



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

## **ANÁLISIS SISTEMA DE MANEJO DE MATERIALES SECTOR PACÍFICO SUPERIOR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

**NICOLÁS ALEJANDRO ROJAS LAFUENTE**

PROFESOR GUÍA:

JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

NELSON MORALES VARELA

MAURICIO MELENDEZ BRIONES

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR**

**AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas

**POR:** Nicolás Alejandro Rojas Lafuente

**FECHA:** 14 de enero de 2020

**PROFESOR GUÍA:** Javier Cornejo González

## **ANÁLISIS SISTEMA DE MANEJO DE MATERIALES SECTOR PACÍFICO SUPERIOR**

Una de los aspectos más importantes al determinar la producción de una mina explotada por panel caving, es el sistema de carguío y transporte de mineral. Este sistema se caracteriza por una alta tasa de interferencias operacionales causadas por las mantenciones y fallas de los equipos, además de desviaciones causadas por el criterio de cada operador al decidir la forma de realizar sus actividades. Por otra parte es necesario determinar la capacidad de cada sector de la mina para poder incorporarla de buena manera al plan productivo y optimizar el sistema de manejo de materiales y el flujo de mineral hacia la planta de procesamiento. El sector Pacífico Superior, perteneciente a la División El Teniente, que entró en etapa productiva el año 2016 y tiene un sistema de manejo de materiales que considera una descarga directa de los LHD sobre camión. Con dicha configuración de carguío no se tiene ninguna experiencia previa al interior de la División, por lo que no existe claridad de cuál es la capacidad máxima del sector, en consecuencia no se tiene certeza si será posible cumplir con la producción comprometida en los planes de producción quinquenales.

La forma escogida para reducir la incertidumbre que existe respecto a esta configuración de sistema de manejo de materiales, es aplicando simulaciones de eventos discretos. Mediante este tipo de simulación es posible, además de estimar la capacidad productiva del sector, estudiar la robustez de las distintas estrategias de acarreo y asignación de los piques para la descarga de los camiones. Este trabajo fue planteado como un esfuerzo conjunto entre la Superintendencia de Planificación Minero Metalúrgica y la Superintendencia Mina Sur tiene dos objetivos, por un lado estimar correctamente la producción del Pacífico Superior tomando como datos de entrada la información que ocurre actualmente en la operación, y en segunda instancia dar respuesta a las inquietudes de los involucrados directamente en el sector y validar las estrategias que se piensan utilizar en la operación frente a las distintas configuraciones y escenarios.

Los principales resultados apuntan hacia la falta de holgura para respecto a la meta productiva de 15,000 [tpd], al considerar una configuración de loop completo. Además al simular un periodo de 30 días se tiene un bajo nivel de cumplimiento diario. Esta configuración no es sensible a la incorporación de las fallas y mantenciones de los equipos, al considerar las tasas de fallas actuales.

*Inventa un mañana*

*O intenta otra vez*

# Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mis padres Eduardo y Pilar, por todo el apoyo y fe inquebrantable que han tenido en mí, a mis hermanos y hermana, Eduardo, Gonzalo y Pilar por los momentos y experiencias que hemos compartido. Mis abuelos Eduardo, Eliana, Enrique y Pilar, por siempre incentivar mi desarrollo integral y permitirme conocer distintas realidades.

A Javier Cornejo, profesor guía y amigo, que creyó en mi para el desarrollo de este trabajo y fue capaz de darme una segunda oportunidad cuando no lo merecía.

A Fernanda, mi compañera de aventuras, por acompañarme en los buenos momentos y ha estado también en los peores.

A la División El Teniente, por permitir la realización de este trabajo y de mis distintas prácticas profesionales.

A las personas de las superintendencias de planificación y mina sur, por todas las enseñanzas que me traspasaron durante mi estancia, además de hacer las jornadas más agradables.

A Nelson Morales y el resto de la gente de DELPHOS, por todo el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

A Ignacio y Víctor, por una amistad que ha durado una vida.

A los Larrys y los BH, por todos los momentos que compartimos durante nuestro paso por la facultad, desde almuerzos, pichangas hasta el ocasional estudio.

Finalmente a los profesores y funcionarios del departamento de minas, por siempre aportar a mi formación tanto profesional como personal.

Sin su apoyo nada de esto sería posible.

# Tabla de contenido

Capítulo I .....	1
1.1 Introducción y motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 General .....	2
1.2.2 Específicos .....	2
Capítulo II .....	3
2.1 Alcances .....	3
Capítulo III .....	4
3.1 Antecedentes zona de estudio .....	4
3.2 Estado del arte .....	11
3.2.1 Simulación de eventos discretos .....	11
3.2.2 Simulaciones de transporte .....	15
Capítulo IV .....	22
4.1 Metodología .....	22
Capítulo V .....	26
5.1 Caso de estudio .....	26
5.1.1 Entender cadena de procesos .....	26
5.1.2 Definir configuraciones a estudiar .....	27
5.1.3 Levantamiento de la información .....	30
5.1.4 Definir coeficientes de rendimientos .....	32
5.1.5 Construcción modelo de simulación .....	32
5.1.6 Obtención y análisis de resultados .....	45
5.1.7 Recomendación opción .....	46
Capítulo VI .....	47
6.1 Resultados .....	47
6.1.1 Capacidad nominal nivel de transporte intermedio .....	47
6.1.2 Capacidad máxima real nivel de transporte intermedio .....	47
6.1.3 Plan de producción .....	49
6.1.4 Mantenimiento de equipos .....	50
6.1.5 Fallas de equipos .....	50
6.1.6 Push-pull .....	50

6.1.7 Falla chancador Teniente 6 .....	52
6.1.8 Extensión Norte .....	54
Capitulo VII .....	55
7.1 Análisis de resultados .....	55
7.1.1 Capacidad máxima .....	55
7.1.2 Asignaciones equipos nivel de transporte intermedio .....	55
7.1.3 Incorporación Procesos .....	56
7.1.4 Falla chancador Teniente 6 .....	66
7.1.5 Extensión Norte .....	67
7.2 Análisis de sensibilidad .....	70
7.2.1 Número de camiones .....	70
7.2.2 Cambio de tamaño de balde .....	71
7.2.3 Fragmentación .....	71
Capitulo VIII .....	75
8.1 Conclusiones .....	75
8.2 Recomendaciones .....	76
Capítulo IX .....	77
9.1 Bibliografía .....	77
Capitulo X .....	79
10.1 Anexos .....	79
10.1.1 Anexo A .....	79

Tabla 1: Velocidades de extracción Pacífico Superior.....	7
Tabla 2: Plan de producción Pacífico Superior.....	7
Tabla 3: Plan de producción Extensión Norte (GRMD, 2017).....	9
Tabla 4: Valores medidos por Salama (Salama & Greberg, 2012). ....	12
Tabla 5: Análisis FODA software DSIM.....	16
Tabla 6: Dimensión flota de equipos JRI. ....	17
Tabla 7: Resultados simulaciones JRI.....	17
Tabla 8: Comparación estudio Delphos y JRI.....	20
Tabla 9: Resultados simulación Esmeralda.....	21
Tabla 11: Estrategia de mantención DET.....	31
Tabla 12: Mantención final ciclo DET. ....	31
Tabla 13: Distribución tiempos de reducción secundaria.....	32
Tabla 14: Características LHD. ....	33
Tabla 15: Características Camiones. ....	34
Tabla 16: Tonelaje disponible por calle. ....	37
Tabla 17: Parámetros ajuste fallas ....	38
Tabla 18: Criterios de elección de pique. ....	45
Tabla 19: Capacidad máxima nivel de transporte intermedio ....	47
Tabla 20: Resultados asignación. ....	48
Tabla 21: Utilización sistema de manejo de materiales Pacífico Superior. ....	61
Tabla 22: Disminución producción por falla chancador Teniente 6.....	67
Tabla 23: Utilización sistema de manejo de materiales Extensión Norte.....	70
Tabla 24: Resultados sensibilidad tonelaje entre colgaduras. ....	72
Tabla 25: Resultados sensibilidad tiempos de reducción secundaria. ....	72
Figura 1: Disposición yacimiento El Teniente (SPL, 2017). ....	4
Figura 2: Producción PQ 2017 (GRMD, 2017). ....	5
Figura 3: Disponibilidad de área Pacífico Superior (SPL, 2017). ....	6
Figura 4: Secuencia de incorporación de área Pacífico Superior (SPL, 2017). .	6
Figura 5: Descarga LHD-camión. ....	8
Figura 6: Layout niveles de producción y transporte intermedio Pacífico Superior.	8
Figura 7: Secuencia de incorporación de área complejo Pacífico Superior. ....	10
Figura 8: Producción complejo Pacífico Superior (GRMD, 2017). ....	10

