



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

DIAGNÓSTICO PRODUCTIVO EN LAS OPERACIONES UNITARIAS DE  
TRANSPORTE Y PLANTA DE CHANCADO DE MINERA ANTUCOYA MEDIANTE  
SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DISCRETOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FELIPE ALBERTO LÓPEZ SOLAR

PROFESOR GUÍA:  
JORGE PALMA VILLAGRÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARÍA ELENA VALENCIA  
NELSON MORALES VARELA

SANTIAGO DE CHILE  
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas  
**POR:** Felipe Alberto López Solar  
**FECHA:** 13/05/2016  
**PROFESOR GUÍA:** Jorge Palma Villagrán

**DIAGNÓSTICO PRODUCTIVO EN LAS OPERACIONES UNITARIAS DE  
TRANSPORTE Y PLANTA DE CHANCADO DE MINERA ANTUCOYA MEDIANTE  
SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DISCRETOS**

En la gran minería a cielo abierto, los sistemas pala-camión son ampliamente usados para realizar la labor de carguío y transporte. Actualmente este ítem abarca cerca del 50% de los costos de operación y en donde las principales mejoras se logran a través de una gestión óptima de la disponibilidad, confiabilidad y mantenimiento del sistema. En el caso de la minera en estudio, el costo Planta asciende al 48% del costo de caja, y el 25% de este último corresponde al costo del chancado.

El principal objetivo de este estudio es determinar el ritmo de producción de Minera Antucoya en plena operación, en base a las variables y supuestos determinados en la fase de proyecto y construcción, incluyendo en cada uno de los equipos del procesamiento de mineral, sus tiempos de reparación y entre fallas, aplicados en base a distribuciones de probabilidad.

La metodología aplicada a este trabajo consta del desarrollo de un modelo de simulación basado en un modelo conceptual, que detalla supuestos, parámetros, variables, criterios de diseño y operación utilizados, que permiten una comprensión del sistema modelado.

La codificación del modelo en la plataforma ProModel<sup>®</sup> obtiene como resultado una producción anual de 30,77 Mt. Luego de calcular la simulación terminante, se comprueba que con sólo una corrida es suficiente. El paso siguiente fue calibrar el modelo para generar un sistema que soporte capacidades de emergencia en caso de déficit de producción. Luego de esto se validaron por partes y verificaron los indicadores para equipos principales de las tres etapas de chancado. Su resultado fue una producción de 32,76 Mtpa, lo que equivale a un beneficio marginal de US\$ 27,4 MM.

Se recomienda continuar este estudio, de manera de poder replicar las condiciones de la operación con una base de datos actualizada, considerando al menos aumentar el límite de batería hasta las pilas de lixiviación, para de esta forma obtener estimaciones más cercanas a su real desempeño.

## **ABSTRACT**

In large scale open pit mining, shovel-truck system are widely used for loading and haulage labors. Actually, this item represents nearly 50% of operating costs, where main improvements are achieved through optimal management of availability, reliability and maintenance of the system. In this particular study case, processing costs reach 48% of cash costs, where 25% of this given cost comes into the crushing step.

Main purpose of this study is to determine the production rate of Antucoya Mining in full operation, based on variables and suppositions determined during the project and construction phases, including for each processing unit, its maintenance times between malfunctions applied on probabilistic distributions.

The methodology applied for this study includes the development of a simulation model based on a conceptual model, which specifies suppositions, parameters, variables, design and operation criterion that allow a comprehensive patterned system.

The code lines of the model used in ProModel® platform delivers an annual production rate of 30.77 Mt. After calculating the finishing simulation, it is proven that a single run is enough. The next step is to calibrate the model to generate a system that supports emergency capacities in case of a lacking production. After this, the indicators for the 3 main crushing stages were validated and verified individually. With this, a new production of 32.76 Mtpa is achieved which represent a marginal profit of US\$ 27.4M.

It is advised to further continue this study in order to replicate the operating conditions using updated data and increasing at least the battery limit to leaching piles, allowing the model to obtain more realistic estimations.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, quiero dedicarle este trabajo a mi padre Carlos Lorenzo y en especial mi madre Gladys Del Carmen Solar Melo, que son el motor y fuerza infinita que tengo para salir adelante. Este trabajo se los dedico a ustedes dos.

En segundo lugar quiero dedicar estas palabras por el esfuerzo, coraje y perseverancia que han demostrado en sus vidas a mi familia entera por siempre sentirse orgulloso de mí. Un saludo especial a Carolina Melo Rozas, Juan Solar Oliva -mis abuelos maternos- y Cristián Nicolás González Solar que siempre los llevo en el corazón, junto a mi tío Vladimir Solar Melo que me ha apoyado en innumerables pasajes de mi vida.

En forma especial le dedico todo esto largo y riguroso trabajo a Jorge Luis Palma Villagrán, por aceptar ser mi profesor guía, aceptarme en su casa y apoyarme como amigo, consejero y hermano.

Finalmente, les quiero dedicar todo el esfuerzo estampado en este Trabajo de Título a mis mejores amigos Gustavo Leiva Fuentes y Elías Moscoso Castillo por estar siempre ahí, en las ocasiones importantes de esta vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Ramón Jorquera Flores y Hugo Adrian por permitirme tomar este tema de memoria en Minera Antucoya.

En segundo lugar, cómo no dar las gracias infinitas a Miguel Jorquera Villarroel, Carlos “Loco Loco” González, Cristóbal Lastra, Francisco Sepúlveda, Luis Serrano, César Arredondo, Jaime Rojas, Juan Cristóbal Dreyfus, Ignacio Moscoso, Diego Olivares, Rachid Manzur, Jean Louis Azorin, Francisco Villaseca y Patricio Vergara, por siempre confiar en mis capacidades, incluso cuando ya no confiaba en ellas.

A Guillermo Faúndez Santander, José Salvador Campaña, Paulina Barahona, Felipe Rojas Zamudio, Sergio Rivera Araya, Jorge Gaete y Roberto Jarpa Sandoval, que me apoyaron mucho e hicieron amena la estancia en el campamento de la minera.

A Sebastián Maluenda, Pablo Espinoza Velásquez, Víctor Hugo Orellana, Pablo Garrido, Patricio Ramos Quijada, Fernando Pérez Jamarné, Manuel Gatica, Luis Felipe Oyarce, Egon Baeza, Alonso Saldivia, Gustavo Carmona Guenante y Cristóbal Manzano por apoyarme desde lejos del mundo beauchefiano y minero, unidos por nuestro pasatiempo diferente. Especial mención se llevan el querido Hugo Yévenes Arenas (“Jugo”) que me alojó, transportó y acompañó entre los tiempos libres de viaje y faena en Antofagasta; y Carlos Enrique Garcés por hacer la revisión de redacción y ortografía.

Gracias miles por la ayuda en el trámite burocrático, como en el apoyo incondicional y simpatía al profesor Gonzalo Montes-Atenas.

## TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Proyecto Antucoya.....	1
1.1.1 Descripción del proyecto .....	1
1.1.2 Recursos Minerales.....	3
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.2.1 Objetivos generales .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 ALCANCES .....	4
1.4 Organización del trabajo.....	5
2 ANTECEDENTES.....	6
2.1 Breve reseña histórica.....	6
2.3.1 Clasificación de los modelos.....	7
2.4 Métodos de Simulación.....	8
2.5 Simulación Dinámica de Eventos Discretos .....	9
2.5.1 Elementos del SED .....	14
2.6 Estado del arte.....	16
2.7 Norma ASARCO.....	17
2.7.1 Disponibilidad y utilización de los equipos.....	18
2.7.2 Tiempos medios de falla y entre fallas de los equipos de chancado .....	19
2.8 Estudios previos .....	19
2.9 Análisis crítico sobre la aplicabilidad del sistema modelado .....	20
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO: MODELO CONCEPTUAL .....	21
3.1 Supuestos .....	22
3.2 Límite de Batería Sistema.....	23

3.2.1	Subsistema Mina .....	23
3.2.2.	Subsistema Planta de Chancado .....	24
3.3	Criterios Generales .....	26
3.4	Criterios de Diseño .....	27
3.4.1	Mantenciones Área Seca - Planta.....	27
3.4.2	Parámetros de Diseño Planta Chancado .....	27
3.4.3	Flujos de procesamiento del circuito .....	28
3.4.4	Infraestructura e instalaciones .....	29
3.4.5	Interferencias Operacionales estimadas .....	32
3.5	Criterios de Operación.....	34
3.5.1	Interferencias Operacionales .....	34
3.6	Distribución probabilística asociada a Camiones.....	36
3.7	Variables de salida del modelo .....	40
4.	MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DISCRETOS .....	41
4.1	Elementos de la simulación .....	41
4.2	Implementación Caso Base.....	48
4.3	Calibración del modelo .....	48
5.	RESULTADOS .....	49
5.1	Resultados Caso Base .....	49
5.3.1	Indicadores de Disponibilidad y Utilización.....	51
6.	VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN .....	53
6.1.	Validación por partes .....	53
6.2	Verificación del sistema modelado .....	54
7.	ANÁLISIS DE ESCENARIOS .....	56
7.1	Análisis económico del escenario .....	61
8.	ANÁLISIS CRÍTICO DE RESULTADOS.....	63
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65

9.1	Conclusiones Generales.....	65
9.2	Recomendaciones.....	67
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	69
11.	ANEXOS .....	72
11.1	Detalle Equipos modelados Planta Chancado .....	72
11.1.1	Chancado Primario .....	72
11.1.2	Chancado Secundario.....	72
11.1.3	Chancado Terciario .....	73
11.2	Simulación Terminante del Sistema.....	75



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Valores habituales de disponibilidad y utilización para chancadores. ....	19
Tabla 3-1: Flujos Equipos Principales Línea Chancado – Caso Base. ....	29
Tabla 3-2: Caracterización del mineral para transporte en correas Planta Chancado. ....	30
Tabla 3-3: Características del mineral. ....	30
Tabla 3-4: Curva granulométrica estimada. ....	31
Tabla 3-5: Velocidades de diseño Correas Transportadoras Planta Chancado. ....	32
Tabla 3-6: MTTR y MTBF usados para Simulación Dinámica - Planta Chancado .....	33
Tabla 4-1: Ciclo Transporte Mineral a Chancado. ....	46
Tabla 4-2: Elementos principales de simulación. ....	47
Tabla 5-1: Disponibilidad y Utilización Equipos Principales – Caso Base. ....	52
Tabla 5-2: Disponibilidad y Utilización máxima para equipos de chancado. ....	52
Tabla 6-1: Flujos por equipos Diseño v/s Caso Base Modelo. ....	53
Tabla 6-2: Tiempos medios de falla Diseño v/s Caso Base Modelo. ....	54
Tabla 7-1: Diferencia Porcentual de Escenarios A y B – Producción Anual estimada. ....	56
Tabla 7-2: Producción Escenario C – Fase Régimen. ....	58
Tabla 7-3: Disponibilidad y Utilización Equipos Principales – Escenario C. ..	59
Tabla 7-4: Estadísticas básicas corridas – N° camiones por año (N° CAEX/día). ....	60
Tabla 7-5: Estadísticas básicas corridas – Ritmo de producción (ktpd). ....	60
Tabla 7-6: Datos Evaluación Beneficio Marginal. ....	61
Tabla 11-1: Datos Cálculo Número de Corridas. ....	75

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1: Curvas Tonelaje - Ley de Recursos. ....	3
Gráfico 3-1: Histograma de camiones que alimentan Planta Chancado. ....	37
Gráfico 4-1: Cantidad de camiones con mineral a Planta Chancado. ....	50
Gráfico 4-2: Producción Caso Base – Etapa Régimen.....	51
Gráfico 7-1: Camionadas Escenario C – Etapa Régimen.....	57
Gráfico 7-2: Ritmo Producción Escenario C – Etapa Régimen.....	58
Gráfico 7-3: Resumen Análisis Escenarios – Producción Diaria estimada ....	59
Gráfico 7-4: Resumen Análisis Escenarios – Producción Anual estimada. ...	60
Gráfico 7-5: Análisis Sensibilidad - Precio Cu. ....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Límite de batería Sistema Carguío y Transporte Mina – Planta de Chancado .....	5
Figura 2-1: Etapas a desarrollar en un estudio de simulación. ....	11
Figura 2-2: Distribución de tiempos según norma ASARCO. ....	17
Figura 3-1: Topografía Mina – Marzo 2015.....	24
Figura 3-2: Interferencias Operaciones relevantes – Turno A. ....	35
Figura 3-3: Interferencias Operaciones relevantes – Turno B. ....	35
Figura 3-4: Criterio de Decisión – Cola Descarga Alimentación Chancado... ..	38
Figura 3-5: Criterio de Decisión – Tolva Descarga Alimentación Chancado. ..	39
Figura 4-1: Representación Sistema Planta Chancado Antucoya. ....	42
Figura 4-2: Subsistema Mina – Representación Layout Mina Marzo 2015. ..	43
Figura 4-3: Subsistema Mina – Representación Modelo. ....	44
Figura 4-4: Subsistema Chancado Primario – Representación Modelo.....	45
Figura 4-5: Subsistema Chancado Secundario – Representación Modelo....	45
Figura 4-6: Subsistema Chancado Terciario – Representación Modelo. ....	46
Figura 4-7: Tiempo de corrida del modelo. ....	48
Figura 6-1: Representación Gráfica N° 1 – Nivel llenado de equipos durante la corrida.....	55
Figura 6-2: Representación Gráfica N°2 – Nivel llenado de equipos durante la corrida. ....	55
Figura 11-1: Diagrama de Flujo Planta Chancado – Área Seca.....	76

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Cálculo de la disponibilidad de equipos en la operación. ....	18
Ecuación 2-2: Cálculo de la utilización de equipos en la operación. ....	18
Ecuación 7-1: Beneficio Diferencial - Escenario 3.....	61
Ecuación 11-1: Número de corridas necesarias.....	75

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Proyecto Antucoya**

### **1.1.1 Descripción del proyecto**

El proyecto Antucoya se localiza en la segunda región de Antofagasta, aproximadamente a 180 kilómetros al norte de la ciudad de Antofagasta y a 60 kilómetros al noreste de la faena minera de Michilla, de propiedad de Antofagasta Minerals S.A.

Existen dos vías de acceso al sitio del proyecto desde la ciudad de Antofagasta. Una es a través de la ruta 5 norte, y la otra accediendo hasta la faena Michilla por la ruta 1 (camino costero) o ruta 240 (camino interior) y desde ahí al sitio del proyecto.

En la zona predomina un clima desértico normal nuboso, que está bajo la influencia de las altas presiones del Pacífico con ausencia de precipitaciones. El fenómeno de neblina densa conocido como *camanchaca* se presenta durante todo el año con humedades cercanas al 100%. Las temperaturas promedio son inferiores a 18°C, con un 39% de humedad ambiental, siendo febrero el mes más cálido con un promedio de 16,7°C y Junio el mes más frío con un promedio de temperatura de 12,9°C. La amplitud termal anual es de 8,3°C, siendo el mes de agosto el de mayor amplitud y pueden presentarse amplitudes de 30°C con noches muy frías.

El área del proyecto se encuentra en una zona plana, que promedia los 1.700 msnm, encerrada por dos cordones montañosos de dirección norte-sur, con una elevación máxima de 1.820 msnm en el cordón oeste.

El proyecto considera la extracción de los óxidos con la operación de un rajo abierto convencional, con minerales chancados enviados al proceso de lixiviación en pilas.

La capacidad nominal de producción estimada de cobre fino, es de 80 kt/año y la capacidad de chancado es de 30 Mt/año. La mina rajo abierto tiene un límite máximo de movimiento total de materiales de 90 Mt/año.

Se consideran dos botaderos de estéril ubicados espacialmente al lado norte y sur del rajo. La operación de chancado está ubicada en la superficie del rajo y las pilas de lixiviación están localizadas en las cercanías de la planta de extracción por solvente y la nave de electro-obtención al norte del rajo.

El proyecto de factibilidad de la mina, desarrolla el diseño operativo y viable del rajo abierto y el plan de producción con las consideraciones para cumplir las metas de producción del proyecto.

En un sistema minero, la realización de un diseño de producción lleva consigo un nivel de incertidumbre, causada por un conjunto de factores que dependen de las operaciones unitarias del proceso, además de una serie de interferencias operacionales tales como mantenciones programadas, fallas no programadas, detenciones operacionales, entre otras causas comunes en una operación minera de gran envergadura.

Por lo mismo, en la actualidad es imperativo estimar la producción esperada en el diseño, para dar confianza a los inversionistas mediante herramientas de simulación, las cuales corresponden a herramientas computacionales que modelan la puesta en marcha de una operación productiva. Esto es vital para un proyecto donde el CAPEX (Capital de Inversión, de su sigla en inglés), está en el orden de los billones de dólares, como es el caso de una virtual operación para gran minería.

El proyecto se encuentra en fase de puesta en marcha, explotado bajo el sistema de cielo abierto. Sobre el plan de producción, este considera cumplir las metas de producción del proyecto, sujeto a las concentraciones máximas de carbonato y sulfato de las áreas seca y húmeda de la planta, que permitan su continuo funcionamiento.

## 1.1.2 Recursos Minerales

El modelo de recursos contiene la información de sondajes de exploración, obtenida hasta el 30 de abril del 2011. El modelo de recursos empleado en el desarrollo de este estudio, corresponde a la actualización realizada en Septiembre de 2011 y contiene atributos de leyes, densidad, litología, unidad mineralógica, parámetros geometalúrgicos actualizados que incluyen la zonificación de nitratos, carbonatos, sulfato, consumo de ácido, recuperación metalúrgica y la categorización de recursos clasificados como medidos, indicados e inferidos.

El total de recursos -considerando todas las categorías- se muestra en la curva tonelaje-ley.

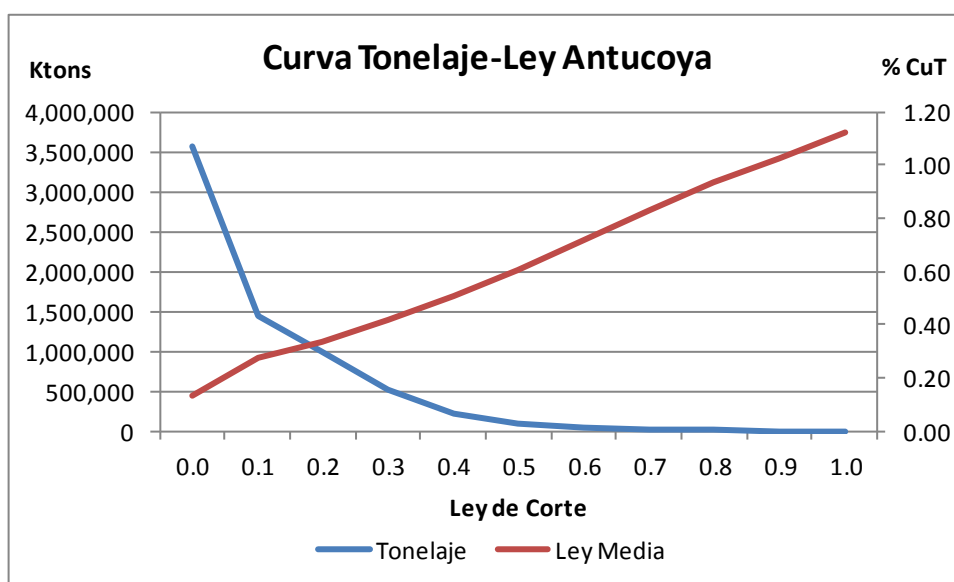


Gráfico 1-1: Curvas Tonelaje - Ley de Recursos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos generales

Estimar la producción de una mina explotada a cielo abierto, compuesta por varios niveles operacionales, mediante simulaciones que

consideren las interferencias operacionales del Carguío y Transporte de la mina, como el procesamiento de minerales. Para esto, la simulación de eventos discretos se enfocará desde la llegada de camiones que alimentan la tolva de descarga del chancador primario hasta las líneas secundaria y terciaria.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Modelar el diseño planteado de la mina a cielo abierto, con el fin de determinar la producción proyectada en etapa de régimen, mediante una simplificación del sistema. Además, se estudiará si el sistema mina y planta en conjunto es capaz de procesar el tonelaje de mineral esperado, para la capacidad y cantidad de equipos dimensionados en la etapa de chancado. Esto se logrará estudiando la dinámica del comportamiento productivo de la mina, y la capacidad de procesamiento de la planta.

Para esto, se considerarán criterios de decisión, criterios y parámetros de operación, provenientes del diseño de la planta, layout de la faena y flota de camiones. Sobre la base de datos e información de la operación, necesarios para la realización del modelo conceptual, se recolectarán datos en terreno de tiempos de ciclo de camiones, y se realizarán entrevistas con funcionarios expertos a cargo de la operación y mantención de la compañía minera mencionada.

