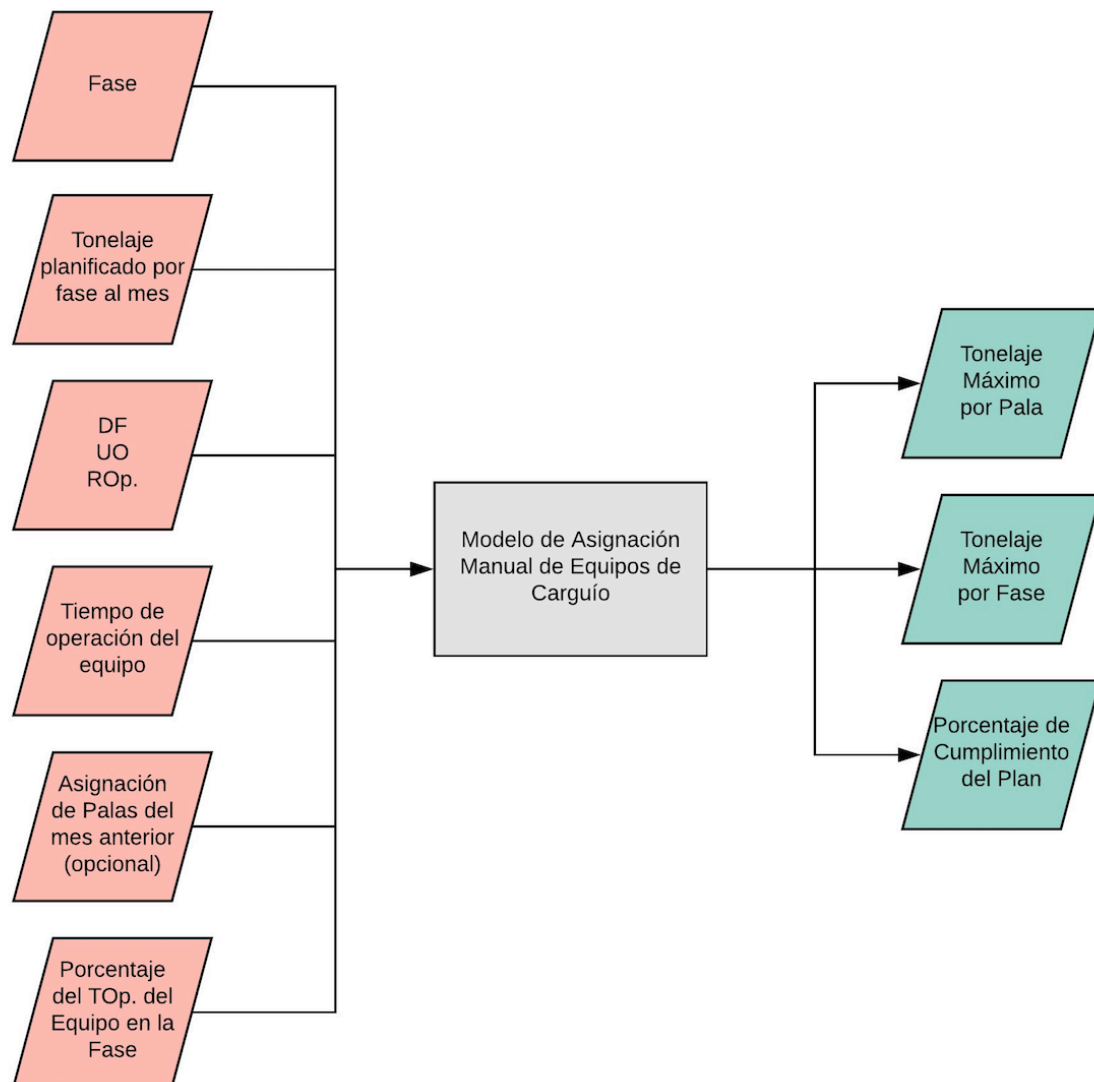


Figura 5.1 Esquema Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.1 Parámetros de Entrada

Los parámetros de entrada del modelo son:

- **Fase Mensual:** Corresponden a las fases activas dentro del Rajo (Fases 08, 09, 10 y 11) y la Planta (Ujina).
- **Tonelaje Requerido por Fase:** Corresponde al tonelaje que se debe extraer de la fase, definido en el Plan Mensual.
- **DF:** Corresponde a la Disponibilidad Física del Equipo de Carguío en el mes, la cual se obtiene desde el Plan Mensual de Mantenimiento de Palas.
- **UO:** Corresponde a la Utilización Operativa del Equipo de Carguío en el mes, la cual se obtiene desde los análisis históricos de los índices operacionales.
- **ROP:** Corresponde al Rendimiento Operativo del Equipo de Carguío en el mes. También se obtiene desde los análisis históricos de los índices operacionales.
- **Asignación de Palas del Mes Anterior (Opcional):** El modelo permite al usuario incorporar la asignación de palas del mes anterior, con el objetivo de conocer el tonelaje que se pierde en los traslados. No es un parámetro obligatorio.
- **Porcentaje del Tiempo Operativo del Equipo en la Fase (Opcional):** El modelo permite que el usuario asigne un porcentaje del tiempo operativo de cada equipo en las distintas fases.

5.2.1.2 Resultados del Modelo

Los resultados del modelo son:

- **Tonelaje Máximo por Pala:** Corresponde al máximo tonelaje que es capaz de cargar el equipo de carguío en el mes.
- **Tonelaje Máximo por Fase:** Corresponde al tonelaje que se puede lograr en esa fase si se considera que cada pala está cargando el tonelaje máximo.
- **Cumplimiento del Plan:** Corresponde al porcentaje de cumplimiento del Plan Mensual (por fase y total) con una determinada asignación de palas y sus indicadores operacionales correspondientes. Se calcula según Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3.

5.2.1.3 Uso del Modelo

En cuanto al uso del modelo, éste considera que la asignación de los equipos de carguío a la fase es ingresada de manera manual por el usuario, a través de una celda desplegable. Cabe mencionar que el modelo permite que el usuario asigne una misma pala a varias fases, pero marca la celda de color rojo para advertirle al usuario acerca de este error.

5.2.2 Modelo de Asignación Automática de Equipos de Carguío

La segunda versión del modelo corresponde a una asignación optimizada de palas. El esquema del modelo desarrollado se muestra en Figura 5.2. La implementación del modelo es hecha en Solver, el cual corresponde a un complemento de Excel.

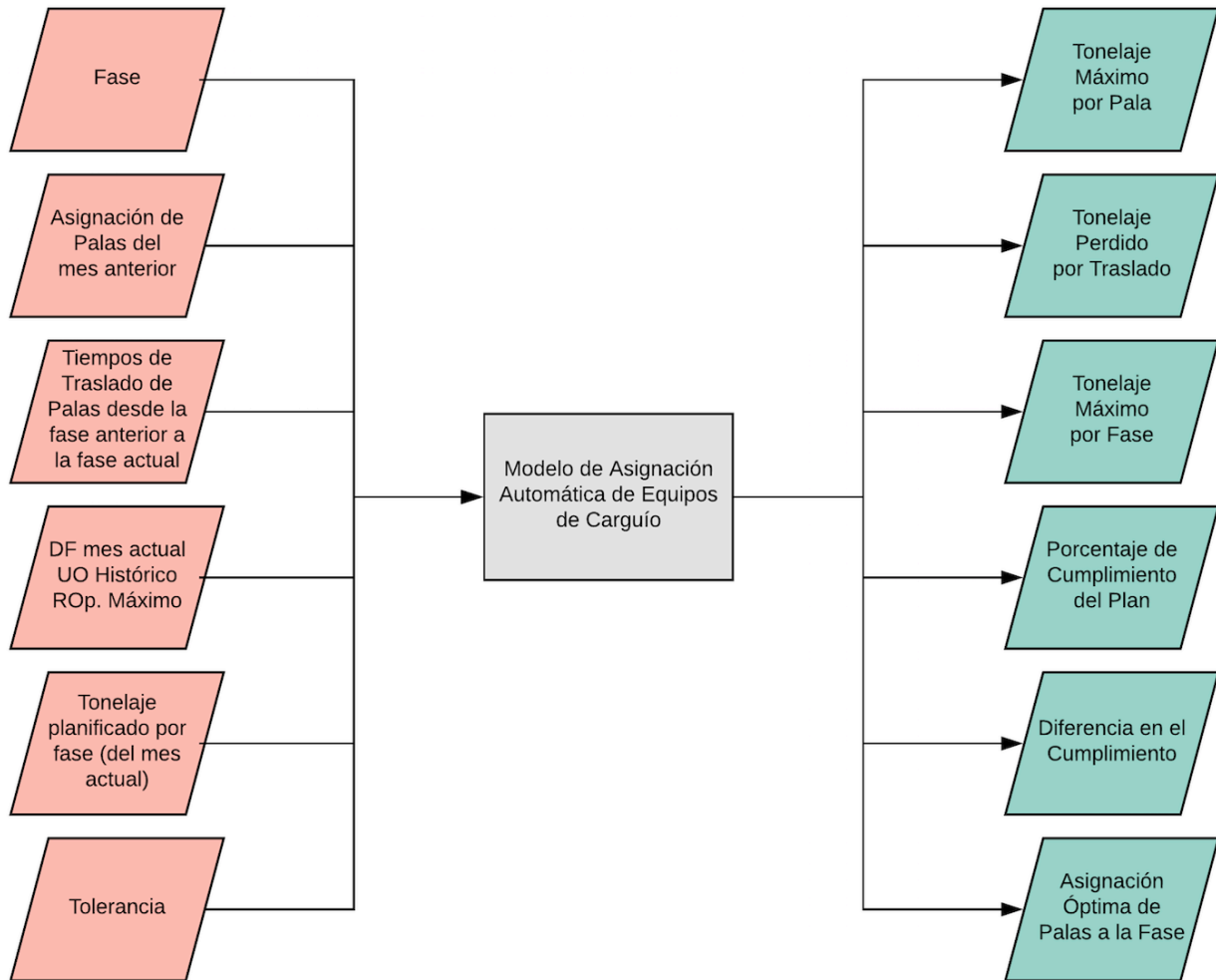


Figura 5.2 Esquema Modelo de Asignación Automática de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1 Conjuntos

Los conjuntos a los cuales pertenecen los parámetros del modelo son los siguientes:

- I : Conjunto de meses
- F : Conjunto de fases operativas en la faena
- P : Conjunto de equipos de carguío operativos

5.2.2.2 Parámetros de Entrada

Este modelo posee entradas similares a las de la versión anterior, las cuales se explican a continuación:

- F : **Fase:** Corresponde a las fases operativas en la faena: Ujina, Fases 08, 09, 10 y 11, y el stock de Remanejo.
- $P_{f,i-1}^p$: **Asignación de palas-fase del mes anterior:** El modelo solicita al usuario que incorpore la asignación de palas del mes anterior ($i - 1$) para decidir si es conveniente (en términos de producción) trasladarlas o mantenerlas en la fase en la que se encontraban.
- $T_{f,g}^p$: **Tiempos de traslado de palas desde fase anterior a la fase actual:** Se relaciona con el anterior, puesto que la decisión de trasladar la pala p desde la fase anterior g a una nueva fase f depende de la fase anterior en la que se encuentre la pala y , por lo tanto, del tiempo que demore este traslado. Este tiempo depende del tipo de pala, por ejemplo: las palas eléctricas demoran más en trasladarse que las hidráulicas y los cargadores, ya que requieren movimientos de cables y cierre temporal de rutas.

Cabe notar que el tiempo de traslado se traduce en una pérdida de tonelaje. Por tanto, el modelo debe decidir si la producción se optimiza manteniendo la pala en una fase anterior o trasladarla a alguna otra fase. La unidad de medida de este parámetro debe estar en horas.
- $DF_{p,i}$: **Disponibilidad Física del mes actual i :** Corresponde a la disponibilidad física de cada equipo de carguío p (medida en porcentaje) dada por la Superintendencia de Planificación de la Mantenición de Palas, en el mes para el que se está ejecutando el modelo (mes i).

- UO_p : **Utilización Operativa Histórica:** Corresponde a la utilización histórica, para cada equipo de carguío p , obtenida en el análisis de indicadores operacionales (Véase sección 5.1.2), medida en porcentaje.
- ROP_p : **Rendimiento Operativo Histórico:** Corresponde al rendimiento operativo histórico, para cada equipo de carguío p , obtenido en el análisis de indicadores operacionales (Véase sección 5.1.1), medido en porcentaje.
- $T_{f,i}$: **Tonelaje Planificado por Fase del Mes Actual:** Corresponde al tonelaje por fase definido en el Plan Mensual del mes i .
- $\delta_{mín}, \delta_{máx}$: **Tolerancias:** Corresponde a la máxima variación porcentual permitida en cuanto al cumplimiento del plan. Para darle un poco más de flexibilidad al modelo se definieron tolerancias en cuanto al cumplimiento mínimo ($\delta_{mín}$) para calcular la cantidad mínima de tonelaje que se puede cargar y en cuanto al cumplimiento máximo ($\delta_{máx}$) para la cantidad máxima.

5.2.2.3 Variables del Modelo

Las variables del problema de optimización se describen a continuación. Ambas son de naturaleza binaria y la primera corresponde a la variable de decisión, mientras que la segunda aporta información acerca de la precedencia del equipo de carguío.

$$X_{p,f} = \begin{cases} 1, & \text{si la pala } p \text{ está asignada a la fase actual } f \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

Ecuación 5.1 Variable de decisión $X_{p,f}$

$$P_{f,g} = \begin{cases} 1, & \text{si fase actual } f \text{ es igual a la fase anterior } g \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

Ecuación 5.2 Variable $P_{f,g}$

5.2.2.4 Parámetros de Salida del Problema de Optimización

Los parámetros de salida del problema de optimización son los siguientes:

- C_f : **Cumplimiento del Plan:** Corresponde al tonelaje cumplido por fase y total, con la asignación de palas optimizada. Se calcula según Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3. Se mide en porcentaje.

D_f : **Diferencia en el Cumplimiento:** Es la diferencia entre el tonelaje requerido por fase de acuerdo con el plan y el tonelaje máximo que puedo cumplir con la capacidad de carguío que se posee. Se mide en porcentaje.

$T_{p,f}$: **Tonelaje Máximo Cargado por la Pala:** Corresponde al máximo tonelaje que puede cargar la pala p , considerando la pérdida por traslado (desde fase g a fase f), si es que aplica.

$T_{p,g-f}$: **Tonelaje Perdido por Traslado:** Corresponde al tonelaje que se pierde al trasladar la pala p desde la fase anterior g a la fase actual f .

$T_{máx}$: **Tonelaje Máximo por Fase:** Corresponde a la producción real alcanzada por fase. Depende del tonelaje máximo cargado por cada pala presente en la fase.

$$T_{máx} = X_{p,f} * T_{p,f} - (X_{p,f} - P_{f,g}) * T_{p,g-f}$$

Ecuación 5.3 Producción real alcanzada

Notar que, si las fases f y g son iguales, $P_{f,g}$ es 1. Además, $T_{p,g-f}$ es cero, pues la pala no se traslada. Luego, la fórmula se resume en:

$$T_{máx} = X_{p,f} * T_{p,f}$$

Ecuación 5.4 Producción real alcanzada para f igual a g

Vale decir, la producción máxima que se puede lograr con la pala p es simplemente el tonelaje que puede cargar.

Notar que si fases f y g son diferentes $P_{f,g}$ es cero, por tanto, la pala p debe trasladarse desde g a f y la fórmula se resume en:

$$T_{máx} = X_{p,f} * T_{p,f} - (X_{p,f} * T_{p,g-f})$$

Ecuación 5.5 Producción real alcanzada para f distinto de g

Es decir, la producción máxima a la cual se puede aspirar con la pala p es el tonelaje que puede cargar (primer término) menos el que pierde al trasladarse desde la fase g a la f (segundo término).

5.2.2.5 Formulación del Problema de Optimización

El problema de optimización lineal planteado es el siguiente:

Función objetivo: Corresponde a maximizar los porcentajes de cumplimiento del plan de cada fase.

$$\max \sum_{f \in F} X_{p,f} * T_{p,f} - (X_{p,f} - P_{f,g}) * T_{p,g-f}, \forall f, g \in F, \forall p \in P$$

Ecuación 5.6 Función Objetivo

Sujeto a:

$$X_{p,f} \in \{0,1\}, \forall f \in F, \forall p \in P$$

Ecuación 5.7 Primera Restricción

$$\sum_{f \in F} X_{p,f} = 1 \quad \forall p \in P$$

Ecuación 5.8 Segunda Restricción

$$(1 - \delta_{\min}) \leq C_f \leq (1 + \delta_{\max}) \quad \forall f \in F$$

Ecuación 5.9 Tercera Restricción

La primera y segunda restricción se obtiene por construcción de la variable de decisión. La primera solicita que sea binaria, mientras que la segunda pide que cada pala sea asignada sólo una vez en el modelo.

La última restricción corresponde a los límites en que se permite que el tonelaje cargado por la pala discrepe del planificado. El límite inferior corresponde a cargar menos tonelaje del planificado y el superior, lo contrario. Esto puede ser modificado por el usuario, pues es él quien define las tolerancias en el cumplimiento del plan.

Por último, el resultado del problema de optimización corresponde a la **asignación óptima de las palas a cada una de las fases**. Esto maximiza la adherencia al plan considerando la condición de mantener una pala en su locación original o trasladarla a una fase distinta. A diferencia del modelo presentado anteriormente, considera un 100% de tiempo de operación del equipo en la fase y no un porcentaje de permanencia.

5.3 Modelo de Cálculo de Equipos de Transporte

En esta sección se presenta el desarrollo del modelo de cálculo de equipos de transporte. La metodología realizada para su elaboración se describa a continuación.

1. Realizar un Análisis de la Base de Datos de Despacho.

Este paso corresponde al análisis de una base de datos de los tiempos que componen el ciclo de los camiones (todos los tiempos definidos en Ecuación 3.1 excepto tiempos de viaje cargado y retorno vacío). Este análisis consta de un filtrado de los datos en base a criterio experto.

2. Generar tiempos de Match Pala–Camión.

A partir del análisis realizado en el paso anterior se obtienen los tiempos de *match* pala – camión para los diferentes equipos que hay en la mina.

3. Incorporar los tiempos de Match Pala – Camión a la Herramienta Haulage Profile de Vulcan.

Los matches Pala – Camión generados en el paso anterior son datos de entrada para la Herramienta Haulage Profile; como también lo son los perfiles de velocidades de los camiones. Al ejecutar esta herramienta, se obtiene el tiempo que demora un camión en recorrer una ruta (tiempos de viaje cargado y retorno vacío) y la distancia respectiva.

4. Generar una base de datos con los resultados de Haulage Profile.

Este paso corresponde a la generación de una base de datos con la mayoría de las rutas de tránsito de camiones en la mina, con sus respectivos tiempos y distancias. Cabe mencionar que no se consideran las rutas para ir a petrolear, a asistencia mecánica programada, colación o rutas que no se hayan utilizado en un período considerable de tiempo.

5. Calcular la cantidad de camiones necesarios para cumplir el tonelaje por fase

Posteriormente, se procede a calcular la cantidad de camiones que se requieren para cumplir el tonelaje calculado en los modelos de carguío (manual y automático), distribuido de acuerdo al tipo de material especificado en el Plan Pivote.

6. Comparar la cantidad de camiones calculados con los asignados por el Sistema de Despacho.

Por último, con el objetivo de validar la flota de camiones obtenida a partir del procedimiento descrito anteriorente, se realiza una comparación con la flota asignada por el Sistema de Despacho.

5.3.1 Análisis de Tiempos de Ciclo de Camiones

Como se mencionó anteriormente, se realizó un análisis de los tiempos de ciclo de los camiones sin considerar los tiempos de viaje cargado y retorno vacío, debido a que estos datos se calculan con Haulage Profile. Para realizar este análisis primero se definieron las distintas combinaciones que se podían generar en los Match Pala – Camión y luego se realizó la limpieza de los datos.

5.3.2 Combinaciones de Matches Pala – Camión

La hipótesis formulada era que estas combinaciones dependían del modelo de camión y pala, y de los sitios de carga y descarga de los camiones. Las combinaciones posibles se muestran Figura 5.3.