Figura 9: Mina Grasberg (Hindle, 2012). .....	13
Figura 10: Layout de simulación Grasberg (Hindle, 2012).....	13
Figura 11: Resultados utilización de trenes simulación trenes Grasberg (Hindle, 2012). .....	14
Figura 12: Resultados tiempos de espera simulación Grasberg (Hindle, 2012).14	
Figura 13: Resultados simulación Diablo Regimiento. (Valenzuela, 2017) .....	19
Figura 14: Metodología de Chang. ....	22
Figura 15: Metodología. ....	23
Figura 16: Límite de batería modelo de simulación. ....	26
Figura 17: Circuito loop completo.....	27
Figura 18: Circuito push-pull. ....	28
Figura 19: Falla chancador Teniente 6.....	28
Figura 20: Ruta taller camiones.....	29
Figura 21: Ruta talleres LHD. ....	30
Figura 22: Layout Pacífico Superior. ....	35
Figura 23: Curvas de fragmentación para roca Dacita y Brecha Braden. (Seguel & Schachter, 2013).....	36
Figura 24: Curvas de fragmentación para distintos sectores DET. (Guiñez, 2017) .....	36
Figura 25: Estado puntos de extracción Noviembre 2020. ....	37
Figura 26: Criterio de decisión LHD sin camión.....	40
Figura 27: Criterios de decisión LHD con Camión. ....	41
Figura 28: Criterios de operación camión. ....	42
Figura 29: Criterios de operación segura camión. ....	43
Figura 30: Criterios de decisión cuadrilla de reducción secundaria. ....	44
Figura 31: Capacidad máxima real caso A con preferencia OP13 determinística. .....	48
Figura 32: Capacidad máxima real caso B con preferencia OP13 determinística. .....	49
Figura 33: Capacidad máxima real caso C con preferencia OP13 determinística. .....	49
Figura 34: Capacidad máxima real caso A push-pull.....	51
Figura 35: Capacidad máxima real caso B push-pull.....	51
Figura 36: Capacidad máxima real caso C push-pull. ....	52
Figura 37: Resultados falla Teniente 6 caso A. ....	53



Figura 38: Resultados falla Teniente 6 caso B .....	53
Figura 39: Resultados falla Teniente 6 caso C. ....	54
Figura 40: Producción según distintas asignaciones. ....	55
Figura 41: Variabilidad entre replicas según distintas asignaciones. ....	56
Figura 42: Impacto incorporación de procesos Pacífico Superior. ....	56
Figura 43: Variabilidad entre replicas caso A. ....	57
Figura 44: Cumplimiento caso A. ....	58
Figura 45: Variabilidad entre replicas caso B. ....	59
Figura 46: Cumplimiento caso B. ....	59
Figura 47: Variabilidad entre replicas caso C. ....	60
Figura 48: Cumplimiento caso C. ....	61
Figura 49: Impacto incorporación de procesos push-pull. ....	62
Figura 50: Variación entre replicas caso A push-pull.....	63
Figura 51: Variación entre replicas caso B push-pull.....	64
Figura 52: Cumplimiento caso B push-pull. ....	64
Figura 53: Variación entre replicas caso C push-pull.....	65
Figura 54: Cumplimiento caso C push-pull.....	65
Figura 55: Comparación loop completo y push-pull.....	66
Figura 56: Comparación loop completo y falla chancador Teniente 6. ....	66
Figura 57: Impacto incorporación de procesos Extensión Norte loop completo. ....	68
Figura 58: Variabilidad replicas Extensión Norte loop completo. ....	68
Figura 59: Cumplimiento loop completo Extensión Norte. ....	68
Figura 60: Impacto incorporación de procesos Extensión Norte push-pull. ....	69
Figura 61: Variabilidad entre replicas push-pull Extensión Norte.....	69
Figura 62: Análisis de número de equipos nivel de transporte intermedio. ....	70
Figura 63: Análisis cambio tamaño de balde. ....	71
Figura 64: Diagrama de tornado frecuencia de colgaduras. ....	73
Figura 65: Diagrama de tornado tiempo de reducción secundaria.....	73

# Capítulo I

## 1.1 Introducción y motivación

La industria minera ha sido a lo largo de la historia de Chile uno de los motores fundamentales de la economía del país aportando actualmente un 9.8% del PIB siendo la cuarta industria más importante del país, detrás de la industria manufacturera, la de servicios industriales y la agro pecuaria (Cochilco, 2019b). A nivel internacional Chile es el país con las mayores reservas y producción de cobre 170 y 5.8 millones de toneladas respectivamente, (USGS, 2019). Dentro de la industria minera una de las más grandes empresas a nivel mundial es CODELCO, la cual está conformada por distintas divisiones a lo largo del país y que en este momento tiene a la División El Teniente como la más productiva y la que otorga un mayor aporte a la economía del país. Dado el escenario mundial de incertidumbre que vive la industria minera donde los commodities, en especial el Cobre, han bajado su precio de forma sostenida desde el último súper ciclo del Cobre ocurrido el año 2011 con precios sobre los 450 [cents/lb] (Cochilco, 2019a). Es en este escenario que toma una gran importancia una adecuada planificación en las distintas operaciones mineras para así poder maximizar el beneficio que la operación de las distintas minas aportan al presupuesto nacional, puesto que si se subestima la capacidad productiva de una mina no se sacara todo el beneficio económico posible, pero por otro lado si se sobreestima la capacidad habrá un beneficio esperado que nunca se podrá alcanzar, lo que llevara a perdidas debido al sobredimensionamiento tanto de la flota de equipos como de personas.

Al considerar la planificación de la División El Teniente, es de vital importancia una adecuada planificación de los distintos sectores productivos tanto los que ya están en su etapa productiva, como los que todavía están en construcción y los proyectos futuros. Esto debido a que aproximadamente el 90% de la producción total de la División es transportada desde el interior de la mina hacia la planta concentradora de Colón mediante el ferrocarril Teniente 8, lo que provoca que si existe un descenso no esperado en la producción de un sector sea muy complejo cubrir esta baja con los distintos sectores, puesto que ya todos se encuentran operando a máxima capacidad por lo cual no se podrá cumplir la meta productiva divisional.

El sector Pacífico Superior es un sector que entró en producción el año 2016 y donde todavía interactúa la construcción con la operación. Posee un sistema de manejo de materiales con infraestructura que no ha sido utilizada al interior de la División cuya principal característica es una alta interacción entre los equipos en el nivel de producción y en el nivel de transporte intermedio. Es por esto que antes de poder comprometer una producción para cuando el sector alcance el régimen productivo, el cual según los planes actuales se alcanza en el año 2020 (SPL, 2018), primero se debe estudiar en detalle cual es la capacidad máxima que permite el sistema de manejo de materiales al considerar distintas estrategias de acarreo y las posibles fallas que podrían ocurrir sobre el mismo, ya sea de infraestructura o de equipos, para así poder dar una respuesta confiable sobre cuanta producción puede alcanzar este sector en los distintos escenarios que se pueden presentar a lo largo de la vida del proyecto.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

- Estudiar la producción del sector Pacífico Superior, mediante simulaciones, para verificar el cumplimiento de la producción comprometida en el plan quinquenal 2018.

### **1.2.2 Específicos**

- Generar y analizar técnicamente alternativas de sistema de manejo de materiales.
- Analizar casos de falla y su efecto en la producción.
- Realizar un análisis de sensibilidad que permita determinar el efecto en un cambio porcentual de las variables de interés y encontrar los puntos críticos de las alternativas estudiadas.
- Determinar la cantidad de equipos mínima requerida para cumplir el compromiso productivo del proyecto.
- Realizar validación y prueba industrial de software DSIM.

# Capítulo II

## 2.1 Alcances

Los alcances de este estudio consideran la infraestructura perteneciente al sector Pacífico Superior, tales como los equipos que operarán en el sector, como las construcciones realizadas que estén ubicadas ya sea en el nivel de producción o en el nivel de transporte intermedio.

Por el lado de los equipos se consideran los equipos que están comprometidos en la etapa inversional del sector Pacífico Superior (Martínez, 2013). Así pues se utilizarán equipos LHD de 20 [ton] y camiones de bajo perfil de 60 [ton], considerando el número de equipos que se encuentran operativos en los distintos periodos a simular.

En relación a la infraestructura, se considera la ubicada en el nivel de producción y transporte intermedio, debido a que el sector Pacífico Superior es solo uno de los distintos sectores existentes en la División El Teniente, cuando el mineral sale del nivel de transporte intermedio se debe considerar la interacción con el resto de los sectores de la División, puesto que esta infraestructura es compartida por más de un sector. Así pues se deja fuera de los alcances de este trabajo tanto el chancador Teniente 6 como el ferrocarril Teniente 8.

El método de explotación del sector corresponde a panel caving convencional, así pues se deben considerar distintas restricciones, actividades y prácticas operacionales que se deben realizar para que exista una operación segura. Las restricciones operacionales a considerar corresponden a las velocidades de extracción máxima, la cual está ligada a la altura de columna extraída y los puntos de extracción que están disponibles en los distintos periodos a simular. Por el contrario no se incorporará la entrada de barro en el sector, debido a que no existen sectores productivos ubicados sobre el Pacífico Superior por lo cual si se realiza una buena extracción no se espera que llegue barro hasta el mismo. Por el lado de las operaciones se debe realizar la reducción secundaria de colpas de gran tamaño, así como el cierre de puntos al ocurrir un arco de colgadura (Salazar, 2015), además de la realización de mantenencias preventivas a los equipos operativos y reparaciones en caso de fallas. La carga de petróleo a los equipos se realizara con un equipo móvil (JRI Ingeniería, 2014a), es por esto que se considera que esta operación será realizada durante los cambios de turno y los tiempos de colación, además no se considera la perforación y tronadura para la incorporación de los puntos de extracción debido a que esta operación tiene muchas variables y no se tienen los datos suficientes para poder reproducirla adecuadamente.