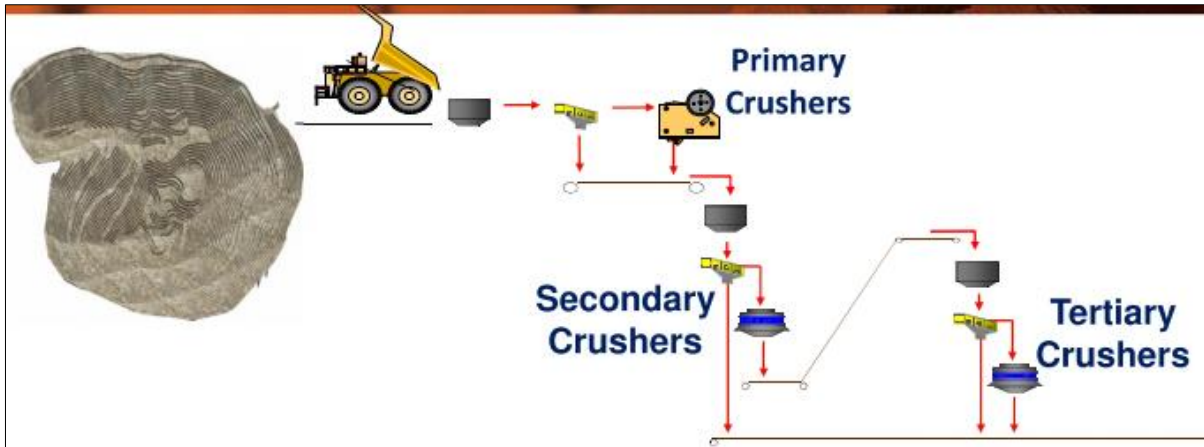
### **1.3 ALCANCES**

Este trabajo pretende estimar el movimiento de materiales transportados y procesados entre las operaciones unitarias descritas para un año calendario de la operación en fase de régimen. Para ello, son vitales las capacidades promedio de las tolvas de los camiones, como de todos los equipos del circuito de chancado. Con esto, se dejan de lado variables tales como ley y granulometría, las cuales -se asume- cumplen lo estimado en la etapa de



proyecto, y en donde su influencia no fue pedida por el cliente de la minera estudiada.

El sistema estudiado será el mostrado en la Figura 1-1, el cual -para efectos del estudio- corresponde al límite de batería de este trabajo.



**Figura 1-1: Límite de batería Sistema Carguío y Transporte Mina – Planta de Chancado**

## 1.4 Organización del trabajo

- El primer capítulo describe el proyecto, define objetivos generales y particulares, además de alcances,
- En el capítulo 2 se muestran antecedentes sobre el desarrollo de simulaciones en variadas problemáticas.
- Luego, en el capítulo 3 se revisa la metodología del uso de esta técnica a través del modelo conceptual, la cual detalla los parámetros, variables, subsistemas analizados durante el modelamiento, además de detallar las variables de salidas y escenarios generados.
- La recolección de datos se muestra en el capítulo 4, junto a los parámetros y criterios de diseño, como además criterios de operación utilizados en la mina.
- La implementación del sistema en el software ProModel<sup>®</sup>, bajo los parámetros del caso base, serán mostrados el capítulo 5.

- La validación por partes y verificación del sistema modelado serán discutidas en el capítulo 6.
- En el capítulo 7 se muestra tres escenarios, de manera de estudiar si la planta en ciertos períodos de la operación soporta una mayor alimentación de mineral para su procesamiento; y su impacto en el beneficio diferencial.
- Las conclusiones finales y generales se detallan en el capítulo 8, junto con recomendaciones sobre trabajos futuros.
- La bibliografía se detalla en el capítulo 9 por orden de aparición.
- Los anexos, donde se muestra el diagrama de flujos se encuentran en el capítulo 10.

## **2 ANTECEDENTES**

### **2.1 Breve reseña histórica**

La simulación para sistemas mineros data de 1961, el cual fue realizado para labores de minería subterránea. Por otra parte, en 1964 se realizó el primer esfuerzo en incorporar herramientas apropiadas a través de un modelo, de manera de dar solución a problemas complejos en los sistemas de carguío y transporte en minería a cielo abierto, en cuanto al traspaso de mineral entre los equipos involucrados. En cuanto al uso de simulación para estudios de distintos modelos de despacho, es posible mencionar a varios autores en el año 1981, 1982, 1984, 1985 y 1993 como los primeros en usar la simulación en el estudio de este tipo de algoritmos. Como hito relevante, se puede mencionar que Brown & Jones (1989) realizaron el primer modelo de simulación para minería provisto de animaciones gráficas. Estos concluyeron que se puedan desarrollar modelos que puedan cuantificar los efectos de la inversión de capital y prácticas

operacionales. Además, permite obtener soluciones ligadas con el uso eficiente de los costos para una unidad productiva en estudio.

### **2.3.1 Clasificación de los modelos**

Existen variadas clasificaciones de modelos basados en otros de diverso origen. Se distinguen tres tipos básicos: modelos icónicos, análogos y simbólicos, en función de las reglas de la construcción del modelo -o en otras palabras- en la forma de establecer las relaciones de correspondencia.

Los modelos simbólicos se construyen de manera más abstracta, por lo que esta denominación suele aplicarse a los casos en los que el objeto real se representa mediante una codificación matemática (como por ejemplo geometría o estadística). Un ejemplo de modelo simbólico es la representación de un edificio mediante la identificación y codificación en una estructura geométrica de sus elementos básicos. El modelo así construido permite la aplicación de algoritmos para, por ejemplo, la estimación de esfuerzos a los que está sometido.

En particular, los modelos simbólicos matemáticos mapean las relaciones existentes entre las propiedades físicas del sistema que se pretende modelar en las correspondientes estructuras matemáticas. El tipo de formalización matemática que se utilice va a depender, de las características intrínsecas de las dinámicas de interés que se quieran representar.

La descripción en términos matemáticos de un sistema real, no es una metodología de trabajo propia de la simulación digital, sino que es inherente a la mayoría de las técnicas que se utilizan para solventar cualquier tipo de problema, las cuales suelen seguir una metodología de trabajo que -a modo general- aplica lo explicado a continuación (Felicísimo, 1994):

- Identificación del problema.
- Formulación del modelo matemático.

- Solución del problema matemático.
- Interpretación de los resultados matemáticos bajo el contexto del problema.

## **2.4 Métodos de Simulación**

Existen diversos métodos de simulación y estos se dan en función del diseño del modelo (continuo, discreto, estocástico y matemático), que representa -en esencia- las características del sistema real, con la finalidad de comprender su comportamiento y evaluar nuevas estrategias, las cuales se explican a continuación:

- Simulación de sistemas continuos:

En general, los modelos matemáticos de tipo dinámico representan sistemas continuos, es decir, sistemas en los que las actividades predominantes causan pequeños cambios en los atributos de sus entidades. Tales modelos están definidos formalmente por ecuaciones diferenciales.

- Simulación de eventos discretos (SED):

El seguimiento de los cambios de estado, requiere la identificación de qué es lo que causa el cambio y cuándo lo causa, lo que denominaremos suceso. Las ecuaciones del modelo se convierten -entonces- en las ecuaciones y relaciones lógicas que determinan las condiciones en que tiene lugar la ocurrencia de un suceso.

- Simulación de Procesos por Lotes:

No se precisa una evolución continua del tiempo, ya que las modificaciones que existen en el sistema a simular se produce cada ciertos intervalos de tiempo, siendo estos de valor muy elevado y espaciados no uniformemente. Para este caso, se precisa de un reloj

asíncrono, cuya actuación depende de los eventos producidos en el sistema.

- Simulación Combinada:

Contempla procesos mixtos en los que existen subprocesos de tipo continuo junto con subprocesos en lotes.

- Simulación de Montecarlo:

El factor tiempo no influye significativamente, admitiendo una gran cantidad de variables que están consolidadas como procedimientos de integración numérica, en particular, cuando se trata de fenómenos reales no integrables en forma analítica, debiendo generar números aleatorios para resolver problemas estocásticos o determinísticos.

De estos métodos, el problema en estudio tiene las siguientes características:

- ❖ El tiempo de simulación es vital en el horizonte de evaluación;
- ❖ No es un sistema continuo.

Dicho esto, la simulación de eventos discretos muestra las ventajas necesarias para resolverlo. La aplicabilidad de este tipo de simulación se justifica al describir eventos físicos de traspaso de material como parte de un proceso productivo discontinuo (*batch*) sobre un tiempo de operación determinado.

## **2.5 Simulación Dinámica de Eventos Discretos**

El objetivo de las simulaciones es intentar replicar el comportamiento de un sistema real mediante el modelamiento del comportamiento de los diferentes componentes que lo integran y sus interacciones. La simulación de procesos permite resolver procesos complejos de traspasos de material e interferencias operacionales en un proceso productivo, para las cuales los

métodos cuantitativos no son eficaces o no pueden aplicarse. De acuerdo a Shannon, 1975, simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema. Una breve explicación de conceptos dentro del contexto de la simulación es la descrita por Banks, 1999. El autor define la simulación como la imitación de la operación de un sistema del mundo real en el tiempo. La simulación implica la generación de una historia artificial del sistema y la observación de esta historia artificial para sacar conclusiones sobre las características de funcionamiento del sistema real que se representa. Asimismo define conceptos clave dentro de la simulación:

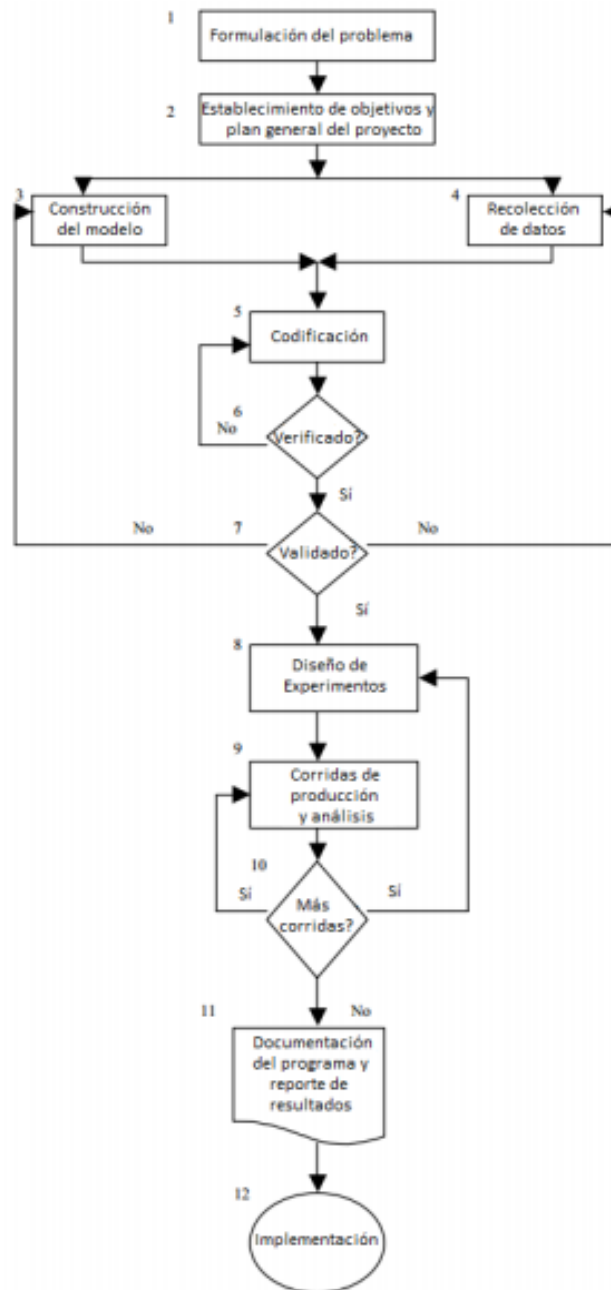
- Un modelo es la representación de un sistema real.
- Un evento es una ocurrencia que cambia el estado del sistema.
- Las variables de estado del sistema son la recopilación de toda la información necesaria para definir lo que está sucediendo dentro del sistema a un nivel suficiente (es decir, para alcanzar el resultado deseado) en un punto dado en el tiempo.
- Un modelo de simulación de eventos discretos se define como uno en el que las variables de estado cambian sólo en aquellos puntos discretos en el tiempo en que ocurren los eventos.

Según el autor Hall (2000), los pasos que todo proyecto de simulación debe tener son los siguientes:

1. Identificación del problema
2. Descripción de los objetivos y plan de trabajo del proyecto
3. Preparación de la recolección de los datos
4. Formulación y construcción del modelo
5. Validación y verificación del modelo

6. Modificación y/o refinamiento del modelo
7. Uso del modelo
8. Aplicación de resultados

De forma similar, las etapas en que todo estudio de simulación debe pasar, se observan según Banks et al. (2000) en la Figura 2-1.



**Figura 2-1: Etapas a desarrollar en un estudio de simulación.**

Con respecto al nivel de detalle del modelamiento del sistema, Lobão y Porto, (1999) exponen que cuando un modelo es construido de forma compleja y detallada, se vuelve lento, difícil de comprender y mantener. Al mismo tiempo, su confiabilidad decrece, puesto que el modelo necesita numerosos parámetros de calibración, difíciles de obtener en la realidad.

Sin perjuicio de lo anteriormente descrito, la publicación de Fioroni et al. (2008) reconoce que en ciertos sistemas a modelar no hay manera de evadir la simplificación de un procedimiento complejo sin pérdidas de precisión en los resultados del modelo. En algunos casos el sistema tiene procedimientos que involucran decisiones o elementos críticos que son muy importantes para el comportamiento del sistema. Además comenta que la presencia de un modelo de optimización en un modelo de simulación es un obstáculo para el modelador. Asimismo reconoce que los softwares de simulación de eventos discretos no están completamente diseñados para resolver problemas de optimización de una manera fácil y rápida.

La ventaja de este enfoque de evaluación es que toma en cuenta las actividades más relevantes involucradas en el proceso de manejo de materiales, al considerar las operaciones unitarias como bloques en una cadena de valor, a expensas de desarrollar un sistema capaz de soportar las actividades operativas más relevantes involucradas en este proceso, como sus interacciones entre ellas. Otro detalle se relaciona con la caracterización de los parámetros de operación del sistema, los cuales modulan el desempeño micro del sistema en términos de tiempo, cantidades e indicadores.

Sobre la simulación dinámica de eventos discretos, se hace necesario definir los conceptos más generales, como sigue:



- Modelo:

Un objeto X es un modelo del objeto Y para el observador Z, si Z puede emplear X para responder cuestiones que le interesan acerca de Y (Minsky, 1965). En otras palabras, un modelo es una representación de una idea, objeto o proceso de un sistema que es usado para describir y explicar fenómenos que no pueden ser probados directamente. Estos permiten la experimentación y predicción a través de una simplificación de la realidad

- Simulación:

Se define como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema (Shannon, 1988). Otro autor indica que la simulación se refiere a un conjunto de métodos y aplicaciones para imitar el comportamiento de sistemas reales, usualmente en un computador con el software apropiado (Kelton et al., 2010).

- Sistema:

Conjunto de objetos o ideas que están interrelacionados entre sí como una unidad para la consecución de un fin. También se puede definir como la porción del universo que será objeto de la simulación (Shannon, 1988). Existen diversos tipos de sistemas (Kelton et al., 2010), los cuales pueden ser separados por:

- Determinístico: si el sistema no contiene ningún elemento aleatorio es un sistema determinístico. En este tipo de sistema, las variables de salidas e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Es decir, las relaciones

funcionales entre las variables del sistema están perfectamente definidas.

- Estocástico: en este caso algún elemento del sistema tiene una conducta aleatoria. Entonces, para entradas conocidas no es posible asegurar los valores de salida. Cuando un sistema determinístico es alimentado con entradas estocásticas, la respuesta del sistema es también estocástica.
- Estático: el tiempo no varía en un modelo estático, se desarrolla en un punto dado en el tiempo.
- Dinámico: el tiempo varía a lo largo de la simulación. La mayoría de los modelos operacionales son de estas características.
- Continuo: Se tiene un sistema continuo cuando las relaciones funcionales entre las variables del sistema sólo permiten que el estado evolucione en el tiempo en forma continua (basta que una variable evolucione continuamente). Matemáticamente, el estado cambia en infinitos puntos de tiempo. - Discreto: Se tiene un sistema discreto cuando las relaciones funcionales del sistema sólo permiten que el estado varíe en un conjunto finito de puntos temporales. Las causas instantáneas de los cambios de estados se denominan eventos.

### **2.5.1 Elementos del SED**

A partir de la sección anterior, es posible definir que una simulación dinámica de eventos discretos es aquella en que el estado de las variables de un sistema varía en puntos discretos en el tiempo cuando ocurren eventos. También se hace necesario definir los elementos por los que estos tipos de simulaciones están compuestas por los siguientes elementos (Kelton et al., 2010):

- Entidades:

Corresponden a los objetos dinámicos en la simulación. Estos que se mueven dentro del sistema, lo cuales pueden cambian su estado, afectan y son afectados por otras entidades y el estado mismo del sistema, y a su vez afectan los resultados medidos. En un mismo modelo pueden existir diferentes tipos de entidades que representen diferentes elementos de la realidad, o también pueden ser ocupados como elementos auxiliares que permitan realizar una función específica requerida.

- Atributos:

Se definen como características comunes entre mismos tipos de entidades, donde los diferentes valores de los atributos individualizan a cada entidad. También se definen como variables locales específicas de cada entidad.

- Variables globales:

Se refiere a una pieza específica de información que describe alguna característica del sistema. Estas son propias del sistema y a diferencia de los atributos no están ligadas a una entidad.

- Recursos:

Se define como una entidad estática (que no puede recorrer el sistema) y que presta servicio a las entidades (las entidades dinámicas antes descritas). Las entidades generalmente compiten entre ellas por el servicio entregado por los recursos y estos pueden representar elementos de un sistema como personal, equipamiento o un lugar físico en una bodega.

- Colas:

Es el lugar físico dentro del sistema a modelar donde una entidad espera cuando no puede continuar su avance a través del sistema (por ejemplo cuando no existen recursos disponibles para realizar un proceso).

## **2.6 Estado del arte**

Se destaca el trabajo elaborado por Yarmuch (2012), el cual realiza un análisis detallado de alternativas usando la simulación dinámica de eventos discretos y cadenas de Markov. La simulación dinámica de eventos discretos permite cuantificar la variabilidad de los procesos junto con estudiar las variables de tráfico y congestión. Por su parte las cadenas de Markov son una alternativa analítica para resolver el problema de la confiabilidad de un sistema en función de la configuración y funcionamiento de sus componentes.

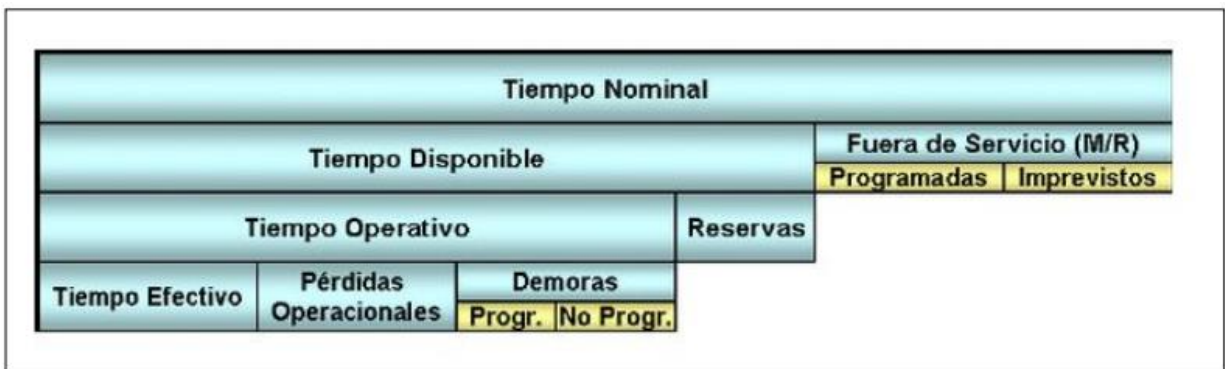
Por lo mismo, se evalúa si los camiones puedan bajar cargar cargados a la mina. Esta condición operativa proviene de la idea que a partir del año 2009, en mina Chuquicamata, dos chancadores primarios se encuentran en superficie y uno al interior del pit. En 2010 se debió tomar la decisión de trasladar uno de los chancadores secundarios en superficie al interior del pit. En base a los resultados obtenidos, como también sobre la variación de productividad dado al caso base y caso de estudio, al permitir que bajen los CAEX con material en la tolva, no se hace viable instalar el chancador en el sector in-pit por los siguientes motivos de índole técnico – económico:

- ✓ El proyecto produce un beneficio económico marginal.
- ✓ Existe una gran incertidumbre en la confiabilidad de la correa transportadora K2. que une el sector de chancado primario (M2) y secundario (E4-1).

- ✓ La conducción de un CAEX cargado bajando el pit sería una práctica operacional de alto riesgo, tanto para la conducción como en el desgaste de insumos y repuestos de estos equipos.
- ✓ La simulación pone de relieve una alta sensibilidad a la productividad observada en el sistema de chancado M1.

## 2.7 Norma ASARCO

Esta norma (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 (Le Feaux et al., 2007).



**Figura 2-2: Distribución de tiempos según norma ASARCO.**

El detalle de cada intervalo mostrado en la Figura 2-2 sobre tiempos designados, se detalla a continuación:

- ❖ Tiempo Nominal: Corresponden al espacio de tiempo en que se realiza la medición (espacio muestral). Este tiempo dependerá del tiempo de continuidad de la faena productiva.
- ❖ Fuera de servicio: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico.
- ❖ Tiempo disponible: Intervalo de tiempo en que el equipo se encuentra electromecánicamente habilitado para operar.