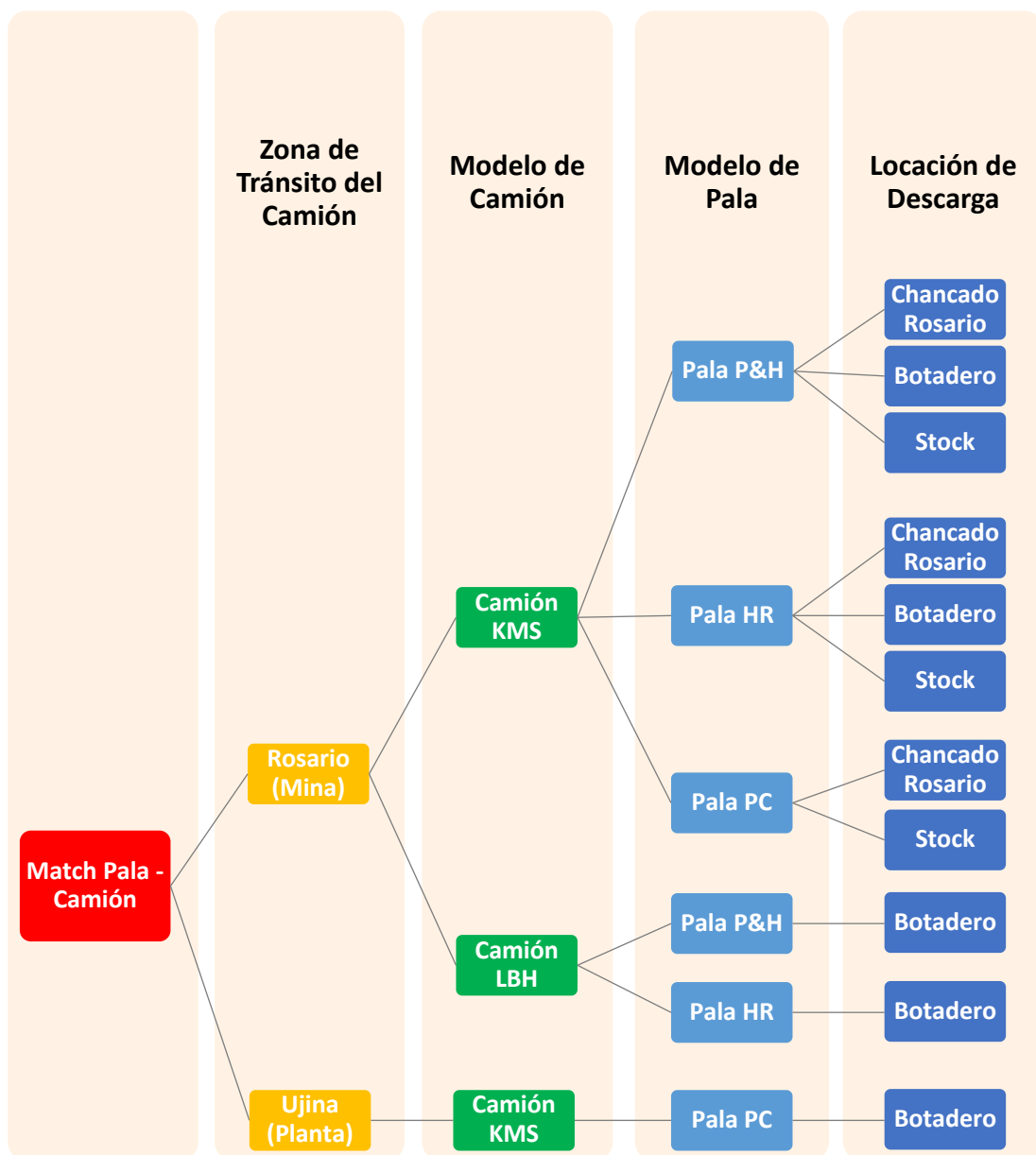


Figura 5.3 Combinaciones posibles consideradas para calcular Matches Pala – Camión. Fuente: Elaboración propia.

Para definir estas combinaciones se consideraron las siguientes restricciones:

1. Existen dos zonas por las cuales pueden transitar los camiones:
 - a. Rosario: corresponde al sector del rajo. Actualmente está compuesto por las fases 08, 09, 10 y 11.
 - b. Ujina: corresponde al sector de la planta y el tranque. El tránsito de los camiones en este sector es desde el botadero actualmente activo hasta el muro del tranque de relaves. Ocasionalmente los camiones pueden transitar desde el sector de “Empréstito” hasta el tranque, puesto que en esta locación cargan material arcilloso que sirve como relleno estructural para el muro del tranque. Como las dos locaciones están relativamente cerca, el modelo se realizó considerando la distancia desde el botadero hasta el tranque de relaves.
2. Existen dos modelos de camiones: KMS 930 E y LBH T282 C, de los cuales 86 corresponden al primer tipo y 6 al segundo.
3. Los camiones KMS pueden ser cargados por todos los tipos de pala de CMDIC (P&H, HR y PC); pero los camiones LBH sólo pueden ser cargados por P&H y HR. El match con las palas PC no se genera porque no son compatibles en términos de dimensiones con ellas (la altura del camión desde el piso a la tolva es muy grande para la pala, por lo que se demoraría mucho en cargarlo y sería poco eficiente).
4. Los camiones LBH no pueden transitar en el sector de Ujina, dado que sus características mecánicas no recomiendan el tránsito en rutas de pendientes elevadas, como es el caso de la locación de descarga en el muro del tranque de relaves. Es más, estos camiones sólo pueden transitar en el sector de Rosario en fases superiores, puesto que al bajar a fondo mina corren el riesgo de panne mecánica.
5. Los camiones LBH sólo transportan estéril, debido a que no pueden entrar al chancado por sus dimensiones.
6. En Rosario, las palas PC cargan sólo mineral, porque en general se ubican en stocks que alimentan al chancado o en fases que alimentan a stock; mientras que en Ujina cargan sólo estéril que se transportará hasta el muro del tranque de relaves.
7. Los cargadores frontales no se consideran entre las combinaciones posibles de la dupla equipo de carguío – unidad de transporte, puesto que el Plan Mensual de Producción elaborado por la SI de Corto Plazo no los considera con ubicación fija, sino como equipo de apoyo del carguío en locaciones. Por tanto, para el efecto de cálculo de camiones, los tiempos de ciclo en las rutas donde haya un Cargador Frontal serán los mismos de una Pala PC, por considerarse que tienen dimensiones similares.

5.3.3 Aplicación de Filtros

Después de determinar las combinaciones posibles de match pala – camión y las rutas que pueden seguir las unidades de transporte, se procede a definir los filtros que se aplicarán a la base de datos de Despacho, la cual se trató de manera independiente para cada uno de los tiempos que se definieron, los cuales se enumeran a continuación:

- Tiempos de Acuatamiento + Carguío por la pala o cargador frontal.
- Tiempos de Descarga + Inactividad.
- Tiempos de Cola.
- Tiempos de Demoras No Programadas.

Por tanto, a partir de la base de datos de Despacho original se crearon 4 subdivisiones que se procesaron de manera independiente. Por otro lado, cabe mencionar que los criterios escogidos para los filtros deben conciliar entre la representación efectiva de la realidad y la preservación de la robustez de la base de datos. Es por esto que todos los valores escogidos como criterios de corte de los filtros se basan en opiniones de expertos.

5.3.3.1 Tiempos de Acuatamiento y Carguío por la Pala o Cargador Frontal

En primer lugar, se divide la base de datos de los tiempos de acuatamiento y carguío de acuerdo a las combinaciones presentadas en Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Combinaciones de Match para Tiempos de Acuatamiento y Carguío. Fuente: Elaboración propia.

Modelo de Camión	Modelo de Pala
KMS	P&H
	HR
	PC
LBH	P&H
	HR

Esta diferenciación se debe a que el tiempo de acuatamiento depende del tipo de camión y el tiempo de carguío del match pala – camión. En efecto, no es lo mismo cargar un camión KMS que un LBH, puesto que éste último es más alto. De la misma forma es distinto el tiempo de carguío que pueden realizar las palas P&H o HR, que son eléctricas, versus la PC que es hidráulica.

Por otro lado, este filtro contempla la suma de los tiempos de aculatamiento y carguío, porque son conceptos ligados dentro de la operación. En particular, el tiempo de aculatamiento se calcula en base a la resolución de ecuaciones del Sistema Dispatch, donde una de ellas corresponde a la de tiempo de carguío. En cambio, el tiempo de carguío tiende a ser más exacto (comparado con la realidad) que el de aculatamiento, puesto que lo marca directamente el operador de la pala y no se obtiene en base a otras variables. Cabe mencionar que los operadores de pala tienden a ser cuidadosos con sus tiempos de carguío por incentivos económicos.

Los filtros definidos para los distintos match pala – camión van desde 1 minuto a 5 minutos. La información detallada se encuentra en Anexo 4. El resumen de resultados se muestra en Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Resultados Tiempos de Aculatamiento + Carguío. Fuente: Elaboración propia.

Modelo CAEX⁷	Modelo Pala	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [%]
KMS	P&H	2.3	0.7	76.9
KMS	HR	2.7	0.8	82.6
KMS	PC	4.4	1.6	76.0
LBH	P&H	2.6	0.9	87.0
LBH	HR	3.0	0.9	89.2

El análisis anterior muestra que el tiempo promedio de aculatamiento más carguío es similar para los match de palas eléctricas (P&H y HR) con camiones KMS y LBH. Sucede lo mismo para la desviación estándar. Sin embargo, las palas hidráulicas (PC) no presentan el mismo comportamiento que las eléctricas.

Además, considerando la información de Anexo 9.2., se observa que para un tipo de match pala – camión, la desviación estándar disminuye considerablemente al aplicar los criterios de filtro, encontrándose en la mayoría de los casos bajo un minuto.

Por tanto, se acepta la metodología planteada para realizar los filtros, debido a que permite disminuir la dispersión de los datos y preservar la integridad de la base de datos.

Además, se observa que después de aplicado el segundo filtro, la base de datos tiende a un comportamiento normal. A continuación, se presenta a modo de ejemplo, el histograma y estadísticas descriptivas obtenidas al aplicar los filtros para el match Camión KMS – Pala P&H. Los datos para las combinaciones restantes se encuentran en Anexo 9.2.

⁷ Camión de Extracción

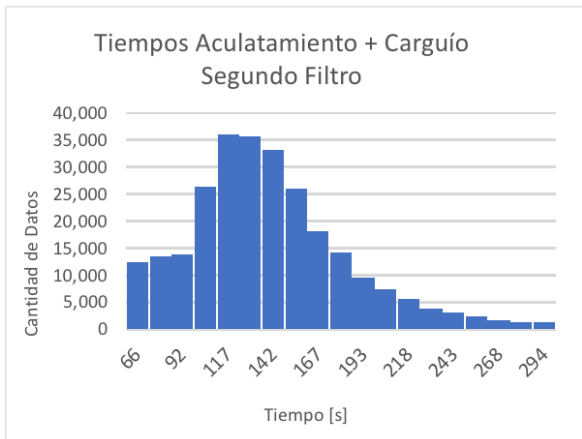


Gráfico 5.9 Histogramas de Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Match Camión KMS - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.

Tiempos Acuatamiento + Carguío Segundo Filtro Camión KMS – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	300.0	5.0
Rango [s] [min]	240.0	4.0
Número de datos [-]	262,090	-
Promedio [s] [min]	139.2	2.3
Desv. Std. [s] [min]	43.6	0.7

Tabla 5.4 Histogramas de Tiempo de Acuatamiento + Carguío, Match Camión KMS - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.2 Tiempos de Descarga + Inactividad

La siguiente clasificación dentro de los tiempos del ciclo de los camiones es la de la suma de los tiempos de descarga más los de inactividad. El tiempo de inactividad corresponde al tiempo en que el camión se encuentra en estado operativo, pero no lo está haciendo efectivamente como, por ejemplo, camiones esperando en el chancado mientras otro está descargando. Para este filtro se definen las mismas combinaciones pala – camión que antes, pero se agrega la categoría de “Destino” que corresponde a los lugares donde el camión puede descargar (chancado Rosario, botadero y stocks). Lo anterior se realiza con el fin de verificar si existe una relación preponderante entre el match pala – camión con la locación de descarga.

Por tanto, los filtros de tiempos de descarga más inactividad se aplican a las categorías presentadas en Tabla 5.5. Los criterios de filtro aplicados van desde los 0.3 minutos a 6 minutos dependiendo del match pala – camión. Información más detallada se encuentra en Anexo 11.

Tabla 5.5 Combinaciones de Match para Tiempos de Descarga e Inactividad. Fuente: Elaboración propia.

Modelo CAEX	Modelo Pala	Locación
KMS	P&H	Chancado Rosario
		Botadero
		Stock
	HR	Chancado Rosario
		Botadero
		Stock
LBH	PC	Chancado Rosario
		Botadero
	P&H	Botadero
		HR

Al aplicar los filtros se obtienen los resultados que se presentan en las tablas siguientes. Como se observa en Tabla 5.6, el tiempo promedio para el match P&H – KMS es muy parecido al par P&H – LBH, por lo que se decidió utilizar los valores de tiempo de KMS para LBH en el análisis de match HR – LBH de la Tabla 5.7.

Tabla 5.6 Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.

Pala P&H				
Modelo CAEX	Destino	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [%]
KMS	Chancado Rosario	2.6	1.5	67.3
	Botadero	1.3	0.7	81.7
	Stock	1.4	0.7	83.9
LBH	Botadero	1.3	0.6	91.0

Tabla 5.7 Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala HR. Fuente: Elaboración propia.

Pala HR				
Modelo CAEX	Destino	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [%]
KMS	Chancado Rosario	2.7	1.5	66.0
	Botadero	1.3	0.6	84.9
	Stock	1.4	0.7	84.34
LBH	Botadero	1.3	0.6	-

Tabla 5.8 Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala PC. Fuente: Elaboración propia.

Pala PC				
Modelo CAEX	Destino	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [%]
KMS	Chancado Rosario	2.6	1.4	73.8
	Botadero	1.4	0.7	77.9
	Stock	1.5	0.7	78.2

A partir de las tablas anteriores correspondientes al análisis de los tiempos de descarga más inactividad se obtienen las siguientes conclusiones preliminares:

- El filtrado de los datos del chancado disminuye bastante el promedio y la dispersión entre los datos. Esto se debe a la variabilidad en el funcionamiento del chancado que se explicó anteriormente. En cambio, en botaderos y stocks las variaciones debidas al filtrado no son sustanciales en cuanto al promedio.
- Por otro lado, los valores para camiones KMS y LBH en botadero son prácticamente iguales, concluyéndose que el tipo de camión que descargue en la locación no implica una variación sustancial del tiempo de descarga más inactividad.
- Por otro lado, la cantidad de datos de camiones LBH versus los de KMS es notoriamente menor; de hecho corresponde a un 3.2% del total de los datos de botadero cargados por palas HR. Es por esto que no se realizó el análisis de los datos para el match Camión LBH – Pala P&H, ya que se consideró que se comportaría de manera similar que con la pala HR, dado que ambas son palas de cables relativamente grandes.

Cabe mencionar que después de aplicados los filtros, también se asegura un comportamiento normal de los datos, como se observa en los histogramas de Anexo 9.3.

5.3.3.3 Tiempo de Cola

A diferencia de los filtros anteriores, los tiempos de cola no se distinguen por tipo de camión, pala o locación de descarga, debido a que se considera que el comportamiento de esta variable es independiente de estos factores según recomendación de experto. En base a esto, los criterios que se definieron permiten tiempos de cola entre 0 y 10 minutos.

Después de aplicados los filtros se obtienen los resultados que se presentan en Tabla 5.9. El valor escogido de tiempo de cola para los match pala – camión es el obtenido al permitir colas de 0 a 5 minutos máximo. Se escoge este filtro porque posee una desviación estándar menor en comparación con los otros filtros, pero preservando un porcentaje de la base de datos intermedio.

Tabla 5.9 Resultados Tiempos de Cola. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [%]
Filtro Tipo 2	1.2	1.5	79.2

5.3.3.4 Demoras No Programadas

Análogo al apartado anterior, el análisis de los tiempos correspondientes a demoras no programadas no considera diferenciaciones por tipo de camión, pala o locación; sino que se definen alternativas para los criterios de corte utilizados que van desde 0 a 20 minutos. Los detalles se presentan en Anexo 28.

Los resultados de los tiempos de demoras no programadas después de aplicar los filtros se presentan en Tabla 5.10. Se observa que claramente aumenta la desviación estándar al tener un límite superior mayor. Sin embargo, el promedio no aumenta tan excesivamente, motivo por el que se permite considerar este valor (promedio 1.1 minutos, después de aplicado el filtro con límite máximo de 20 minutos) para el match pala – camión.

Tabla 5.10 Resultados Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [%]
Sin filtrar	3.7	10.9	100.0
Filtro Tipo 1	0.3	0.9	84.4
Filtro Tipo 2	0.7	1.8	89.3
Filtro Tipo 3	1.1	3.4	93.5

5.3.4 Generación del Match Pala – Camión

A partir de los análisis realizados a los tiempos de la base de datos de Despacho se obtienen los tiempos de match pala – camión para los distintos tipos de material. Cabe mencionar que, debido a que los tiempos obtenidos para los camiones marca LBH es similar al de camiones KMS, se les asignaron los mismos tiempos de match. No se hizo lo mismo con las palas P&H y HR porque ya se habían realizado los match para ellas.

Tabla 5.11 Match Pala - Camión Mineral. Fuente: Elaboración propia.

Match Pala – Camión Mineral [min]						
Modelo Camión	Modelo Pala	T. Aculat. + Carguío	T. Descarga + Inactividad	T. Cola	Demoras No Prog.	Total
KMS	P&H	2.3	2.6	1.2	1.1	7.2
	HR	2.7	2.7	1.2	1.1	7.7
	PC	4.4	2.6	1.2	1.1	9.3
	CF	4.4	2.6	1.2	1.1	9.3
LBH	P&H	-	-	-	-	-
	HR	-	-	-	-	-
	PC	-	-	-	-	-
	CF	-	-	-	-	-

Tabla 5.12 Match Pala - Camión Stocks. Fuente: Elaboración propia.

Match Pala – Camión Stocks [min]						
Modelo Camión	Modelo Pala	T. Aculat. + Carguío	T. Descarga + Inactividad	T. Cola	Demoras No Prog.	Total
KMS	P&H	2.3	1.4	1.2	1.1	6.0
	HR	2.7	1.4	1.2	1.1	6.4
	PC	4.4	1.5	1.2	1.1	8.2
	CF	4.4	1.5	1.2	1.1	8.2
LBH	P&H	-	-	-	-	-
	HR	-	-	-	-	-
	PC	-	-	-	-	-
	CF	-	-	-	-	-

Tabla 5.13 Match Pala - Camión Estéril. Fuente: Elaboración propia.

Match Pala – Camión Estéril [min]						
Modelo Camión	Modelo Pala	T. Aculat. + Carguío	T. Descarga + Inactividad	T. Cola	Demoras No Prog.	Total
KMS	P&H	2.3	1.3	1.2	1.1	5.9
	HR	2.7	1.3	1.2	1.1	6.3
	PC	4.4	1.4	1.2	1.1	8.1
	CF	4.4	1.4	1.2	1.1	8.1
LBH	P&H	2.6	1.3	1.2	1.1	6.2
	HR	3.0	1.3	1.2	1.1	6.6
	PC	-	-	-	-	-
	CF	-	-	-	-	-

5.3.5 Incorporación de los Tiempos de Match Pala – Camión a Haulage Profile

A continuación, se describe brevemente el proceso por el cual se incorporan los tiempos de match pala – camión a la herramienta Haulage Profile.

Primero, se dibujan las rutas por las cuales transitan los camiones en Vulcan, utilizando como base la topografía de la mina que debe haberse cargado previamente. La topografía brinda el perfil de pendientes de las rutas y permite medir el avance de las palas en las frentes de carguío.

Se define que las rutas dibujadas pueden ser de tres tipos: salida in-pit, ex-pit y la conexión. Las rutas in-pit se dibujan desde el punto medio de la fase donde se encuentra la pala hasta una de las salidas del rajo. Las rutas ex-pit van desde algún punto de salida del pit hasta uno donde comience la conexión de locaciones del mismo tipo. Por ejemplo: en CMDIC los stocks de sulfuros están ubicados en el mismo sector, entonces la ruta ex-pit empieza en el límite del rajo y termina en el punto donde comienza la divergencia de las conexiones de cada uno de estos stocks. Cabe mencionar, que no es necesario dibujar los tramos de conexión si no existe esta divergencia en destinos del mismo tipo.

Posterior a esto, se procede a definir las rutas en la herramienta Haulage Profile como se observa en Figura 5.4. Cada una de ellas se compone por los tramos que se dibujaron anteriormente: una ruta in-pit, una ruta ex-pit y una ruta de conexión, si es necesario.

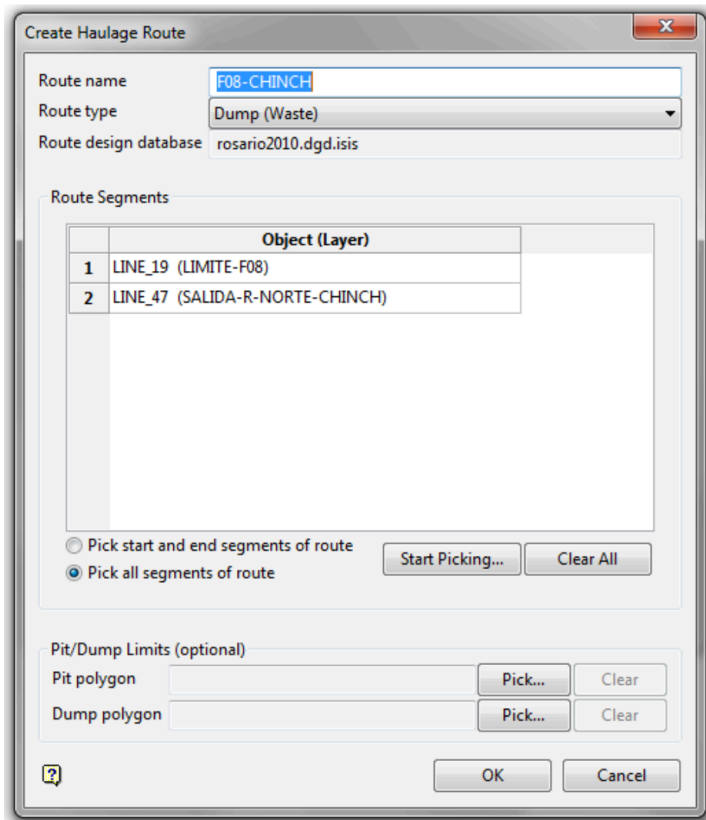


Figura 5.4 Definición de Rutas en Haulage Profile. Fuente: Haulage Profile.