# Capítulo III

## 3.1 Antecedentes zona de estudio

La División El Teniente es la mina subterránea más grande del mundo con una producción de 140,000 [tpd]. Esta división está compuesta por distintos sectores productivos, los cuales se muestran en la

Figura 1. En la Figura 2 se observa el plan de producción para la división hasta el año 2040, cuando la producción pasa a depender totalmente del Nuevo Nivel Mina. Antes de que el Nuevo Nivel Mina ocupe un lugar predominante en la producción, los sectores más importantes son Esmeralda y Reservas Norte, teniendo producciones promedio de 28,500 [tpd] y 18,000 [tpd] respectivamente (SPL, 2017).

El sector Pacífico Superior va a ser importante en el mediano plazo, aportando un 11% de la producción total los años 2020 y 2021 llegando a ser el sexto sector con mayor producción a nivel divisional. Este sector empezó su etapa productiva el año 2017 y se espera que esta dure hasta el año 2026. La operación se realiza mediante panel caving convencional con uso de fracturamiento hidráulico, con equipos LHD y camiones de bajo perfil. El sector Pacífico Superior se encuentra ubicado en el sector Oeste del yacimiento El Teniente; su nivel de producción se ubica en la cota 2,247 m s.n.m. y el nivel de hundimiento esta 18[m] sobre este (cota 2,265 m s.n.m).

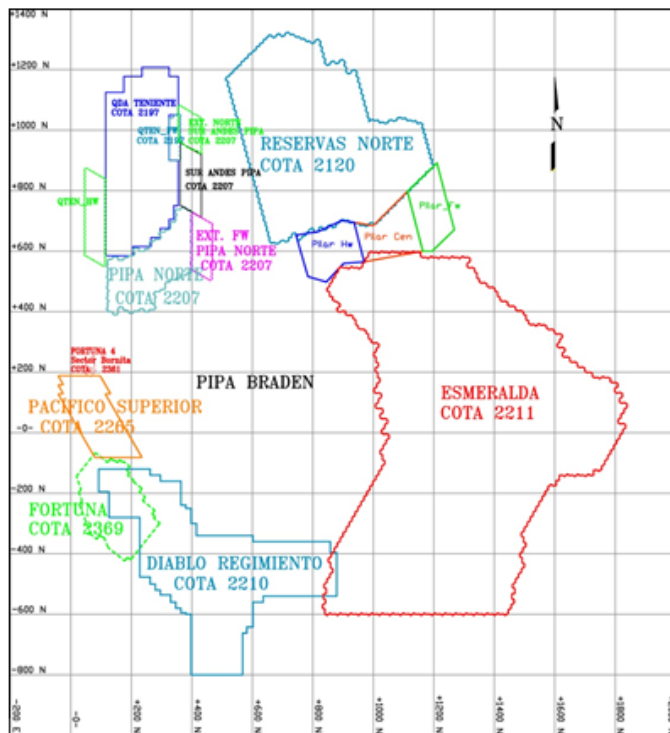
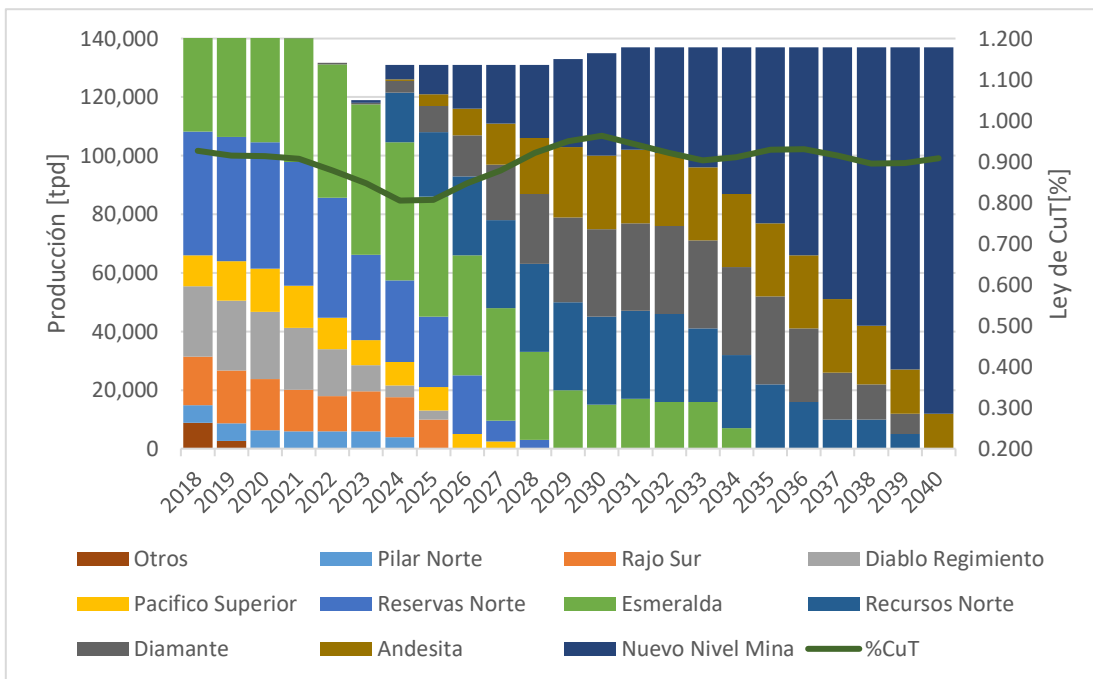


Figura 1: Disposición yacimiento El Teniente (SPL, 2017).



**Figura 2: Producción PQ 2017 (GRMD, 2017).**

En la zona sobre el Pacífico Superior nunca se ha desarrolla explotación minera, debido a que en dicha zona se encuentra gran parte de la infraestructura de ventilación de los distintos sectores productivos, lo cual tiene dos consecuencias para el proyecto. La primera es que gran parte de la inversión realizada es para la reposición de las galerías y chimeneas de ventilación y la segunda es que no existe material quebrado remanente de la explotación de sectores que ya no están en producción. Por otra parte, la presencia de roca tipo brecha en la zona este del sector, la cual posee una peor hundibilidad que la roca CMET (Guiñez, 2017), la cual es el principal tipo de roca encontrado predominantemente en el yacimiento El Teniente, por esto que se espera un escenario geomecánico distinto al que se ha enfrentado la operación en los últimos años. A pesar de lo anterior el sector será explotado por el método de panel caving convencional con uso de fracturamiento hidráulico el cual tiene un uso intensivo en la división.

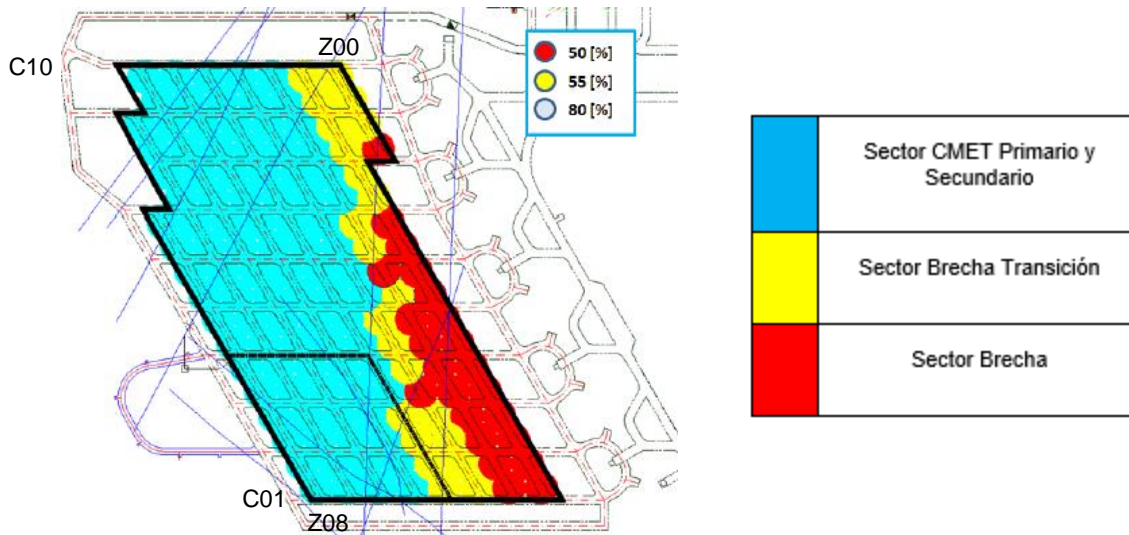


Figura 3: Disponibilidad de área Pacífico Superior (SPL, 2017).