- ❖ Tiempo operativo: Intervalo de tiempo en que el equipo está operando
- ❖ Tiempo de reserva: Corresponde al espacio tiempo en que el equipo está electromecánicamente disponible para trabajar, pero no está siendo utilizado en labores 20 productivas, ya sea por falta de operador o que bajo condiciones específicas de la faena no pueda ser operado.
- ❖ Demoras programadas: Intervalo de tiempo en que el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, tales como colación o cambio de turno.
- ❖ Demoras no programadas: Intervalo de tiempos en que el equipo no opera, debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de ésta, tales como carga de combustible, acomodo o limpieza del lugar de faena, etc.
- ❖ Pérdidas operacionales: Intervalo de tiempo en que el equipo no puede operar, debido a la espera de equipo complementario, tales como sistemas de alumbrado, martillo picador, etc.
- ❖ Tiempo efectivo: Intervalo de tiempo en que el equipo se encuentra realizando aquellas tareas para los cuales fue adquirido y diseñado.

### **2.7.1 Disponibilidad y utilización de los equipos**

A partir de las definiciones de tiempos aceptadas en la operación, se determinan la disponibilidad y utilización según las siguientes fórmulas, considerando para ambos indicadores una base sobre horas nominales (o base nominal).

$$❖ \textit{Disponibilidad} [\%] = \frac{\textit{Tiempo Disponible}}{\textit{Tiempo Nominal}} \times 100$$

**Ecuación 2-1: Cálculo de la disponibilidad de equipos en la operación.**

$$❖ \textit{Utilización} [\%] = \frac{\textit{Tiempo Utilizado}}{\textit{Tiempo Nominal}} \times 100$$

**Ecuación 2-2: Cálculo de la utilización de equipos en la operación.**

En el caso de los chancadores, estos indicadores en la gran minería son aceptados entre un rango presentado en la siguiente tabla (Manzur, 2015).

<b>Disponibilidad</b>	60 - 65 %
<b>Utilización</b>	70 - 75 %

**Tabla 2-1: Valores habituales de disponibilidad y utilización para chancadores.**

### **2.7.2 Tiempos medios de falla y entre fallas de los equipos de chancado**

Los tiempos medios entre fallas (Mean Time Between Failures o *MTBF* en inglés) y tiempos medios de falla (Mean Time To Repair o *MTTR* en inglés) son ajustados por distribuciones de probabilidad de tipo exponencial, la cual se especifica con la media de los datos ocupados en minutos. El tiempo entre fallas promedio sugiere que las fallas o imprevistos ocurren cada 10080 min, lo que equivale decir que estas fallas ocurren promedio cada una semana.

## **2.8 Estudios previos**

El estudio encargado por la EPC Sandvik para TSG Consulting durante el año 2012 considera los indicadores esperados de la operación y principalmente el plan de mantención de Área Seca de la planta, además de fallas sobre eventos imprevistos, pero no se hace cargo de modelar la alimentación de camiones a las tolvas del chancado primario, tiempos de falla de los chancadores ajustados a datos realistas de plantas ni tampoco un estudio de los equipos de chancado en línea, en donde los flujos de material unido a las fallas de imprevistos configuran un escenario de vital estudio para el conocimiento de la producción esperada (Duarte, 2012).

Se hace notar que en el estudio anterior se satura camiones en la alimentación de la tolva primaria, y principalmente los tiempos medios de falla ocupados en los chancadores son del orden de diez veces menos a los

recomendados por el experto de la compañía minera en estudio, dato que se corrobora en el benchmarking realizado (Ver Sección 3.4.5). Esto supone una baja en la producción esperada anual de mineral procesado, ya que el modelo realizado anteriormente no representa condiciones realistas de la operación en estudio.

De los párrafos anteriores, se desprende que los tiempos medios de falla y entre fallas serán ajustados bajo una distribución de comportamiento exponencial.

## **2.9 Análisis crítico sobre la aplicabilidad del sistema modelado**

Se opta por ocupar el software ProModel<sup>®</sup> en vez de Arena<sup>®</sup> Simulation Software, principal competidor para este tipo de estudios, debido a que el primero está orientado a la representación de eventos físicos tales como el llenado, traspaso de material, además de la fácil asignación y movimiento de los recursos del sistema. Arena<sup>®</sup> no ayuda a esta labor al modelar cada etapa o locación como bloques.

Sobre el carácter dinámico de la simulación de eventos discretos realizada, ProModel<sup>®</sup> da la posibilidad de modelar todos los equipos del circuito de chancado mediante la herramienta llamada *TANKS*. Estas corresponden a un tipo de locaciones que ofrece el software, la cual se ocupan en equipos donde se quiera estudiar el comportamiento de flujos de entrada y salida de un equipo que presenta una capacidad determinada. Para conectar un equipo con el siguiente, se utilizaron sub-rutinas (*subroutines*), las cuales determinan si el equipo siguiente posee el espacio suficiente para recibir el material, considerando la capacidad de cada equipo en particular (comando TANK\_CAP) y el nivel de llenado, es decir las toneladas instantáneas del equipo (TANK\_LEVEL). Este método se realiza aguas abajo en todos los equipos por donde el mineral circula.

El desarrollo de este trabajo obedece a la petición de la entonces existente Gerencia de Optimización Operacional, dependiente de la Gerencia



de Operaciones de la minera. La motivación principal radica en la saturación de al menos dos camiones en cola alimentando al chancado, motivo por el cual no se estudia el real impacto de las interferencias operacionales de los equipos mina y planta de chancado en la producción anual de mineral procesado.

Finalmente, sobre la aplicabilidad de esta forma de describir el fenómeno estudiado, se hace hincapié de que es factible replicar este modelo en otra unidad productiva de similar condiciones, en especial las que consideren chancado primario, secundario y terciario. Para realizar esta adaptación, por un lado es necesario adaptar el circuito, cantidades de equipos y capacidades máximas de estos equipos. Además de esto, se requiere ingresar flujos variables de material en t/min para cada traspaso de material dentro del circuito. Esto último sugiere que cada flujo pueda ser ajustado por datos reales de faena, ajustados a una distribución de probabilidades que refleje los cambios de granulometría, ley e incluso tonelaje.

### **3. METODOLOGÍA DE TRABAJO: MODELO CONCEPTUAL**

En esta sección se recolectan datos necesarios, tales como parámetros y variables. También se determinan el límite de batería del sistema a simular, así como criterios de decisión y operación vitales de la faena, los cuales deben ser programados en el modelo de simulación.

En cuanto a la etapa de área seca de la planta, se considera el Plan de Mantenimiento para el año 2015, a cargo de la Superintendencia de Mantenimiento Planta. Se hace notar que en fase de régimen, este tipo de mantenciones debieran funcionar de igual forma.

Para el desarrollo del modelo conceptual se hace un levantamiento tanto de criterios operacionales como de parámetros relevantes de cada uno de los equipos involucrados en el sistema a modelar. De esta manera es posible

generar las bases con las cuales se construirá el modelo computacional, el que será modelado bajo el software de simulación de eventos discretos ProModel®, utilizando el método de investigación operativa conocido como simulación dinámica de eventos discretos.

En su régimen operativo la mina constará de 14 camiones, estimados para una capacidad de 360 t, 2 palas cable de 110 t y 2 cargadores frontales, los que alimentarán la planta. Un stock de contingencia en caso de un imprevisto importante proveniente de la alimentación de mineral desde la mina y un botadero de lastre en el sector sur de rajo. El límite de batería que refleja el sistema estudiado se puede ver en la Figura.

Comprendidos los criterios de diseño estipulados para este subsistema, se hace necesario establecer la asignación de camiones cargados a tolva de alimentación de chancado, stock de contingencia y botadero de lastre o estéril.

### **3.1 Supuestos**

El principal supuesto es que la flota de camiones implementada en la fase actual de puesta es la correcta, por lo que se asume un Plan Minero dado que no repercute en la alimentación del sistema modelado, lo cual provoca un tiempo de ciclo promedio conocido.

Vale decir, se busca conocer si la limitante es la capacidad y el diseño de la Planta de Chancado, estudiando desde el frente de carguío y variados stocks que soportan esta demanda de mineral. Para esto se utilizan los flujos de mineral entregados por el diagrama de flujos realizado al EPC Sandvik para el EPCM SNC-Lavalin, y aprobado por la Gerencia de Ingeniería y Construcción de Proyecto Antucoya. Se debe hacer notar que estos flujos son los esperados en fase de régimen de la faena (Ver Anexos, Figura 11-1).

Sobre la Planta, se utilizó en la codificación del sistema, que la Línea 1 del Chancado Primario tuviera prioridad de llenado, con el propósito de

estudiar la utilización de las líneas en cada etapa de chancado. Explicado esto, se debe aclarar que cuando se alimentan las tolvas del chancado secundario y terciario, el sistema se codificó, de manera de espera que se llene la línea anterior para permitir alimentar la siguiente.

## **3.2 Límite de Batería Sistema**

### **3.2.1 Subsistema Mina**

Las fases desarrolladas se aprecian en Figura 3-2. El Plan Minero contempla el desarrollo de un stock de mineral, a partir del Estudio de Factibilidad del Proyecto, considerando zonas de alto o bajo nitrato, además de una zona de Baja Ley. Además de esto, producto del atraso en la entrega y operación de Planta de Chancado (Área Seca) y Área Húmeda, se realiza un stock de mineral con alta concentración de Nitratos. De esto es relevante considerar el Stock de Factibilidad, el cual está muy cercano a la Plataforma de Chancado, donde esencialmente alimentará al Chancado durante los primeros meses, como la plataforma en sí, dado que se considerará una llegada de camiones representativa al comportamiento de la operación en régimen. Si bien la faena mencionada se encuentra en operación, aún se encuentra en fase de Puesta en Marcha, dejando en claro que la flota de camiones, tiempos de ciclo de estos, y principalmente el ritmo de producción procesada por la Planta de Chancado es menor al proyecto en la etapa de régimen.

Sobre la ley del mineral, la Gerencia de Planificación y Desarrollo a través de su Superintendencia de Metalurgia en coordinación con la Superintendencia de Planificación pidió considerar una ley de alimentación sin mayores cambios relevantes, la cual consiste en una mezcla de mineral que considera un porcentaje máximo de un 30% de sulfatos, y un 70% de óxidos verdes y negros (OVNs), ya que de lo contrario puede provocar una alta suspensión de polvo en las instalaciones del chancado, como además

graves problemas en la lixiviación, donde se puede configurar un deslizamiento dentro de las pilas producto de la acumulación de fino en éstas.

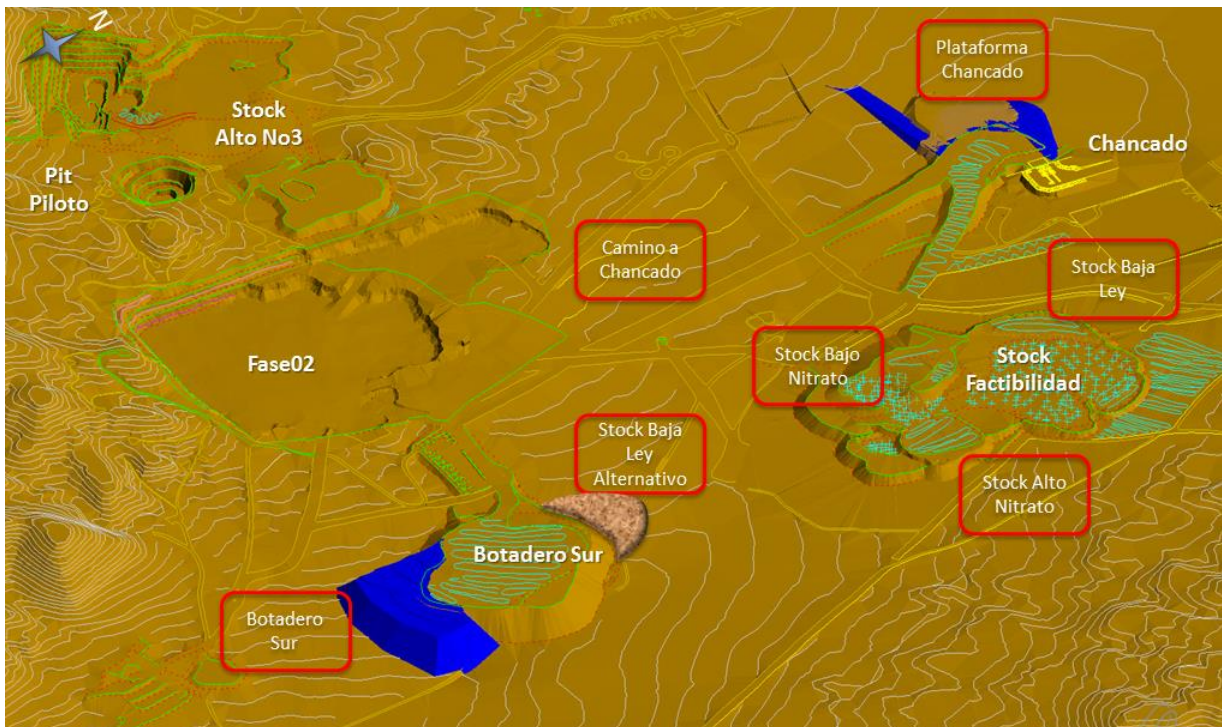


Figura 3-1: Topografía Mina – Marzo 2015.

### 3.2.2. Subsistema Planta de Chancado

#### 3.2.2.1 Subsistema Chancado Primario

El mineral proveniente de la mina (ROM) es transportado por terceros a la Planta de Chancado en camiones de 360 toneladas métricas de capacidad y descargado en las tolvas de alimentación, conectadas directamente con el chancado primario. En la etapa del chancado primario, el mineral es reducido de tamaño considerando una capacidad de diseño de 5716 t/h de mineral seco y la granulometría gruesa del mineral ROM, la descarga de chancado primario es transportado a la etapa siguiente. El chancado primario, dispondrá de chancadores del tipo mandíbula y usando dos líneas independientes, cada una con una capacidad de 858 t/h en

régimen y 3215 tms/h para la condición en que una línea esté detenida. Antes de iniciar el proceso, el operador deberá seleccionar la cantidad de chancadores de mandíbula que serán utilizados en la etapa de chancado primario. Para esto existirá el comando que habilita y deshabilita los chancadores de mandíbula, que consecuentemente deshabilitará el funcionamiento de los equipos que forman parte de la línea de chancador deshabilitado. Otro equipo, que debe ajustarse en función de la cantidad de chancadores habilitados es el alimentador de placas. El tonelaje de cada alimentador debe ser limitado en 2858 t/h cuando los dos chancadores estén habilitados. Cuando sólo un chancador de la línea primaria esté habilitado el límite será de 3215 t/h.

### **3.2.2.2. Subsistema Chancado Secundario**

En esta etapa el mineral proveniente de la línea primaria, alimenta a tres tolvas a partir de la Correa 3 mediante un cabezal móvil, en donde no necesariamente deben estar todas operativas para que alguna de ellas sea llenada. Posterior a esto, el material es conducido a alimentadores de correa, la cual a su vez alimenta a un harnero en circuito abierto. El material grueso, que corresponden a 1906 t/h en el flujo considerado como Caso Base, se estima alimenta con 1386 t/h a cada una de las tres líneas del Chancador secundario. El material procesado bajo tamaño, estimado en 520 t/h, se descarga en la Correa Colectora 4. Luego a la Correa de Traspaso 4A, la que descarga en la Correa 5, la cual corresponde a la correa colectora del chancado secundario y terciario. A esta correa además descargan los chancadores secundarios.

### **3.2.2.3 Subsistema Chancado Terciario**

Corresponde a la última etapa en la Planta de Chancado de la cual se obtiene un producto un 97% bajo un tamaño de ½" (12,7 mm).

El transporte de producto será mediante sistemas de correas transportadoras, las cuales llevarán el mineral a la tolva de alimentación y aglomeradores. Antes de iniciar el proceso, el operador deberá seleccionar la cantidad de chancadores de cono que se utilizarán en la etapa del chancado terciario (máximo 12 y mínimo 10). Para tanto existirá el comando que habilita y deshabilita los chancadores de cono, que consecuentemente deshabilitará el funcionamiento de los equipos que forman parte de la línea del chancador deshabilitado. Otro equipo, que debe sufrir ajuste en función de la cantidad de chancadores habilitados es el alimentador de correa. El tonelaje de cada alimentador debe ser limitado en 963 t/h cuando los doce chancadores estén habilitados. Cuando diez chancadores estén habilitados, los límites serán de 1.046 t/h. En caso que una línea de chancado primario esté funcionando, significa que la capacidad de la planta se verá reducida a 3215 ton/h y por lo tanto no va a ser necesario el funcionamiento de doce chancadores en el chancado terciario, pueden funcionar sólo siete chancadores a 926 tph. Estos ajustes del sistema deben ser configurados desde la sala de control a través de un operador, conforme la cantidad de chancadores habilitados.

### **3.3 Criterios Generales**

#### **3.3.1 Largo de corrida**

El tiempo de simulación se ocupó en este trabajo como el tiempo disponible de los equipos de la Planta de procesamiento de minerales (sin mantenciones), el cual corresponde a 333,5 días (Ver Sección 3.4.1). Esto debido a que el programa considera como vacío las capacidades de los equipos, además de que el objetivo es estudiar la producción de mineral, en consecuencia, no se considera el tiempo en la que la planta se detiene.

### **3.4 Criterios de Diseño**

#### **3.4.1 Mantenciones Área Seca - Planta**

Las mantenciones que se utilizarán en el modelamiento son las planificadas por la Superintendencia de Mantención Planta, las cuales se detallan a continuación:

- Mantenciones semanales de 12 h durante todas las semanas del año.
- 3 mantenciones trimestrales de 72 h.
- Una mantención anual de 72 h.

Estas mantenciones se encuentran fijadas para un año calendario, partiendo desde mediados de abril del año 2015.

#### **3.4.2 Parámetros de Diseño Planta Chancado**

Todos los parámetros se detallan en el listado, a continuación:

- Llegada del CAEX al origen del Carguío.
- Aculatamiento del CAEX
- Viaje al destino de descarga a la tolva de alimentación del chancado.
- Espera para descargar.
- Aculatamiento y descarga del CAEX.
- Circuito de Procesamiento del mineral.

Se debe notar que al ocupar tanques en la resolución del problema de la simulación dinámica para el caso del circuito de planta, no se hace necesario ocupar valores de velocidad y elevación, independiente de la representación de la corrida vista en el modelo a presentar, ya que importa modelar el traspaso de mineral entre equipos aguas abajo.

### 3.4.3 Flujos de procesamiento del circuito

Los CAEX operativos considerados para la etapa en régimen son 12 camiones, lo que equivale a una flota de 14 camiones. El perfil de velocidades se verá reflejado mediante velocidades medias, en tramos horizontales, subiendo o bajo al pit. Por lo mismo, no se consideran aceleraciones.

Para el caso de los equipos de carguío, se pretende estudiar el uso de la pala cable P&H 4100XPC alimentando al transporte bajo corriente alterna (AC), bajo el supuesto de que los dos cargadores frontales presentes en la mina en régimen, sólo se ocuparán en labores de apoyo, y de carguío en caso estrictamente necesario, como mantenciones programadas de la pala. Esta pala tiene una capacidad de 73 yd<sup>3</sup>.

En el caso del área seca de la planta, se espera que se cumplan con los siguientes indicadores:

❖ Flujo instantáneo:	4970 [t/h].
❖ Flujo para una línea primaria:	3215 [t/h]
❖ Flujo Diseño en Base Seca:	5716 [t/h]

El flujo de diseño, el cual está por debajo de la capacidad de emergencia de todos los equipos de la Planta, se tomará como el mineral procesado en la corrida correspondiente al Caso Base evaluado.

Los flujos estimados para los equipos principales se muestran en Tabla 3-2, donde se muestran valores de flujo de minerales para las tolvas y chancadores en las tres etapas de procesamiento. La Correa 5 tiene como función recibir el producto secundario, y el sobretamaño proveniente de los chancadores terciarios para alimentar la línea terciaria. La Correa 7 alimenta el Cabezal Móvil que alimenta las tolvas terciarias.



<b>Equipo</b>	<b>Capacidad [ton/h]</b>
<b>Tolva Primaria</b>	2858
<b>Chancador 1°</b>	544
<b>Tolva Secundaria</b>	1906
<b>Chancador 2°</b>	1385
<b>Tolva Terciaria</b>	1043
<b>Chancador 3°</b>	483
<b>Correa 5</b>	11595
<b>Correa 7</b>	11595

**Tabla 3-1: Flujos Equipos Principales Línea Chancado – Caso Base.**

### **3.4.4 Infraestructura e instalaciones**

A priori se prevé que las locaciones con mayor incertidumbre, en relación a la promesa de productividad del match mina-planta provienen de la pala cable, que en la actualidad está operativa y llegada de camiones al chancador, la cual finaliza el circuito de carguío y transporte.

En cuanto a la línea de chancado, los principales lugares físicos considerados en el modelo son los siguientes:

- Tolvas de Alimentación a etapas de Chancado.
- Chancadores de Mandíbulas (Línea Primaria).
- Chancadores de Conos (Línea Secundaria y Terciaria).
- Harneros Grizzly.
- Harneros de banana
- Alimentadores de placas
- Alimentadores de correa
- Correas de Traspaso
- Correas transportadoras

A continuación se presentan los valores que caracterizan el mineral en Tablas 3-2, 3-3 y 3-4, mediante los cuales fue posible diseñar la planta, en base a parámetros metalúrgicos estudiados durante el año 2011.