A continuación, se procede a definir las combinaciones pala-camión que transitan por las rutas. Para cada una de estas combinaciones se deben ingresar parámetros de los camiones, tales como:

- Capacidad del camión.
- Tiempos de match pala-camión.
- Perfiles de velocidades del camión para distintas pendientes.
- Perfiles de consumo de combustible asociados a los de velocidad (opcional).
- Curva rimpull (opcional).
- Demoras por radio de curvatura del camión (opcional).
- Demoras por por velocidad de partida (opcional).

Por último, se procede a ejecutar el programa para cada una de las rutas, lo cual entrega las distancias de viaje cargado o vacío; en plano, subida o bajada. Además de los tiempos y el consumo de combustible, con y sin demoras, como se muestra en Figura 5.5.

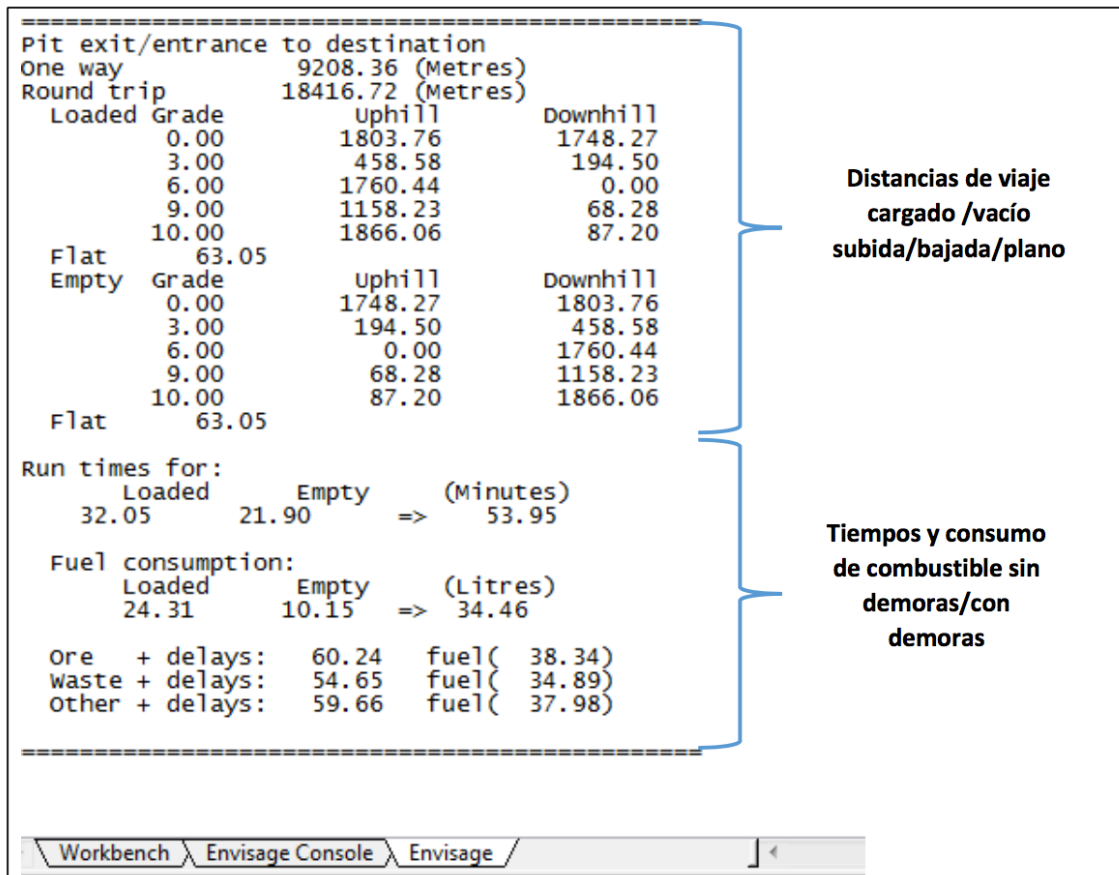


Figura 5.5 Datos de Salidas de Haulage Profile. Fuente: Haulage Profile.

Estos resultados se pueden exportar a un archivo con .csv (Excel), pero el programa genera un archivo por cada una de las rutas que se ejecuten, motivo por el cual se generó una base de datos con todos los datos de las rutas.

5.3.6 Desarrollo del Modelo de Cálculo de Camiones

El cálculo de los camiones depende de todas las etapas descritas anteriormente y se ha resumido en el esquema mostrado en Figura 5.6.

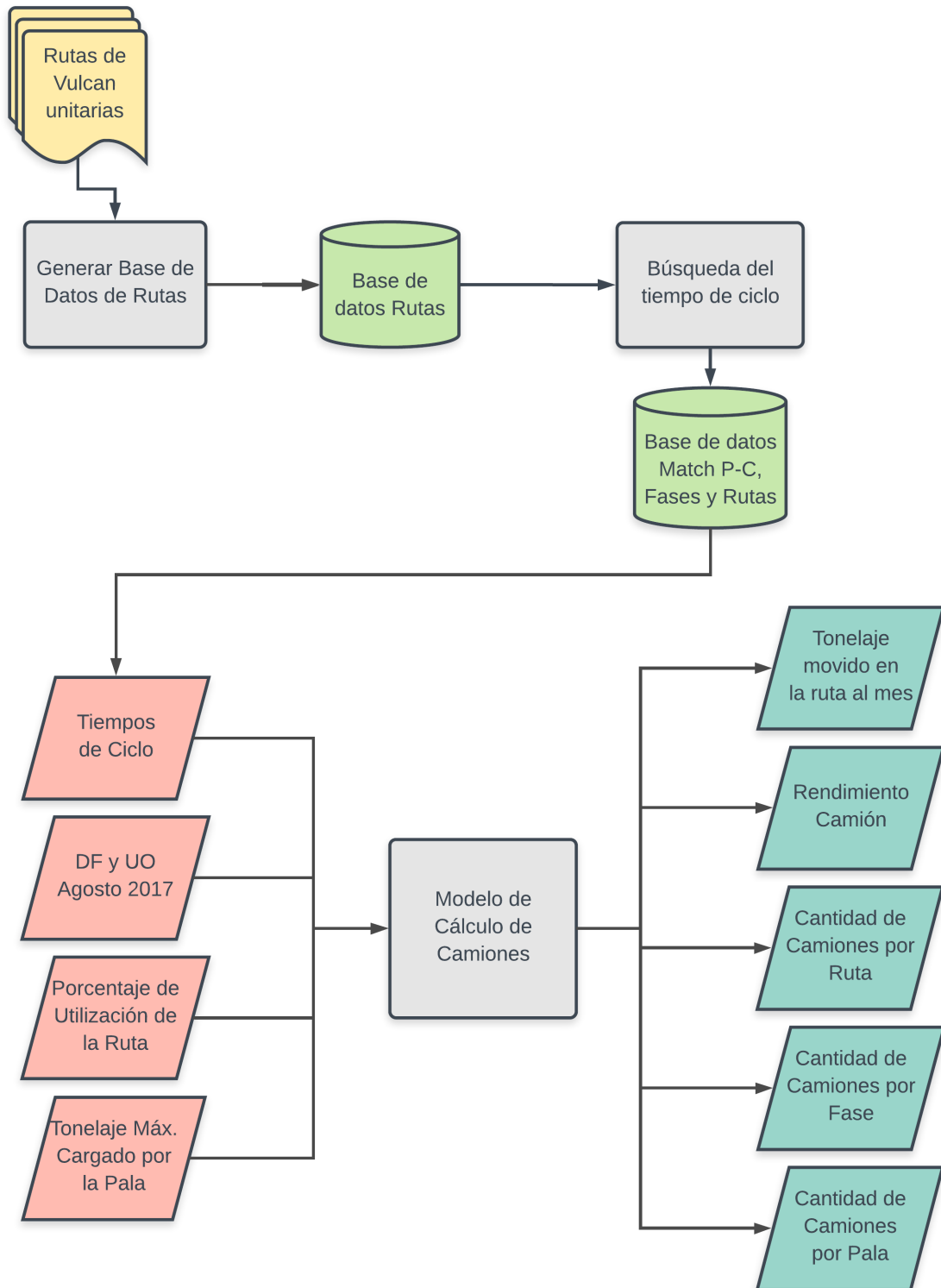


Figura 5.6 Esquema del Modelo de Cálculo de Camiones. Fuente: Elaboración propia.

La primera entrada al modelo de cálculo de camiones son los archivos de rutas de Vulcan, los cuales contienen información acerca de los tiempos de ciclo y distancias que deben recorrer los camiones en cada ruta. A partir de esto, se genera una base de datos de las rutas, la cual posee la información mencionada anteriormente para cada tipo de match pala – camión.

A continuación, se procede a generar otra base de datos que recopile la información anteriormente mencionada y la ordene para permitir al usuario escoger las alternativas de entrada o salida a la fase. Por ejemplo, Fase 09 posee las alternativas de Fase 09 Inferior, Fase 09 Inferior Sur y Fase 09 Superior (Véase Figura 5.7). El usuario debe escoger dos de estas alternativas y asignarles el sentido de tránsito de los camiones. En el ejemplo podría escoger Fase 09 Inferior con sentido de ingreso a la fase y la salida de ésta definirla por Fase 09 Superior. La única condición que posee el modelo con respecto a esto es que deben escogerse dos fases que posean los mismos destinos y que los tramos de entrada y salida sean distintos (lo cual corresponde, en general, a la condición de la mina).

Cabe mencionar que el modelo no soporta que existan entradas y salidas distintas de acuerdo con el tipo de material que se está cargando, puesto que esto no corresponde a una práctica habitual en la Compañía.

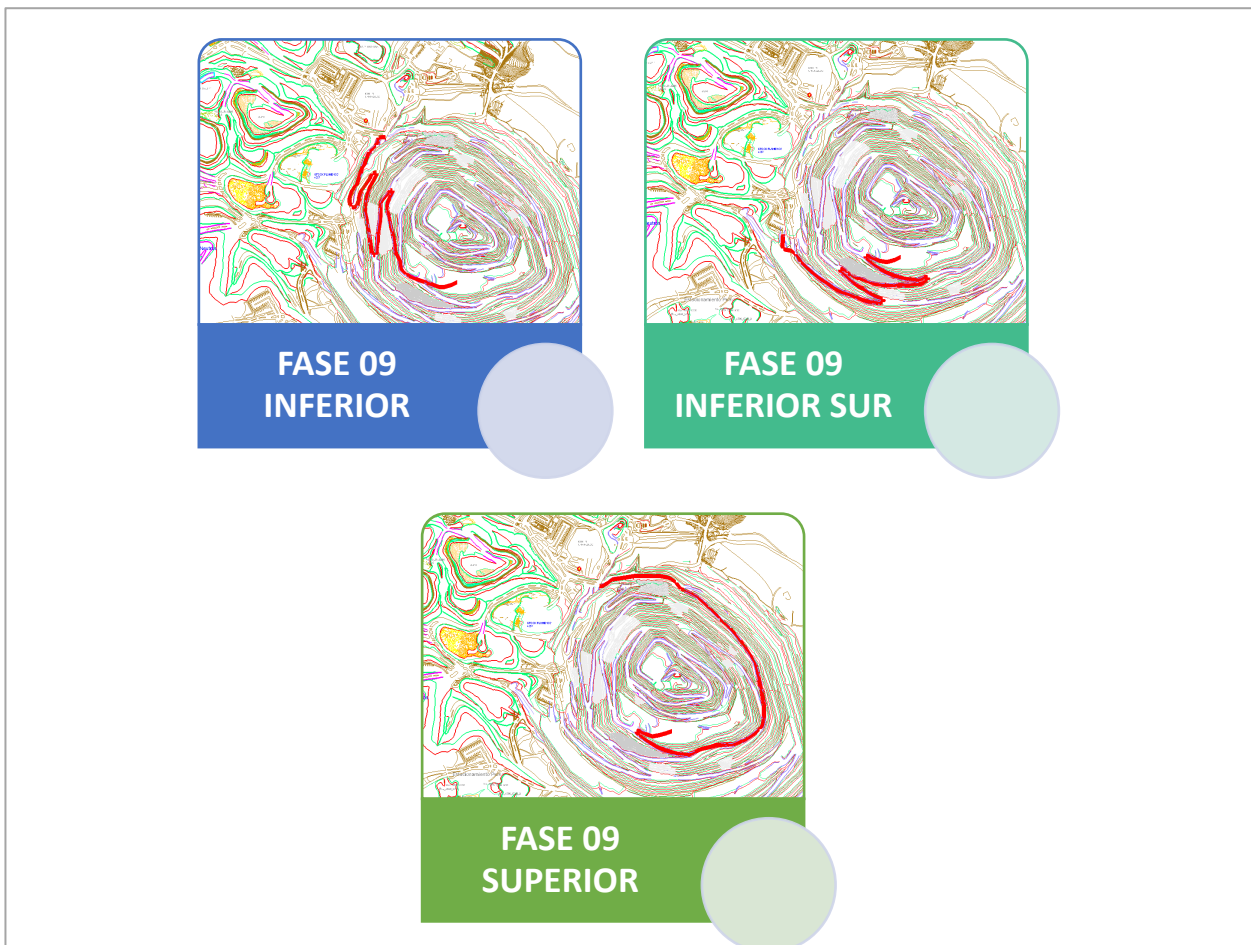


Figura 5.7 Alternativas de ingreso y salida a Fase 09. Fuente: Elaboración propia.

Luego de que el usuario escoja las rutas de ingreso y salida a la fase, debe dirigirse a la pestaña de Cálculo de Camiones. En ésta, el modelo reconoce cuáles son las fases escogidas con las respectivas alternativas de ingreso y salida a la fase. Además, reconoce cuál o cuáles son las palas -o cargadores- que se están utilizando, lo que se traduce en un tiempo de match pala – camión diferente para cada modelo de equipo de carguío.

Posteriormente, el modelo reconoce los destinos donde pueden dirigirse los camiones, los cuales están asociados a cada una de las fases. Por otro lado, los camiones cargados están asociados a un tonelaje que deben transportar, el cual depende de la capacidad de carguío disponible, calculada en el modelo de carguío.

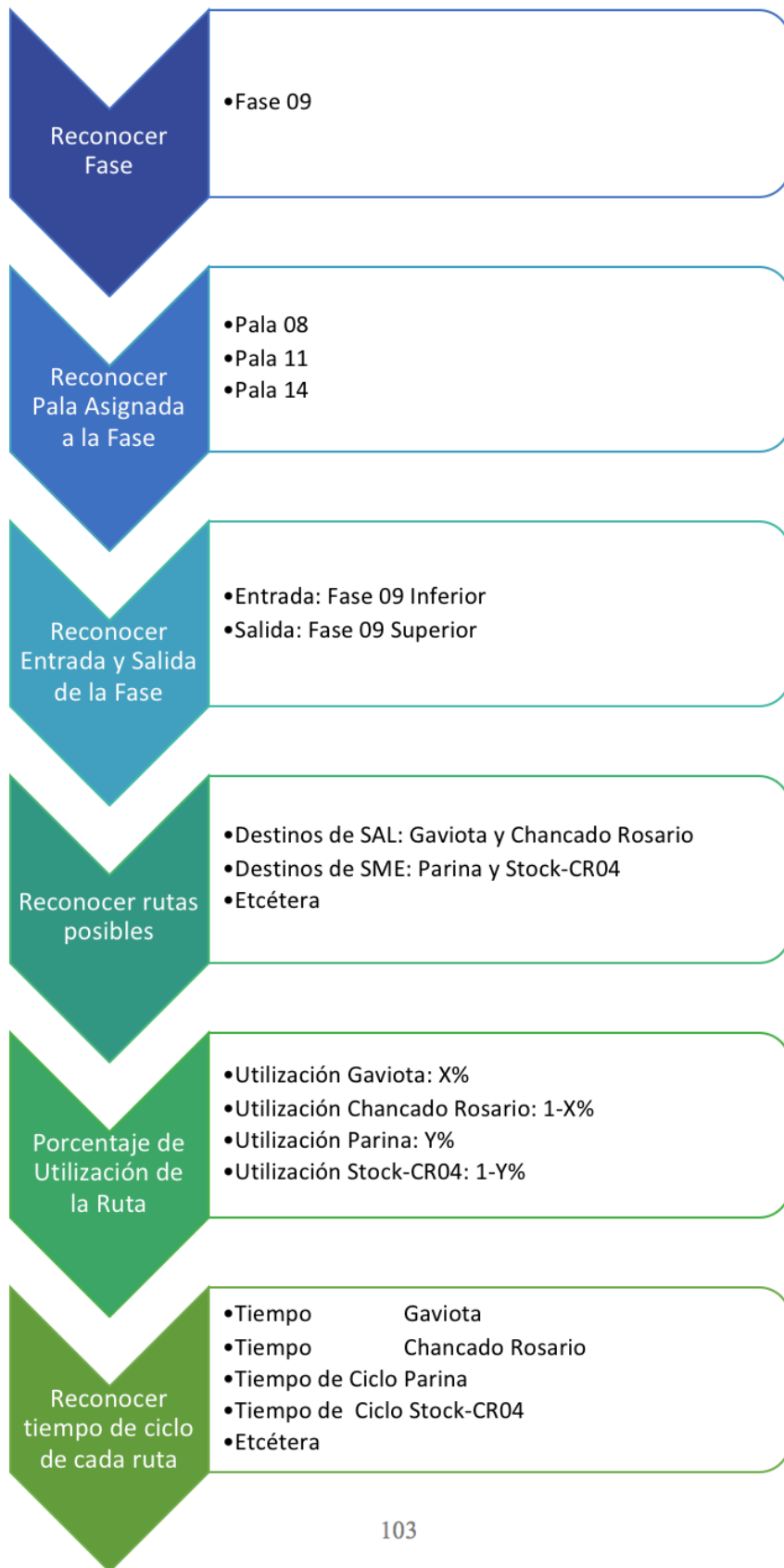
A su vez el tonelaje planificado está dividido en tipos de material definidos en el Plan Pivote, el cual es generado por el Área de Automatización y Control de Mineral. En él se especifican los tonelajes de cada tipo de material con el fin de cumplir la ley definida en el Plan de Corto Plazo y el tonelaje de estéril necesario para asegurar los desarrollos de la mina. Como acotación, el Plan Pivote sólo define los tonelajes de cada tipo de material que deben cumplirse, pero no el destino al cual deben ser enviados, pues esto lo decide el planificador.

Siguiendo la línea del mismo ejemplo, para la Fase 09, los destinos para camiones cargados con Sulfuro de Alta Ley son Gaviota y Chancado Rosario; mientras que para camiones con Sulfuro de Mediana Ley son Parina y Stock-CR04. También existen destinos para los demás tipos de material, pero sólo se mencionan éstos en bondad de la simplicidad del ejemplo.

Posteriormente, el usuario define el porcentaje de utilización de cada una de las rutas de acuerdo con el tipo de material. En el ejemplo, como se poseen dos destinos para camiones con Sulfuro de Alta, el usuario asignará a Gaviota un X% y, por ende, el porcentaje asignado Chancado Rosario será (1-X)%. Esto se traduce en el tonelaje que circulará por esa ruta. Se decidió agregar esta opción para darle al usuario la facilidad de asignar un 0% a aquellos destinos que no se encuentren operativos en el momento de ejecutar el modelo.

Por último, el modelo reconoce las rutas que corresponden a la fase y otorga el tiempo de ciclo correspondiente, el cual corresponde a una entrada para el proceso de cálculo de camiones.

Cabe mencionar que también se consideran entradas el porcentaje de utilización de las rutas (definido por el usuario) y el tonelaje planificado por fase y tipo de material, mencionados anteriormente. La última de las entradas es la Disponibilidad y Utilización de los camiones, definida por la Superintendencia de Planificación de la Mantención de Camiones.



103

Figura 5.8 Esquema de Entradas al Modelo de Cálculo de Camiones. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, los tiempos de tránsito promedio de los camiones en las rutas se agregan al modelo como parámetros de entrada; junto con la disponibilidad física, utilización, porcentaje de utilización de las rutas y el tonelaje correspondiente a carguío manual o automatizado. En el primer caso, se utiliza el tonelaje máximo que puede cargar la pala o cargador al realizar la asignación manual (Véase Tabla 6.3, más adelante) y en el segundo, el tonelaje máximo al realizar la asignación automatizada (Véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, más adelante).

En cuanto a los indicadores de disponibilidad física y utilización operativa, en ambos modelos se utilizaron aquellos presentados por la Compañía en el resumen ejecutivo del mes de agosto de 2017. Se decidió realizarlo de esta manera porque así era posible comparar la cantidad de camiones calculados por el modelo con los asignados por el Sistema de Despacho. Si se hubiera utilizado los valores de disponibilidad y/o utilización planificados, podían generarse resultados diferentes a los asignados por Despacho (que corresponden a la asignación real), si es que los compromisos mensuales con respecto a los indicadores operacionales no se hubieran cumplido.

Dentro de esa misma línea, cabe mencionar que no se realizó un análisis de indicadores operacionales como el que se llevó a cabo para los equipos de carguío (descrito en la sección 5.1) por considerarse que en ese caso las utilidades y rendimientos usados eran particulares para cada tipo de equipo, dada la heterogeneidad de la flota (3 modelos de palas y uno de cargadores frontales), lo que podía influenciar altamente en los resultados otorgados por el modelo. En cambio, la flota de camiones está compuesta en su mayoría por equipos KMS; luego, se considera que el ocupar la utilización promedio de los equipos globales es suficiente de acuerdo con los alcances de este trabajo de título. Sin embargo, no se descarta el estudio de estos indicadores como un posible trabajo futuro.