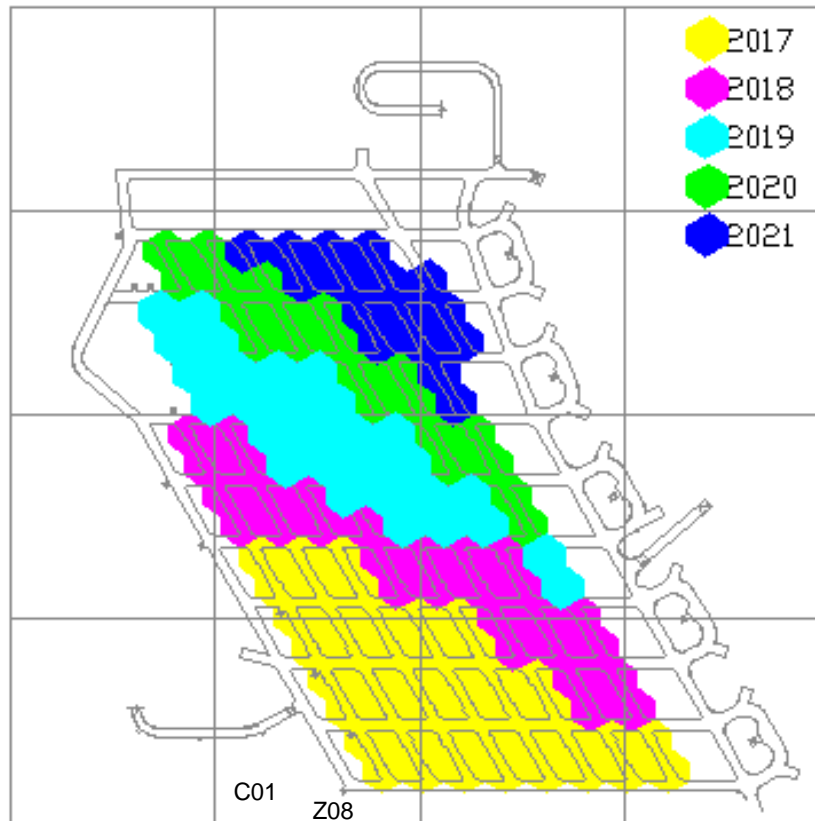


Figura 4: Secuencia de incorporación de área Pacífico Superior (SPL, 2017).

El hundimiento se inició desde el sector sur-oeste, en la calle 01, zanja 08N en la zona de roca CMET y se propagó hacia el sector noreste hasta la calle 10, zanja 00S en el sector de Brecha Transición, Figura 4. En base a este secuenciamiento, además de las velocidades de extracción máximas, según porcentaje de altura de columna

económica extraída, Tabla 1, se obtiene la producción del Pacífico Superior (GRMD, 2017) la cual se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 1: Velocidades de extracción Pacífico Superior.**

Rango	Velocidad de Extracción $\left[\frac{ton}{m^2\ día}\right]$
Inicio de Quiebre (Altura extraída<30%)	0.2
Fin de Quiebre (Altura extraída=30%)	0.7
Liberada (Altura extraída>30%)	1.5

**Tabla 2: Plan de producción Pacífico Superior.**

Año	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Área Abierta $[m^2]$	13,200	21,600	27,300	28,500	28,200	23,400	26,700	24,300	16,500	8,700
Producción [tpd]	3,984	10,724	13,792	14,959	14,479	12,439	8,449	6,383	5,001	4,410
Velocidad de Extracción $\left[\frac{ton}{m^2\ día}\right]$	0.49	0.58	0.52	0.53	0.55	0.52	0.43	0.36	0.30	0.50

Como se observa en la Tabla 2 se espera que el sector alcance su régimen productivo durante el año 2020, y que alcance un valor de 15,000 [tpd].

El sistema de manejo de materiales del Pacífico Superior tiene como característica más representativa que el nivel de producción se encuentra 4[m] por sobre la cota del nivel de transporte intermedio, esto se debe a que los LHD descargan directamente sobre los camiones por medio de distintas estaciones de vaciado, Figura 5 (JRI Ingeniería, 2014a). Una vez completamente cargado el camión este se desplazará hacia alguno de los distintos piques del sector, los cuales son OP13 15 y 16. Dicha configuración de carguío nunca ha sido utilizada en la División El Teniente, fuera del sector en estudio, por lo cual no existe claridad sobre su tasa de fallas y su tiempo de reparación.



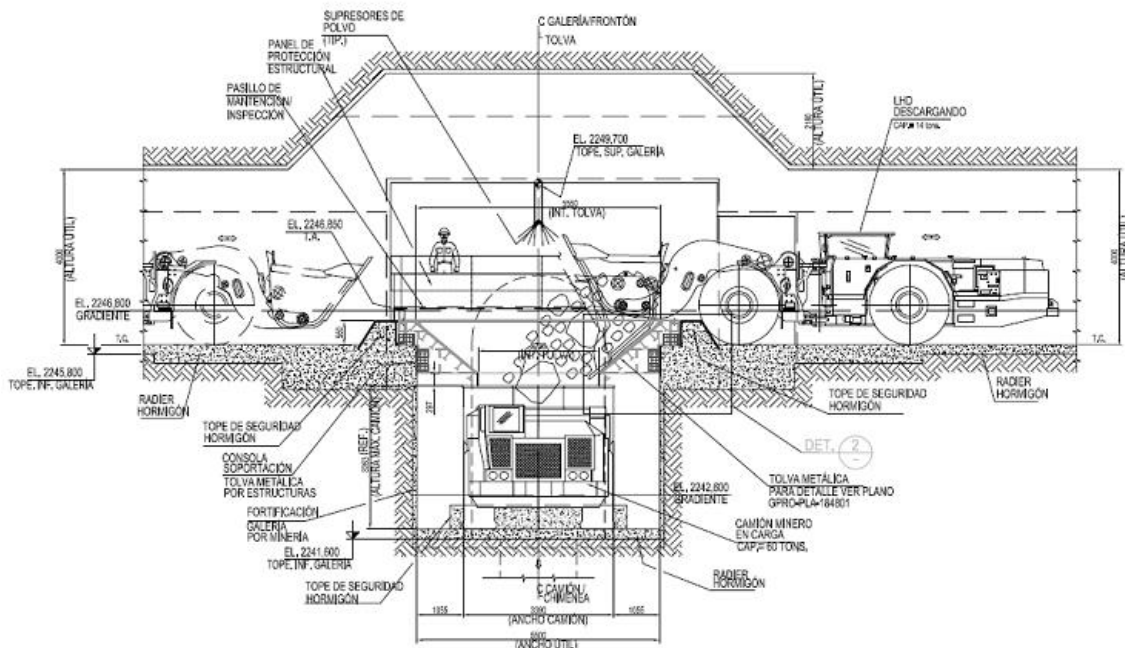


Figura 5: Descarga LHD-camión.

El OP13 descarga directamente en el ferrocarril Teniente 8 y se espera que cuando se alcance el régimen productivo este pique aporte una producción de 5,000 [tpd] de material grueso. Los OP15 y 16 descargan el material en el Chancador Teniente 6, donde este será reducido de tamaño para luego pasar a los OP20 y 21 para luego ir hacia el ferrocarril Teniente 8. Está planificado que la producción del Pacífico Superior que pase conjuntamente por estos 2 piques sea de 10,000 [tpd] de material fino (GRMD, 2017). Finalmente, el Ferrocarril Teniente 8 llevará el mineral hacia la planta concentradora de Colón, donde agregara el material a la línea de finos o gruesos según corresponda.

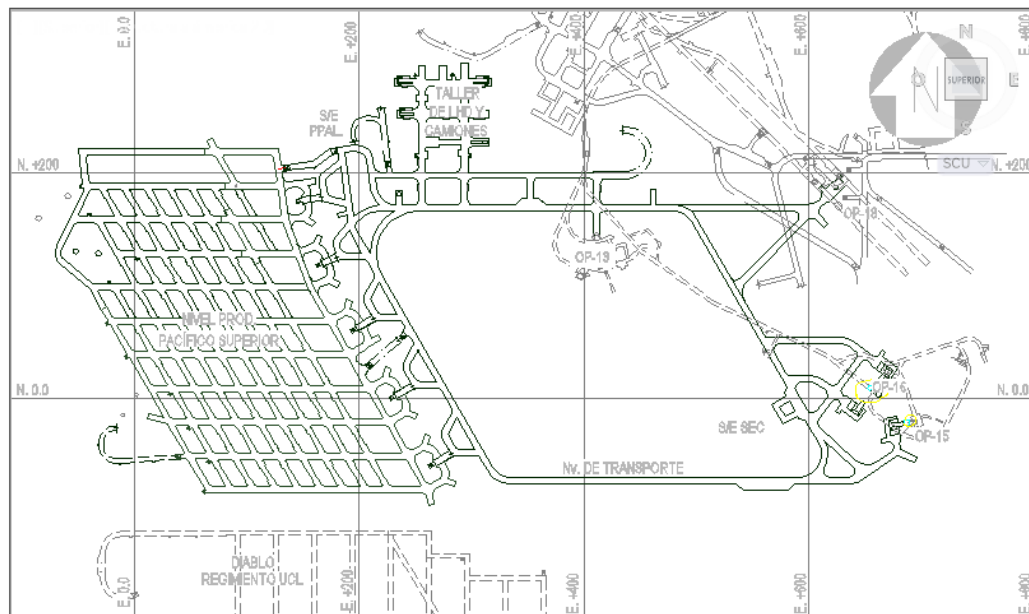


Figura 6: Layout niveles de producción y transporte intermedio Pacífico Superior.