Características	Tipo Mineral		
	ROM	Grueso	Fino
Gravedad aparente [t/m <sup>3</sup> ]	1,75	1,5	1,5
Humedad [%]	2	2	2
Ángulo reposo [°]	37	37	37
Ángulo sobrecarga [°]	20	20	20
Granulometría ROM [mm]	660	-	-
F80 [mm]	-	188	9,8
P80 [mm]	-	167	9,4

**Tabla 3-2: Caracterización del mineral para transporte en correas Planta Chancado.**

Características	Valor	Unidad
Capacidad Planta (Mineral Seco)	32	[Mton/año]
Gravedad Específica	2,5	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ap}$ ROM	1,75	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ap}$ CH° Fino	1,47	[t/m <sup>3</sup> ]
Humedad Max ROM	2	%
Índice de Abrasión $A_i$	0,2	
Índice de Trabajo $W_i$	18	[kWh/t <sub>c</sub> ]
P97	12,7	[mm]

**Tabla 3-3: Características del mineral.**

<b>Malla [mm]</b>	<b>Material Pasante Acumulado Curva Gruesa [%]</b>	<b>Material Pasante Acumulado Curva Fina [%]</b>
660	100	100
610	99	99
508	97	97
406	94	94
330	90	92
254	86	89
203	82	85
152	75	78
127	70	72
102	63	66
76,2	52	59
63,5	44	54
50,8	37	50
38,1	28	45
25,4	21	38
19,1	17	34
15,9	15	32
12,7	13	30
9,5	11	27
6,4	10	24
0,3	5	9
0,2	4	7
0,1	3	5

**Tabla 3-4: Curva granulométrica estimada.**

Sobre las correas, las velocidades máximas según el manual de operación entregado por el EPC responsables del diseño de Planta Chancado se muestran en Tabla 3-5.

<b>Correa</b>	<b>Vmax [m/s]</b>
De sacrificio	2,6
Resto de correas	5,1
Alimentador de correas	0,35
Alimentador de placas	0,17

**Tabla 3-5: Velocidades de diseño Correas Transportadoras Planta Chancado.**

### **3.4.5 Interferencias Operacionales estimadas**

Estas distribuciones de probabilidades fueron realizadas en base a un estudio anterior realizado en 2012. Al considerar esta forma de simular los tiempos como una base de datos válida, se asume entonces el supuesto de que cada equipo, si bien tiene condiciones de diseño y elaboración idénticas, tendrían distintas condiciones de operación dependiendo de la posición del equipo dentro de las tres líneas de chancado. Ejemplo de esto es la carga de la cabeza móvil de las etapas de chancado secundario y terciario, la cual además de preferir las tolvas operativas disponibles y operativas, buscan la tolva la más cercana a la descarga de las correas 2120-CV003-C01 (Correa Transportadora 3) y 2220-CV007-C01 (Correa de Alimentación) para el Chancado Secundario y Terciario, respectivamente.

Se especifican los tiempos de falla ocupados en el modelo con la media de los datos ocupados en minutos, como se muestra en Tabla 3-6.

<b>Equipo</b>	<b>MTBF (min)</b>	<b>MTTR (min)</b>
Chancador Primario (Ch 1°)	E(10080)	E(570)
Chancador Secundario (Ch 2°)	E(10080)	E(500)
Chancador Terciario (Ch 3°)	E(10080)	E(500)
Harnero Grizzly	E(10080)	E(57)
Harnero Banana Ch 2°	E(10080)	E(43)
Harnero Banana Ch 3°	E(10080)	E(50)
Correa 1	E(10080)	E(57)
Correa 2	E(10080)	E(57)
Correa 3	E(10080)	E(30)
Correa 4	E(10080)	E(30)
Correa 4A	E(10080)	E(30)
Correa 5	E(10080)	E(30)
Correa 6	E(10080)	E(30)
Correa 7	E(10080)	E(30)
Correa 10	E(10080)	E(30)
Alimentador de placas Ch 1°	E(10080)	E(50)
Alimentador de correa Ch 2°	E(10080)	E(50)
Alimentador de correa Ch 3°	E(10080)	E(50)

**Tabla 3-6: MTTR y MTBF usados para Simulación Dinámica - Planta Chancado**

**(Stewart, 2012; Encare, S1 2014 & Faúndez, 2015).**

Sin perjuicio de lo anterior, los tiempos de falla en el caso de chancadores, fueron aumentados para las tres líneas, producto de una entrevista con el Ingeniero Metalurgista Senior de la minera (Faúndez, 2015), el cual recomendó ocupar un valor mayor al entregado por el estudio anterior, el cual en orden de magnitud sería diez veces mayor al recomendado por TSG Consulting (Stewart, 2012).

A partir de un benchmarking realizado por Encare Benchmarking y Gestión durante el período correspondiente al Primer Semestre del 2014, se obtuvo como dato que para Minera Centinela Óxidos (antiguamente conocida como El Tesoro), se obtiene un MTTR de 570 min a la semana. Este dato fue actualizado en el modelo.

### **3.5 Criterios de Operación**

#### **3.5.1 Interferencias Operacionales**

Se detalla en las secciones siguientes las interferencias típicas que ocurren diariamente en una faena de este tipo. Por esto mismo, repercuten fuertemente en la productividad de una operación minera, por lo que son sustantivas en ser consideradas en el sistema en cuanto a la cantidad de camiones que alimentan mineral a la planta.

##### ***3.5.1.1 Interferencias por la colación***

Luego de observar un día normal de operación de la mina, se establece que entre las 12.00 y las 15.00 del turno A, y entre las 00.00 y 3.00 del turno B se produce una baja de camiones que alimentan a la planta de Chancado, producto de que los operadores van a su hora de colación, la cual es paulatina. Vale decir entre las 13 y 14 horas en el turno de día; y las 2 am.

##### ***3.5.1.2 Interferencias debido a cambio de turno***

Estas interferencias se realizan entre las 7.30 y 8.30 horas desde el turno B al A; y desde las 19.30 a 20.30 en el turno B, la cual afecta de forma sustancial la producción ya que los equipos mina tanto de las operaciones unitarias como de servicio no son utilizados.

### 3.5.1.3 Interferencias debido a tronadura

Esta interferencia se da durante una hora solamente, entre las 12 y las 15 horas, lo cual es independiente del desarrollo de tronaduras simultáneas, o incluso en distintos sectores de la mina. Por lo mismo, esta tronadura es siempre realizada durante el horario de colación, durante el turno día.

Estas interferencias provocan en el cambio de turno una nula disponibilidad de camiones para alimentar el chancado primero. Ahora bien, en el caso de que haya tronadura o colación, la disminución de camiones será paulatina, en donde se considerará que un tercio de los camiones estarán moviendo material.

Se muestran los hitos mencionados en los puntos anteriores en las Figuras 3-2 y 3-3, como sigue:

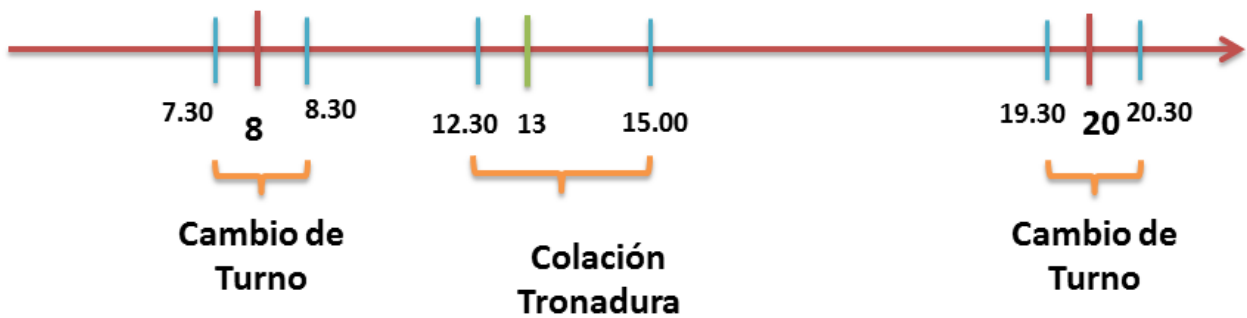


Figura 3-2: Interferencias Operaciones relevantes – Turno A.

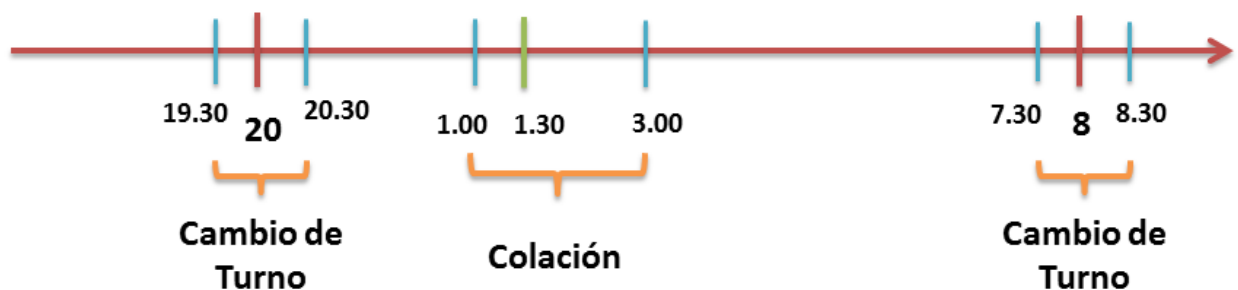
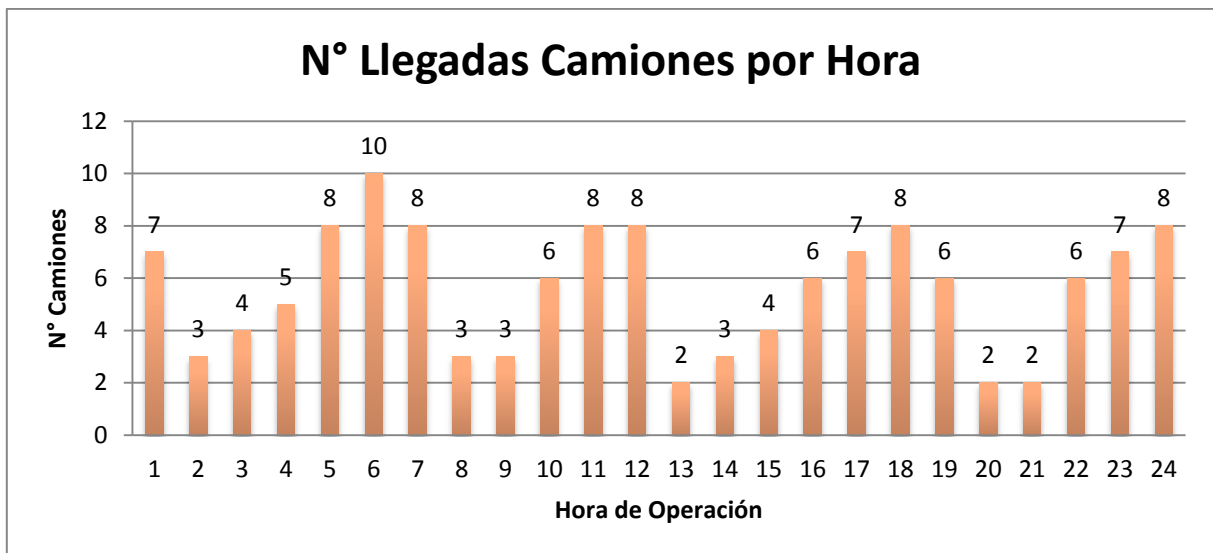


Figura 3-3: Interferencias Operaciones relevantes – Turno B.

### **3.6 Distribución probabilística asociada a Camiones**

La flota de camiones asciende a 12, de las cuales 7 a 8 se encuentran operativos. Además en fase de régimen existirá una flota de 14 camiones, y se estima que 12 estarán operativos. Por lo mismo, como el objetivo de este trabajo, es el de determinar la producción anual dentro de un año típico posterior a la fase del ramp-up, se determinó el siguiente criterio de operación, el cual será usado en la simulación e ingresado como distribución de probabilidades al software ProModel® por hora del día. Esta distribución según criterio del experto, se recomienda como exponencial, tal como fue usada para la simulación realizada por TSG Consulting en Agosto de 2012 (Stewart, 2012). Notar que se muestran la cantidad de camiones esperados para cada hora dentro cada hora en un día representativo de un turno. El total de estas camionadas diarias es de 63200 t. Este cálculo considera un camión con 360 t nominales de capacidad, lo que es menor a las 80 ktpd estimadas como ritmo de producción. En los posteriores estudios se analizará el cumplimiento o no de este valor, además de diferenciar el comportamiento de la producción diario y anual. A priori, estos valores variarán por las mantenciones programadas, no programadas y fallas de imprevistos considerados esencialmente en los equipos de la Planta de Chancado.





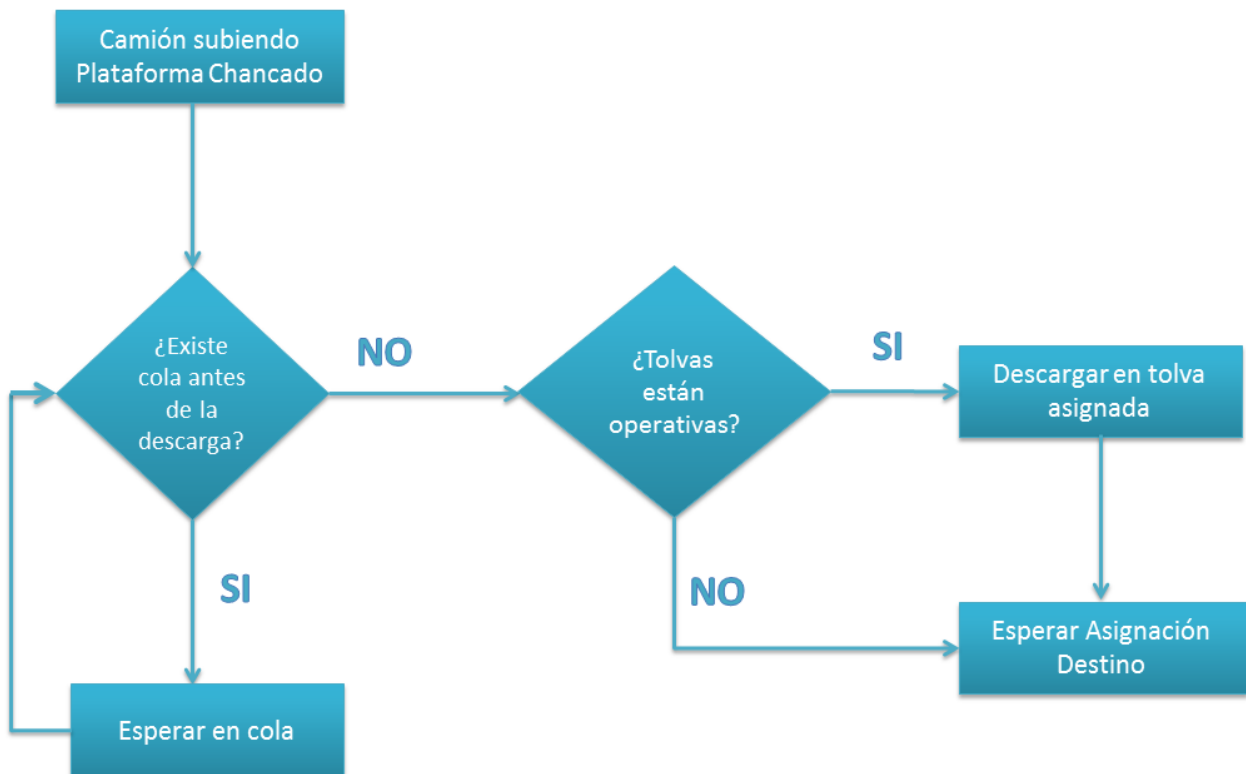
**Gráfico 3-1: Histograma de camiones que alimentan Planta Chancado.**

Los datos desplegados en el Gráfico 3-1 serán ajustados bajo una distribución probabilística por hora. Producto de esto, al considerar un comportamiento similar, para efectos de este estudio la cantidad operativa de camiones cumplen las siguientes interferencias:

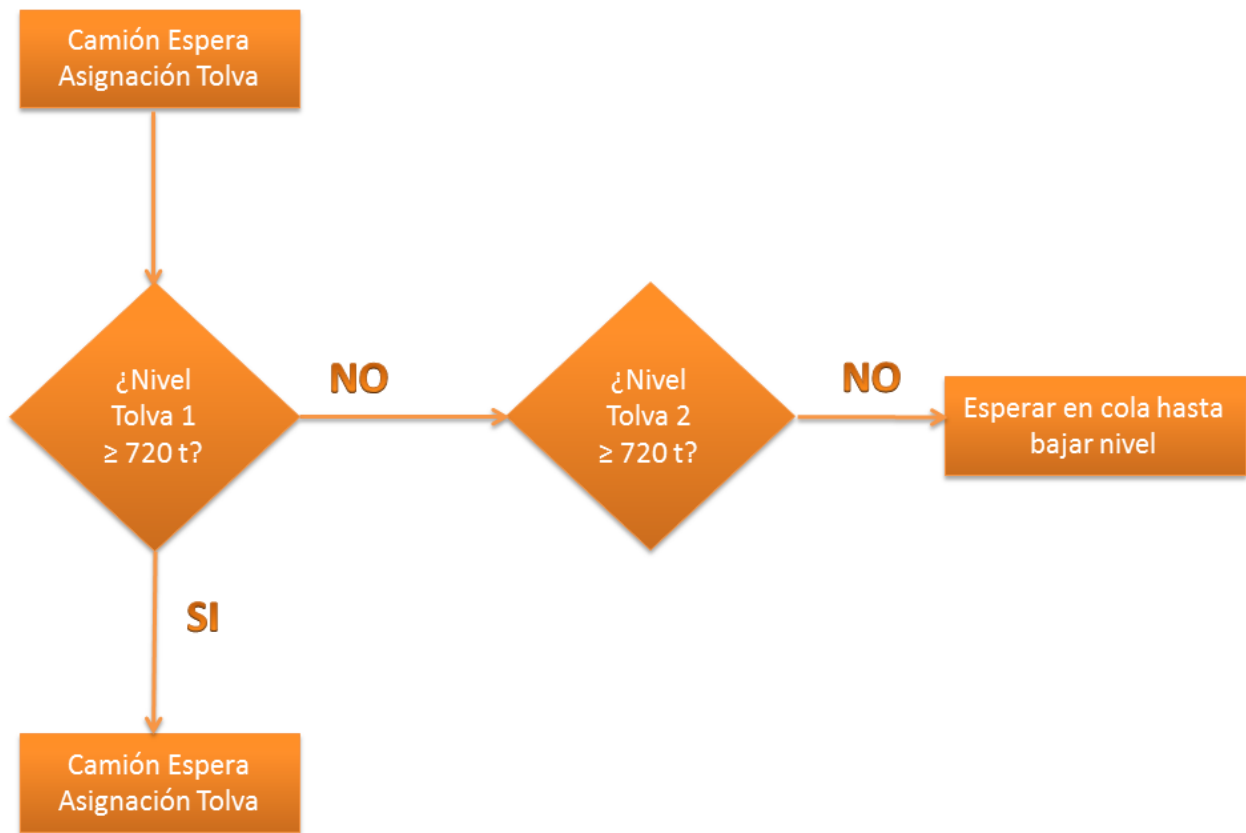
- Cambio de Turno: Durante la media hora anterior y posterior a la hora del cambio, la flota será de 0. Posterior a la primera hora del turno, y en la penúltima se considerará la mitad de la flota.
- Colación: Una hora antes y después de la hora peak, se considerará en la mitad de la flota. Ahora bien, durante los 60 min partes de la hora peak de operación se considerará sólo un tercio de la flota de camiones disponibles.
- Tronadura: Esta interferencia es realizada junto al turno de día (Turno A), en donde se considera un radio de seguridad de 500 m. Esto aplica tanto de detención de labores, como de movimientos de cualquier equipo. Es por esto que, bajo la experiencia vista en la mina, se determina que durante las tres horas consideradas de colación sólo un tercio de la flota estará operativa. La detención de los camiones no es

completa que la plataforma de Chancado es al menos 5 km retirada de las actuales labores de perforación y tronadura de material.

Si bien en la actualidad se utilizan ambas tolvas para la descarga en simultáneo, se estudiarán configuraciones de descarga buscando mejoras en la productividad. Para esto se pensó en los criterios de decisión de descarga para su codificación en el modelo.



**Figura 3-4: Criterio de Decisión – Cola Descarga Alimentación Chancado.**



**Figura 3-5: Criterio de Decisión – Tolva Descarga Alimentación Chancado.**

Como se aprecia en la Figura 3-4, se codificó en el modelo la forma que los camiones harán la cola para la descarga de mineral, donde se revisa si es que existe una cola para descargar. Además pregunta si la tolva está operativa, en cuyo caso negativo el despachador puede utilizar el CAEX para una labor distinta. Dicho esto, este criterio es necesario da paso para darle validez al criterio siguiente (Figura 3-5), ya que es un paso consecutivo que debe realizar el operador desde la Sala de Control del Chancado para permitirle o no descargar en las tolvas primarias, importando en definitiva que se encuentre operativa. Otro punto a considerar por el operador es que revisar el nivel de llenado de estas tolvas, que no deben superar la capacidad nominal de los CAEX CAT 797-A, lo que equivale a 720 t.

### **3.7 Variables de salida del modelo**

Los indicadores del comportamiento del modelo mediante las variables de salida definidas son medidos ya que reflejan el desempeño cuando se modifican los parámetros de entrada, y con ello los efectos producto de estos cambios.

Cuando finaliza una corrida, se entrega automáticamente una cantidad de datos asociados a los parámetros de salida mencionados en formato Microsoft Office Excel. Estos datos son entregados en forma automática en el caso de disponibilidad y utilización de equipos, como el caso de capacidad y flujos de mineral. Otros datos particulares, para un estudio más profundo de producción, fallas y productividad son posibles de calcularlos durante la corrida del modelo en paralelo, para un posterior despliegue de resultados, validación y verificación mediante comparación con criterio experto.