Por otro lado, cabe mencionar que el cálculo de camiones no se diferenció para flota LBH y KMS, pues los resultados de la sección 5.3.4 muestran que los tiempos de los match pala – camión de flota KMS son aproximadamente 18 segundos menores a los LBH. Esta diferencia no es significativa si se considera que los tiempos de ciclo de los camiones en la mina son del orden de 15 a 110 minutos. Por ende, para mantener la simpleza del modelo, se decidió omitir la diferencia en los tiempos de ciclo y utilizar una capacidad equivalente del camión de acuerdo a *Ecuación 3.9*.

Por último, con el tiempo promedio de tránsito de los camiones por ruta y considerando un porcentaje de utilización de cada ruta consultado al ingeniero de planificación, se obtiene el tonelaje movido en la ruta mensualmente, el rendimiento de los camiones y la cantidad necesaria de camiones por ruta, pala, fase y total, para cumplir la capacidad de carguío disponible.

6 Resultados y Análisis del Modelo

6.1 Resultados y Análisis del Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío

Se desea verificar si los parámetros de entrada al modelo de asignación manual de equipos de carguío (específicamente, utilizaciones operativas y rendimientos operativos de los equipos) poseen valores adecuados para ser utilizados en la elaboración de planes mensuales futuros debido a su buena capacidad predictiva.

Para ello, se alimenta al modelo de asignación de equipos de carguío manual con las **disponibilidades físicas reales** de los equipos reportadas en el mes de agosto de 2017 y la **asignación real de los equipos de carguío** de acuerdo al tiempo que pasaron efectivamente en cada fase (motivo por el cual en varias de ellas se observan equipos repetidos). Por ejemplo, Pala 20 cargó un porcentaje del mes en Fase 08 y luego se trasladó a Fase 11 (información detallada en Anexo 32). Los resultados de este ejercicio se muestran en Tabla 6.1.

Cabe mencionar que en los resultados presentados en Tabla 6.1 y Tabla 6.3 no se calculó una pérdida de tonelaje por traslado, por estimarse que está considerada en los valores de utilización operativa y rendimiento operativo que se utilizaron.

Tabla 6.1 Resultados del Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío. Disponibilidad Física Real. Fuente: Elaboración propia.

FASE MENSUAL	TONELAJE PLANIFICADO POR FASE [t/mes]	ASIGNACIÓN DE PALAS A LA FASE	DF [%]	UO [%]	ROP [t/Hop.]	TONELAJE MÁXIMO	TONELAJE MÁXIMO POR FASE [t/mes]	CUMPLIMIENTO PLAN [%]
UB0	1,140,000	CF04	63.1%	63.6%	1,387	37,797	1,138,784	99.9%
		CF05	60.2%	64.9%	1,298	140,867		
		CF06	68.1%	71.0%	1,279	351,717		
		PA15	71.9%	66.9%	1,698	608,403		
F08	838,000	PA12	88.1%	73.4%	4,152	1,329,248	1,446,645	172.6%
		PA20	40.6%	62.2%	1,848	117,397		
F09	3,983,000	CF05	60.2%	64.9%	1,298	66,392	5,431,234	136.4%
		PA08	71.2%	86.5%	4,143	1,809,429		
		PA11	81.6%	89.3%	5,241	1,193,258		
		PA12	88.1%	73.4%	4,152	668,526		
		PA14	85.9%	60.5%	4,375	1,693,629		
F10	9,390,000	CF04	63.1%	63.6%	1,387	218,727	8,845,203	94.2%
		CF05	60.2%	64.9%	1,298	11,547		
		CF06	68.1%	71.0%	1,279	43,482		
		PA09	88.9%	89.1%	5,168	2,777,624		
		PA10	78.7%	89.3%	4,899	1,358,578		
		PA11	81.6%	89.3%	5,241	1,649,784		
		PA13	78.3%	85.7%	5,578	2,785,462		
F011	4,797,000	CF04	63.1%	63.6%	1,387	52,668	3,273,947	68.2%
		CF06	68.1%	71.0%	1,279	23,935		
		PA06	79.2%	63.3%	3,774	1,407,382		
		PA08	71.2%	86.5%	4,143	89,794		
		PA09	88.9%	89.1%	5,168	267,033		
		PA10	78.7%	89.3%	4,899	1,203,283		
		PA20	40.6%	62.2%	1,848	229,853		
Remanejo	784,000	CF04	63.1%	63.6%	1,387	105,336	709,631	90.5%
		CF05	60.2%	64.9%	1,298	158,764		
		PA16	65.9%	48.8%	1,693	404,566		
		CF06	68.1%	71.0%	1,279	40,965		
TOTAL	20,932,000					20,845,444	99.6%	

De la tabla anterior se observa que el cumplimiento del plan ajusta bastante bien en su totalidad (99.6% de predicción del tonelaje planificado), pero no es muy preciso al compararlo con el tonelaje planificado, puesto que las únicas fases que cumplen con una variación de $\pm 10\%$ son Ujina, Fase 10 y el Stock de Remanejo. Las demás superan el tonelaje planificado (Fases 08 y 09) o les falta (Fase 11).

A raíz de esto, se decide realizar una comparación de los tonelajes modelados al utilizar la disponibilidad física real versus el tonelaje real reportado por la Compañía en el mes de agosto. Esta comparación se realiza con el tonelaje real -y no con el planificado- debido a que se requiere calibrar el modelo en cuanto a la utilización operativa y el rendimiento operativo. Esta comparación se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Comparación de los Tonelajes Modelados con DF Real. Fuente: (1) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017, (2)Elaboración propia.

Fase	Tonelaje Reportado en agosto 2017 [kt/mes] ¹	Tonelaje Modelado con DF real [kt/mes] ²	Variación Tonelaje Modelado c/r Real	
			[kt/mes]	[%]
UB0	1,215	1,139	-76	-6.3
F08	1,322	1,447	125	9.5
F09	4,995	5,431	436	8.7
F10	8,581	8,845	264	3.1
F011	3,618	3,274	-344	-9.5
Remanejo	647	710	63	9.7
Total	20,378	20,845	467	2.3

Se observa que existe una variación entre el tonelaje modelado y el real (no superior al 10% en valor absoluto), la cual podría explicarse por los siguientes factores:

- Los valores de utilización operativa y rendimiento operativo provienen de un análisis de una base de datos de varios meses y no sólo del mes de agosto. El motivo de esto es que se buscaban valores que fueran representativos de los indicadores y así evitar que obedecieran a algún periodo o condiciones particulares de la mina.
- Además, el modelo de cálculo de carguío no considera factores como el tipo de roca, condición de la locación de carguío (por ejemplo, frente estrecha, presencia de material arcilloso, etcétera) o necesidad de desarrollos de la operación; los cuales influyen en el rendimiento operativo y, por tanto, en el tonelaje logrado.
- Así mismo, la utilización operativa depende de la gestión que realizan los supervisores para enfrentar las condiciones que se presentan en la mina, lo que puede generar una variación en el tonelaje.

Sin embargo, debido a que la variación del tonelaje modelado con respecto al real no supera el 10% en ninguna de las fases y la variación del tonelaje total es de sólo 2.3%, se consideran adecuados los valores de utilización y rendimiento operativo calculados para los equipos, para el nivel de estudio que se está realizando.

Por otra parte, se ejecuta nuevamente el modelo usando ahora **las disponibilidades físicas planificadas (obtenidas en el Plan Mensual de agosto)**, manteniendo los valores de utilizations operativas y rendimientos operativos reales usados en el modelo anterior. Los resultados se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Resultados del Modelo de Asignación Manual de Equipos de Carguío. Disponibilidad Física Planificada. Fuente: Elaboración propia.

FASE MENSUAL	TONELAJE PLANIFICADO POR FASE [t/mes]	ASIGNACIÓN DE PALAS A LA FASE	DF [%]	UO [%]	ROP [v/Hop.]	TONELAJE MÁXIMO	TONELAJE MÁXIMO POR FASE [t/mes]	CUMPLIMIENTO PLAN [%]
UB0	1,140,000	CF04	65.3%	63.6%	1,387	39,070	1,267,123	111.2%
		CF05	74.9%	64.9%	1,298	175,252		
		CF06	78.0%	71.0%	1,279	402,605		
		PA15	76.9%	66.9%	1,698	650,196		
F08	838,000	PA12	84.2%	73.4%	4,152	1,270,440	1,467,065	175.1%
		PA20	68.0%	62.2%	1,848	196,626		
F09	3,983,000	CF05	74.9%	64.9%	1,298	82,598	5,718,479	143.6%
		PA08	82.8%	86.5%	4,143	2,104,559		
		PA11	84.3%	89.3%	5,241	1,231,625		
		PA12	84.2%	73.4%	4,152	638,949		
		PA14	84.3%	60.5%	4,375	1,660,747		
F10	9,390,000	CF04	65.3%	63.6%	1,387	226,095	9,072,130	96.6%
		CF05	74.9%	64.9%	1,298	14,365		
		CF06	78.0%	71.0%	1,279	49,773		
		PA09	83.1%	89.1%	5,168	2,595,817		
		PA10	81.7%	89.3%	4,899	1,410,459		
		PA11	84.3%	89.3%	5,241	1,702,830		
		PA13	86.4%	85.7%	5,578	3,072,790		
F011	4,797,000	CF04	65.3%	63.6%	1,387	54,442	3,287,975	68.5%
		CF06	78.0%	71.0%	1,279	27,398		
		PA06	68.6%	63.3%	3,774	1,217,931		
		PA08	82.8%	86.5%	4,143	104,440		
		PA09	83.1%	89.1%	5,168	249,554		
		PA10	81.7%	89.3%	4,899	1,249,233		
		PA20	68.0%	62.2%	1,848	384,977		
Remanejo	784,000	CF04	65.3%	63.6%	1,387	108,884	851,476	108.6%
		CF05	74.9%	64.9%	1,298	197,518		
		PA16	81.1%	48.8%	1,693	498,182		
		CF06	78.0%	71.0%	1,279	46,892		
TOTAL	20,932,000					21,664,248	3.5%	

Los resultados de la comparación del tonelaje movido por fase entre el modelo con DF planificado y el tonelaje real se presentan en Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Comparación de los Tonelajes Modelados con DF Planificada. Fuente: (1) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017, (2) Elaboración propia.

Fase	Tonelaje Reportado en agosto 2017 [kt/mes] ¹	Tonelaje Modelado con DF real [kt/mes] ²	Variación Tonelaje Modelado c/r Real	
			[kt/mes]	[%]
UB0	1,215	1,267	52	4.3
F08	1,322	1,467	145	11.0
F09	4,995	5,718	723	14.5
F10	8,581	9,072	491	5.7
F011	3,618	3,287	-331	-9.1
Remanejo	647	851	204	31.5
Total	20,378	21,664	1,284	6.3

Se observa que el tonelaje modelado supera el $\pm 10\%$ de variación en Fases 08, 09, 11 y Remanejo. Además, la variación en el tonelaje modelado con respecto al real es mayor al utilizar la DF planificada (6.3%) versus el tonelaje obtenido con la DF real (2.3%). Lo anterior se explica por las diferencias entre las DF real y planificada, las cuales se presentan en Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Comparación entre DF Real y Planificada. Fuente: Resumen Ejecutivo CMDIC agosto de 2017.

Equipo de Carguío	DF Real [%]	DF Planificada [%]	Diferencia [%]
PA06	79.2%	68.6%	-10.7%
PA08	71.2%	82.8%	11.6%
PA09	88.9%	83.1%	-5.8%
PA10	78.7%	81.7%	3.0%
PA11	81.6%	84.3%	2.6%
PA12	88.1%	84.2%	-3.9%
PA13	78.3%	86.4%	8.1%
PA14	85.9%	84.3%	-1.7%
PA15	71.9%	76.9%	4.9%
PA16	65.9%	81.1%	15.2%
PA20	40.6%	68.0%	27.4%
CF04	63.1%	65.3%	2.1%
CF05	60.2%	74.9%	14.7%
CF06	68.1%	78.0%	9.9%

En Tabla 6.6 se presenta el detalle de la contribución de cada pala en el aumento del tonelaje modelado con la DF real versus el modelado con la DF planificada. Por otro lado, los datos del porcentaje de tiempo de operación de cada equipo se encuentran en Anexo 32.

Tabla 6.6 Variación en los Tonelajes Modelados por Fase. Fuente: Elaboración propia.

Fase	Equipo	Variación en el Tonelaje por Equipo [kt/mes]	Variación en el Tonelaje Neto de la Fase	
			[kt/mes]	[%]
UB0	CF04	1.2	128.3	11.3
	CF05	34.4		
	CF06	50.8		
	PA15	41.8		
F08	PA12	-58.8	20.4	1.4
	PA20	79.2		
F09	CF05	16.2	287.2	5.3
	PA08	295.1		
	PA11	38.4		
	PA12	-29.6		
	PA14	-32.9		
F10	CF04	7.4	226.7	2.6
	CF05	2.8		
	CF06	6.0		
	PA09	-181.8		
	PA10	51.9		
	PA11	53.0		
	PA13	287.3		
F11	CF04	1.8	13.1	0.4
	CF06	2.6		
	PA06	-189.5		
	PA08	14.6		
	PA09	-17.5		
	PA10	46.0		
	PA20	155.1		
Remanejo	CF04	3.5	141.8	20.0
	CF05	38.8		
	PA16	93.6		
	CF06	5.9		
Total	-	-	817.7	3.9

Para Ujina, se observa que los equipos que más aportaron en el aumento de tonelaje modelado en la fase (128 kt/mes) son el CF05, CF06 Y PA15. Estos equipos influyeron en el aumento del tonelaje total ya sea por un aumento considerable en la disponibilidad planificada versus la real (CF05 y CF06) o por un aumento mediano en este valor, pero bastante tiempo de operación en la fase (PA15). Por otro lado, el CF04 aporta poco tonelaje en comparación a los demás equipos, por su bajo porcentaje de permanencia en la fase.

Por otro lado, para Fase 08 la variación en el tonalaje modelado versus el reportado aumenta desde 9.5% (al utilizar la DF real) hasta 11.0% (si se utiliza la DF planificada). Esto sucede ya que la disponibilidad planificada de PA20 era bastante superior a la real (27.4% mayor), generando un aumento del tonelaje modelado de 79 kt/mes. A pesar de esto, es importante mencionar que esta pala estuvo un 33.8% de su tiempo operativo en esta fase, mientras que, PA12 (que tiene un mayor rendimiento que PA20) estuvo un 66.5% de su tiempo operativo. Sin embargo, PA12 tuvo una variación en la disponibilidad de sólo -3.9%, disminuyendo el tonelaje modelado en 59 kt/mes, resultando un balance por fase de 20 kt/mes.

En cuanto a Fase 09, ésta aumento su tonelaje en 287 kt/mes al modelar con la disponibilidad planificada. Esto se debe a la diferencia en la disponibilidad de PA08 (71.2% DF real versus 82.8% DF planificada) y a que pasó la mayoría de su tiempo operativo en esta fase, generando un aumento en el tonelaje modelado de 295 kt/mes. Los demás equipos, al poseer variaciones en la disponibilidad o porcentaje de operación en la fase menores, generan contribuciones que se compensan entre sí.

Acerca de Fase 10, se puede mencionar que PA09 y PA13 son las que generaron mayor influencia en el tonelaje: la primera lo disminuyó en 181 kt/mes, mientras que la segunda lo aumentó en 287 kt/mes. Esto se debe a una variación en la disponibilidad no tan importante, pero mucho tiempo operativo en la fase, para equipos como estos que son de alto rendimiento. Por otro lado, Palas 10 y 11 también contribuyeron en aumentar en menor medida el tonelaje modelado (105 kt/mes), por el mismo efecto que los equipos anteriores. Las demás palas presentes en la fase contribuyeron con aumentos menores de tonelaje, calculándose una variación neta de la fase de 227 kt/mes.

Para Fase 11, los equipos que generaron mayor variación en el tonelaje total fueron Palas 06 y 20: la primera lo disminuyó en 189 kt/mes y la segunda lo aumentó en 155 kt/mes. Esto fue casuado por la variación en la disponibilidad de PA06 (de -10.7%), sumado a que estuvo todo su tiempo operativo en esta fase. Pala 20 tuvo el mismo efecto, pero de manera inversa, con una variación en su disponibilidad de 27.4%. A pesar de que la variación es mayor, el último equipo corresponde a una pala hidráulica y, por tanto, posee menor rendimiento que PA06 que es eléctrica. Por otro lado, PA10 también aportó cierta cantidad de tonelaje (46 kt/mes) por una variación de su disponibilidad y tiempo de operación en la fase medianos. Todos los demás equipos presentan poco aporte con respecto a estas palas y el balance general de la fase es una variación de 13 kt/mes, valor que se considera pequeño.

Por otro lado, para el stock de remanejo se produjo una variación bastante más sustancial, desde 9.6% del tonelaje modelado al considerar la disponibilidad real hasta 31.5% al utilizar la planificada (141 kt/mes neto). Esto se debe a que la Pala 16 poseía una disponibilidad real de 65.9% comparada con una planificada de 81.1% y estuvo todo su tiempo operativo en esta fase. Además, algo del tonelaje discrepado fue aportado por el Cargador Frontal 5, que reportó una DF real de 60.2% comparada con 74.9% la DF planificada.

Por último, la variación en el tonelaje total de la mina, debida a los cambios mencionados anteriormente, fue de 818 kt/mes. Esta discrepancia en el tonelaje modelado fue causada en mayor medida por Fases 09 y 10, en segundo lugar el Stock de Remanejo y Ujina y menor aporte de Fases 08 y 11.

6.2 Resultados y Análisis del Modelo de Asignación Automática de Equipos de Carguío

Los resultados del modelo de cálculo de equipos de carguío con asignación optimizada se presentan en Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Resultados del Modelo de Asignación Automática de Equipos de Carguío. Fuente: Elaboración propia.

FASE MENSUAL	TONELAJE REQUERIDO POR FASE [t/mes]	ASIGNACIÓN DE PALAS A LA FASE	DF [%]	UO [%]	ROP [t/Hop.]	TONELAJE MÁXIMO POR EQUIPO	TONELAJE MÁXIMO POR FASE [t/mes]	CUMPLIMIENTO PLAN [%]
UB0	1,140,000	PA15	76.9%	66.9%	1,698	650,196	1,213,292	106.4%
		PA20	68.0%	62.2%	1,848	563,096		
F08	838,000	CF05	74.9%	64.9%	1,298	464,208	989,757	118.1%
		CF06	78.0%	71.0%	1,279	525,548		
F09	3,983,000	PA11	84.3%	89.3%	5,241	2,934,456	4,595,203	115.4%
		PA14	84.3%	60.5%	4,375	1,660,747		
F10	9,390,000	PA06	68.6%	63.3%	3,774	1,146,967	8,928,323	95.1%
		PA09	83.1%	89.1%	5,168	2,845,372		
		PA12	84.2%	73.4%	4,152	1,863,194		
		PA13	86.4%	85.7%	5,578	3,072,790		
F011	4,797,000	PA08	82.8%	86.5%	4,143	2,155,555	4,793,799	99.9%
		PA10	81.7%	89.3%	4,899	2,638,244		
Remanejo	784,000	PA16	81.1%	48.8%	1,693	482,112	906,284	115.6%
		CF04	65.3%	63.6%	1,387	424,172		
TOTAL	20,932,000						21,426,657	102.4%

Cabe mencionar que para el cálculo de las capacidades de carguío presentadas en la tabla anterior se consideraron las utilidades operativas y rendimientos operativos validados en la sección 6.1, en particular Tabla 6.2 y su análisis. Además, debido a que este modelo debería ejecutarse antes de realizar el plan mensual, se utilizaron las disponibilidades planificadas de los equipos de carguío.

Se observa que el modelo resuelve de manera bastante apropiada el problema de optimización lineal, alcanzándose un cumplimiento del 102.4% del tonelaje establecido en el plan, equivalente a 21.4 millones de toneladas. En cuanto al ajuste de las fases, se observa que, debido a que el tonelaje planificado se ve superado por la capacidad de carguío de 14 equipos, pero no es cumplido en un mínimo de 95% al utilizar 13, se obtienen límites de 95% y 118% de predicción del tonelaje. Por ende, se considera que, utilizando la totalidad de equipos disponibles se podría aumentar el tonelaje planificado en algunas fases, si es que la flota de camiones así lo permite.

Por otro lado, se realiza una comparación análoga a la realizada en la sección 6.1 en cuanto al tonelaje reportado por la Compañía y el modelado de manera optimizada, presentada en Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Comparación de los Tonelajes Modelados con el Reportado. Fuente: (1) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017, (2) Elaboración propia.

Fase	Tonelaje Reportado en agosto 2017 [kt/mes] ¹	Tonelaje Modelado [kt/mes] ²	Variación Tonelaje Modelado c/r Real	
			[kt/mes]	[%]
UB0	1,215	1,213	-2	-0.2
F08	1,322	990	-332	-25.1
F09	4,995	4,595	-400	-8.0
F10	8,581	8,928	347	4.0
F011	3,618	4,794	1,176	32.5
Remanejo	647	906	259	40.0
Total	20,378	21,427	1,049	5.1

Se observa que el tonelaje modelado no se ajusta al reportado en las Fases 08, 11 y el Stock de Remanejo, puesto que la adherencia al plan de agosto no fue tan precisa, ya que la Compañía modificó su estrategia de operación en ese mes particular para lograr compromisos de largo plazo.

6.3 Comparación de los Indicadores Operacionales Modelados con los Reportados en el Resumen Ejecutivo

A continuación, se presenta la comparación de los indicadores operacionales utilizados en los modelos de carguío (de asignación manual y automática) con el resumen ejecutivo elaborado por CMDIC el mes de agosto de 2017. Se compararán los indicadores operacionales de Utilización Operativa y Rendimiento Operativo. Los indicadores de Disponibilidad Física y Producción lograda ya han sido analizados en la sección 6.1.