En cada pique existen martillos picadores que reducirán de tamaño las colpas mayores. Existe un taller mecánico para los equipos del sector, el cual se ubica al norte del nivel de transporte intermedio y tiene acceso tanto desde el nivel de transporte intermedio como por el nivel de producción, sin que los equipos LHD deban entrar al circuito de producción de los camiones (JRI Ingeniería, 2014a).

Además de las 10 calles del Pacífico Superior, se añadirá una extensión al norte, la cual añade 5 calles al diseño original del nivel de producción. Dicha extensión considera la construcción de la infraestructura necesaria como los distintos puntos de acopio y estaciones de carguío. Utilizará la misma estructura principal en el nivel de transporte intermedio que el Pacífico Superior, de esta forma solo se debe construir algunas galerías adicionales. Las velocidades de extracción que se ocupan en la planificación del sector Extensión norte son iguales a las utilizadas en el Pacífico Superior, Tabla 1. Al utilizar estos parámetros, además del secuenciamiento de incorporación de área que se utilizara para la Extensión norte, el cual se observa en la Figura 7, se obtiene el plan de producción para la Extensión Norte, la cual se muestra en la Tabla 3 (GRMD, 2017). Finalmente en la Figura 8 se muestra la producción del complejo Pacífico Superior.

**Tabla 3: Plan de producción Extensión Norte (GRMD, 2017).**

Año	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Área Abierta	5,400	13,200	21,000	20,400	16,500	8,700
Producción	638	4,392	5,000	4,994	5,001	4,410
Velocidad de Extracción $\left[ \frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]$	0.24	0.38	0.24	0.24	0.30	0.39

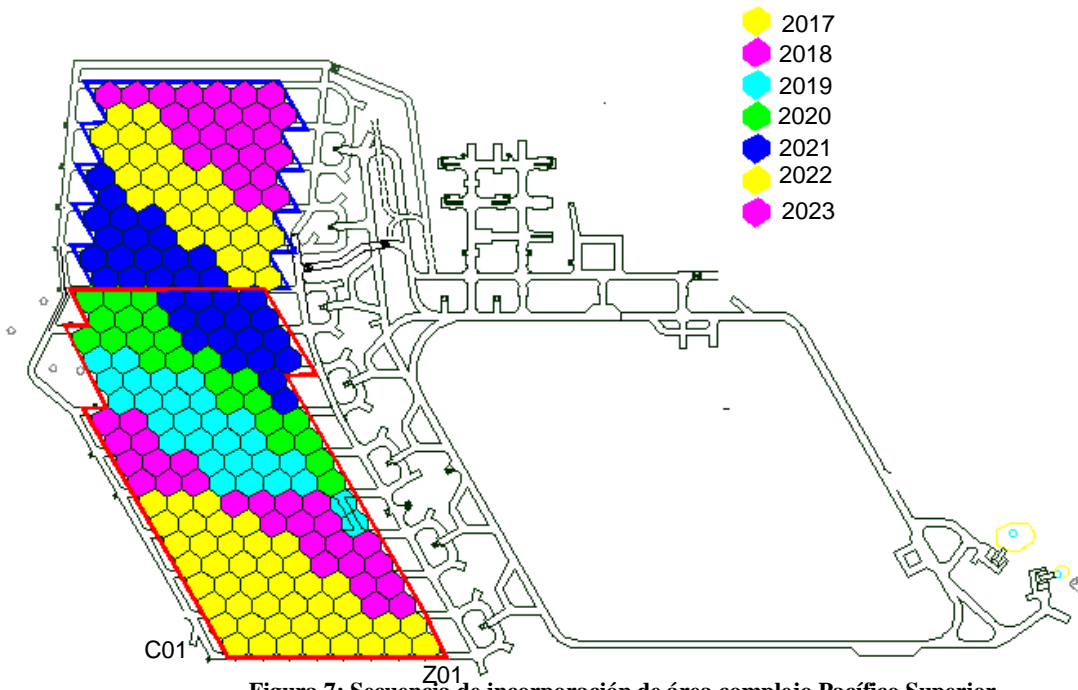


Figura 7: Secuencia de incorporación de área complejo Pacífico Superior.

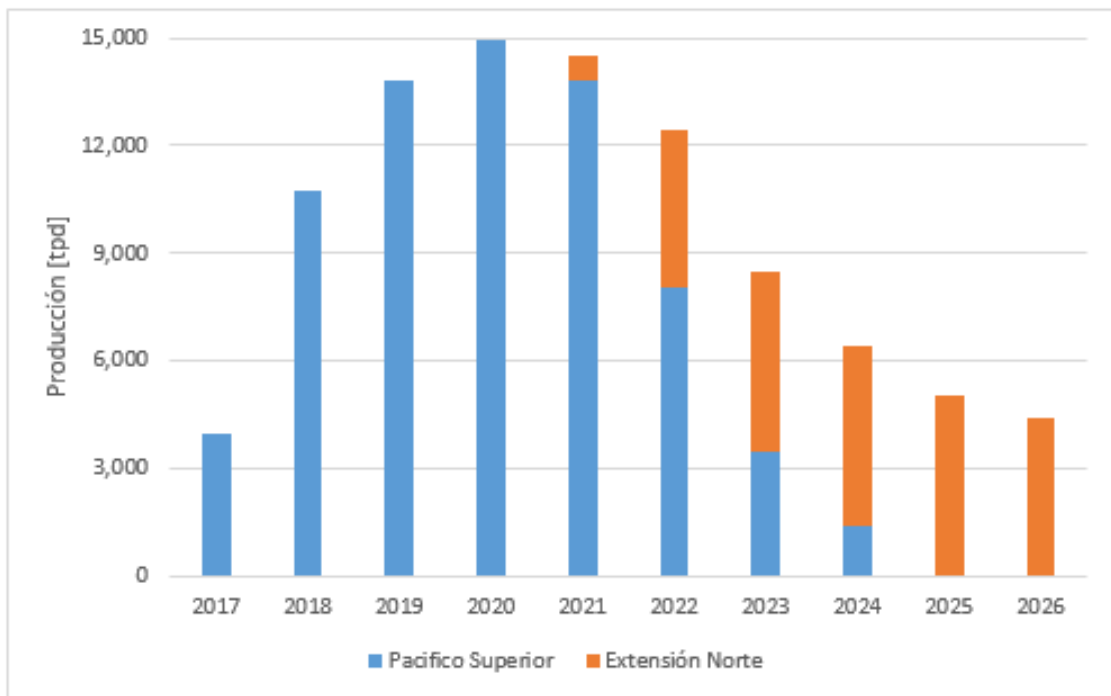


Figura 8: Producción complejo Pacífico Superior (GRMD, 2017).

## 3.2 Estado del arte

### 3.2.1 Simulación de eventos discretos

#### *Simulación*

Una de las decisiones más importantes en la planificación de cualquier proyecto se realiza al momento de determinar la estrategia óptima a utilizar durante la operación de este, puesto que por lo general existe más de una opción disponible, no se pueden poner en ejecución todas las estrategias y evaluarlas posteriormente. Es por esto que la elección de la estrategia más adecuada para el proyecto es de suma importancia, puesto que una mala estrategia se propaga rápidamente a través de los procesos causando desbalances en las capacidades, aumento en los stocks, etc. En este contexto es donde toma importancia la simulación, pues permite evaluar las distintas opciones y las distintas situaciones que podrían afectar el proyecto y analizar las debilidades de este.

El proceso adecuado para realizar una simulación según Chang (Chang & Makatsoris, 2001) es:

- Mapear la cadena de procesos y la planificación de esta.
- Definir los escenarios a simular y definir los alcances de las simulaciones.
- Levantamiento de datos.
- Definir coeficientes de medición de rendimiento.
- Definir rendimiento objetivo.
- Definir condición de fin de simulación.
- Evaluación de la cadena de procesos.

Y las respuestas a las que puede responder una simulación, de acuerdo a Chang (Chang & Makatsoris, 2001):

- ¿Qué estrategia tiene un mejor rendimiento?
- ¿Qué estrategia es más robusta a las variaciones?
- ¿Cómo se verá impactada la utilidad del proyecto a variaciones de las variables?
- ¿Cuál es la importancia de la información en la toma de decisiones?

#### *Toma de datos*

Al momento de tomar los datos en terreno necesarios para la realización de una simulación, según lo expuesto por Sargent (Sargent, 2007), no se conoce previamente un número determinado de datos que haga que estos sean representativos de una muestra. Lo que se debe hacer es tomar los datos, eliminar los outliers y analizar si los datos se apegan a una distribución de probabilidad.

Para la medición de datos en una faena minera es importante analizar el trabajo realizado por Salama (Salama & Greberg, 2012), el cual corresponde a una optimización del sistema de manejo de materiales en una mina de sublevel caving. Para esto realizo un proceso de toma de datos de los tiempos de ciclo de los camiones y LHD en terreno realizando mediciones de distintas rutas y operadores a distintas horas del día para que

así los datos fueran insesgados. Este proceso se demoró 21 días, tanto en turno de día como de noche. Luego de recolectados los datos, los analizó, eliminó outliers y determinó que los datos seguían una distribución triangular, de parámetros mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores medidos por Salama (Salama & Greberg, 2012).