En particular, para el caso base las variables de salida entregadas por el modelo en ProModel® son las siguientes:

- Producción diaria.
- Producción anual.
- Variables de comportamiento para equipos de chancados, tales como:
  - Utilización
  - Disponibilidad
- Cantidad de camiones que alimentan a la línea primaria cada hora.

Los parámetros de producción son entregados a través de un reporte diario y mensual, los que informan los resultados en el siguiente nivel de detalle:

- Mineral descargado a sistema de aglomeración (t/h).
- Disponibilidad de los equipos principales y/o críticos (%).
- Utilización de los equipos principales y/o críticos (%).

Se debe recalcar que el producto final del circuito de Chancado corresponde al producto final, el cual alimenta a la etapa de aglomeración. Si bien esta operación unitaria es el cliente de la Planta estudiada, no es parte de los alcances de este estudio.

Además del caso base, se estudiarán escenarios, de manera de determinar sensibilidades asociadas a variables críticas del sistema. Estos escenarios se detallan como sigue:

- ❖ **Escenario A:** Cantidad de camiones que alimenten en simultáneo las tolvas del Chancador Primario.
- ❖ **Escenario B:** Alimentación a tolvas de la línea primaria sin interferencias operacionales en una operación a cielo abierto.
- ❖ **Escenario C:** Las líneas 1 del Chancado Primario y Secundario, las cuales poseen la primera prioridad para ser alimentada en cada etapa, se operan a su capacidad de emergencia, al igual que todos los equipos del chancado terciario. Esto con el objeto de estudiar si los equipos aguas abajo pueden soportar esta capacidad de procesamiento.

## **4. MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DISCRETOS**

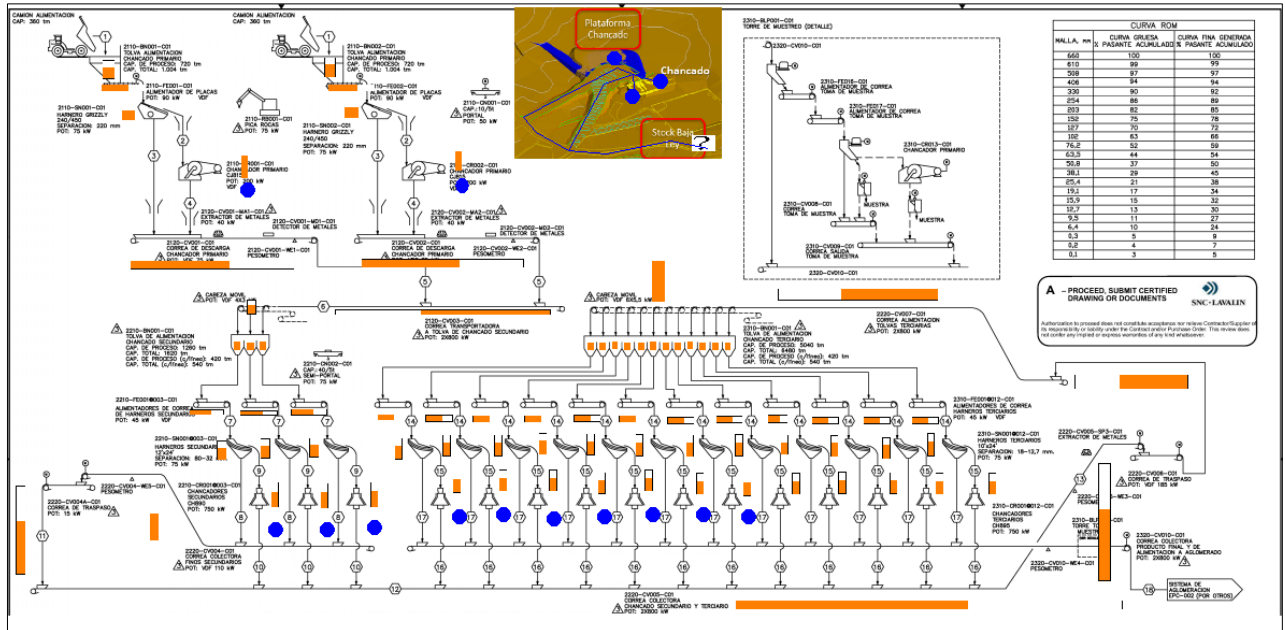
### **4.1 Elementos de la simulación**

El modelo a desarrollar se basa en el caso base que contempla un flujo de diseño procesado por la Planta de Chancado de 5716 t/h para un año calendario en fase de régimen.

El sistema pretende representar las principales actividades e interacciones entre estas. Esto se traduce en modelar el procesamiento del mineral, evaluando parámetros tales como la capacidad, velocidades de las correas y flujos de los equipos. El subsistema de chancado se debe alimentar

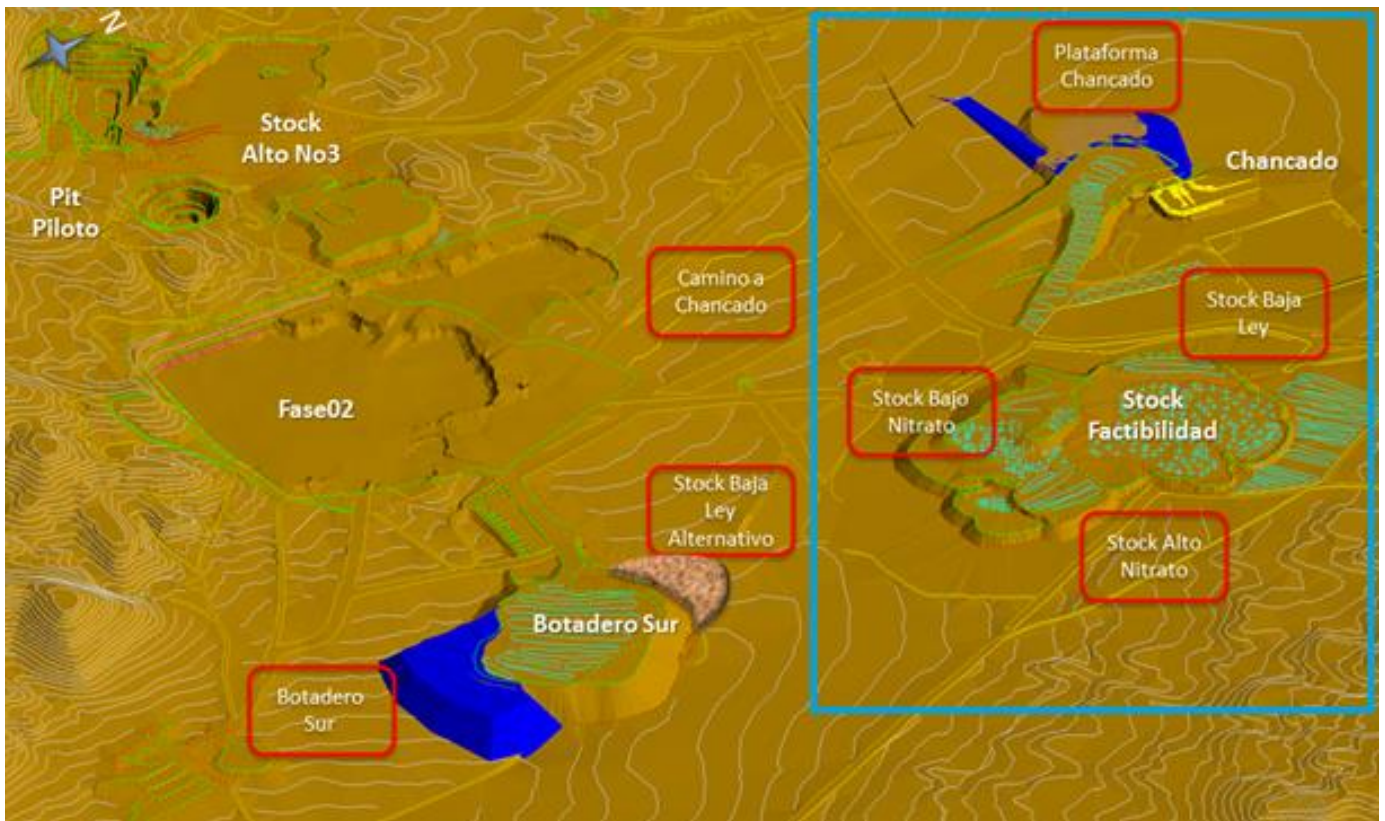
mediante el sistema de transporte por camiones de 360 t como capacidad nominal.

A modo de ilustración, se muestra el sistema desarrollado en ProModel®, en donde se puede ver tanto el límite de batería, como los supuestos de carguío y transporte, los cuales se traducen en una distribución de probabilidades que asemeja la alimentación de camiones al chancado.

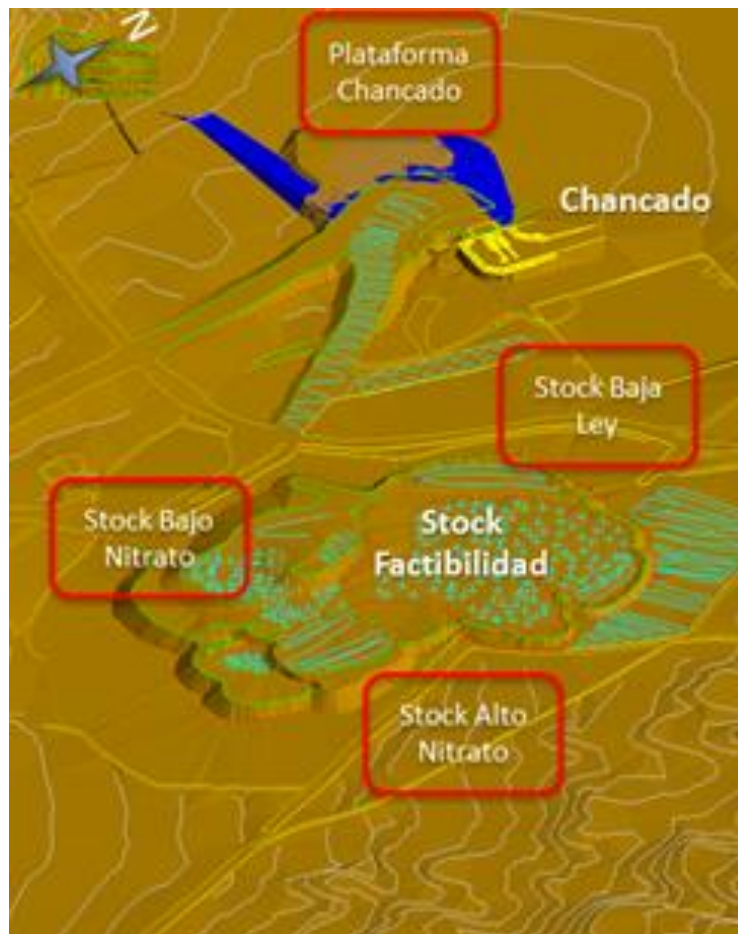


**Figura 4-1: Representación Sistema Planta Chancado Antucoya.**

En la Figura 4-2, se muestra la parte del desarrollo de la mina a Marzo de 2015 que se representó en el modelo. En la Figura 4-3 se muestra el subsistema Mina, el cual pretende describir la generación de camiones que responden a un tiempo de ciclo medido en la faena.



**Figura 4-2: Subsistema Mina – Representación Layout Mina Marzo 2015.**



**Figura 4-3: Subsistema Mina – Representación Modelo.**

Los siguientes subsistemas corresponden al Chancado Primario, Secundario y Terciario, los cuales son posibles ver en las Figuras 4-4, 4-5 y 4-6, respectivamente.



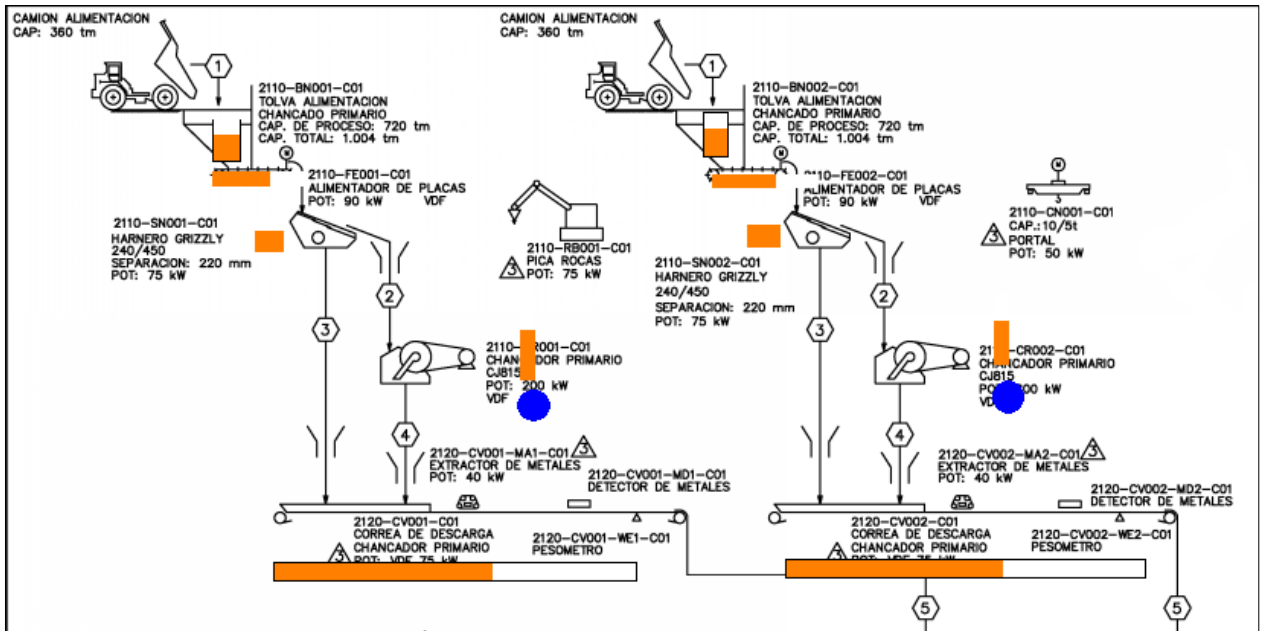


Figura 4-4: Subsistema Chancado Primario – Representación Modelo.

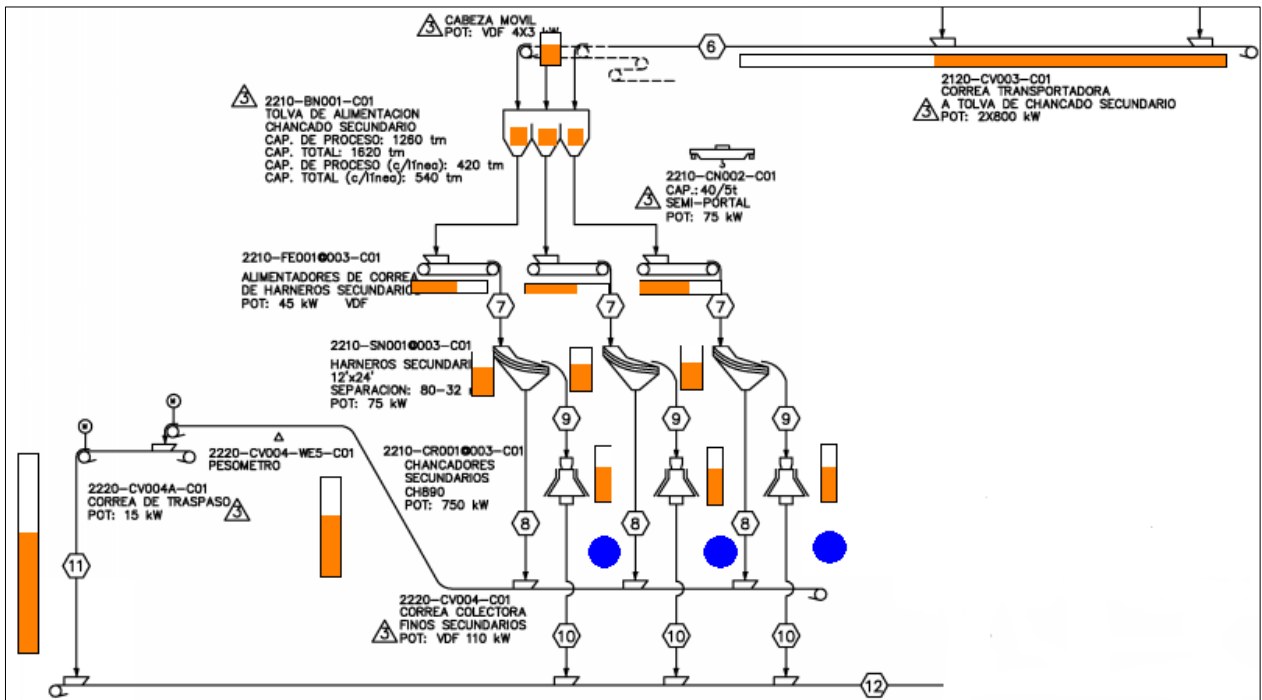
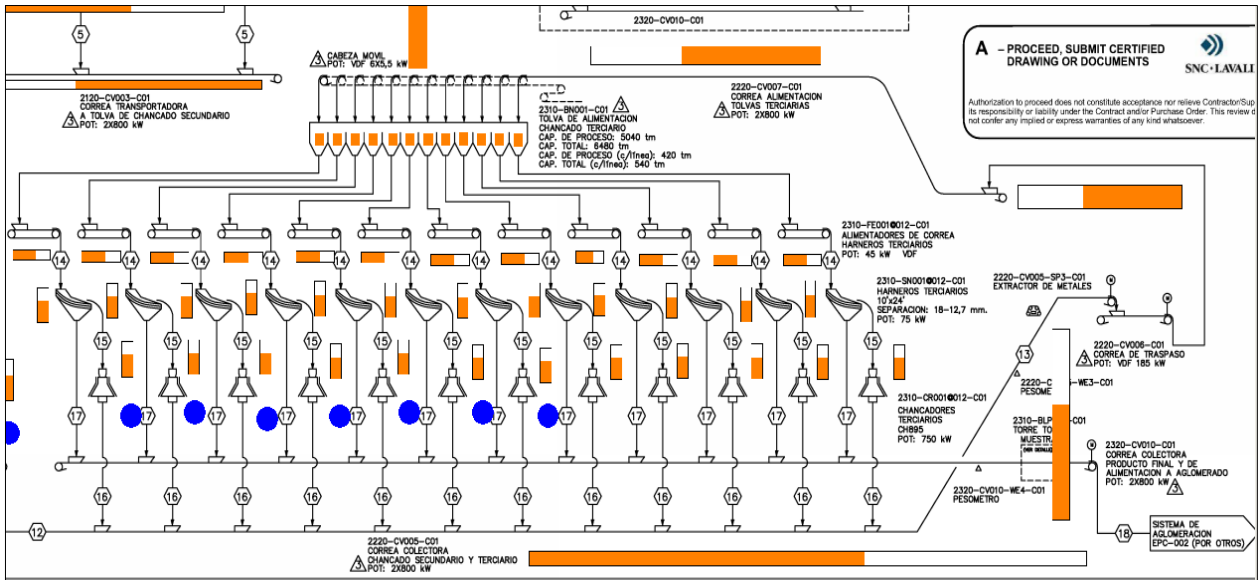


Figura 4-5: Subsistema Chancado Secundario – Representación Modelo.



**Figura 4-6: Subsistema Chancado Terciario – Representación Modelo.**

Explicado esto, el subsistema mina modeló un generador de camiones que simule la asignación de camiones desde frentes de carguío con mineral, como también desde los stocks presentes en la mina, los cuales son asignados a descargar en la plataforma de chancado. Para esto se utilizó un tiempo de ciclo promedio actual de la faena, además de tiempos de maniobras. En el caso de que exista una cola, se decidió modelar justo antes de la descarga. Los valores de tiempo utilizados fueron tomados en terreno, por lo que se detalla la media de estos datos, en la Tabla 4-1 a continuación.

Maniobra	Tiempo [min]
<b>Carga</b>	0,5
<b>Descarga</b>	0,5
<b>Subir Plataforma</b>	0,4
<b>Bajar Plataforma</b>	0,3
<b>Viaje Cargado</b>	12,25
<b>Viaje Descargado</b>	12,25
<b>TOTAL</b>	<b>26,2</b>

**Tabla 4-1: Ciclo Transporte Mineral a Chancado.**

Los elementos de simulación utilizados en el modelamiento de la faena, se detallan como sigue (Ver Anexos, Figura 10-1):

<b>Entidad</b>	Operario
<b>Recursos</b>	Camiones
<b>Locación Física</b>	Tolvas Alimentación
<b>Locación Flujos Chancado</b>	Equipos Chancado

**Tabla 4-2: Elementos principales de simulación.**

Se debe aclarar que las locaciones del chancado son los detallados como *TANKS*.

El uso de operario se explica por la facilidad del camión de retornar al sector del layout del sistema donde se asigne el camión al sector de Plataforma de Chancado, y por consecuencia, pueda retornar a este punto posterior a la descarga de mineral.