El primer indicador operacional a comparar es la utilización operativa, presentado en Tabla 6.9. En este caso, este valor corresponde al otorgado al modelo luego de realizar el análisis histórico de indicadores. En este caso, se observa que las variaciones son menores al 10% en todos los casos; inclusive, la utilización para las palas HR y P&H, que son las más grandes de la mina, posee una variación menor al 5%.

Tabla 6.9 Comparación entre Utilizaciones Modeladas y Reales. Fuente: (1) Elaboración propia, (2) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017.

Utilización Operativa [%]			
Tipo de Equipo	Modelada ¹	Resumen agosto 2017 ²	Variación r/Resumen [%]
Palas HR	84.2	88.1	-4.4
Palas P&H	79.1	82.0	-3.5
Palas PC	62.0	66.8	-7.1
CF	69.6	76.0	-8.4
Promedio Global	74.7	80.0	-6.6

Se observa que la utilización operativa modelada para las palas modelo PC es menor a la reportada por la Compañía, debido a que se calculó una cifra de 48.8% para la Pala 16, lo cual afectó el valor total de la utilización modelada.

En el caso de los cargadores frontales, la utilización operativa modelada también es menor a la reportada por el intervalo de tiempo en que se evaluó la data. En particular, en los meses de junio y julio la utilización operativa de estos equipos fue de 58.4% y 67.3% respectivamente, lo cual dista de los 76.0% reportados en el mes de agosto. Como se comentó anteriormente, la utilización operativa depende de la gestión que hacen los supervisores en cuanto a los recursos que poseen para operar. Luego, la utilización operativa modelada analizada en cierto intervalo de tiempo no será necesariamente igual a la de un mes específico.

El segundo indicador operacional por comparar corresponde al rendimiento operativo. Análogo al caso anterior, el rendimiento modelado se obtuvo del análisis de los indicadores operacionales. Se observa que la variación de los rendimientos es menor al 5% en todos los casos, excepto en las palas PC, que varía en -8.3%.

Tabla 6.10 Comparación entre Rendimientos Modelados y Reales. Fuente: (1) Elaboración propia, (2) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017.

Rendimiento Operativo [t/hop]			
Tipo de Equipo	Modelada ¹	Resumen agosto 2017 ²	Variación r/Resumen [%]
Palas HR	4,507	4,721	-4.5
Palas P&H	4,890	4,671	4.7
Palas PC	1,745	1,902	-8.3
CF	1,318	1,283	2.7
Promedio Global	3,625	3,678	-1.4

Como se mencionó anteriormente, las discrepancias en el rendimiento operativo pueden obedecer a condiciones de la locación de carguío (frente estrecha, material duro o arcilloso, piso blando, entre otras), necesidades de la operación (carguío en rampa o empalme de fases) o condiciones propias de los equipos (fiabilidad de las partes del equipo, variación en la cantidad de equipos operativos).

En particular, las palas de modelo PC poseen un rendimiento modelado menor al reportado por la Compañía. Esto puede ser causado por el intervalo de tiempo definido para analizar la data, el cual corresponde a los meses de junio, julio y agosto. Como las palas 15 y 16 se incorporaron a la operación pocos meses antes del periodo de evaluación de la data (marzo y junio respectivamente), es posible que su rendimiento se viese disminuido por la adaptación que esto requiere.

Cabe mencionar que se propone como trabajo futuro ahondar en el estudio de los indicadores operacionales relevantes para el modelo, con el fin de aumentar la precisión del mismo.

6.4 Resultados y Análisis del Modelo de Cálculo de Equipos de Transporte

Con el objetivo de validar los parámetros utilizados para el modelo de cálculo de camiones, se realizó una comparación entre los camiones modelados manualmente y los asignados por el Sistema de Despacho en agosto de 2017, la cual se presenta en Tabla 6.11. Cabe mencionar que los camiones asignados por despacho corresponden a valores decimales porque fueron calculados a partir de la data reportada en el mes, no estimados.

Se decidió comparar los camiones obtenidos por el modelo de asignación manual con los asignados por despacho porque el primer valor incorpora todos los equipos de carguío que estuvieron operando en cada fase, considerando su **disponibilidad física real** y, por tanto, el tonelaje modelado obtenido de esa manera; mientras que el segundo, presenta la cantidad de camiones asignados a esos equipos.

Tabla 6.11 Comparación de los Camiones Modelados Manualmente con los asignados por el Sistema de Despacho.
Fuente: (1) Elaboración propia, (2) Resumen Ejecutivo CMDIC agosto 2017.

Camiones Asignados por Fase					
Fase	Modelo de Asignación Manual [unidades] ¹	Asignados por Sistema de Despacho [unidades] ²	Variación entre Modelos		
			[unidades]	[%]	
Ujina	5.0	7.7	-2.7	-35.1	
Fase 08	9.0	8.8	0.2	2.3	
Fase 09	26.0	25.3	0.7	2.8	
Fase 10	33.0	34.1	-1.1	-3.2	
Fase 11	9.0	13.2	-4.2	-31.8	
Remanejo	1.0	2.2	-1.2	-54.5	
Total	83.0	91.2	-8.2	-9.0	

Se observa que existen grandes variaciones en la cantidad de camiones para las fases de Ujina, Fase 11 y el Stock de Remanejo; donde el modelo asignó una cantidad menor de camiones a la reportada por la Compañía. Por otro lado, se observa que en Fases 08, 09 y 10 el modelo modeló la cantidad de camiones con una precisión menor al 5% y el balance global es de una precisión con un margen de error del -9.0%.

Con respecto a esto, es difícil definir un factor específico causante de las diferencias en la cantidad de camiones modelados, debido a que el modelo posee muchas variables de entrada, tales como: topografía de la mina, perfiles de velocidad asignados a los camiones, rutas de tránsito escogidas, distancia entre la frente de carguío y el sector de descarga (la cual se va modificando con el avance de la mina), disponibilidades y utilizaciones de los equipos, usar la capacidad equivalente de los camiones versus un estudio más exhaustivo de esto, entre otros.

Considerando los resultados de este modelo como referencia, se procede a calcular los camiones asignados por el modelo de asignación automática.

Tabla 6.12 Comparación en los Camiones Asignados por el Modelo de Asignación Automática y el Manual. Fuente: Elaboración propia.

Camiones Asignados por Fase					
Fase	Modelo de Asignación Automática [unidades]	Modelo de Asignación Manual [unidades]	Variación entre Modelos		
			[unidades]	[%]	
Ujina	5.0	5.0	0.0	0.0	
Fase 08	6.0	9.0	-3.0	-33.3	
Fase 09	21.0	26.0	-5.0	-19.2	
Fase 10	33.0	33.0	0.0	0.0	
Fase 11	13.0	9.0	4.0	44.4	
Remanejo	1.0	1.0	0.0	0.0	
Total	79.0	83.0	-4.0	-4.8	

Se observa que el ajuste del modelo automático con respecto al manual tampoco es preciso, pues Fases 08, 09 y 11 poseen una dispersión mayor al 10%. Sin embargo, la variación total de la flota de camiones disminuyó de -9.0% a -4.8%, puesto que las fases que lograron ajustarse lo hicieron en su totalidad. El detalle se presenta en Tabla 6.13.

Tabla 6.13 Comparación en los Tonelajes Calculados por el Modelo de Asignación Automática y el Manual. Fuente: Elaboración propia.

Tonelaje Calculado por Fase					
Fase	Modelo de Asignación Automática [kt/mes]	Modelo de Asignación Manual [kt/mes]	Variación entre Modelos		
			[kt/mes]	[%]	
Ujina	1,213	1,138	75	6.6	
Fase 08	990	1,447	-457	-31.6	
Fase 09	4,595	5,431	-836	-15.4	
Fase 10	8,928	8,845	83	0.9	
Fase 11	4,793	3,274	1,519	46.4	
Remanejo	906	709	197	27.8	
Total	21,427	20,845	582	2.8	

Se observa que las fases de Ujina y Fase 10 se ajustaron al modelo de asignación manual, lo cual se debe a que la variación en sus tonelajes era pequeña. Sin embargo, Fase 11 también se ajustó en la cantidad de camiones, lo que se explica porque es una fase pequeña y ubicada a poca profundidad, luego su tiempo de ciclo es más corto que las demás fases y el tonelaje que se requiere puede cumplirse con sólo un camión para ambos modelos. Por otro lado, las fases que poseen mayor discrepancia son Fases 08, 09 y 11, lo cual responde a una diferencia en los tonelajes modelados.

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones del Modelo de Cálculo de Equipos de Carguío

Como se estableció en un principio, el objetivo del modelo manual es corroborar si con una asignación de equipos de carguío determinada se puede cumplir una meta de movimiento de material especificado en el plan mensual. Por ende, el modelo debe ser capaz de estimar de manera precisa el tonelaje que se puede cargar. Es por esto que se decidió validar el modelo con respecto a los indicadores operacionales en primera instancia, al comparar el tonelaje modelado con el reportado por la Compañía. Posteriormente, se decide analizar el tonelaje modelado al modificar las disponibilidades de los equipos.

Los resultados obtenidos para el primer tópico son los correspondientes a la sección 6.3, donde se concluye que ambos indicadores operacionales no superan una variación del $\pm 10\%$ con respecto al valor reportado por la Compañía.

En la Tabla 6.9 se observa que la utilización operativa presenta un promedio de 74.7% para el valor modelado versus 80.0% para el reportado (-6.6% de variación). Esto se debe a que la utilización operativa modelada para las palas PC y Cargadores Frontales fue menor a la reportada por la Compañía en ese mes:

- En el primer caso, la disminución en la UO modelada es causada en gran medida por el valor calculado para la Pala 16 (48.8%), muy por debajo del 66.8% promedio reportado.
- En el segundo caso, los cargadores frontales presentaron una menor UO en los meses de junio y julio, con valores de 58.4% y 67.3% respectivamente, lo cual dista del 76.0% reportado en el mes de agosto, disminuyéndose así el promedio general.

Sin embargo, es importante resaltar que la utilización operativa modelada para las palas HR y P&H, que corresponden a los equipos de carguío más grandes de la mina, es menor al 5%, lo cual representa un aspecto positivo en la validación del indicador.

Como se ha mencionado anteriormente, la utilización operativa depende en gran medida de la gestión que pueden realizar los supervisores con respecto a los recursos disponibles para afrontar los desafíos de la operación. Luego, un cambio en la estrategia o perspectiva por parte de ellos puede generar impactos en el valor de este indicador.

Por otro lado, el rendimiento operativo modelado presenta un valor de 3,625 t/hop versus 3,678 t/hop el modelado, vale decir un -1.4% variación (Véase Tabla 6.10). En particular, se observan variaciones menores al 5% con respecto al valor reportado, excepto para las palas de modelo PC, que poseen un rendimiento modelado 8.3% menor al reportado. Una explicación para esto es que las palas 15 y 16 se incorporaron a la operación pocos meses antes del período de realización del modelo, luego su rendimiento pudo verse afectado por la adaptación de estos equipos a la operación.

Además, es importante mencionar que el rendimiento operativo puede verse afectado por distintos factores influyentes en la capacidad de carguío, tales como:

- Condición de la locación de carguío, como una frente de carga estrecha, presencia de material duro o arcilloso, piso blando.
- Necesidades de la operación, como carguío en rampa, empalme de fases, logro de línea de programa, traslado de palas y aéreos.
- Factores propios de los equipos, como fiabilidad de las partes del equipo y su disponibilidad, variación en la cantidad y tipo de equipos operativos, flota heterogénea en los equipos de carguío.
- Estado anímico de los operadores.

Por ende, conocer específicamente la causa de las variaciones en los valores de los indicadores operacionales no corresponde una tarea trivial, motivo por el cual se propone una investigación más exhaustiva con respecto a ellos, en virtud de mejorar la exactitud del modelo de carguío.

Para el segundo análisis y considerando lo realizado en la sección 6.1 se concluye que la variación de tonelaje modelado con respecto al tonelaje reportado es menor al utilizar la DF real (2.3%) versus la planificada (6.3%). En particular en el primer caso, la variación del tonelaje por fases era menor al $\pm 10\%$. Sin embargo, al utilizar la DF planificada, el tonelaje modelado presenta variaciones superiores a este valor, alcanzando incluso los 31.5% en el stock de remanejo debido a la diferencia en las disponibilidades de Pala 16.

Por otro lado, las mayores discrepancias en el tonelaje modelado fueron causadas por Fases 09 y 10 (514 kt/mes), en segundo lugar el stock de remanejo y Ujina (270 kt/mes), y en menor medida por Fases 08 y 11 (34 kt/mes), de un total de 817 kt/mes. Las discrepancias de cada una de las fases fueron explicadas con mayor detalle en la sección 6.1, pero como conclusión general cabe mencionar que la diferencia entre las disponibilidades planificadas y reales impacta en gran medida a las fases con palas de alto rendimiento (como Fases 09 y 10) o a fases con palas más pequeñas, pero menor tonelaje de referencia. Lo anterior deja en evidencia la importancia de una correcta planificación de la disponibilidad de los equipos de carguío, tanto para el modelo desarrollado como para las exigencias de la operación.

En base a lo explicado anteriormente, se concluye que las discrepancias en la disponibilidad, sumado a las variaciones que se pueden generar al calibrar los indicadores operacionales, pueden afectar la exactitud del modelo. Sin embargo, se considera que una exactitud menor al 5% cumple los objetivos establecidos por parte de la Compañía para este trabajo de memoria.

Por otro lado, para verificar si las asignaciones realizadas de manera manual pueden lograr una mayor adherencia al tonelaje planificado, se desarrolla el modelo de cálculo de equipos de carguío optimizado, el cual corresponde a un problema de optimización lineal. Se concluye que este modelo resuelve de manera bastante apropiada el problema, con un cumplimiento del tonelaje planificado de 102.4%, equivalente a 495 kt más para ese mes. Además, el tonelaje planificado se cumple en un mínimo de 95% y máximo de 118% para todas las fases. Es por esto que se plantea que es posible aumentar el tonelaje planificado en algunas fases, si es que el ingeniero de planificación lo estima conveniente y la flota de camiones lo permite.

Cabe mencionar que, al comparar la asignación de equipos de carguío realizada por el modelo optimizado con el manual, se observa que esta es bastante diferente en todas las fases. Esto se debe a que los enfoques de los modelos son distintos: el primero busca resolver la asignación de equipos basada en un problema que optimiza el cumplimiento del plan mensual por fases; mientras que el segundo, se remite a definir si el tonelaje planificado se puede cumplir o no y en qué medida.

Por último, las conclusiones generales de los modelos de cálculo de equipos de carguío, de asignación manual y automática son:

- Dado que el objetivo principal del modelo manual es verificar si una determinada asignación de equipos de carguío es capaz de cumplir una cantidad de material definido en el plan mensual, se desprende que la primera ventaja que presenta, es que permite modificar las asignaciones de los equipos de carguío a las fases, generando diferentes combinaciones en base a la estrategia de negocios que se posea (privilegiar tonelaje o ley de una fase determinada). Incluso se puede adaptar, como se realizó en este caso, para asignar equipos de carguío que poseen mayor movilidad (por ejemplo, los cargadores frontales o palas hidráulicas) a diferentes fases en determinados momentos del mes.
- La adherencia al plan es un tópico no menor en la planificación, pues una buena adherencia significa asegurar la ley definida en el plan y por tanto, el compromiso de finos. Además, una buena adherencia en fases de desarrollos permitirá la exposición de fases de mineral más adelante, por tanto son beneficios a mediano plazo. El hecho de no adherirse a los desarrollos, implica que no se podrá contar con la ley del mineral que se hubiera mostrado.

- En el caso de la versión de asignación manual del modelo, se observa que no se atiende en totalidad al plan. Esto sucede porque, en el caso particular del mes de agosto, se modificó el plan para cumplir con requerimientos de finos para cumplir el budget. La estrategia de negocios perseguida por la Compañía consistía en aumentar la extracción de mineral de fases de fondo mina para aumentar las leyes globales del mes y de esa manera cumplir con el tonelaje de finos.
- A pesar de que la adherencia del modelo manual no haya sido buena por esta situación en particular, el modelo sí permite visualizar de forma rápida el tonelaje máximo que se puede lograr con una combinación de equipos de carguío y, en consecuencia, visualizar oportunidades de mejora o amenazas en cuanto a la gestión de los indicadores operacionales modificables o permutaciones de las asignaciones de los equipos de carguío a las fases.
- Por ende, se pueden comparar distintos escenarios variando los datos de entrada para determinar cuál es la ganancia o pérdida de tonelaje que se genera, lo cual se traduce en una disminución o aumento del mineral enviado a planta, parte importante del negocio minero.
- Por último, cabe mencionar que el modelo ha sido diseñado específicamente para un usuario que es experto en la planificación, por tanto, los valores de los parámetros de entrada que se utilizaron para elaborar el modelo quedan a libre albedrío del usuario. Es más, a pesar de que el modelo se haya elaborado como una herramienta de apoyo para el planificador, él es quien posee experiencia en cuanto al funcionamiento de operaciones mineras, mientras que el modelo se basa en tendencias en el comportamiento de los datos y no en situaciones particulares. Además, el planificador conoce requerimientos de mediano y largo plazo que el modelo no incorpora y puede estar tomando decisiones en base a ello.

7.1.1 Recomendaciones

Una de las debilidades presentes en el modelo es que se están utilizando indicadores operacionales históricos que se ven afectados por las variaciones en las condiciones de carguío, como se ha mencionado anteriormente. Por ende, se recomienda seguir profundizando en el estudio de los indicadores operacionales, para disminuir la varianza de estos valores con tal de generar una mejor predicción en el modelo. Además, se sugiere calibrar el modelo realizando un análisis de indicadores históricos si se modifican en gran medida las condiciones de la faena.

Por otro lado, un trabajo futuro del modelo de carguío automatizado es admitir que las palas se trasladen a más de una fase en el mes. Esto está permitido en el modelo de carguío manual, puesto que el usuario puede ir configurando el tiempo de operación del equipo en la fase, pero en el modelo automatizado era más difícil incorporar esa condición utilizando la herramienta Solver.

7.2 Conclusiones del Modelo de Cálculo de Equipos de Transporte

De Tabla 6.11 se concluye que, a pesar de que existen grandes variaciones en la cantidad de camiones para algunas fases, el ajuste global del modelo posee una precisión con un margen de error menor al -9.0%. Para un modelo con tantas variables, es difícil determinar qué factor puede ser el causante directo de las diferencias en la cantidad de camiones, puesto que, como ya se ha mencionado, se incluyeron los tonelajes que se deben transportar, la topografía, los perfiles de velocidad de los camiones, las rutas que transitan, los indicadores operacionales, la distancia entre locaciones de carguío y destinos, uso de la capacidad equivalente de los camiones, entre otros. Sin embargo, considerando las herramientas de las que se dispone en este trabajo de título y de la cantidad de variables que posee el modelo, se considera que una precisión menor al 10% es apropiada para el modelo de camiones.

Por otro lado, a partir de Tabla 6.12 se concluye que al comparar el modelo de asignación automática con el manual, la dispersión de la flota disminuye de -9.0% a -4.8%. Esto se debe a que las fases que lograron ajustarse al modelo lo hicieron en su totalidad, dado que las variaciones en los tonelajes eran pequeñas. Un caso excepcional corresponde al Stock de Remanejo, el cual a pesar de poseer una diferencia en su tonelaje importante, asignó la misma cantidad de camiones. Esto se debe a que los tiempos de ciclo en este stock son pequeños, luego sólo se necesita un camión para cumplir el tonelaje modelado en ambos casos. Por otro lado, para las fases que poseían una mayor diferencia en sus tonelajes, el modelo asignó la cantidad de camiones de acuerdo a esto.

Por último, las conclusiones generales de los modelos de cálculo de equipos de transporte se mencionan a continuación:

- La principal fortaleza del modelo de cálculo de equipos de transporte es que permite determinar la cantidad de camiones necesaria para cumplir un determinado tonelaje modelado, el cual debiera poseer una buena adherencia al planificado. Esta información no es trivial, puesto que en la etapa de construcción del plan debería considerarse como información retroactiva la cantidad de camiones de la cual se dispone.
- Además, el modelo permite al usuario definir cuánto material quiere enviar a cada destino, permitiéndole cerrar rutas o potenciar destinos que prefiera en base a las condiciones de la mina. En particular, CMDIC es una mina con condiciones climáticas que afectan en gran cantidad a la operación, motivo por el cual ciertos destinos se privilegian en momentos de inclemencia climática. Además, el hecho de abrir o cerrar rutas permite conocer el tonelaje asignado al destino y por tanto su volumen, el cual no es trivial para la planificación de los sectores de ubicación de botaderos y stocks a mediano y largo plazo.
- Por otro lado, la cantidad de camiones modelada es similar, pero menor a la asignada por el Sistema de Despacho. Es difícil identificar cuál de los factores mencionados anteriormente es el que posee mayor influencia en la cantidad de camiones calculada, motivo por el cual se recomienda ahondar en el estudio.

- Otro factor a considerar es que, para la elaboración del modelo, se realizó un análisis de los tiempos de demoras de los camiones para elaborar los match pala – camión. Sin embargo, estos tiempos corresponden a promedios, porque así requiere Haulage Profile que se ingrese la información, cuando en realidad las demoras de los camiones obedecen a distribuciones que se van modificando a lo largo del turno.
- Cabe mencionar que, para calibrar los tiempos de ciclo determinados en el modelo de cálculo de equipos de transporte, se midieron tiempos en terreno, a modo de poder comparar si los resultados obtenidos eran correctos.