	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo
Carga LHD	S	17	18.5	20
Descarga LHD	S	5	6	7
Carga Camión	S	60	65	70
Descarga Camión	S	65	70	75
Tiempo Maniobras	S	30	35	40

### ***Delimitación de alcances***

Una definición de suma importancia al momento de realizar una simulación es la delimitación de alcances debido a que se puede dejar de lado una parte del proceso que sea de suma importancia o incorporar procesos que no tienen relevancia alguna. En la mina Grasberg al momento de realizar una transición desde un método open pit a una mina de block cave se estimó el número de trenes necesario para un óptimo funcionamiento de los distintos sectores productivos, Figura 9. Los trenes movilizan tanto a los trabajadores como a los insumos necesarios para un normal funcionamiento de los distintos sectores, es por esto que el túnel de infraestructura es crítico para que el proyecto funcione adecuadamente, razón por la cual se decide simular el sistema de trenes debido a que así se puede modelar de buena manera efectos dinámicos tales como:

- Interacciones.
- Variaciones de los procesos.
- Fallas aleatorias.
- Competencia por los recursos.
- Restricciones lógicas.
- Restricciones de procesos.
- Otros fenómenos observados en sistemas reales.

El objetivo del estudio fue identificar las interacciones entre el tren y el pique de acceso de personal con el objetivo de determinar las estrategias de movimiento y acumulamiento de insumos, asegurando que el sistema resultante asegure un cambio de turno puntual y todos los movimientos de material durante los años de mayor desarrollo. Debido a que el foco de la problemática estaba en el movimiento entre Ridge Camp Rail Yard hasta el

Grasberg Block Cave (GBC) solo se consideraron estos sectores en la simulación, dejando de lado el Big Gossan, DOZ y DMLZ, esto se observa en la Figura 10. En ambos terminales se modelaron las interferencias con el movimiento de personal e insumos en los piques (Hindle, 2012).

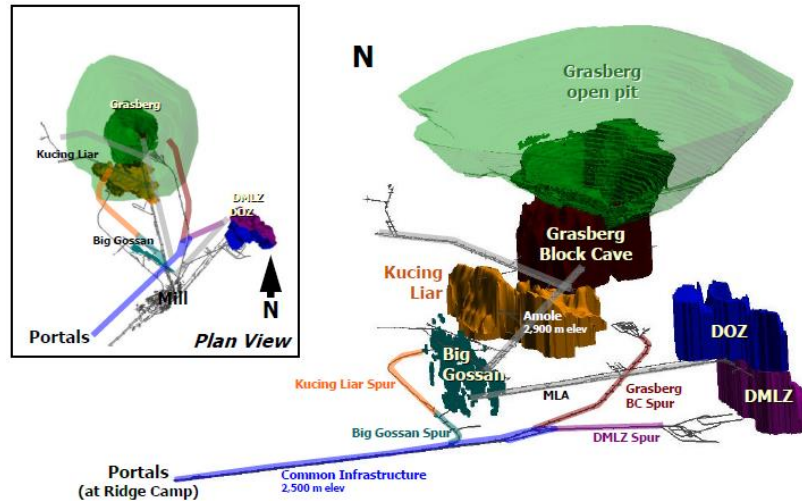


Figura 9: Mina Grasberg (Hindle, 2012).

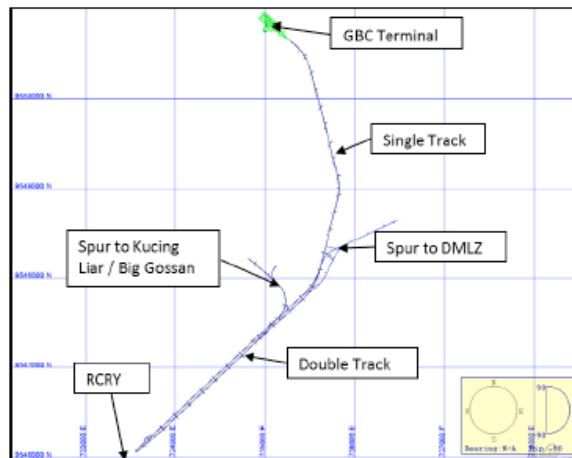


Figura 10: Layout de simulación Grasberg (Hindle, 2012).

Luego de construido el modelo y de obtenidos los resultados se definió que se utilizarán 3 trenes debido tanto al tiempo requerido para completar el movimiento de personal como el tiempo de espera de los trenes, debido a que si se utiliza un número mayor de trenes el porcentaje de tiempo esperando una asignación aumenta sobre un 10%, Figura 11, pero si se ponen 2 trenes el tiempo que se requiere para poder transportar a todos los trabajadores es mayor al tiempo que se requiere para tener una operación adecuada de la mina Grasberg.

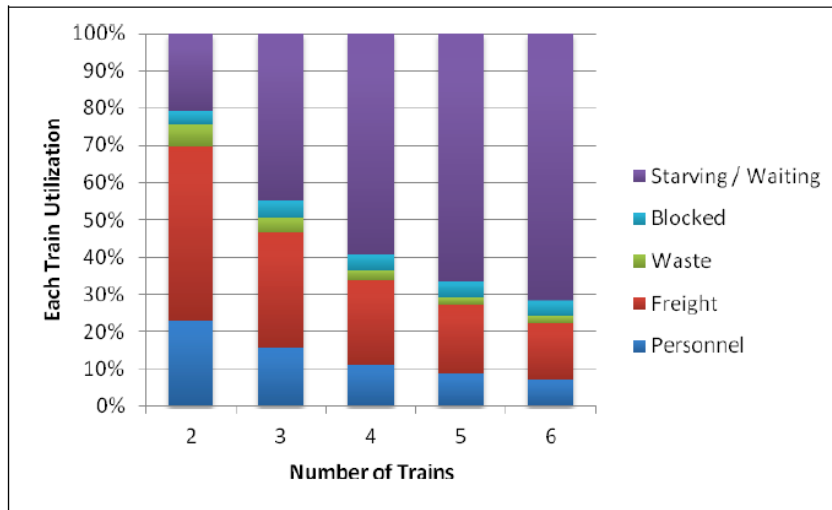


Figura 11: Resultados utilización de trenes simulación trenes Grasberg (Hindle, 2012).

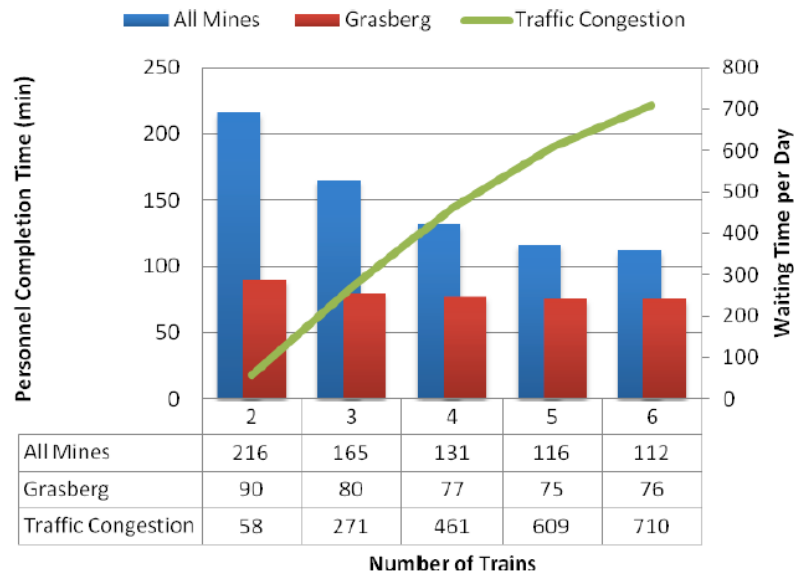


Figura 12: Resultados tiempos de espera simulación Grasberg (Hindle, 2012).

De estos resultados es posible apreciar que al tener tres o más trenes en operación no se espera una disminución del tiempo que se demora en completar el transporte de personal, solo se espera que aumente la congestión, además de aumentar en gran medida los tiempos de espera, Figura 11, así pues se concluyó que el número óptimo de trenes necesarios para el transporte de personal y material es de tres, puesto que no se obtiene ningún beneficio adicional al sobrepasar este número.

### Validación

Sargent (Sargent, 2007) también determino que para validar una simulación existen distintos caminos, los que se pueden separar en 2 grupos principales. El primer

grupo corresponde a la validación por casos históricos y el segundo grupo a la validación por juicio de expertos.