#### **4.1.2 Tiempo de simulación**

El tiempo en que los equipos están procesando mineral en forma efectiva, vale decir el tiempo efectivo se ve disminuido tanto por las mantenciones programadas como por los imprevistos, o fallas. Este último depende de una distribución de probabilidad asociado a un tiempo promedio de MTTR. Ahora bien, en el caso de las mantenciones programadas anuales, las cuales se detallan en la sección 3.4.1 suman un total de 30,5 días. Este tiempo, para efectos de este estudio, no ha sido considerado ya que no influye en el análisis de resultados tanto de producción como de tiempo efectivo de operación de los equipos del subsistema de chancado, al encontrarse detenida.

Dicho esto, el año calendario considera un tiempo operativo de 333,5 días simulados para obtener la producción anual, como se aprecia en la Figura 3-2.



Figura 4-7: Tiempo de corrida del modelo.

## 4.2 Implementación Caso Base

El desarrollo del caso base incluye el transporte de camiones, el cual considera el carácter cíclico de su comportamiento, como las interferencias operacionales detectadas en esta operación. No obstante, en el sistema modelado detalló la operación de descarga de camiones en las tolvas de alimentación, construida a partir del diseño de la plataforma de Chancado, como se explica en la Sección 3.5, y en las Figuras 3-4 y 3-5.

Estos criterios simulación fueron implementados como parte de la asignación de camiones que revisa las condiciones recién descritas. Notar que *Asignación Destino*, depende en la práctica del despachador, como del sistema experto aplicado en la operación, la que para este caso corresponde al software JIGSAW<sup>®</sup>. En cuanto a la Figura 4-3, se debe aclarar que las 720 t de mineral corresponden a dos descargas de camiones en la tolva.

## 4.3 Calibración del modelo

El modelo fue calibrado, en primera instancia, en base a la cantidad de descargas de CAEX con mineral necesarias para que el circuito de chancado procesara un tonelaje acorde a lo planificado en la etapa de régimen. Más en detalle, se revisó en las primeras versiones del sistema que la cantidad de

camionadas no fueran una variable crítica sobre el mineral esperado a procesar durante un año típico en la fase de régimen de la compañía estudiada.

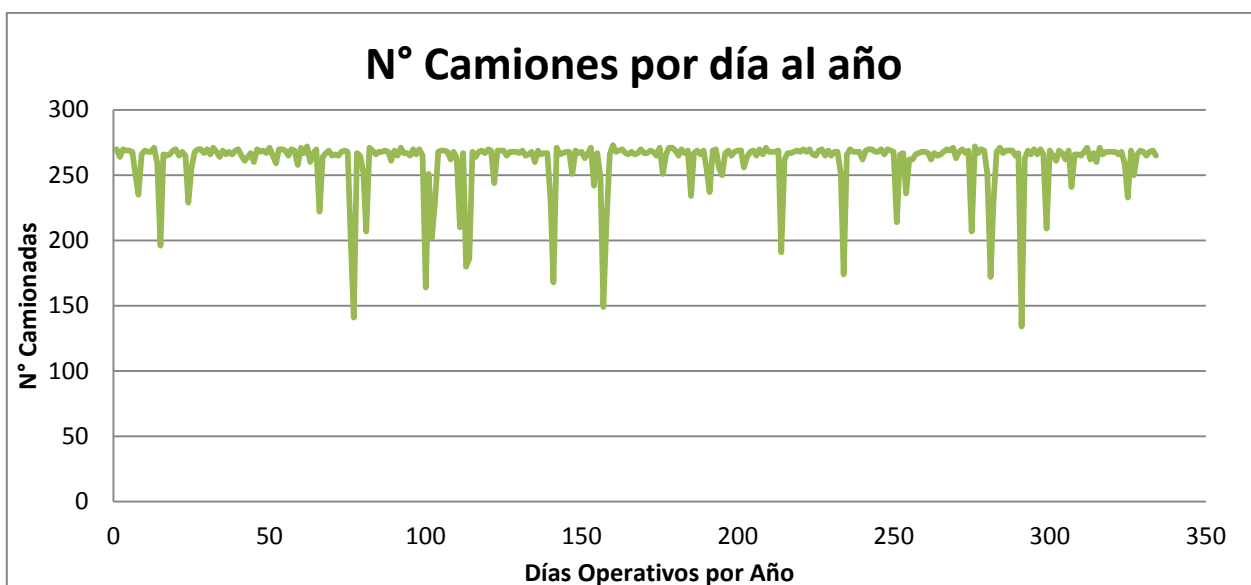
Luego de esto, se procedió a verificar si cada equipo de planta modelado se comporta según lo estipulado en la metodología de trabajo previa (Sección 3: Modelo conceptual) a la realización del modelo en ProModel®. Vale decir que reciba y traspase el mineral según los flujos calculados por la EPC Sandvik y aceptados por la Gerencia de Proyecto de ese entonces (Ver Anexos, Figura 11-1).

Finalmente se revisaron los resultados diarios promedios con un tiempo de simulación de tres meses de operación (evaluados en ktpd), de manera tal de validarlos con lo esperado según el ritmo de producción diseñado. Posterior a esto, se evaluó a un año calendario, cotejando en este caso la producción procesada en este horizonte de tiempo con la esperada según las condiciones iniciales de Diseño (Mtpa).

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 Resultados Caso Base**

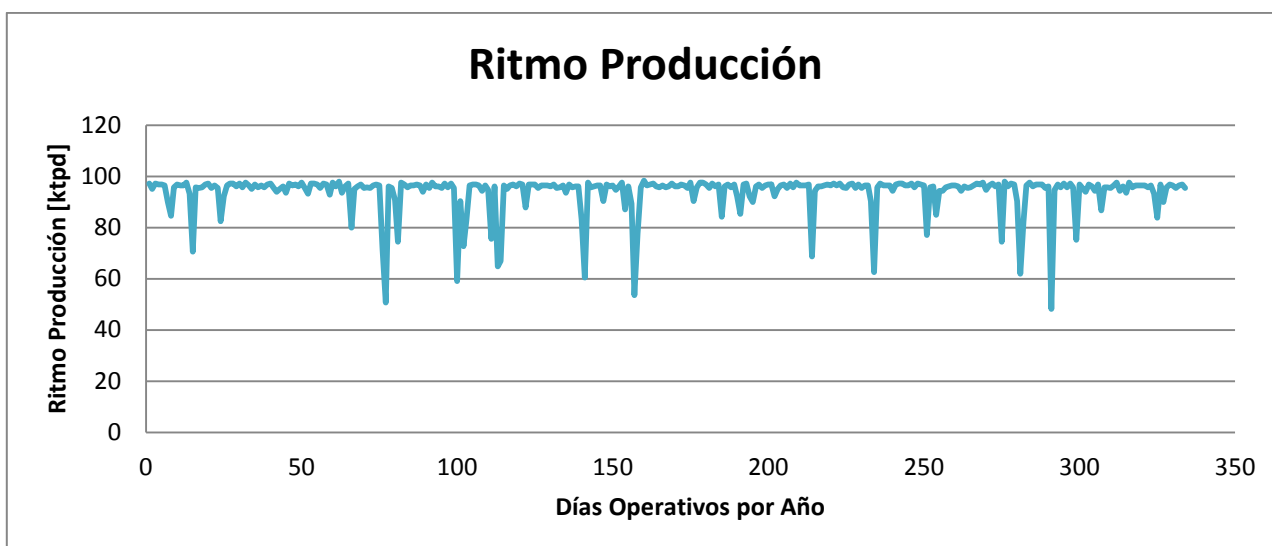
Para comprender el comportamiento de las camionadas que alimentan la tolva primaria de la Planta, se estudió la variabilidad de los datos simulados durante un año, tal como se muestra en el Gráfico 4-1. Se aprecia del gráfico que la alimentación reproduce las interferencias operacionales repercuten tanto en los camiones con mineral, como también las fallas producto del tiempo entre fallas y el tiempo de reparación de estos imprevistos. Recordar que para describir el comportamiento de estas interferencias, se utilizó una distribución exponencial de MTBF y MTTR descrita en la Sección 3.4.5.



**Gráfico 4-1: Cantidad de camiones con mineral a Planta Chancado.**

La variabilidad que arrojan estos resultados sugiere considerar mantenencias programadas más realistas con respecto a un criterio experto, desarrollos de estudios en base al levantamiento de base de datos del fenómeno que se pretende estudiar, tiempos de falla y entre fallas en este caso. Los resultados del Gráfico 4-1 a priori muestran una menor utilización de los equipos, al repercutir fuertemente en la cantidad de mineral procesado esperado.

A continuación se muestra la producción anual por día, considerando que los camiones con mineral transportan 360 t, que alimentan ambas líneas del chancado primario.



**Gráfico 4-2: Producción Caso Base – Etapa Régimen.**

La cantidad de mineral procesado, para el caso base analizado es de 92,13 kt diarios promedio, lo que equivale a 30,77 Mtpa.

### **5.3.1 Indicadores de Disponibilidad y Utilización**

Se determinaron indicadores para los equipos principales de Planta, ya que es una redundancia extraer la información para todos los equipos. Los equipos en que se extrajeron estos indicadores fueron los siguientes:

- Chancador Primario - Línea 1.
- Chancador Secundario - Línea 1.
- Chancador Secundario - Línea 3.
- Chancador Terciario - Línea 1.
- Chancador Terciario - Línea 12.
- Correa Colectora de Chancado Secundario y Terciario (Correa 5).
- Correa de Alimentación a Tolvas Terciarias (Correa 7).

Notar que se eligieron líneas dentro de cada etapa de chancado, para notar la utilización de los chancadores de líneas secundarias y terciarias, respectivamente.

<b>Equipo</b>	<b>Disponibilidad [%]</b>	<b>Utilización [%]</b>
<b>CH 1° - Línea 1</b>	73,6	60,2
<b>CH 2° - Línea 1</b>	75,4	63,5
<b>CH 2° - Línea 3</b>	70,8	58,8
<b>CH 3° - Línea 1</b>	75,4	63,5
<b>CH 3° - Línea 12</b>	67,6	54,1
<b>Correa 5</b>	70,2	61,5
<b>Correa 7</b>	70,2	61,4

**Tabla 5-1: Disponibilidad y Utilización Equipos Principales – Caso Base.**

En la Tabla 5-1 se obtuvieron indicadores esperados para equipos de chancado para la gran minería (Ver Sección 2.7.1, Tabla 2-1).

Los Chancadores Secundario y Terciario, ambos en la Línea 1 de su etapa, obtienen el mejor desempeño, como se aprecia en la Tabla 5-2. Esto significa que sólo dejan de procesar cuando ocurren eventos por fallas o imprevistos en la operación.

<b>Disponibilidad [%]</b>	<b>Utilización [%]</b>
75,4	63,5

**Tabla 5-2: Disponibilidad y Utilización máxima para equipos de chancado.**

Se observa además de que las líneas estudiadas tienen una utilización de un 58,8% para el caso de la Línea 3 de Chancado Secundario; y un 54,1% en el caso de la Línea 12 del Chancado Terciario, lo que corrobora que si bien la planta fue modelada pensando en llenar la primera línea de las etapas de reducción de tamaño, tal como se explicó en la Sección 3.1. Esto sostiene que los flujos de mineral procesado fueron considerados a capacidad de diseño.

Con respecto al número de corridas necesarias en este sistema, se debe recalcar que para lograr una representatividad aceptable, se debe resolver cuantas corridas sean necesarias para lograr que los resultados sean robustos. Finalmente se debe elegir la variable de respuesta sobre la cual se



realizará este análisis (Palma, 2014). Para este caso se eligió la producción anual como variable.

Ocupando los valores de las tres corridas realizadas se determina que a través de la fórmula que permite conocer la simulación terminante, con sólo una corrida basta para obtener la producción promedio diaria y anual pedida (Ver Anexos, Sección 10.2).

## 6. VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN

Se debe aclarar que el sistema actualmente, si bien ya pasó la etapa de puesta en marcha, aún no se encuentra en fase de régimen debido a interferencias operacionales producidas por la rotopala, por lo que no existen datos actuales que validen las variables de salidas de rendimiento (Flujo por equipo, Ritmo de Producción Diario y Anual), como las variables de desempeño (Disponibilidad, Utilización, MTTR).

### 6.1. Validación por partes

Sin perjuicio de lo anterior, es posible validar por partes este sistema. Esto quiere decir que se considerará tanto las variables de desempeño y comportamiento del caso base para equipos principales asociados a las tres etapas de conminución del mineral.

Equipo	Flujo Equipo [ton/h]	Flujo Corrida Caso Base [ton/h]	Δ %
<b>Tolva Primaria</b>	2858	1959	31,4
<b>Chancador 1°</b>	544	373	31,5
<b>Tolva Secundaria</b>	1906	1323	30,6
<b>Chancador 2°</b>	1385	962	30,5
<b>Tolva Terciaria</b>	1043	667	36,1
<b>Chancador 3°</b>	483	335	30,6
<b>Correa 5</b>	11595	7727	33,4
<b>Correa 7</b>	11595	7727	33,4

**Tabla 6-1: Flujos por equipos Diseño v/s Caso Base Modelo.**

En la Tabla 6-1, se muestran los flujos promedios de los equipos principales. Se aprecia que no cumplen lo calculado por el Caso Base, ya que los tiempos de falla repercuten en un menor flujo de mineral procesado en todos los equipos del circuito de Chancado.

<b>Equipo</b>	<b>MTTR Diseño (min)</b>	<b>MTTR Modelo (min)</b>	<b>Δ %</b>
<b>CH 1° - Línea 1</b>	570	538,3	5,6
<b>CH 2° - Línea 1</b>	500	366,5	26,7
<b>CH 2° - Línea 3</b>	500	392,1	21,6
<b>CH 3° - Línea 1</b>	500	373,6	25,3
<b>CH 3° - Línea 12</b>	500	547,8	9,6
<b>Correa 5</b>	30	30,4	1,4
<b>Correa 7</b>	30	37,2	23,9

**Tabla 6-2: Tiempos medios de falla Diseño v/s Caso Base Modelo.**

Sobre los tiempos de falla de la Tabla 6-2, se puede apreciar que son del orden los tiempos medios de diseño esperados. Recordar a esta variabilidad responde a que estos datos se ajustan a una distribución de probabilidades del tipo exponencial con el tiempo de falla como media semanal en minutos. Esto va en desmedro del tiempo operativo que repercute en una menor producción esperada, disponibilidad y utilización. Dicho esto, los resultados obtenidos se validan al ser valores de diseño y estimados similares.

Se recalcan los tiempos de reparación de las Correas 5 y 7, críticas para el procesamiento del material aguas abajo, tienen un valor similar al ocupado, el cual proviene del estudio previo realizado.

## **6.2 Verificación del sistema modelado**

En la codificación se puede verificar que la representación realizada en ProModel® se condice con lo dispuesto en el modelo conceptual elaborado.

A modo de ilustración, se mostrará el modelo cuando se encuentra operando (Figuras 6-1 y 6-2). Se hace notar que estas imágenes muestran que el modelo calcula el nivel de llenado de cada equipo (locación del tipo TANK en ProModel®), representándolo gráficamente durante la corrida.

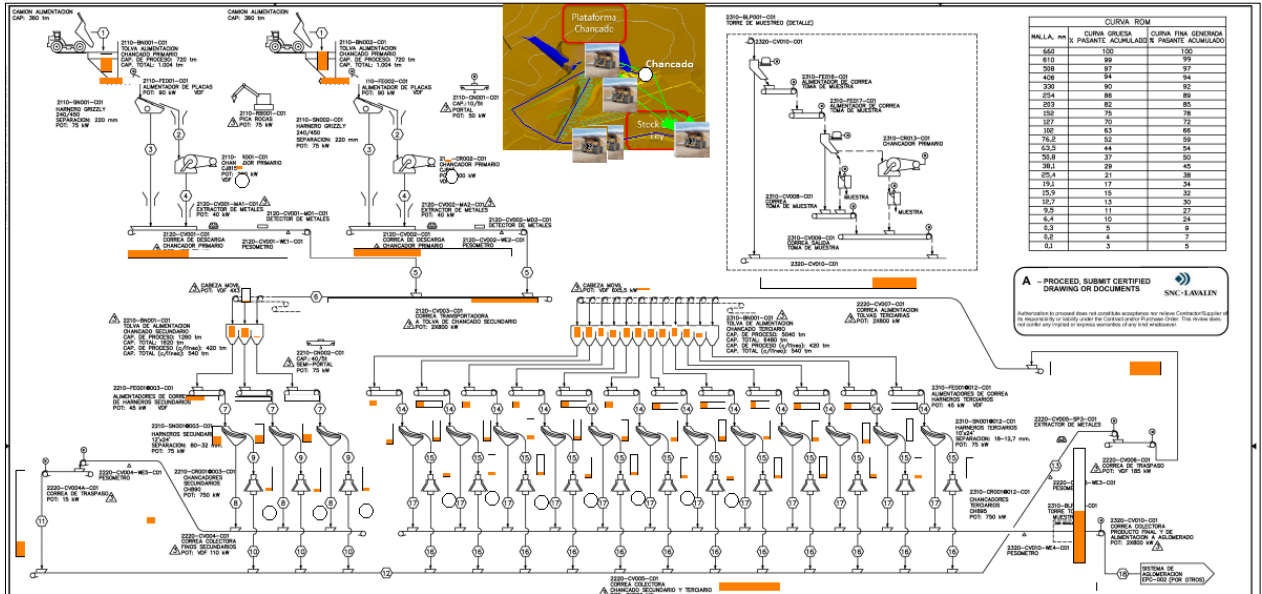


Figura 6-1: Representación Gráfica N° 1 – Nivel Llenado de equipos durante la corrida.

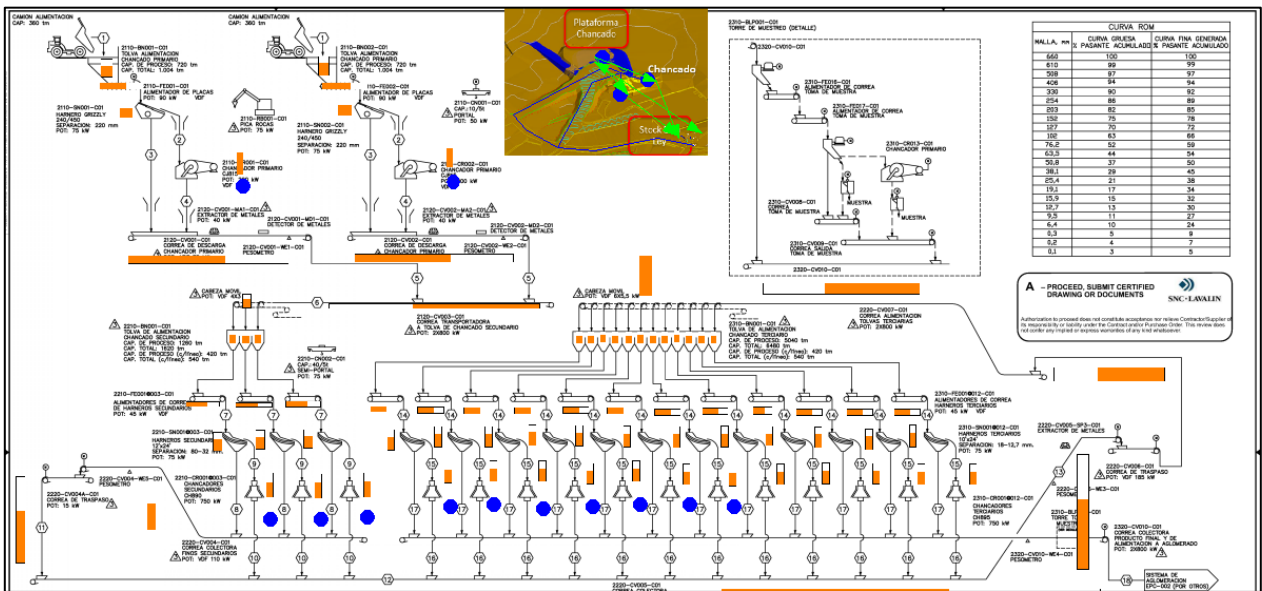


Figura 6-2: Representación Gráfica N°2 – Nivel Llenado de equipos durante la corrida.

A modo de explicación sobre la generación de camiones, éstos salen desde el stock de factibilidad, representado en la parte del layout donde se muestra un sector de la Topografía Mina correspondiente a Marzo de 2015 (Ver Figura 3-1), el cual fue elegido como el punto generador de camiones con mineral. Este stock se encuentra próximo a la Plataforma de Chancado, de manera que alimenta al chancado durante alguna interferencia operacional en la mina. Cuando estos camiones descargan, retornan al punto generador.

## 7. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Los escenarios se orientan a alimentar ambas líneas de chancado primario de manera simultánea, para estudiar un potencial aumento relevante de la producción bajo el supuesto de este escenario entrega un mejor comportamiento.

Para determinar sensibilidades en la producción, se configura un caso en el cual básicamente ciertas líneas de chancado soportan un mayor flujo producto de una mayor alimentación, para de esta manera compensar virtuales interferencias, las cuales ocurren en forma habitual en este tipo de faenas.

En la Tabla 7-1, se calculó la diferencia porcentual de los escenarios 2 y 3 con respecto al caso base.