7.2.1 Recomendaciones

A pesar de que el modelo permite que se le agreguen o actualicen rutas y fases, no es recomendable que las mismas se actualicen mensualmente, pues el ejecutar Haulage Profile no es tan rápido como se esperaría, por el hecho de que entrega archivos unitarios que se deben agregar a la base de datos; además de la alta capacidad computacional que esto conlleva para tener un proceso eficiente. Sin embargo, se recomienda que si las rutas no se modifican, vale decir, si no se agregan destinos nuevos o se modifican las entradas o salidas de la mina, se agregue un tiempo equivalente al que demorarían los camiones en alcanzar el avance de la pala. Sí se recomienda actualizar las rutas cuando se presenten cambios bruscos, como cambiar una ruta, pues esto modifica el tiempo de traslado del camión.

Por otro lado, el modelo podría validarse con datos de un plan mensual de un mes distinto, para validar los indicadores operacionales utilizados. Además, el validar el modelo con otros planes mensuales permite evaluar si la estrategia operativa definida está alcanzando las metas de mediano plazo.

Por último, cabe mencionar que el modelo funciona como apoyo para el ingeniero de Planificación, por tanto, puede decidir si modificar los valores recomendados en cuanto a los indicadores operacionales o no, de acuerdo a su visión crítica y experiencia en la mina.

8 Bibliografía

- [1] BARRIOS, M. 2015. Modelo Estructural y Cinemático del Yacimiento de Quebrada Blanca y su Relación con la Mineralización Supérgena. Memoria para optar al Título de Geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [2] BURT, C., 2008. An Optimization Approach to Materials Handling in Surface Mines. Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy of Curtin University of Technology, Department of Mathematics and Statistics.
- [3] BURT, C., CACCETTA, L., HILL, S., WELGAMA, P., 2008. Models for Mining Equipment Selection.
- [4] BURT, C., CACCETTA, L., WELGAMA, P., FOUCHÉ, L., 2008. Equipment Selection with Heterogeneous Fleets for Multiple-Period Schedules. En: An Optimization Approach to Materials Handling in Surface Mines. Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy of Curtin University of Technology, Department of Mathematics and Statistics.
- [5] BURT, C., CHAN, Y., 2009. Equipment Selection for Surface Mines.
- [6] BURT, C., CACCETTA, L., 2013. Equipment Selection for Surface Mining: A Review.
- [7] CARMICHAEL, D., 2006. Shovel – truck Queues: A Reconciliation of Theory and Practice. *Construction Management and Economics*, 1986, 4, 161 – 177.
- [8] CASTILLO, L., 2009. Modelos de Optimización Para la Planificación Minera a Cielo Abierto. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [9] COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI SCM. 2016. Actualización Método de Explotación Rajo Rosario.
- [10] COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI SCM. 2017. Mapeo de Procesos Gerencia Gestión Mina. Superintendencia Planificación Corto Plazo.
- [10] COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI SCM. Nuestra Compañía. Sobre Collahuasi. [en línea] <<http://www.collahuasi.cl/quienes-somos/la-compania/>> [Consulta: 21 de marzo de 2017].
- [11] DIRECCIÓN DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS PÚBLICAS. COMISIÓN CHILENA DEL COBRE. 2016. Observatorio de Costos Cash Cost COCHILCO Primer Semestre: 2016 vs 2015.

- [12] JOFRÉ, P. 2012. Validación Herramienta de Optimización VMM-BOS², en Área de Planificación Mediano-Corto Plazo, en Compañía Minera Cerro Colorado. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
- [13] MARTÍNEZ, C. 2016. Evaluación del Impacto Generado por el Uso de Simuladores de Camiones de Extracción, en el Proceso de Entrenamiento de Operadores Mina, en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener El Título de Ingeniero Civil en Minas. Santiago, Universidad de Santiago de Chile, 2016.
- [14] MARZOUK, M., MOSELHI, O., 2002a. Selecting Earthmoving Equipment Fleets Using Genetic Algorithms. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference.
- [15] MARZOUK, M., MOSELHI, O., 2002b. Simulation Optimization for Earthmoving Operations Using Genetic Algorithms. Construction Management and Economics 20, 535–543.
- [16] MARZOUK, M., MOSELHI, O., 2004. Multiobjective Optimization of Earthmoving Operations. Journal of Construction Engineering and Management 20(6), 535 – 543.
- [17] MORALES, C. 2009. Metodología de Planificación de Corto Plazo Integrando Restricciones Geometalúrgicas. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis para optar al grado de Magíster en Minería. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [18] NEWMAN, A., RUBIO E., CARO R., WEINTRAUB A., EUREK K., 2010. A Review of Operations Research in Mine Planning. Interfaces 40(3): 222 - 245.
- [19] PEÑAILILLO, 2009. Curso de Minería para Periodistas. [en línea] <<http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/04/02.-Desarrollo-de-un-Proyecto-Minero..pdf>> [Consulta: 22 de marzo de 2018]
- [20] RODRÍGUEZ, D. 2013. Modelo Analítico Para el Dimensionamiento de Flota de Transporte en Minería a Cielo Abierto: Análisis de Prioridades de Atención Según Rendimiento. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
- [21] ROJAS, M. 2009. Descripción Cuantitativa de los Procesos de Extracción y Reducción de Mineral en la Minería de Cobre a Cielo Abierto. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

- [22] RUBIO, E., 2006. Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning. Thesis (Ph. D.). Vancouver, Canada. The University of British Columbia. The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering).
- [23] RUBIO, E., 2008. Planificación de Minas de acuerdo al Contexto. Apuntes del Curso Explotación de Minas, Universidad de Chile.
- [24] SÁNCHEZ, R., ÁVILA, C. y NAVARRO, B., 2017. Definición de Dominios Estructurales 3D, integrando datos de registros Televiewer y Mapeos de Bancos. Revista Tierra y Tecnología (43).
- [25] SERNAGEOMIN. Anuario de la Minería de Chile 2015. [en línea] <[http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/anuario/Anuario-de-la Mineria2015.pdf](http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/anuario/Anuario-de-la_Mineria2015.pdf)> [Consulta: 04 de abril de 2017]
- [26] VALDEZ, F., LANATA, M., OROSCO, W. 2011. Programación Lineal en Gestión de Operaciones mineras. [en línea] <http://www.iimp.org.pe/website2/jueves/ultimo234/jm20110414_barrick.pdf> [Consulta: 24 de marzo de 2018]
- [27] VARGAS, M. 2011. Modelo de Planificación Minera de Corto y Mediano Plazo Incorporando Restricciones operacionales y de mezcla. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis para optar a grado de Magister en Minería. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

9 Anexos

9.1 Distribución de Tiempos ASARCO para Equipos de Carguío y Transporte

Distribución de Tiempos ASARCO para Camiones				
Tiempo Efectivo	Demoras		Reserva	Panne
Producción (2)	WC (106)	Colación Día (102)	Sin Operador (301)	Sist. Tecnológicos (3029)
En Restricción (4)	Inspección Equipo (112)	Combustible (104)	Sin Asignación (302)	Eq. Comunicación (2212)
En Relevo (3)	Obstrucción de Vía (117)	Tronadura (110)	Condiciones Climáticas (304)	Mantenimiento Programada (1233)
Entrena COA (31)	Instrucción (118)	Cambio de Turno (101)	Requerimiento Operacional (305)	Traslado Taller (2230)
Operativo sin Dispatch (32)	Colación noche A (138)	Traslado (114)	Otros (399)	Panne Mecánica (3027)
	Colación noche B (139)	Cambio de Sitio (103)		Panne Eléctrica (3026)
	Otros (123)	Chancador (107)		Panne Neumático (2208)
		Cambio Turno (101)		
		Somnolencia (201)		

Anexo 1 Distribución de Tiempos ASARCO para Camiones. Fuente: CMDIC, 2017.

Distribución de Tiempos ASARCO para Palas				
Tiempo Efectivo	Demoras		Reserva	Panne
Producción (2)	Prep. Frente (111)	Colación (102)	Sin Operador (301)	Sist. Tecnológicos (3029)
Producción Stock (33)	WC (106)	Arrollando (109)	Sin Asignación (302)	Eq Comunicación (2212)
Producción en LP (34)	Inspección Equipo (112)	Tronadura (110)	Condiciones Climáticas (304)	Mantenimiento Programada (1233)
Entrena COA (31)	Ingreso Post Tronadura	Cambio de Turno (101)	Sin Frente (306)	Traslado Taller (2230)
Logro de LP (20) (Solo PC5500)	Instrucción (118)	Traslado (114)	Requerimiento Operacional (305)	Panne Mecánica (3027)
Trabajo en Cordillera (21) (Solo PC5500)	Colación A (138)	Cambio de Sitio (103)	Otros (399)	Panne Eléctrica (3026)
Apoyo Geomecánica (19) (Solo PC5500)	Colación B (139)	Topografía (115)		
	Otros (199)			
	Mov. Cable (116)			

Anexo 2 Distribución de Tiempos ASARCO para Palas. Fuente: CMDIC, 2017.

Distribución de Tiempos ASARCO para Cargadores Frontales				
Tiempo Efectivo	Demora		Reserva	Panne
Producción (2)	Prep. Frente (111)	Colación (102)	Sin Operador (301)	Dispatch (2211)
	WC (106)	Arrollando (109)	Sin Asignación (302)	Eq Comunicación (2212)
	Inspección Equipo (112)	Tronadura (110)	Condiciones Climáticas (304)	Mantenión Programada (1233)
	Topografía (115)	Cambio de Turno (101)	Sin Frente (306)	Traslado Taller (2230)
	Instrucción (118)	Traslado (114)	Requerimiento Operacional (305)	Motor (2203)
	Incidente/acc (113)	Cambio de Sitio (103)	Otros (399)	Tracción (2204)
				Frenos (2205)
			Sist. Eléctrico (2201)	
			Sist. Levante (2215)	
			Balde (2217)	
			Dirección (2207)	
			Neumáticos (2208)	
			Lubricación (1202)	

Anexo 3 Distribución de Tiempos ASARCO para Cargadores Frontales. Fuente: CMDIC, 2017.

9.2 Tiempos de Acuatamiento más Carguío

9.2.1 Criterios de Filtro de Tiempos de Acuatamiento y Carguío

Como se mencionó en la sección 5.3.3.1, el detalle de los criterios de filtros utilizados para los tiempos de acuatamiento y carguío se muestra a continuación.

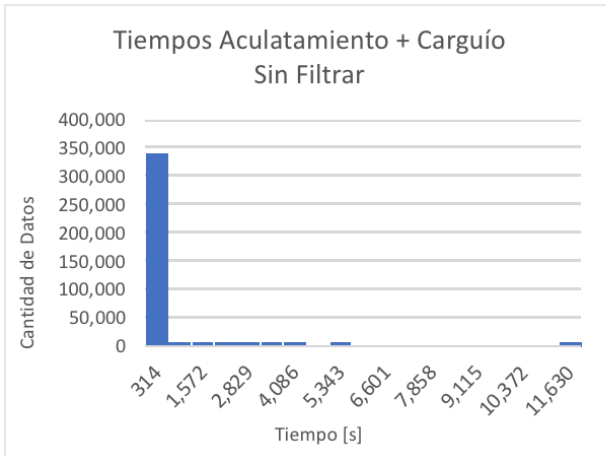
Tiempo	Límite Inferior [min]	Límite Superior [min]
Acuatamiento	0.0	2.0
Carguío (KMS – P&H)	1.0	3.0
Carguío (KMS – HR)	1.0	3.0
Carguío (KMS – PC)	1.0	5.0
Carguío (LBH – P&H)	1.0	4.0
Carguío (LBH – HR)	1.0	4.0

Anexo 4 Detalle Criterio de Filtro de Tiempos de Acuatamiento y Carguío. Fuente: Elaboración propia.

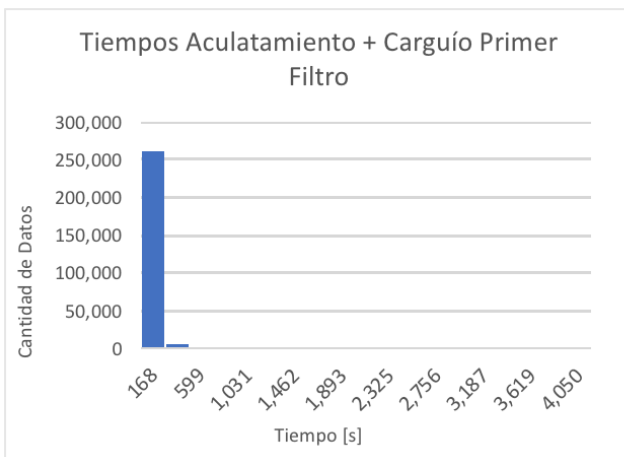
El tiempo de acuatamiento se acotó entre 0 y 2 minutos; mientras que los tiempos de carguío son de 1 a 3 minutos en el match de KMS con palas eléctricas y de 1 a 5 minutos con la pala hidráulica, puesto que esta es más pequeña que las eléctricas y por tanto carga con más pases al camión. Por este mismo motivo, los camiones LBH tienen un tiempo máximo de 4 minutos con las palas P&H y HR.

La metodología para realizar los cortes consta en aplicar el primer filtro con el rango definido para el tiempo de carguío, puesto que este tiende a ser más exacto que el de acuatamiento. Posteriormente, sobre la data filtrada que se generó se aplica el segundo filtro, que corresponde a la suma de los dos tiempos (de acuatamiento y carguío). Por ejemplo, para el match de camión KMS con pala P&H, el primer filtro sólo preserva data con tiempo de carguío entre 1 y 3 minutos. Posteriormente, para aplicar el segundo filtro se creó una columna auxiliar correspondiente a la suma de tiempo de acuatamiento y carguío, donde solo se preservan aquellos datos entre 1 y 5 minutos. Las histogramas y estadísticas descriptivas se muestran a continuación.

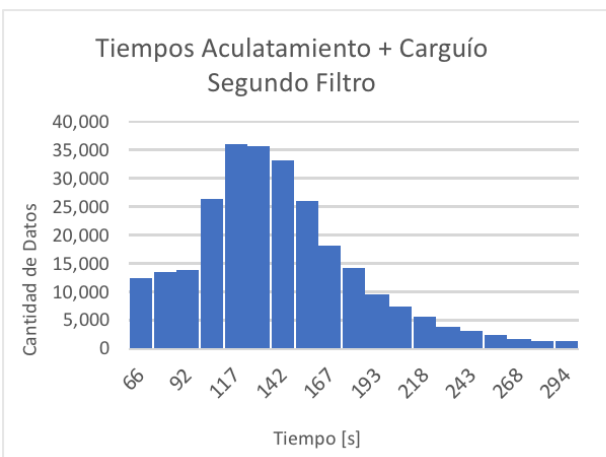
9.2.2 Camión KMS – Pala P&H



Tiempos Acuatamiento + Carguío Sin Filtrar, Camión KMS – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	11,944.0	199.1
Rango [s] [min]	11,944.0	199.1
Número de datos [-]	341,060	-
Promedio [s] [min]	137.5	2.3
Desv. Std. [s] [min]	70.8	1.2



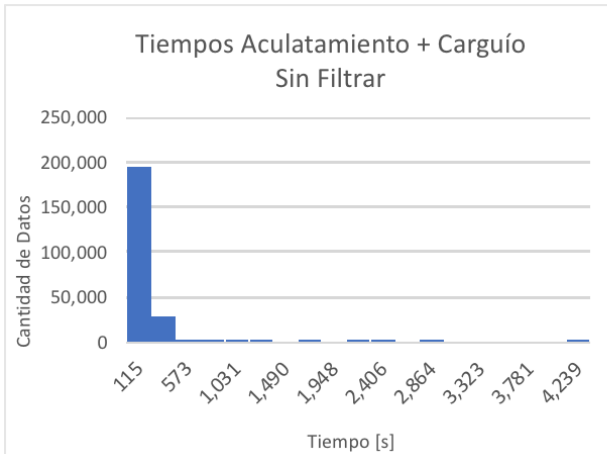
Tiempos Acuatamiento + Carguío Primer Filtro Camión KMS – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	4,158.0	69.3
Rango [s] [min]	4,098.0	68.3
Número de datos [-]	266,409	-
Promedio [s] [min]	143.1	2.4
Desv. Std. [s] [min]	54.3	0.9



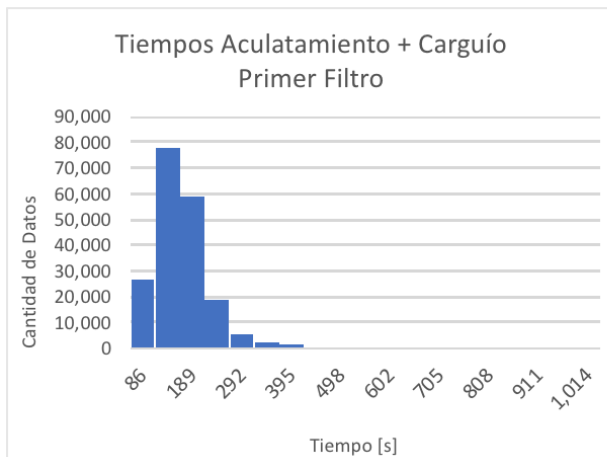
Tiempos Acuatamiento + Carguío Segundo Filtro Camión KMS – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	300.0	5.0
Rango [s] [min]	240.0	4.0
Número de datos [-]	262,090	-
Promedio [s] [min]	139.2	2.3
Desv. Std. [s] [min]	43.6	0.7

Anexo 5 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión KMS - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.

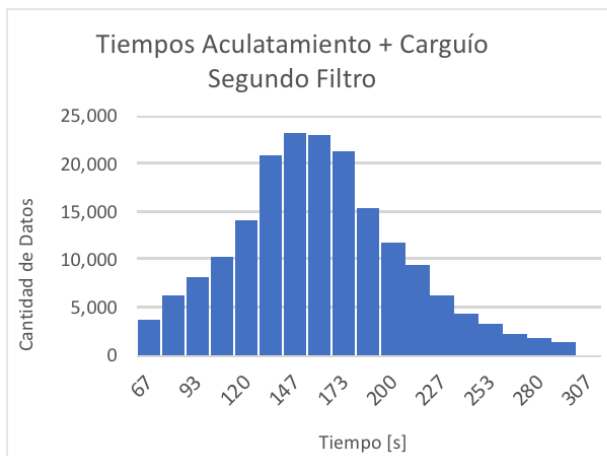
9.2.3 Camión KMS – Pala HR



Tiempos Acuatamiento + Carguío Sin Filtrar, Camión KMS – Pala HR		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	4,354.0	72.6
Rango [s] [min]	4,354.0	72.6
Número de datos [-]	224,568	-
Promedio [s] [min]	165.8	2.8
Desv. Std. [s] [min]	75.0	1.2



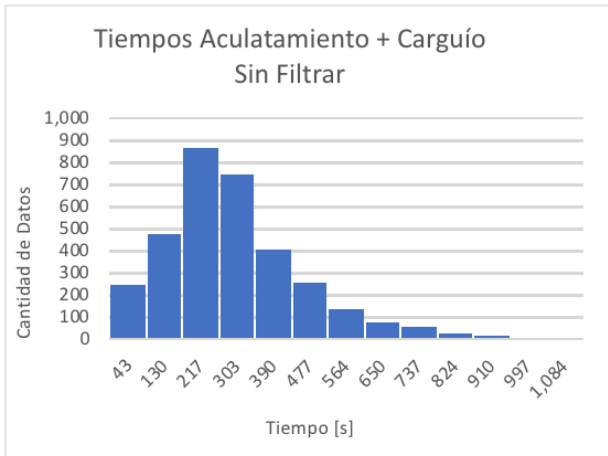
Tiempos Acuatamiento + Carguío Primer Filtro Camión KMS – Pala HR		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	1,040.0	17.3
Rango [s] [min]	980.0	16.3
Número de datos [-]	190,720	-
Promedio [s] [min]	165.8	2.8
Desv. Std. [s] [min]	58.6	1.0



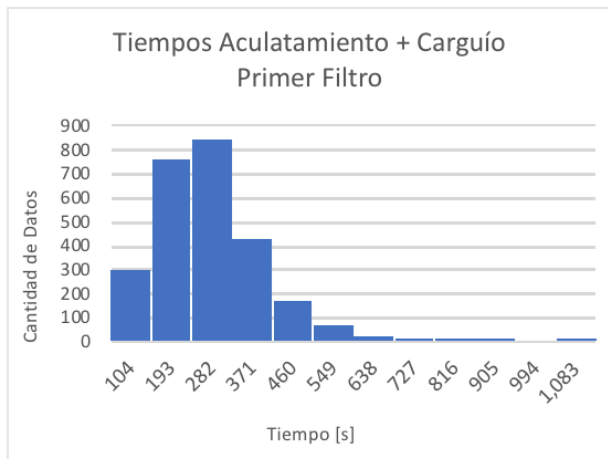
Tiempos Acuatamiento + Carguío Segundo Filtro Camión KMS – Pala HR		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	300.0	5.0
Rango [s] [min]	240.0	4.0
Número de datos [-]	185,558	-
Promedio [s] [min]	160.1	2.7
Desv. Std. [s] [min]	46.0	0.8

Anexo 6 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión KMS - Pala HR. Fuente: Elaboración propia.