Las distintas validaciones por medio de juicios de expertos son

- Por sensibilidad: se varían extremadamente las variables y se estudia si el escenario real se movería de igual forma.
- Rastro: se estudia el comportamiento de las entidades y se estudia si la lógica de simulación es correcta y se tiene la precisión requerida.
- Test de Turing: se le presentan a un experto los resultados de la simulación y los del sistema, y se le pide que determine cuál es cuál. Esto solo se puede realizar para sistemas que ya estén operativos

### ***3.2.2 Simulaciones de transporte***

#### ***Software de simulación***

En el mercado existen diversos softwares diseñados para realizar simulaciones, en algunos el foco está puesto en simular cualquier proceso y en cambio otros están enfocados exclusivamente en simular procesos mineros. Además, es posible separar los softwares en dos grupos principales los desarrollados comercialmente y los académicos (desarrollados por universidades). Dentro del primer grupo se destacan dos en especial, puesto que son los que tienen la mayor participación en el mercado mundial, los cuales son Arena y Promodel. Estos softwares son representados por distintas empresas a nivel mundial las que están encargadas de la comercialización, dando las condiciones y servicios que estimen conveniente según las necesidades de cada cliente. Estos simuladores se caracterizan en que no son específicos para la industria minera, sino que se puede simular cualquier proceso que se desee. Por el lado de los softwares académicos se destacan dos softwares, el Simmine desarrollado por la Universidad de Lüleá y que se especializa en la simulación tanto del sistema de manejo de materiales como de los desarrollos de los sectores productivos, el cual ya fue calibrado y validado y actualmente está siendo comercializado internacionalmente. Además, se tiene el DSIM desarrollado por el laboratorio de planificación minera Delphos de la Universidad de Chile y se enfoca solamente en el sistema de manejo de materiales tanto para minería a cielo abierto, siendo ya calibrado y validado para esta, y en minería subterránea donde se encuentra en la etapa de validación.

El software de simulación que se utilizara en este estudio será el DSIM desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera (DELPHOS) de la Universidad de Chile y se realizara la validación del mismo. En la Tabla 5 se muestra un análisis FODA del software a utilizar en este trabajo.



**Tabla 5: Análisis FODA software DSIM.**

Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Específico para minería	Creación de Herramienta	Requiere alta programación	Otros softwares
Soporte en Chile	Gran flexibilidad	Altos requerimientos computacionales	
Facilidad para simular grandes modelos	Conexión con sistemas de control	Software en etapa de desarrollo	
Reportes pensados para minería	Licencia Dongle (USB)	Se desarrolla un proyecto	

Se observa que el software DSIM presenta fortalezas en su especificidad y facilidad de reciclar códigos y utilizarlos para grandes modelos, y sus debilidades apuntan a que todavía está en etapa de desarrollo y que requiere de altos conocimientos y requerimientos computacionales (Hidalgo, 2017).

A continuación, se describen en forma reducida estudios realizados sobre simulación de sistema de manejo de materiales realizados con los distintos softwares de simulación.

### ***Promodel***

*Ingeniería básica proyecto Pacífico Superior simulación proceso productivo.* (JRI Ingeniería, 2012b)

Este informe busca determinar el tamaño de la flota óptima de equipos productivos para cada año del plan de producción del sector, según la producción comprometida en el PND 2012. Para esto se simula el mes donde el cociente entre el tonelaje mensual planificado y los puntos de extracción activos sea el máximo del año, luego se simula este mes considerando distintos tamaños de flota, que asegure el cumplimiento de la meta productiva.

Este estudio considera colgadura y aparición de colpas de sobretamaño en los puntos de extracción, no así posibles fallas mecánicas de los equipos. Considera un acopio de 3 baldadas en las estocadas presentes en las estaciones de vaciado. De esta forma se determina que la flota requerida corresponde a la mostrada en la Tabla 6.

**Tabla 6: Dimensión flota de equipos JRI.**

Flota Requerida		Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020
LHD	#	1	1	3	5	5	2
Camiones	#	1	1	3	5	5	2

*Ingeniería de detalles proyecto Pacífico Superior simulación transporte combinación LHD-Camión. (JRI Ingeniería, 2014a)*

El objetivo de este informe es de estudiar distintas capacidades y factores de llenado de LHD con camiones de 60 [ton] y determinar si cumplen los requerimientos de tonelaje. Algo a destacar de este informe es que considera distintos eventos que son inherentes a la minería por métodos caving, como son la reducción secundaria y descolgadas de los puntos de extracción y una estrategia acorde a estos eventos, además de tiempos de utilización de los martillos picadores. Pero por otro lado este estudio considera 12 horas productivas en el sistema de manejo de materiales, sin interrupción por fallas en los camiones operativos. En la Tabla 7 se observan los distintos escenarios simulados con sus resultados:

**Tabla 7: Resultados simulaciones JRI.**

	Volumen Balde LHD [yd <sup>3</sup> ]	Factor Llenado [%]	Capacidad Balde LHD [ton]	Tonelaje Camión [ton]	Baldadas a Camión [#]	Producción Diaria [tpd]
Escenario 1a	15.2	80	15	46	3	15,633
Escenario 1b	15.2	85	16	49	3	16,168
Escenario 1c	15.2	90	17	52	3	16,572
Escenario 2a	13.3	80	13	54	4	16,174
Escenario 2b	13.3	85	14	57	4	16,557

*Metodología de simulación sistema LHD-Sizer.*

Estudio desarrollado con el software Promodel que determino el área de influencia optima de un chancador tipo sizer, al considerar la operación del nivel de producción y la construcción de una sala de chancado.

### *Simplifying the ore handling system through the use of current technology at PMCHS*

Estudio donde se evalúan distintas alternativas para el Sistema de manejo de materiales, considerando la infraestructura existente en el Proyecto Chuquicamata Subterráneo.

### *Modelo de planificación integrado mina-transporte-planta División El Teniente Codelco Chile*

Modelo de simulación que considera el ferrocarril Teniente 8 y la planta concentradora Colón en la División El Teniente y que busca simular la interacción entre ambos.

### *Diseños de explotación en panel caving con trituración temprana con sizer*

Estudio donde se estudian distintas ubicaciones para un chancador sizer y su impacto en la producción de una mina operada con panel caving.

## **Arena**

### *Simulación FFCC T8-T5*

Se buscó simular la interacción entre los ferrocarriles Teniente 5 norte, Teniente 5 sur y el ferrocarril Teniente 8 y el impacto de dichas interacciones en la producción diaria de la División El Teniente.

### *Operación descolgador*

Se simuló distintas lógicas operacionales para la operación de descuelgue de puntos de extracción en minas de panel caving.

## **PMCHS**

Se busca simular el manejo de materiales en el proyecto mina Chuquicamata Subterráneo y verificar el cumplimiento de la producción comprometida.

## **DSIM**

### *Simulación del sistema productivo sector Diablo Regimiento (Valenzuela, 2017)*

Estudio realizado en el sector Diablo Regimiento de la División El Teniente, donde se calibró el software DSIM en un sector operativo. Se buscaba encontrar donde se ubican los procesos limitantes del sector, además de ver el impacto de las interferencias operacionales en el sector. En la Figura 13 se muestran las producciones de los chancadores de las distintas fases tanto de la simulación como del plan minero, y se observa que son muy similares, a excepción de la fase 3 (debido a una mayor cantidad de equipos asignados a esta fase).

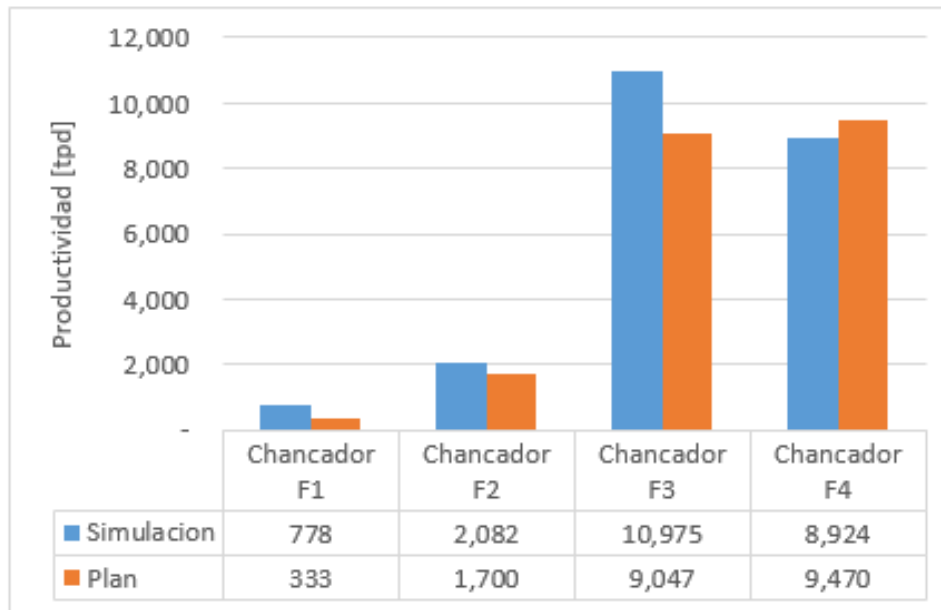


Figura 13: Resultados simulación Diablo Regimiento. (Valenzuela, 2017)

Se determinó que el cuello de botella del sector es la interacción entre los LHD y la correa transportadora. Además, se determinó que para minas de esta producción con 10 réplicas mensuales es suficiente para determinar una adecuada variabilidad.

#### *Prueba piloto software DSIM (Salazar, 2015)*

El objetivo de este estudio es el de variar las capacidades de los equipos de carguío y transporte, así como las asignaciones de los puntos de carga y descarga, para contrastar los resultados con los obtenidos en el estudio "Ingeniería de detalles proyecto Pacífico Superior simulación transporte combinación LHD-Camión". Lo principal de este informe es cambiar los puntos de descarga de los camiones, dependiendo el punto donde fueron cargados. Así se obtienen 6 escenarios posibles, además de generar 2 tipos de simulaciones distintas, lo cual se hizo cambiando las restricciones de los puntos de carguío. El caso A considera que no existe una cuota máxima y el caso B una cuota de 6,000 [tpd]. Finalmente se tienen 12 escenarios distintos. Entre las variables más importantes se consideran 3 turnos de 8 horas, con tiempos perdidos debido a los cambios de turnos, y mantenciones a los camiones. Pero no considera los eventos que generan indisponibilidad de los puntos de extracción, así como un acopio cercano a los puntos de carguío. Al comparar ambos estudios se obtiene la Tabla 8.