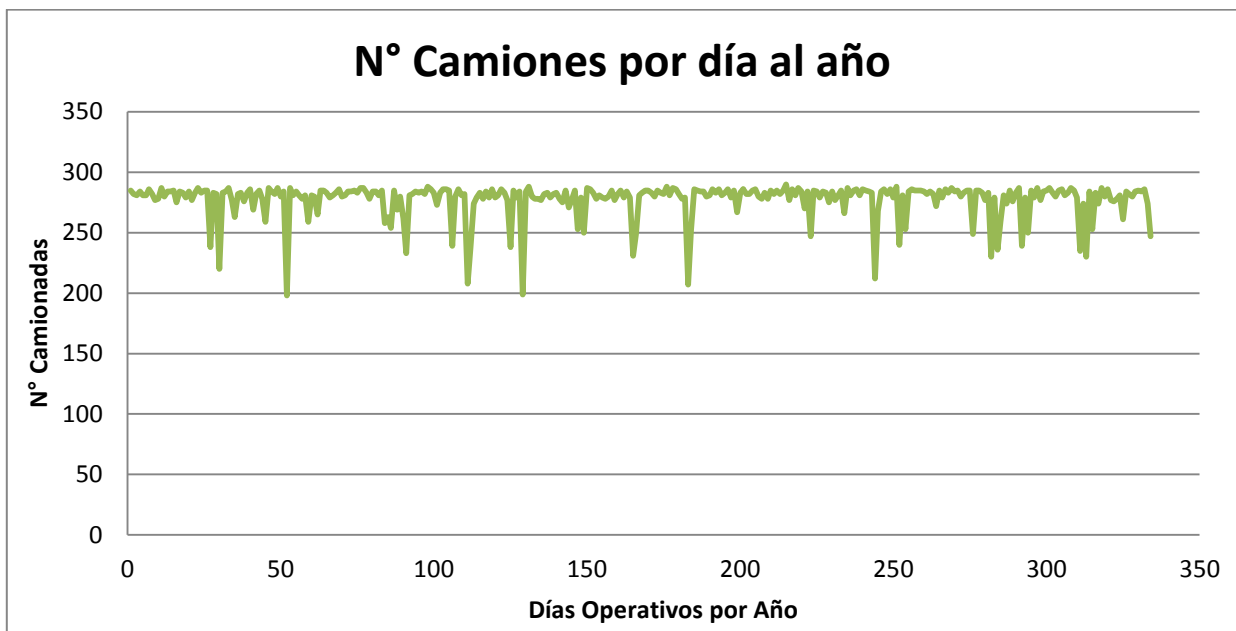
<b>Variable</b>	<b>Escenario A [%]</b>	<b>Escenario B [%]</b>
<b>Dif. Producción</b>	0,08	0,2

**Tabla 7-1: Diferencia Porcentual de Escenarios A y B – Producción Anual estimada.**

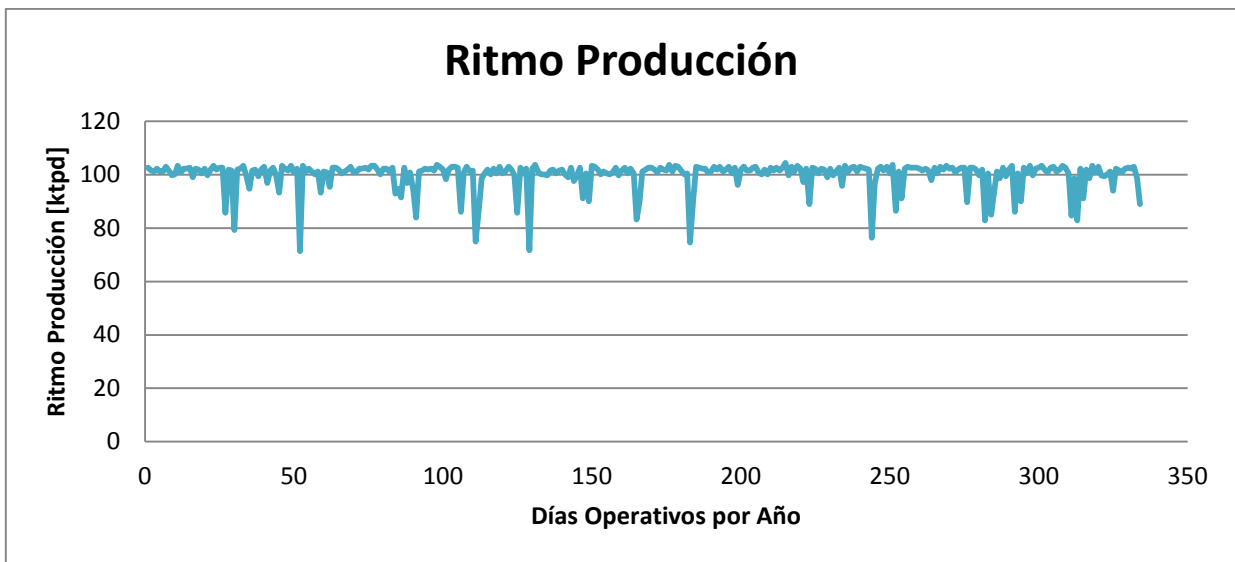
Con estos resultados, es claro ver que no existen diferencias significativas en la producción. Como no se observan variaciones relevantes al cambiar criterios de decisión en la descarga de las tolvas primarias, se infiere que se

está estudiando el mismo escenario, por ende se pueden considerar como dos corridas más del caso base.

Producto de estos resultados, se realizó un tercer escenario, que considera un flujo de 3215 t/h en la Línea 2 del Chancado Primario, el cual corresponde al supuesto de diseño bajo una línea; 2485 t/h y 1046 t/h en las líneas secundarias y terciarias respectivamente. En esta última se considera además la capacidad de emergencia de los alimentadores de correa, y la capacidad máxima de los chancadores terciarios, que corresponde a 490 t/h. A partir de estos supuestos, se obtienen los Gráficos 7-1 y 7-2, los cuales muestran la producción ligada al número de descarga de camiones.



**Gráfico 7-1: Camionadas Escenario C – Etapa Régimen.**



**Gráfico 7-2: Ritmo Producción Escenario C – Etapa Régimen.**

El ritmo de producción diario y anual bajo esta configuración se detalla en Tabla 7-2.

<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
98,08	<b>ktpd</b>
32,76	<b>Mtpa</b>

**Tabla 7-2: Producción Escenario C – Fase Régimen.**

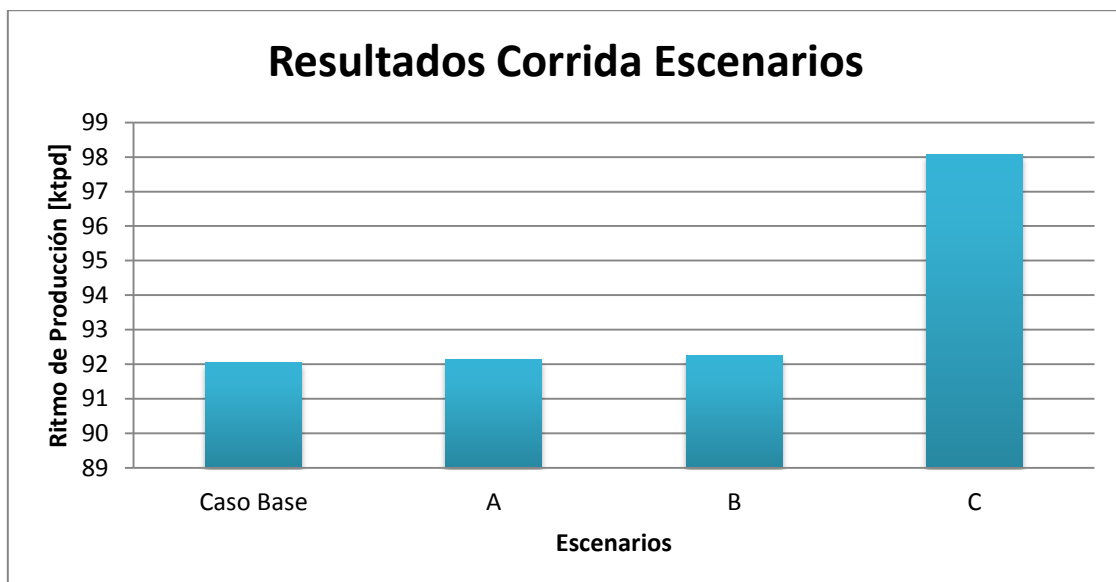
Esto supone un aumento en la cantidad de mineral procesado. Sin embargo, este escenario muestra que dos camiones en simultáneo no es determinante en el cumplimiento de los 32 Mtpa esperados para un año en régimen, si no que más confirma que la capacidad de los equipos es sumamente relevante. Dicho de otra forma, el dimensionamiento de las capacidades de los equipos es menor debido a que los valores de las variables de comportamiento supuestos (Disponibilidad, Utilización, MTTR, MTBF) son menores a la realidad de una operación minera de este tipo.

Los indicadores de disponibilidad y utilización no variaron sustancialmente. Sin embargo, la línea 12 del chancador terciario no se utilizó, ya que se supuso en este escenario que cada línea de esta etapa procesa un mayor flujo de mineral. Esto último quiere decir que las once líneas terciarias anteriores son suficientes para procesar el material.

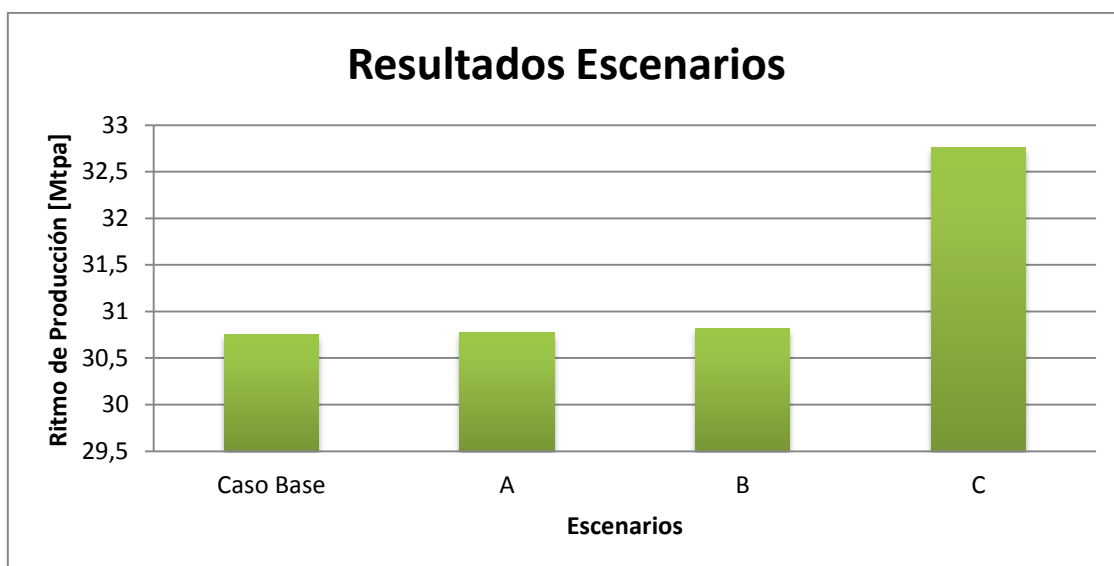
Equipo	Disponibilidad [%]	Utilización [%]
<b>CH 1° - Línea 1</b>	73,2	60,9
<b>CH 2° - Línea 1</b>	75,6	63,5
<b>CH 2° - Línea 3</b>	36,7	25,4
<b>CH 3° - Línea 1</b>	76,2	63,5
<b>CH 3° - Línea 12</b>	13,5	0,0
<b>Correa 5</b>	70,4	61,6
<b>Correa 7</b>	67,3	58,5

**Tabla 7-3: Disponibilidad y Utilización Equipos Principales – Escenario C.**

A modo de resumen, se muestra la producción promedio diaria y anual, estimada para el caso base, y los tres escenarios (detallados en la Sección 3.7) en los Gráficos 7-3 y 7-4 respectivamente, como sigue:



**Gráfico 7-3: Resumen Análisis Escenarios – Producción Diaria estimada**



**Gráfico 7-4: Resumen Análisis Escenarios – Producción Anual estimada.**

Además, en las Tablas 7-4 y 7-5 se muestran las estadísticas básicas de todas las corridas realizadas, para la cantidad de camionadas descargadas diarias y el ritmo de producción promedio (en ktpd) durante el tiempo de simulación estipulado.

<b>N° CAEX/día</b>	<b>Caso Base</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Media</b>	261	261	261	278
<b>Mínimo</b>	133	134	135	198
<b>Máximo</b>	271	271	272	288
<b>Desv. Estándar</b>	22	21	23	15

**Tabla 7-4: Estadísticas básicas corridas – N° camiones por año (N° CAEX/día).**

<b>ktpd</b>	<b>Caso Base</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Media</b>	92,13	92,05	92,25	98,78
<b>Mínimo</b>	47,9	48,2	48,6	71,3
<b>Máximo</b>	97,5	97,5	97,9	103,6
<b>Desv. Estándar</b>	7,9	7,5	8,4	5,3

**Tabla 7-5: Estadísticas básicas corridas – Ritmo de producción (ktpd).**



## 7.1 Análisis económico del escenario

Con el fin de comparar los escenarios de la productividad anual desde un punto de vista económico, se calcula el beneficio marginal (BMg) asociado al aumento de la producción anual mediante la fórmula detallada a continuación.

$$BMg \left[ \frac{US\$}{año} \right] = M \left[ \frac{Mt}{año} \right] * \left( Ley [\%] * R [\%] * \left( P_{Cu} \left[ \frac{US\$}{lb} \right] - C_{VyR} \left[ \frac{US\$}{lb} \right] \right) * \frac{2204,6 [lb]}{[t]} - C_{Mina} \left[ \frac{US\$}{t} \right] C_{Planta} \left[ \frac{US\$}{t} \right] \right)$$

Donde:

- *M*: Toneladas extras por año del escenario
- *P<sub>Cu</sub>*: Precio venta de la libra de Cu
- *C<sub>VyR</sub>*: Costo de venta y refinación
- *C<sub>Mina</sub>*: Costo Mina
- *C<sub>Planta</sub>*: Costo Planta

**Ecuación 7-1: Beneficio Diferencial - Escenario 3.**

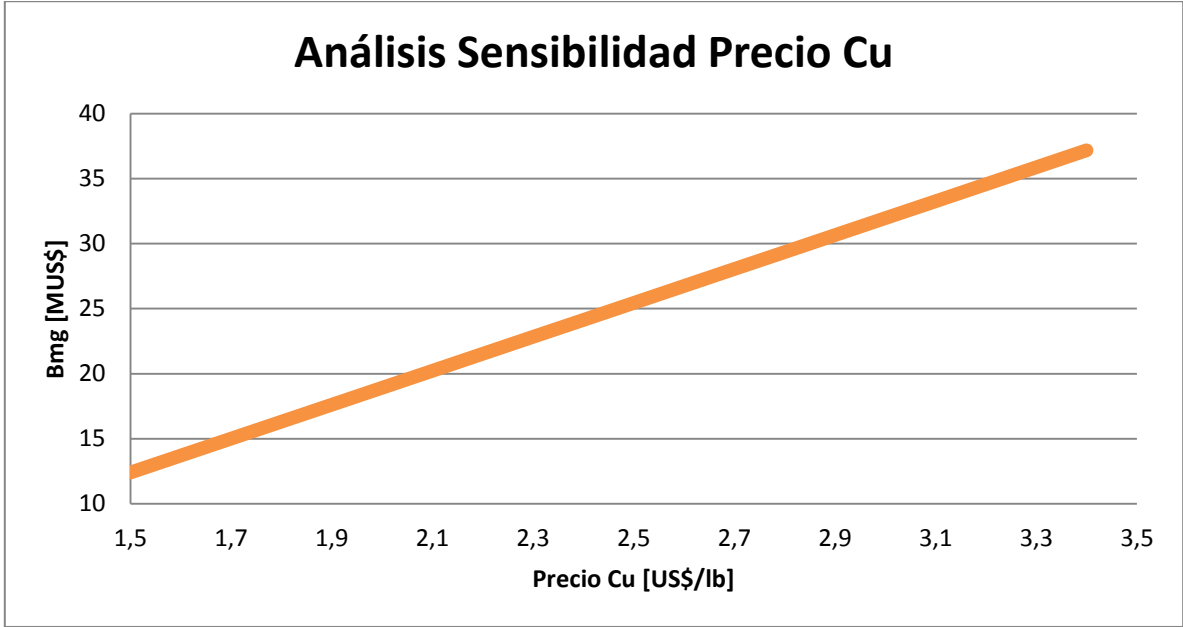
Se evalúa este beneficio con los siguientes datos para el escenario mostrado, según lo descrito en Tabla 7-4:

Parámetro	Valor	Unidad
<i>M</i>	1,99	<b>Mtpa</b>
<i>P<sub>cu</sub></i>	2,5	<b>US\$/lb</b>
<i>C<sub>VyR</sub></i>	0,4	<b>US\$/lb</b>
<i>C<sub>Mina</sub></i>	1,17	<b>US\$/t</b>
<i>C<sub>Planta</sub></i>	0,76	<b>US\$/t</b>

**Tabla 7-6: Datos Evaluación Beneficio Marginal.**

Se hace notar que se evaluó con el precio de Cu en etapa de factibilidad del proyecto, el cual en ese entonces era de 2,5 US\$/lb. Lo dicho

el punto anterior, junto a los costos actuales repercute en un probable rechazo de la realización del proyecto. Considerados estos indicadores y supuestos, el beneficio marginal de la producción anual bajo este escenario asciende a 27,4 MUS\$. Considerando el precio promedio de la Bolsa de Metales de Londres de enero y febrero de este año (227,6 cUS\$/lb), este valor no supera los 24,4 MUS\$, importante diferencia la cual pone de manifiesto la relevancia de alcanzar un ritmo de producción del orden de los 98 ktpd, que le da a la operación holgura de material por interferencias, fallas de equipos y mejoras en los indicadores de las variables de comportamiento. Para estudiar con más detalle el impacto de este beneficio marginal, se estudia la sensibilidad que tiene este cálculo con la variación del precio del Cu, entre 1,5 y 3,4 [US\$/lb], como se muestra en el Gráfico 7-5.



**Gráfico 7-5: Análisis Sensibilidad - Precio Cu.**

Se aprecia en el Gráfico 7.5 que el beneficio diferencia varías desde los 12,4 a los 37,2 MUS\$, por lo que una virtual expansión de la capacidad productiva de la Planta completa (Área Seca y Húmeda) depende no sólo de

los costos por una mayor producción e inversión por la expansión, sino que además del ciclo del commodity que se esté evaluando.

Este escenario con una mayor capacidad de mineral procesado es viable de realizar mezclando material grueso y fino, como se describe en la Sección 3.2.1, ya que aumenta el factor de llenado del chancado, y en consecuencia su eficiencia.

Esto muestra, por un lado, nuevamente que las mantenciones no programadas fueron subestimadas por el estudio anterior, como por la Planificación de Operaciones Planta de la compañía; y además pone de manifiesto que un mayor flujo logra un mejor desempeño en cuanto al mineral procesado, sin que esto se traduzca en ocupar todos los equipos del chancado a capacidad de emergencia.

## **8. ANÁLISIS CRÍTICO DE RESULTADOS**

La resolución del caso base elaborado en la etapa de diseño considera un caso base, que deja de lado los escenarios críticos típicos de toda operación de una planta de procesamiento, en particular sobre cambios en la granulometría. Una granulometría muy gruesa se traduce en un mayor desgaste de los aceros los equipos de reducción de tamaño, menor factor de llenado de éstos y finalmente un mayor probabilidad de interferencias operacionales. En consecuencia, una probable menor producción de mineral procesado. En cambio, una granulometría fina se traduce en un mayor porcentaje de bajo tamaño que no será chancado, pudiendo sobre-estimarse el flujo de material que pasa por los chancadores.

Dicho esto, cabe recordar que el mandante de este estudio no pidió el análisis de estos escenarios, lo cual queda plasmado claramente en los alcances de este trabajo (Ver Sección 1.3). Sobre la ley, se aseguran mezclas en la alimentación, lo cual no afecta mayores cambios en la ley de mineral (Ver Sección 3.2.1).

Ahora bien, si se desea realizar una adaptación a algún sistema de similares condiciones, en primer lugar se deben modificar las cantidades de equipos y capacidades máximas de estos equipos. Además de esto, se requiere modificar el flujo de equipos en t/min para cada traspaso de material dentro de la planta a modelar bajo diferentes escenarios de alimentación de mineral. Esto último sugiere que cada flujo pueda ser ajustado por datos reales de faena, mediante una distribución de probabilidades que refleje los cambios de granulometría, ley e incluso tonelaje.

En el caso particular de este trabajo, se pueden ingresar flujos de minerales fijos, que reflejen escenarios críticos, tales como:

- ❖ Granulometría gruesa
- ❖ Granulometría fina
- ❖ Exceso de sulfatos
- ❖ Alta concentración de nitratos
- ❖ Baja concentración de nitratos
- ❖ Alimentación a capacidad de emergencia de la planta.

Inclusive se pueden entregar en las sub-rutinas de traspaso flujos de minerales variables, donde se detallen el mínimo, máximo y media de las bases de datos ocupadas.

Dicho esto, su aplicabilidad a otros estudios semejantes es factible de realizar, en especial las que consideren chancado primario, secundario y terciario, en la medida que se tomen en cuenta las adaptaciones necesarias descritas en la Sección 2.9 y en los párrafos anteriores de este capítulo.

## **9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El estudio realizado se inició realizando un levantamiento de datos, parámetros, variables y entrevistas con personal de la compañía relacionado con lo diseñado en la fase de Ingeniería Básica, enfocado a la Planta de Chancado, como con personal de Operaciones previa a la Puesta en Marcha de este proyecto. Luego se realizó un modelo de simulación dinámica de eventos discretos que logró emular la realidad del sistema en estudio, el cual fue validado y calibrado con la información que se tiene del diseño del sistema real. A partir de este modelo base, se realizaron nuevos escenarios agregando cambios de capacidad, lo cual permite cuantificar el impacto de estos. Finalmente se realizó un análisis de resultados que permitió llegar a las conclusiones mostradas a continuación.