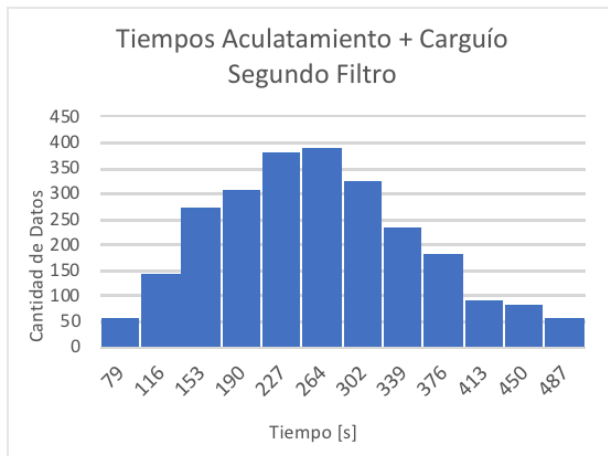
9.2.4 Camión KMS – Pala PC



Tiempos Acuatamiento + Carguío Sin Filtrar, Camión KMS – Pala PC		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	1,127.0	18.8
Rango [s] [min]	1,127.0	18.8
Número de datos [-]	3,302	-
Promedio [s] [min]	294.3	4.9
Desv. Std. [s] [min]	170.3	2.8



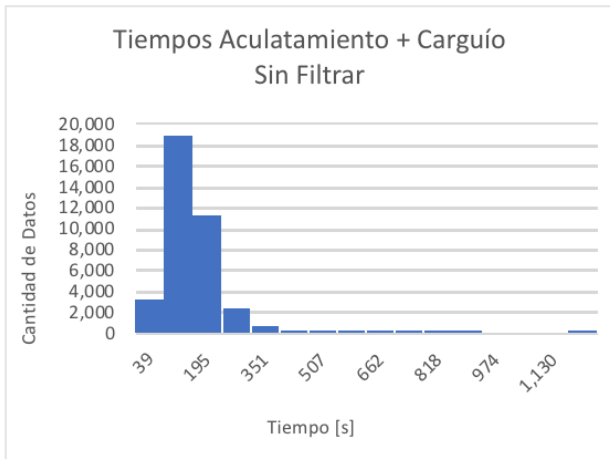
Tiempos Acuatamiento + Carguío Primer Filtro Camión KMS – Pala PC		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	1,127.0	18.8
Rango [s] [min]	1,067.0	17.8
Número de datos [-]	2,617	-
Promedio [s] [min]	274.8	4.6
Desv. Std. [s] [min]	115.8	1.9



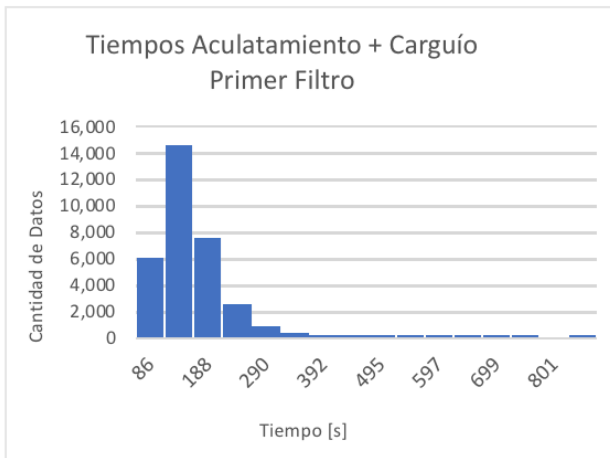
Tiempos Acuatamiento + Carguío Segundo Filtro Camión KMS – Pala PC		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	506.0	8.4
Rango [s] [min]	446.0	7.4
Número de datos [-]	2,511	-
Promedio [s] [min]	261.0	4.4
Desv. Std. [s] [min]	94.0	1.6

Anexo 7 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión KMS - Pala PC. Fuente: Elaboración propia.

9.2.5 Camión LBH – Pala P&H



Tiempos Acuatamiento + Carguío Sin Filtrar, Camión LBH – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	1,247.0	20.8
Rango [s] [min]	1,247.0	20.8
Número de datos [-]	36,999	-
Promedio [s] [min]	152.1	2.5
Desv. Std. [s] [min]	70.1	1.2



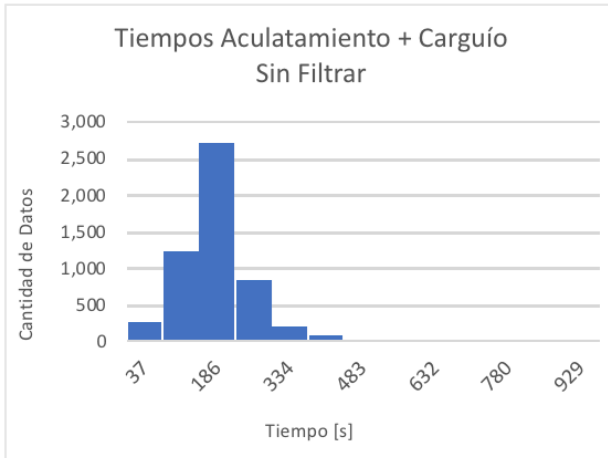
Tiempos Acuatamiento + Carguío Primer Filtro Camión LBH – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	878.0	14.6
Rango [s] [min]	818.0	13.6
Número de datos [-]	32,581	-
Promedio [s] [min]	157.5	2.6
Desv. Std. [s] [min]	60.6	1.0



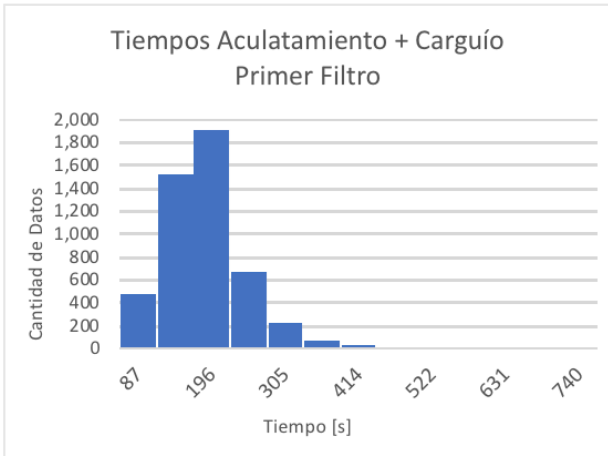
Tiempos Acuatamiento + Carguío Segundo Filtro Camión LBH – Pala P&H		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	360.0	6.0
Rango [s] [min]	300.0	5.0
Número de datos [-]	32,184	-
Promedio [s] [min]	154.0	2.6
Desv. Std. [s] [min]	51.4	0.9

Anexo 8 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión LBH - Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.

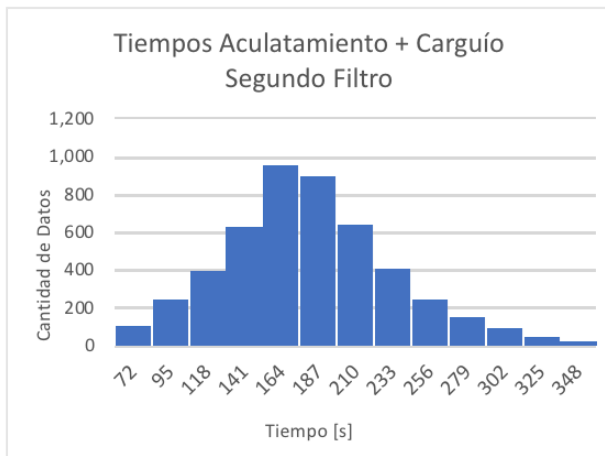
9.2.6 Camión LBH – Pala HR



Tiempos Acuatamiento + Carguío Sin Filtrar, Camión LBH – Pala HR		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	966.0	16.1
Rango [s] [min]	966.0	16.1
Número de datos [-]	5,424	-
Promedio [s] [min]	183.5	3.1
Desv. Std. [s] [min]	75.7	1.3



Tiempos Acuatamiento + Carguío Primer Filtro Camión LBH – Pala HR		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	767.0	12.8
Rango [s] [min]	707.0	11.8
Número de datos [-]	4,917	-
Promedio [s] [min]	186.0	3.1
Desv. Std. [s] [min]	62.5	1.0



Tiempos Acuatamiento + Carguío Segundo Filtro Camión LBH – Pala HR		
Tiempo Mínimo [s] [min]	60.0	1.0
Tiempo Máximo [s] [min]	360.0	6.0
Rango [s] [min]	300.0	5.0
Número de datos [-]	4,836	-
Promedio [s] [min]	181.8	3.0
Desv. Std. [s] [min]	52.6	0.9

Anexo 9 Tiempos de Acuatamiento + Carguío, Camión LBH - Pala HR. Fuente: Elaboración propia.

9.2.7 Resultados Tiempos de Acuatamiento más Carguío

Modelo CAEX	Modelo Pala	Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cantidad Datos conservados [-]	Cantidad Datos conservados [%]
KMS	P&H	Sin filtrar	2.3	1.2	341,060	100.0
		1 ^{er} Filtro	2.4	0.9	266,409	78.1
		2° filtro	2.3	0.7	262,090	76.9
KMS	HR	Sin filtrar	2.8	1.3	224,568	100.0
		1 ^{er} Filtro	2.8	1.0	190,720	84.9
		2° filtro	2.7	0.8	185,558	82.6
KMS	PC	Sin filtrar	4.9	2.8	3,302	100.0
		1 ^{er} Filtro	4.6	1.9	2,617	79.3
		2° filtro	4.4	1.6	2,511	76.0
LBH	P&H	Sin filtrar	2.5	1.2	36,999	100.0
		1 ^{er} Filtro	2.6	1.0	32,581	88.1
		2° filtro	2.6	0.9	32,184	87.0
LBH	HR	Sin filtrar	3.1	1.3	5,424	100.0
		1 ^{er} Filtro	3.1	1.0	4,917	90.7
		2° filtro	3.0	0.9	4,836	89.2

Anexo 10 Detalle Resultados Tiempos de Acuatamiento + Carguío. Fuente: Elaboración propia.

9.3 Tiempos de Descarga + Inactividad

9.3.1 Criterios de Filtro de Tiempos de Descarga e Inactividad

En la sección 5.3.3.2 se muestran los criterios de corte aplicados a la suma de los tiempos de descarga e inactividad. Para la locación de descarga de chancado se consideró un tiempo máximo superior que para botadero y stock por la variabilidad del funcionamiento de la primera locación: a veces el chancado se encuentra con mayor cantidad de camiones en espera, lo que puede deberse a la necesidad de alimentación, a la granulometría del material que se está descargando (los finos tienden a pegarse a las paredes del chancado, mientras que los gruesos pueden obstruirlo) o presencia de inchancables.

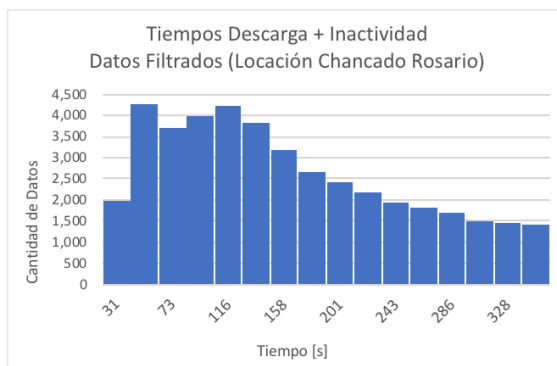
Modelo CAEX	Modelo Pala	Locación	Límite Inferior [min]	Límite Superior [min]
KMS	P&H, HR y PC	Chancado Rosario	0.3	6.0
	P&H, HR y PC	Botadero	0.3	4.0
	P&H, HR y PC	Stock	0.3	4.0
LBH	P&H y HR	Botadero	0.3	4.0

Anexo 11 Detalle Criterio de Filtro de Tiempos de Descarga + Inactividad. Fuente: Elaboración propia.

9.3.2 Camión KMS - Pala P&H, Locación Chancado Rosario



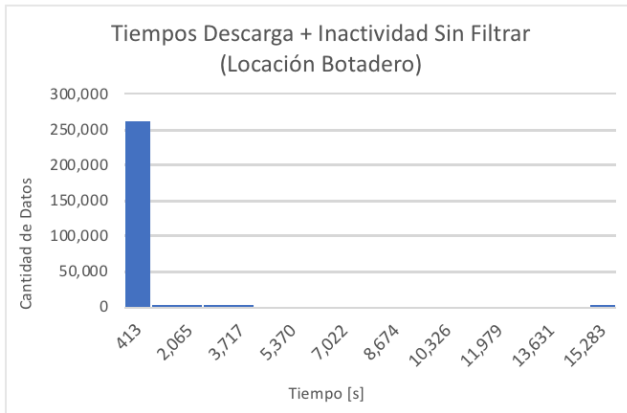
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala P&H (Locación Chancado Rosario)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	5,415.0	90.25
Rango [s] [min]	5,415.0	90.25
Número de datos [-]	63,981	-
Promedio [s] [min]	294.2	4.9
Desv. Std. [s] [min]	271.0	4.5



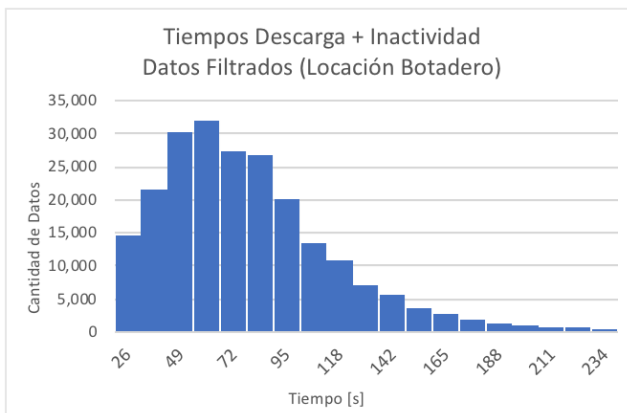
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados Camión KMS - Pala P&H (Locación Chancado Rosario)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	360.0	6.0
Rango [s] [min]	360.0	6.0
Número de datos [-]	42,217	-
Promedio [s] [min]	160.1	2.7
Desv. Std. [s] [min]	89.2	1.5

Anexo 12 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala P&H, Locación Chancado Rosario. Fuente: Elaboración propia.

9.3.3 Camiones KMS y LBH – Pala P&H, Locación Botadero



Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Pala P&H (Locación Botadero)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	15,696.0	261.6
Rango [s] [min]	15,696.0	261.6
Número de datos [-]	261,728	-
Promedio [s] [min]	72.6	1.2
Desv. Std. [s] [min]	69.7	1.2



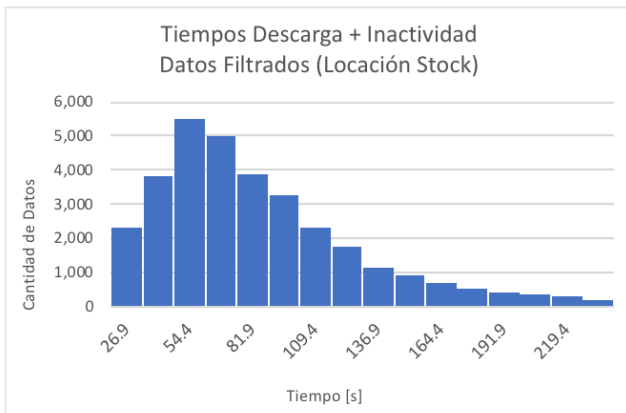
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados Pala P&H (Locación Botadero)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	240.0	4.0
Rango [s] [min]	220.0	3.7
Número de datos [-]	222,287	-
Promedio [s] [min]	78.32	1.31
Desv. Std. [s] [min]	38.0	0.6

Anexo 13 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS y LBH - Pala P&H, Locación Botadero. Fuente: Elaboración propia.

9.3.4 Camión KMS – Pala P&H, Locación Stock



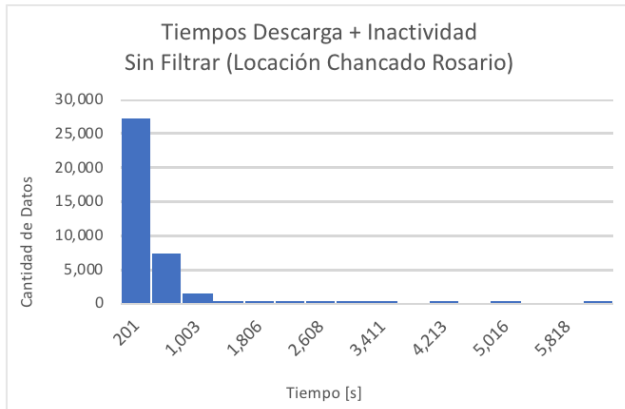
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala P&H (Locación Stock)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	3,428.0	57.1
Rango [s] [min]	3,428.0	57.1
Número de datos [-]	38,554	-
Promedio [s] [min]	84.93	1.4
Desv. Std. [s] [min]	94.9	1.6



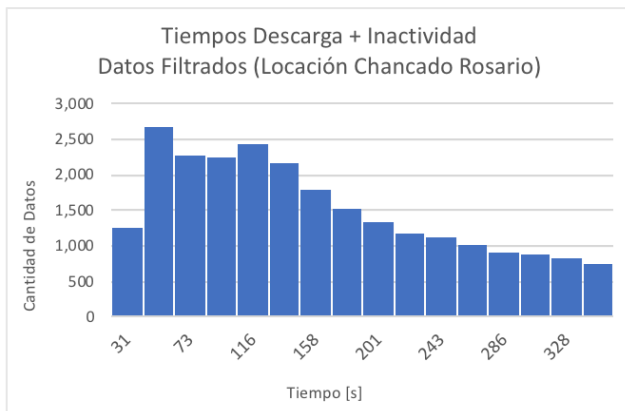
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión KMS -Pala P&H (Locación Stock)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	240.0	4.0
Rango [s] [min]	220.0	3.7
Número de datos [-]	32,518	-
Promedio [s] [min]	84.3	1.4
Desv. Std. [s] [min]	44.0	0.7

Anexo 14 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala P&H, Locación Stock. Fuente: Elaboración propia.

9.3.5 Camión KMS – Pala HR, Locación Chancado Rosario



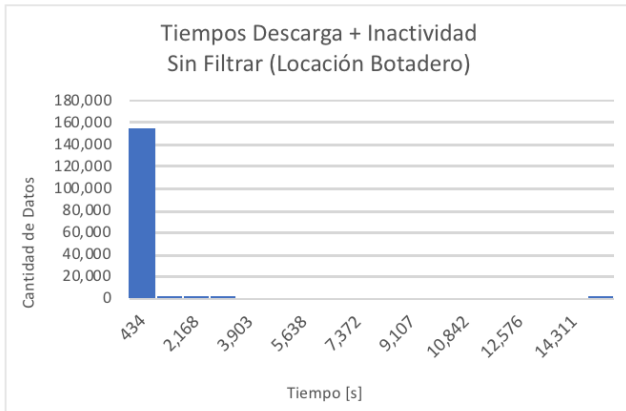
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala HR (Locación Chancado Rosario)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	6,420.0	107.0
Rango [s] [min]	6,420.0	107.0
Número de datos [-]	36,220	-
Promedio [s] [min]	282.8	4.7
Desv. Std. [s] [min]	264.0	4.4



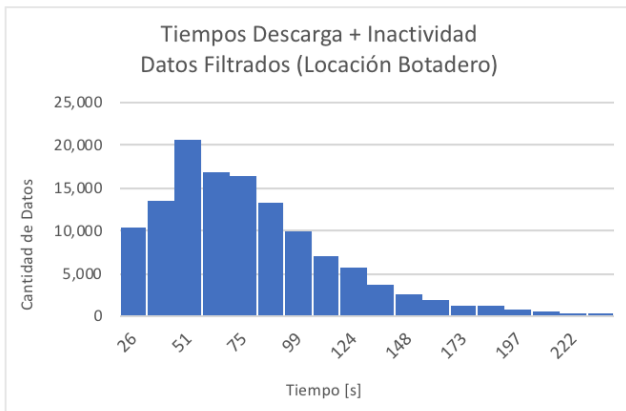
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión KMS - Pala HR (Locación Chancado Rosario)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	360.0	6.0
Rango [s] [min]	340.0	5.7
Número de datos [-]	24,376	-
Promedio [s] [min]	156.9	2.6
Desv. Std. [s] [min]	89.4	1.5

Anexo 15 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala HR, Locación Chancado Rosario. Fuente: Elaboración propia.

9.3.6 Camión KMS – Pala HR, Locación Botadero



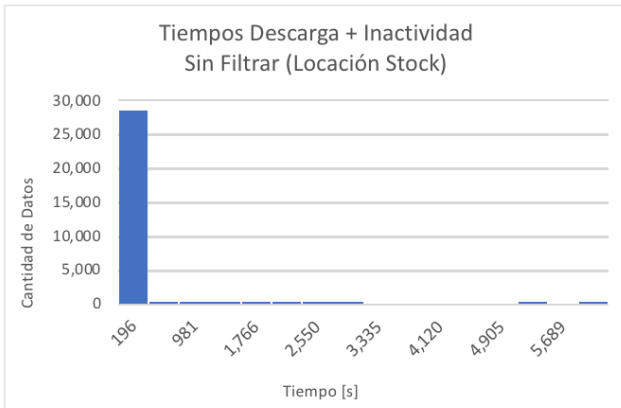
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala HR (Locación Botadero)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	15,612	260.2
Rango [s] [min]	15,612	260.2
Número de datos [-]	155,030	-
Promedio [s] [min]	71.3	1.2
Desv. Std. [s] [min]	81.4	1.4



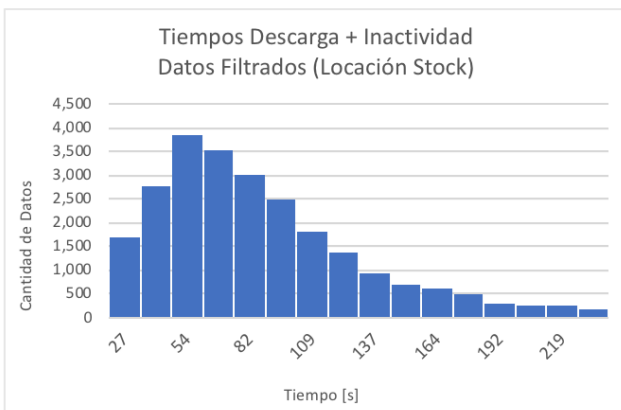
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión KMS - Pala HR (Locación Botadero)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	240.0	4.0
Rango [s] [min]	220.0	3.7
Número de datos [-]	126,627	-
Promedio [s] [min]	77.8	1.3
Desv. Std. [s] [min]	39.6	0.7

Anexo 16 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala HR, Locación Botadero. Fuente: Elaboración propia.