### **9.1 Conclusiones Generales**

La incertidumbre operacional tiene impacto en los resultados de la operación. La principal fuente proviene de las variables de comportamiento relacionadas con interferencias operacionales. Esta variabilidad debe ser estudiada mediante levantamientos de datos actuales de la operación, ya que es gravitante en el cumplimiento la producción. Su estudio en los equipos mina influye de igual manera en la cantidad y tipo de ciclos productivos por equipo de carga, frente de carga y destino.

El material procesado promedio depende de saber con mayor certeza cuanto tiempo los equipos de la Planta pueden soportar su operación a capacidades de diseño y de emergencia, lo cual los fabricantes, en este caso Sandvik, entregan en sus especificaciones técnicas. En cuanto al modelo desarrollado el cual está relacionado el supuesto del comportamiento cíclico de equipos de transporte con mineral, se obtiene un 3,91% menos en comparación a los valores estimados en el diseño de planta, relacionado principalmente con las fallas imprevistas de los equipos de chancado. El

obtener como resultado un total de 90,77 Mtpa, es interpretado como un valor esperado, el cual se explica por las interferencias operacionales consideradas, y especialmente los tiempos de fallas de los equipos, lo cual muestra que a medida que la duración de las detenciones en estudio son menores, la productividad diaria aumenta. Esto motiva a continuar con el análisis de la variación de las detenciones a través de cambios en políticas operacionales y así medir la variación en la productividad diaria del sistema.

Se desea recalcar que la productividad instantánea de la faena estudiada es una variable temporal que permitiría identificar ineficiencias a lo largo del día a través de la identificación de la correlación con variables no consideradas en este estudio por falta de bases de datos. Un ejemplo de lo anterior puede ser un análisis exhaustivo entre los distintos tipos de detenciones (programadas y no programadas) presentes y la productividad instantánea a lo largo del día. Los mismos datos extras en las detenciones servirían para realizar una calibración más completa sobre el modelo de simulación, ya que al agregar información sería posible que el modelo se comportara acorde a éstas.

El uso de modelos de simulación dinámica de eventos discretos permite probar políticas operacionales que no son posibles de probar directamente en el sistema real, ya que los impactos económicos que se tiene al alterar la operación misma son muy grandes. Aprovechando esta ventaja es que se definen posibles escenarios de cambio que miden cuantitativamente su impacto, teniendo en cuenta que es una simplificación de la realidad, pero que a pesar de ello logra entregar resultados con un alto grado de representatividad. Esto se respalda por la calibración hecha a través del escenario en que ciertas líneas del chancado fueron dimensionadas entre capacidad de diseño y emergencia.

Sin perjuicio de lo anterior, se debe recalcar que en la práctica no es conveniente de implementar como ritmos de producciones promedio esperadas, si no que más bien como un valor promedio peak, el cual la

planta puede soportar como capacidad de emergencia en situaciones operacionales periódicas y no recurrentes. Por otra parte, también se realiza un número de réplicas que respaldan esta representatividad de forma estadística, ya que se tienen variaciones bajo el 0,2% para 3 corridas del mismo escenario.

Finalmente se muestra el beneficio operacional y económico de la variación en las capacidades de los equipos en las etapas del circuito de chancado que se detallan en el Capítulo 7, bajo el supuesto de una mejor estimación en su dimensionamiento, podría dar holgura a la compañía minera en casos de interferencias operaciones importantes. El beneficio marginal para el precio de Cu evaluado en etapa de factibilidad (2,5 US\$/lb), asciende a los 27,4 MUS\$.

## **9.2 Recomendaciones**

Un estudio con valores actuales de la operación en su fase de puesta en marcha, tales como flujos procesados de mineral medidos, valores de tiempo de ciclo de camiones, cantidad de camiones por turno o diarios que alimenten las tolvas de alimentación, flota actual operativa de camiones, sobre todo tiempos actuales entre fallas y de reparación (MTBF y MTTR) disminuiría sustantivamente la incertidumbre, por lo que fuertemente recomendable calibrar este modelo a esos valores.

La aplicabilidad de esta simulación para otros estudios semejantes es factible de realizar, en especial las que consideren chancado primario, secundario y terciario, en la medida que se tomen en cuenta las adaptaciones necesarias para su uso.

Por lo dicho en el punto anterior, es claro recomendar un estudio con datos actuales de la operación, además de ampliar el límite de batería del sistema considerando las operaciones unitarias aguas abajo, especialmente en las pilas de lixiviación, para de esta manera se estudien variables críticas. De esta manera, se puede tomar decisiones operacionales relevantes, tales

como utilizar el chancado a una capacidad cercana a la emergencia en ciertos momentos de la operación, aumentar líneas de procesamiento. Sobre el proceso aguas abajo, se recomienda considerar el impacto de la operación de la rotopala en la producción de fino recuperado; y estimar la cantidad de camiones para transportar el mineral de forma eficiente bajo las metas esperadas según la planificación del área de Operaciones Mina y Planta de Minera Antucoya Limitada.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS POR ORDEN DE APARICIÓN:

1. **Estudio de Factibilidad Mina - Proyecto Antucoya.** Noviembre 2011. NCL Ingeniería y Construcción Ltda,.
2. **YARMUCH J. L. & ORTIZ J. Abril 2012.** *Uso de la Simulación Dinámica de Eventos Discretos para el modelo del sistema de Carguío y Transporte de Mina Chuquicamata.*
3. **YARMUCH J. L. & ORTIZ J. Junio 2012.** *Mine simulation of an open pit mine material handling system using discrete events,* Conferencia Internacional de Innovación en Operaciones Mineras (DIMIN 2012).
4. **HALL B. E. 2000.** *Simulation Modeling of Mining Systems.* MassMin 2000, p. 83-95.
5. **BROWN D. & JONES G. 1989.** *Computer simulation of ore transport and handling operations.* Mt. Newman Mining Company. Port Hedland - Australia Oeste.
6. **FELICÍSIMO A. 1994.** *Modelos digitales del terreno, Capítulo 1: Conceptos básicos, modelos y simulación, p. 13-28.* Pentalfa Ediciones. Universidad de Oviedo – España.
7. **PALMA J. 2014.** *Cátedra Simulación de Procesos Mineros.* Departamento de Ingeniería de Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
8. **ÁLVAREZ H. R. Abril 2011.** *Introducción a la simulación.* Departamento de Producción - Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Tecnológica de Panamá.
9. **GRECA I.L & MOREIRA M.A. Agosto 1998.** *Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización.* Instituto de Física – Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). Brasil.

10. **DURÁN G. Abril 2010.** *Cátedra I Introducción a la Ingeniería.* Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad de Córdoba. Argentina.
11. **MINSKY M. L. 1965.** *Matter, Mind and Models.* Proc. International Federation of Information Processing Congress. 1: 45-49.
12. **KELTON D.W., SADOWSKI R.P. & SWETS N.B. 2010.** *Simulation with Arena,* Fifth Edition. Editorial McGraw-Hill.
13. **MANZUR R. 2015,** *Productividad determinada por simulaciones de un sistema minero subterráneo agregado por niveles,* Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas. Universidad de Chile.
14. **LE FEAUX R., VÁSQUEZ A. & GALDAMES B. 2007.** Texto Guía *Cátedra Diseño de minas a cielo abierto.* Departamento de Ingeniería de Minas – Universidad de Chile.
15. **FAÚNDEZ SANTANDER, G. F. Febrero 2015.** Ingeniero Metalurgista Senior – Gerencia Planta. Minera Antucoya Limitada.
16. **Anexo 1.2 PLANO INSTALACIONES. Noviembre 2010.** *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Antucoya,* Gestión Ambiental Consultores.
17. **STEWART C. et al.** Antucoya Project, Discrete Event Simulation Mode, *Data and Logic Document,* Informe Realizado para el EPC1 Sandvik – Antucoya, TSG Consulting, Agosto 2012.
18. **DUARTE M. et al.** *Antucoya Final Report,* TSG Consulting, Agosto 2012.
19. **Diagrama de Proceso Balance Masa Chancado y Transporte de Mineral Proyecto Antucoya. Septiembre 2013.** Contrato A7NT EPC1 Sandvik.
20. **Filosofía de Control – Planta de Chancado y Transporte de Mineral Proyecto Antucoya. Diciembre 2013.** Contrato A7NT EPC1 Sandvik.

21. **Manual de Operaciones Planta de Chancado y Manejo de Materiales Proyecto Antucoya. Julio 2014.** Contrato A7NT EPC1 Sandvik.
22. **Transportadores de Correa – Memoria de Cálculo Mecánico Planta de Chancado y Manejo de Materiales Proyecto Antucoya. Agosto 2014.** Contrato A7NT EPC1 Sandvik.
23. **ENCARE Benchmarking y Gestión. 2014.** Estudio Benchmarking Gestión Minera Nacional: Indicadores Chancado Primario, Primer Semestre (S1 2014).

## **11. ANEXOS**

### **11.1 Detalle Equipos modelados Planta Chancado**

#### **11.1.1 Chancado Primario**

- 2110-BN001-C01: Tolva Alimentación – Línea 1.
- 2110-BN002-C01: Tolva Alimentación – Línea 2.
- 2110-FE001-C01: Alimentador de Placas – Línea 1.
- 2110-FE002-C01: Alimentador de Placas – Línea 2.
- 2110-SN001-C01: Harnero Grizzly – Línea 1.
- 2110-SN001-C01: Harnero Grizzly – Línea 2.
- 2110-CR001-C01: Chancador de Mandíbulas – Línea 1.
- 2110-CR002-C01: Chancador de Mandíbulas – Línea 2.
- 2120-CV001-C01 (Correa 1): Correa de Descarga Chancador Primario – Línea 1.
- 2120-CV002-C01 (Correa 2): Correa de Descarga Chancador Primario – Línea 2.
- 2120-CV003-C01 (Correa 3): Correa Transportadora a Tolvas Secundarias.

#### **11.1.2 Chancado Secundario**

- 2210-BN001-C01: Tolva Alimentación – Línea 1.
- 2210-BN002-C01: Tolva Alimentación – Línea 2.
- 2210-BN003-C01: Tolva Alimentación – Línea 3.
- 2210-FE001-C01: Alimentador de correa – Línea 1.
- 2210-FE002-C01: Alimentador de correa – Línea 2.
- 2210-FE003-C01: Alimentador de correa – Línea 3.
- 2210-SN001-C01: Harnero Secundario – Línea 1.
- 2210-SN002-C01: Harnero Secundario – Línea 2.
- 2210-SN003-C01: Harnero Secundario – Línea 3.

- 2210-CR001-C01: Chancador de Conos Sandvik CH890 – Línea 1.
- 2210-CR002-C01: Chancador de Conos Sandvik CH890 – Línea 2.
- 2210-CR003-C01: Chancador de Conos Sandvik CH890 – Línea 3.
- 2220-CV004-C01 (Correa 4): Correa Colectora Finos Secundarios.
- 2220-CV004A-C01 (Correa 4A): Correa de Traspaso.
- 2220-CV005-C01 (Correa 5): Correa Colectora Chancado Secundario y Terciario.
- 2220-CV005-C01 (Correa 6): Correa de Traspaso
- 2220-CV003-C01 (Correa 7): Correa Transportadora a Tolvas Terciarias.

### **11.1.3 Chancado Terciario**

- 2310-BN001-C01: Tolva Alimentación – Línea 1.
- 2310-BN002-C01: Tolva Alimentación – Línea 2.
- 2310-BN003-C01: Tolva Alimentación – Línea 3.
- 2310-BN004-C01: Tolva Alimentación – Línea 4.
- 2310-BN005-C01: Tolva Alimentación – Línea 5.
- 2310-BN006-C01: Tolva Alimentación – Línea 6.
- 2310-BN007-C01: Tolva Alimentación – Línea 7.
- 2310-BN008-C01: Tolva Alimentación – Línea 8.
- 2310-BN009-C01: Tolva Alimentación – Línea 9.
- 2310-BN010-C01: Tolva Alimentación – Línea 10.
- 2310-BN011-C01: Tolva Alimentación – Línea 11.
- 2310-BN012-C01: Tolva Alimentación – Línea 12.
- 2310-FE001-C01: Alimentador de correa – Línea 1.
- 2310-FE002-C01: Alimentador de correa – Línea 2.
- 2310-FE003-C01: Alimentador de correa – Línea 3.
- 2310-FE004-C01: Alimentador de correa – Línea 4.
- 2310-FE005-C01: Alimentador de correa – Línea 5.
- 2310-FE006-C01: Alimentador de correa – Línea 6.

- 2310-FE007-C01: Alimentador de correa – Línea 7.
- 2310-FE008-C01: Alimentador de correa – Línea 8.
- 2310-FE009-C01: Alimentador de correa – Línea 9.
- 2310-FE010-C01: Alimentador de correa – Línea 10.
- 2310-FE011-C01: Alimentador de correa – Línea 11.
- 2310-FE012-C01: Alimentador de correa – Línea 12.
- 2310-SN001-C01: Harnero Terciario – Línea 1.
- 2310-SN002-C01: Harnero Terciario – Línea 2.
- 2310-SN003-C01: Harnero Terciario – Línea 3.
- 2310-SN004-C01: Harnero Terciario – Línea 4.
- 2310-SN005-C01: Harnero Terciario – Línea 5.
- 2310-SN006-C01: Harnero Terciario – Línea 6.
- 2310-SN007-C01: Harnero Terciario – Línea 7.
- 2310-SN008-C01: Harnero Terciario – Línea 8.
- 2310-SN009-C01: Harnero Terciario – Línea 9.
- 2310-SN010-C01: Harnero Terciario – Línea 10.
- 2310-SN011-C01: Harnero Terciario – Línea 11.
- 2310-SN012-C01: Harnero Terciario – Línea 12.
- 2310-CR001-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 1.
- 2310-CR002-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 2.
- 2310-CR003-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 3.
- 2310-CR004-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 4.
- 2310-CR005-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 5.
- 2310-CR006-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 6.
- 2310-CR007-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 7.
- 2310-CR008-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 8.
- 2310-CR009-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 9.
- 2310-CR010-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 10.
- 2310-CR011-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 11.
- 2310-CR012-C01: Chancador de Conos Sandvik CH895 – Línea 12.

- 2320-CV010-C01 (Correa 10): Correa Colectora Producto Final y de Alimentación a Aglomerado.

## 11.2 Simulación Terminante del Sistema

$$N = \left[ \frac{\sigma * Z}{Error * X} \right]^2$$

N= número de corridas  
 $\sigma$ =Desviación estándar de la variable de respuesta a analizar de las 50 corridas  
 $X$ =Promedio de la variable de respuesta a analizar de las 50 corridas  
 $Z$ =Estadístico normal estándar (Para un nivel de confianza de 95% = 1.96)

**Ecuación 11-1: Número de corridas necesarias.**

Parámetro	Valor	Unidad
$\sigma$	0,03	Mtpa
$Z$	30,84	Mtpa
<b>Error</b>	0,05	Mtpa
<b>X</b>	30,78	Mtpa

**Tabla 11-1: Datos Cálculo Número de Corridas.**

$$N = 0,42 \sim 1 \text{ corrida}$$

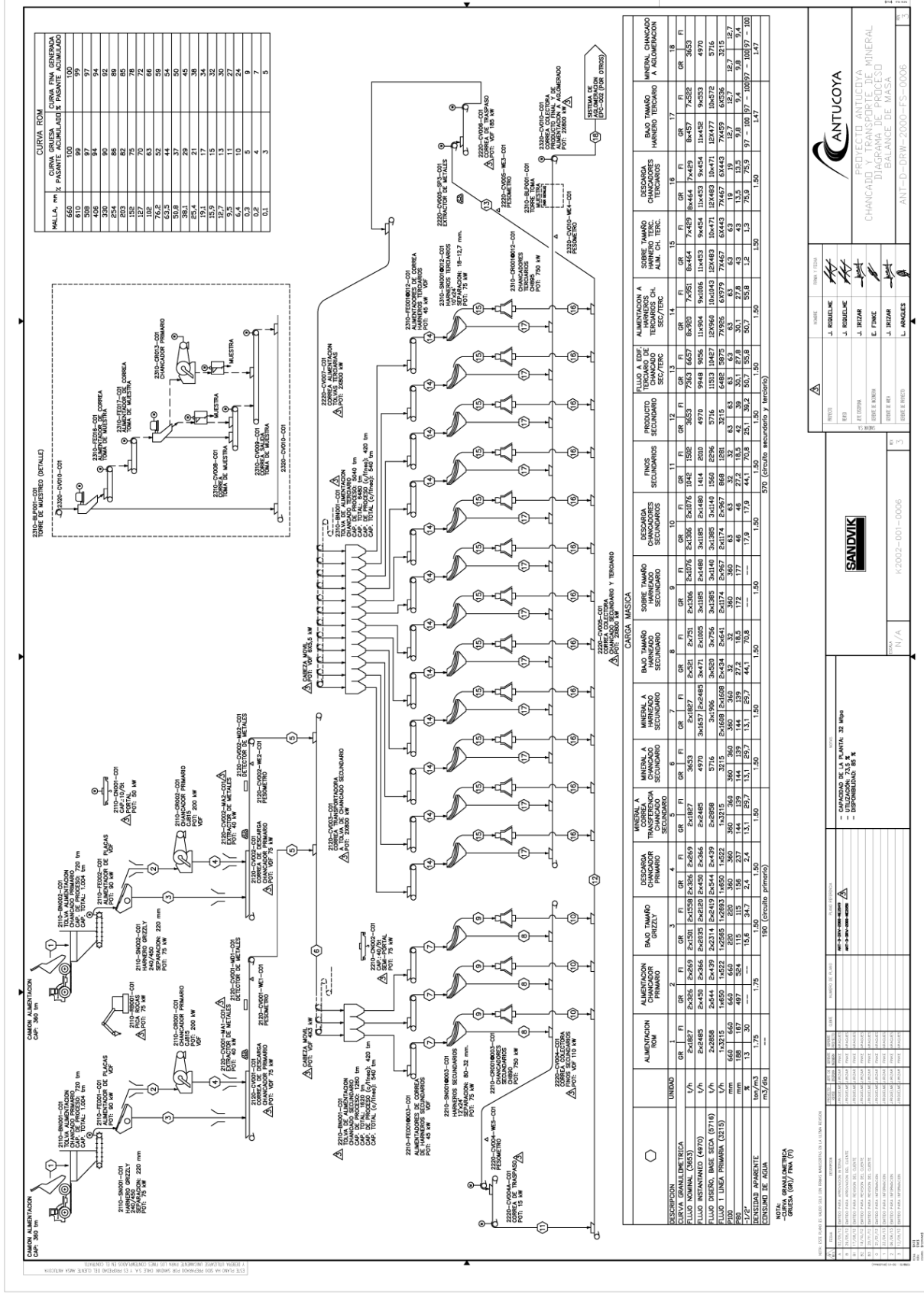


Figura 11-1: Diagrama de Flujo Planta Chancado – Área Seca.

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	REMARKS
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
4	...	...	...	...
5	...	...	...	...
6	...	...	...	...
7	...	...	...	...
8	...	...	...	...
9	...	...	...	...
10	...	...	...	...
11	...	...	...	...
12	...	...	...	...
13	...	...	...	...
14	...	...	...	...
15	...	...	...	...
16	...	...	...	...
17	...	...	...	...
18	...	...	...	...
19	...	...	...	...
20	...	...	...	...
21	...	...	...	...
22	...	...	...	...
23	...	...	...	...
24	...	...	...	...
25	...	...	...	...
26	...	...	...	...
27	...	...	...	...
28	...	...	...	...
29	...	...	...	...
30	...	...	...	...
31	...	...	...	...
32	...	...	...	...
33	...	...	...	...
34	...	...	...	...
35	...	...	...	...
36	...	...	...	...
37	...	...	...	...
38	...	...	...	...
39	...	...	...	...
40	...	...	...	...
41	...	...	...	...
42	...	...	...	...
43	...	...	...	...
44	...	...	...	...
45	...	...	...	...
46	...	...	...	...
47	...	...	...	...
48	...	...	...	...
49	...	...	...	...
50	...	...	...	...
51	...	...	...	...
52	...	...	...	...
53	...	...	...	...
54	...	...	...	...
55	...	...	...	...
56	...	...	...	...
57	...	...	...	...
58	...	...	...	...
59	...	...	...	...
60	...	...	...	...
61	...	...	...	...
62	...	...	...	...
63	...	...	...	...
64	...	...	...	...
65	...	...	...	...
66	...	...	...	...
67	...	...	...	...
68	...	...	...	...
69	...	...	...	...
70	...	...	...	...
71	...	...	...	...
72	...	...	...	...
73	...	...	...	...
74	...	...	...	...
75	...	...	...	...
76	...	...	...	...
77	...	...	...	...
78	...	...	...	...
79	...	...	...	...
80	...	...	...	...
81	...	...	...	...
82	...	...	...	...
83	...	...	...	...
84	...	...	...	...
85	...	...	...	...
86	...	...	...	...
87	...	...	...	...
88	...	...	...	...
89	...	...	...	...
90	...	...	...	...
91	...	...	...	...
92	...	...	...	...
93	...	...	...	...
94	...	...	...	...
95	...	...	...	...
96	...	...	...	...
97	...	...	...	...
98	...	...	...	...
99	...	...	...	...
100	...	...	...	...