9.3.7 Camión KMS – Pala HR, Locación Stock



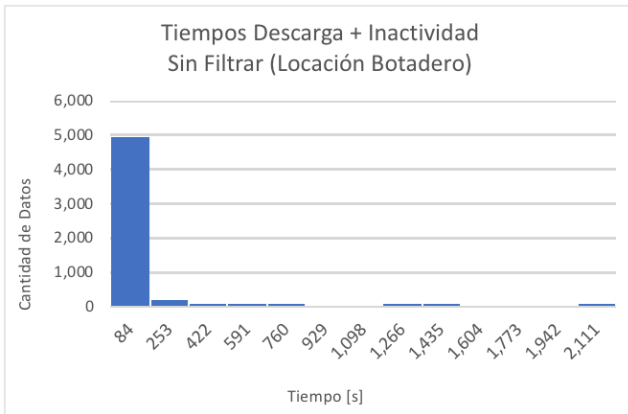
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala HR (Locación Stock)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	6,278.0	104.6
Rango [s] [min]	6,278.0	104.6
Número de datos [-]	28,773	-
Promedio [s] [min]	87.0	1.5
Desv. Std. [s] [min]	107.1	1.8



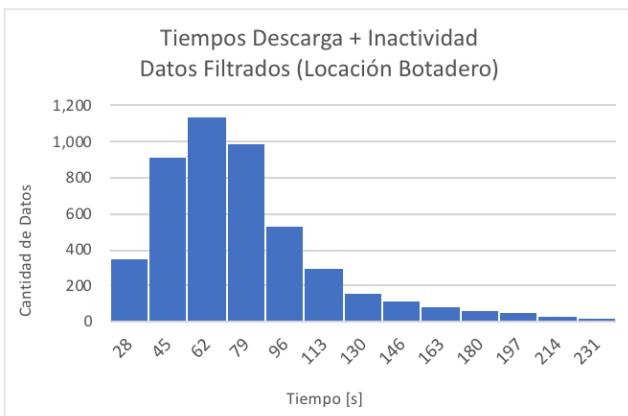
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión KMS - Pala HR (Locación Stock)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	240.0	4.0
Rango [s] [min]	220.0	3.7
Número de datos [-]	24,139	-
Promedio [s] [min]	85.8	1.4
Desv. Std. [s] [min]	44.4	0.7

Anexo 17 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala HR, Locación Stock. Fuente: Elaboración propia.

9.3.8 Camión LBH – Pala HR, Locación Botadero



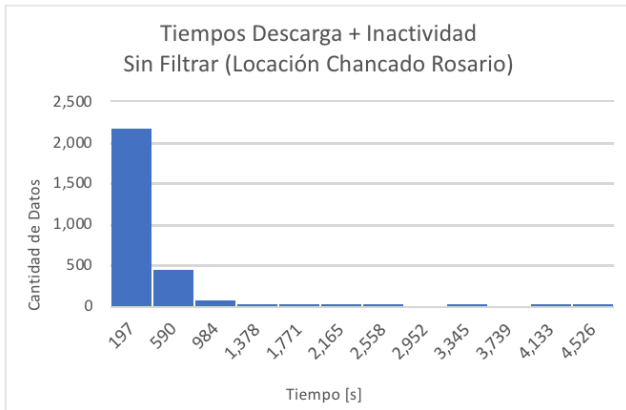
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión LBH - Pala HR (Locación Botadero)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	2,195	36.6
Rango [s] [min]	2,195	36.6
Número de datos [-]	5,150	-
Promedio [s] [min]	76.3	1.3
Desv. Std. [s] [min]	65.8	1.1



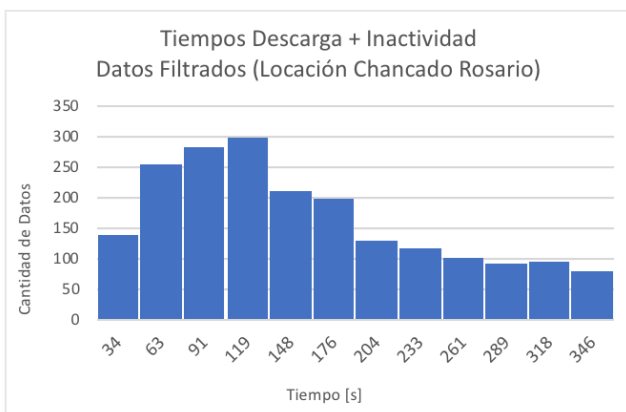
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión LBH - Pala HR (Locación Botadero)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	239.0	4.0
Rango [s] [min]	219.0	3.7
Número de datos [-]	4,685	-
Promedio [s] [min]	76.8	1.3
Desv. Std. [s] [min]	36.5	0.6

Anexo 18 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión LBH - Pala HR, Locación Botadero. Fuente: Elaboración propia.

9.3.9 Camión KMS – Pala PC, Locación Chancado Rosario



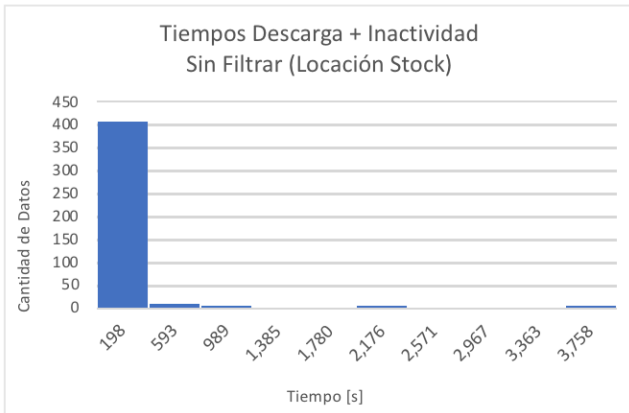
Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala PC (Locación Chancado Rosario)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	4,723.0	78.7
Rango [s] [min]	4,723.0	78.7
Número de datos [-]	2,702	-
Promedio [s] [min]	260.0	4.3
Desv. Std. [s] [min]	288.6	4.8



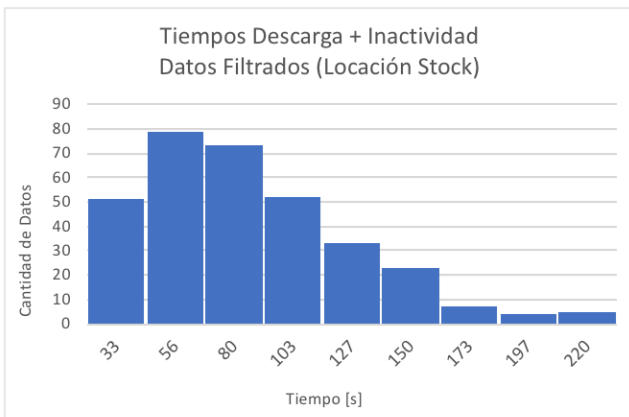
Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión KMS - Pala PC (Locación Chancado Rosario)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	20.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	360.0	6.0
Rango [s] [min]	340.0	5.7
Número de datos [-]	1,994	-
Promedio [s] [min]	156.1	2.6
Desv. Std. [s] [min]	86.7	1.4

Anexo 19 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala PC, Locación Chancado Rosario. Fuente: Elaboración propia.

9.3.10 Camión KMS – Pala PC, Locación Stock



Tiempos Descarga + Inactividad Sin Filtrar, Camión KMS - Pala PC (Locación Stock)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	3,956.0	65.9
Rango [s] [min]	3,956.0	65.9
Número de datos [-]	420	-
Promedio [s] [min]	109.3	1.8
Desv. Std. [s] [min]	244.4	4.1



Tiempos Descarga + Inactividad Filtrados, Camión KMS - Pala PC (Locación Stock)		
Tiempo Mínimo [s] [min]	21.0	0.3
Tiempo Máximo [s] [min]	232.0	3.9
Rango [s] [min]	211.0	3.5
Número de datos [-]	327.0	-
Promedio [s] [min]	85.9	1.4
Desv. Std. [s] [min]	41.6	0.7

Anexo 20 Tiempos de Descarga + Inactividad, Camión KMS - Pala PC, Locación Stock. Fuente: Elaboración propia.

9.3.11 Resultados Tiempos de Descarga más Inactividad

Pala P&H						
Flota CAEX	Destino	Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cant. Datos conservados [-]	Cant. Datos conservados[%]
KMS	Chancado Rosario	Sin Filtrar	4.7	4.4	36219	100.0
		Filtrados	2.6	1.5	24,376	67.3
	Botadero	Sin Filtrar	1.2	1.4	154,423	100.0
		Filtrados	1.3	0.7	126,627	81.7
	Stock	Sin Filtrar	1.5	1.8	28,771	100.0
		Filtrados	1.4	0.7	24,139	83.9
LBH	Botadero	Sin Filtrar	1.2	1.1	5660	100.0
		Filtrados	1.3	0.6	5,150	91.0

Anexo 21 Detalle Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala P&H. Fuente: Elaboración propia.

Pala HR						
Flota CAEX	Destino	Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cant. Datos conservados [-]	Cant. Datos conservados[%]
KMS	Chancado Rosario	Sin Filtrar	4.9	4.5	63,965	100.0
		Filtrados	2.7	1.5	42,217	66.0
	Botadero	Sin Filtrar	1.2	1.2	261,822	100.0
		Filtrados	1.3	0.6	222,287	84.9
	Stock	Sin Filtrar	1.4	1.6	38,556	100.0
		Filtrados	1.4	0.7	32,518	84.34
LBH	Botadero	Sin Filtrar	1.2	1.2	-	-
		Filtrados	1.3	0.6	-	-

Anexo 22 Detalle Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala HR. Fuente: Elaboración propia.

Pala PC						
Flota CAEX	Destino	Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Cant. Datos conservados [-]	Cant. Datos conservados[%]
KMS	Chancado Rosario	Sin Filtrar	4.3	4.8	2,702	100.0
		Filtrados	2.6	1.4	1,994	73.8
	Botadero	Sin Filtrar	1.8	4.1	420	100.0
		Filtrados	1.4	0.7	327	77.9
	Stock	Sin Filtrar	1.9	4.3	399	100.0
		Filtrados	1.5	0.7	312	78.2

Anexo 23 Detalle Resultados Tiempos de Descarga e Inactividad, Pala PC. Fuente: Elaboración propia.

9.4 Tiempo de Cola

9.4.1 Criterios de Filtro de Tiempos de Cola

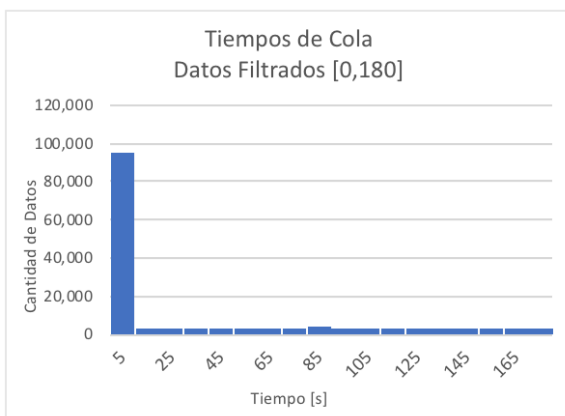
Para estudiar esta variable se definieron tres alternativas en cuanto a los criterios, como se explicó en la sección 5.3.3.3. Estos criterios se basan en el dato empírico correspondiente a la tolerancia que se permite el despachador en cuanto al tiempo de colas en una locación de carguío, antes de colocar los camiones en reserva por requerimiento.

Tipo de Filtro	Límite Inferior [min]	Límite Superior [min]
Filtro Tipo 1	0.0	3.0
Filtro Tipo 2	0.0	5.0
Filtro Tipo 3	0.0	10.0

Anexo 24 Detalle Criterios de Filtros Tiempo de Cola. Fuente: Elaboración propia.

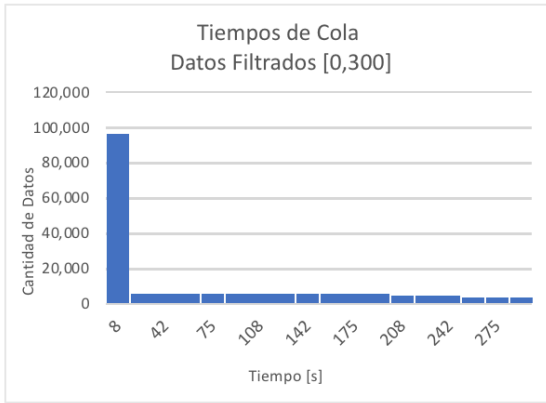


Tiempo de Cola Sin Filtrar		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	14,270.0	237.8
Rango [s] [min]	14,270.0	237.8
Número de datos [-]	229,992	-
Promedio [s] [min]	164.7	2.8
Desv. Std. [s] [min]	230.0	3.8

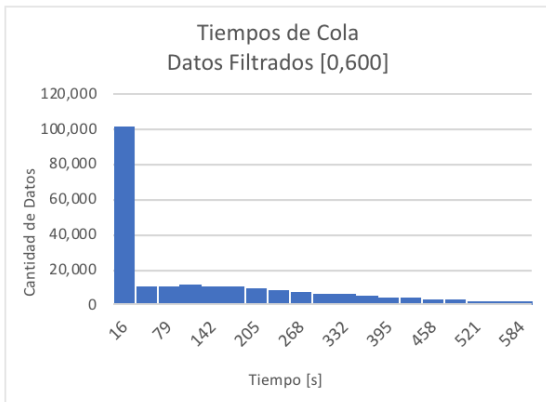


Tiempo de Cola Filtro [0,180]		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	180.0	3.0
Rango [s] [min]	180.0	3.0
Número de datos [-]	150,974	-
Promedio [s] [min]	35.97	0.6
Desv. Std. [s] [min]	54.9	0.9

Anexo 25 Tiempos de Cola. Fuente: Elaboración propia.



Tiempo de Cola Filtro [0,300]		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	300.0	5.0
Rango [s] [min]	300.0	5.0
Número de datos [-]	182,147	-
Promedio [s] [min]	70.3	1.2
Desv. Std. [s] [min]	91.7	1.5



Tiempo de Cola Filtro [0,600]		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	600.0	10.0
Rango [s] [min]	600.0	10.0
Número de datos [-]	217,780	-
Promedio [s] [min]	127.4	2.1
Desv. Std. [s] [min]	157.5	2.6

Anexo 26 Tiempos de Cola, continuación. Fuente: Elaboración propia.

9.4.2 Resultados Tiempos de Cola

Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Datos conservados [-]	Datos conservados [%]
Sin filtrar	2.8	3.8	229,992	100.0
Filtro Tipo 1	0.6	0.9	150,974	65.6
Filtro Tipo 2	1.2	1.5	182,147	79.2
Filtro Tipo 3	2.1	2.6	217,780	94.7

Anexo 27 Detalle Resultados Tiempos de Cola. Fuente: Elaboración propia.

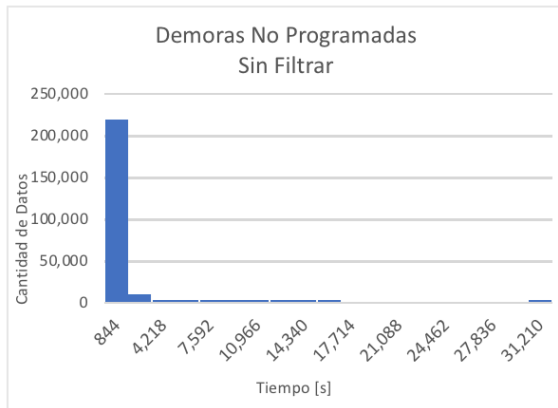
9.5 Demoras No Programadas

9.5.1 Criterios de Filtro de Demoras No Programadas

Los criterios mencionados en la sección 5.3.3.4. se describen a continuación. Todos comienzan en 0 minutos (asumiendo que hay ocasiones en que no se producen demoras no programadas) hasta los 20 minutos (que es el caso de las demoras no programadas con mayor tiempo, por ejemplo W.C. o somnolencia). Sin embargo, los casos con límite superior de 5 y 10 minutos se analizan de todas formas a modo de comparación.

Tipo de Filtro	Límite Inferior [min]	Límite Superior [min]
Filtro Tipo 1	0.0	5.0
Filtro Tipo 2	0.0	10.0
Filtro Tipo 3	0.0	20.0

Anexo 28 Detalle Criterios de Filtros de Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.

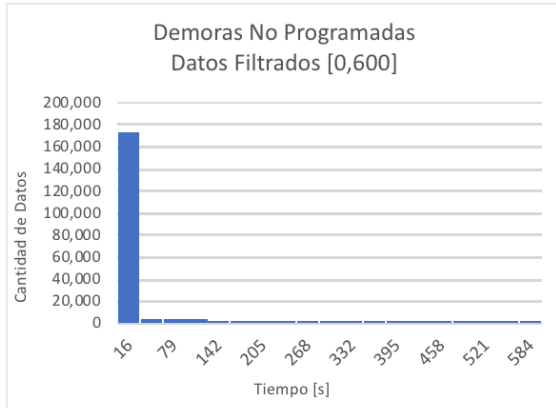


Tiempo de Demoras No Programadas Sin Filtrar		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	32,054.0	534.2
Rango [s] [min]	32,054.0	534.2
Número de datos [-]	229,992	-
Promedio [s] [min]	224.4	3.7
Desv. Std. [s] [min]	655.8	10.9

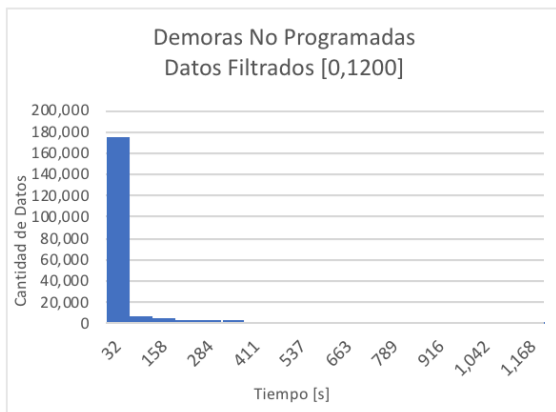


Tiempo de Demoras No Programadas Filtro [0,300]		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	300.0	5.0
Rango [s] [min]	300.0	5.0
Número de datos [-]	194,022	-
Promedio [s] [min]	16.33	0.3
Desv. Std. [s] [min]	52.6	0.9

Anexo 29 Tiempo de Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.



Tiempo de Demoras No Programadas Filtro [0,600]		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	600.0	10.0
Rango [s] [min]	600.0	10.0
Número de datos [-]	205,278	-
Promedio [s] [min]	39.3	0.7
Desv. Std. [s] [min]	110.0	1.8



Tiempo de Demoras No Programadas Filtro [0,1200]		
Tiempo Mínimo [s] [min]	0.0	0.0
Tiempo Máximo [s] [min]	1,200.0	20.0
Rango [s] [min]	1,200.0	20.0
Número de datos [-]	214,993	-
Promedio [s] [min]	64.2	1.07
Desv. Std. [s] [min]	201.8	3.37

Anexo 30 Tiempo de Demoras No Programadas, continuación. Fuente: Elaboración propia.

9.5.2 Resultados Tiempos de Demoras No Programadas

Tipo de Filtro	Promedio [min]	Desv. Est. [min]	Datos conservados [-]	Datos conservados [%]
Sin filtrar	3.7	10.9	229,992	100.0
Filtro Tipo 1	0.3	0.9	194,022	84.4
Filtro Tipo 2	0.7	1.8	205,278	89.3
Filtro Tipo 3	1.1	3.4	214,993	93.5

Anexo 31 Detalle Resultados Tiempos de Demoras No Programadas. Fuente: Elaboración propia.

9.6 Porcentaje del mes que el Equipo de Carguío estuvo en cada Fase

		Fase					
		UB0	F08	F09	F10	F11	Remanejo
Equipo de Carguío	PA06	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
	PA08	0.0	0.0	95.3	0.0	4.7	0.0
	PA09	0.0	0.0	0.0	91.2	8.8	0.0
	PA10	0.0	0.0	0.0	53.0	47.0	0.0
	PA11	0.0	0.0	42.0	58.0	0.0	0.0
	PA12	0.0	66.5	33.5	0.0	0.0	0.0
	PA13	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
	PA14	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
	PA15	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	PA16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	PA20	0.0	33.8	0.0	0.0	66.2	0.0
	CF04	9.1	0.0	0.0	52.8	12.7	25.4
	CF05	37.3	0.0	17.6	3.1	0.0	42.0
	CF06	76.4	0.0	0.0	9.4	5.2	8.9

Anexo 32 Porcentaje del mes que el Equipo de Carguío estuvo en cada Fase. Valores en porcentaje del tiempo nominal. Fuente: Elaboración propia.