**Tabla 8: Comparación estudio Delphos y JRI**

	SPL	JRI	Unidad
Tiempo de ciclo	18.4	17.4	Min
Material total acarreado	16,915	16,174	Tpd
Material total acarreado por hora efectiva	1,150	1,348	ton/hora efectiva
Material total acarreado parámetros JRI	13,808	16,174	Tpd

### ***Simmine***

#### *PMCHS*

Primer estudio realizado con el software Simmine en Chile donde se simuló el nivel de producción del proyecto mina Chuquicamata subterráneo.

*Optimization of truck-loader haulage system in a underground mine: A simulation approach using Simmine*

Estudio realizado en una mina de sublevel caving que optimizó la utilización de los camiones mediante la simulación de distintos escenarios.

### ***Automod***

*Application of simulation to improved planning at Esmeralda, El Teniente Mine, Chile. (Barraza et al., 2004)*

Estudio realizado al momento de cambiar el método de explotación desde panel caving con hundimiento previo hacia panel caving convencional. Fue el primer estudio de análisis de opciones de crecimiento en la División El Teniente que incluyó el uso de simulaciones.

Debido a la diferencia de los desarrollos necesarios en las distintas variantes de panel caving, se tienen distintas disponibilidades de área, siendo menor la disponibilidad en el panel caving convencional. Por esto se determinaron 3 casos de estudio, uno con el área disponible al momento de realizar el estudio, pero con un 65% de utilización de área, el caso 2 considera un aumento en el número de LHD y el caso 3 considera una disminución del área total donde se utiliza la capacidad actual de LHD. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9: Resultados simulación Esmeralda.**

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
LHD [tpd]	25,745	32,117	25,694
Numero LHD	12	15	12
Tren [tpd]	25,672	31,536	25,615
Área Abierta [ $m^2$ ]	111,370	111,370	90,488
Área Utilizada [%]	60%	80%	80%

El uso de simulaciones fue importante debido a que permitió la comparación entre distintos casos, y poder elegir el más conveniente para aprovechar de mejor forma la oportunidad de crecimiento en el sector Esmeralda.

# Capítulo IV

## 4.1 Metodología

La metodología a seguir para este trabajo está basada en la propuesta por Chang para la realización de simulaciones (Chang & Makatsoris, 2001), la cual es: mapear la cadena de procesos y la planificación de la misma, definir los escenarios a simular y los alcances de las simulaciones, levantamiento de información relevante, definir coeficientes de medición de rendimiento, definir rendimiento objetivo, definir condición de fin de simulación y evaluación de la cadena de procesos. Una vez construidos los distintos escenarios se obtienen los resultados y se analizan, realizando distintos análisis de sensibilidad, para ver qué tan robustos estos, Figura 14. Finalmente se concluye el trabajo y se realizan recomendaciones.

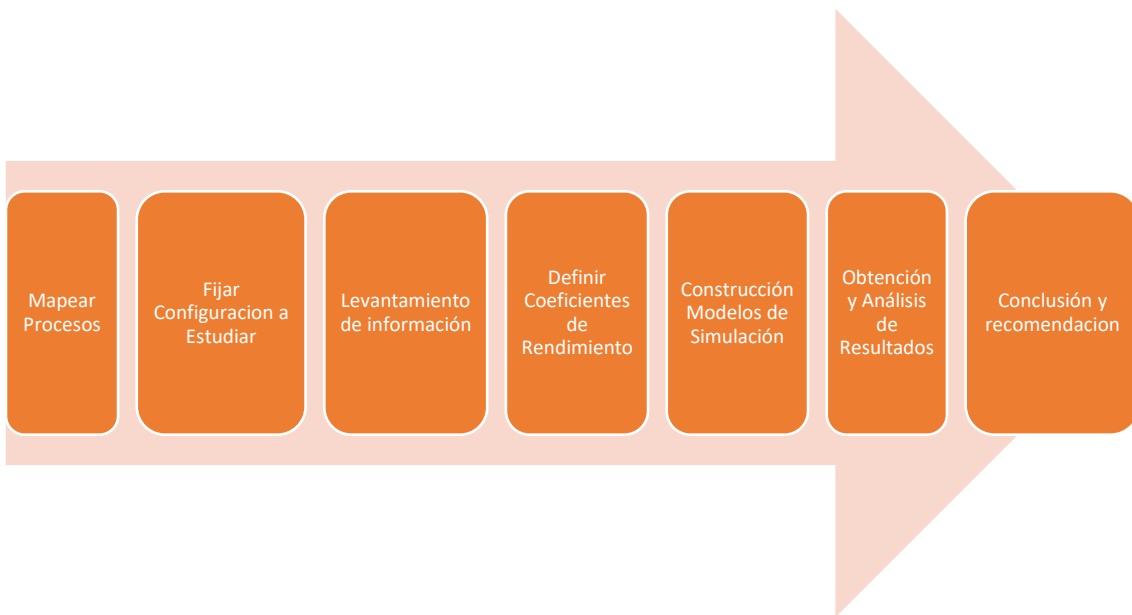


Figura 14: Metodología de Chang.

En base a lo anterior, se adecuo la siguiente metodología, mostrada en la Figura 15, la cual está pensada como una metodología más operativa y aplicable al caso de estudio, donde se muestran los procesos iterativos para la construcción y validación del modelo de simulación.

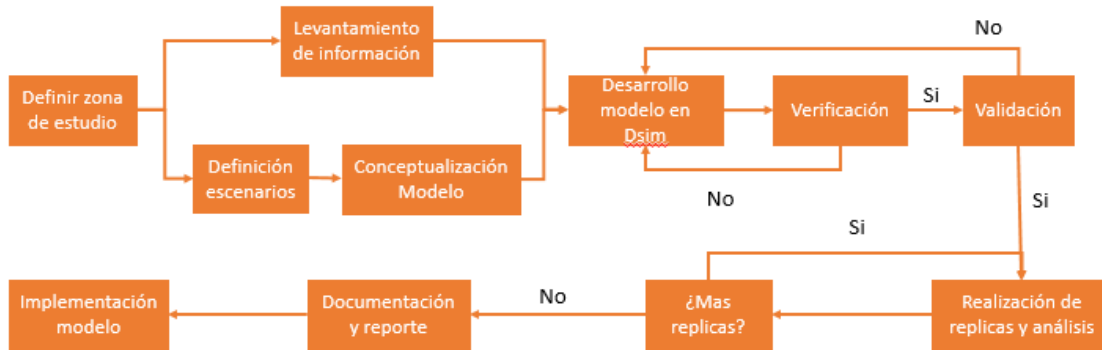


Figura 15: Metodología.

### ***Definir zona de estudio***

Se debe definir la zona donde se realiza el estudio, además de los objetivos, general y específicos, los alcances. Esto para tener claridad de lo que se busca lograr con el estudio y poder recabar la información adecuada para lograr alcanzarlos.

### ***Definición escenarios***

Se determina cuáles son los casos que se desean estudiar y son considerados de importancia para la realización del proyecto, además de las distintas estrategias a utilizar.

### ***Conceptualización modelo***

Antes de simular cualquier proceso se debe entender que es, cómo opera y que se espera del proceso, las características diferenciadoras del mismo, el negocio en el cual se encuentra inmerso y la estrategia del proceso, ya sea de corto, mediano y largo plazo. Esto para poder definir adecuadamente el límite de batería de la simulación, así como los casos que son realmente posibles que ocurran y tengan un impacto importante. Además se debe definir desde un principio cual es el objetivo que se busca con la simulación, ya sea estudiar la robustez de un proceso, reproducir la realidad y ver sus debilidades, estimar rendimientos futuros, etc.

### ***Levantamiento de información***

La fuente de información más relevante para la simulación de un proceso es la información que ocurre realmente en la operación del proceso, ya sea medida directamente u obtenida mediante registros históricos.

En caso de que esta información no se puede obtener, ya sea porque el proceso todavía no está en operación, no existe un registro histórico robusto, o no es posible el levantamiento directo de la misma se debe utilizar información que también sea aplicable al proceso en estudio, ya sea de un proceso con características similares o experiencias



previas de los trabajadores y supervisores que estarán involucrados en la operación del proyecto.

### ***Desarrollo modelo en DSIM***

Una vez que se ha entendido como funciona el proceso, se ha recabado la información que se incluirá en el modelo y se sabe cuáles serán los rendimientos objetivos se construye el modelo de simulación.

Se debe delimitar correctamente cual será el límite de batería del modelo, esto para no incluir procesos que no impactan el comportamiento global del proceso, pero tampoco se pueden dejar procesos importantes de lado. Además se deben incluir los distintos procesos paralelos que son relevantes para la operación del modelo.

### ***Verificación***

La verificación consiste en comprobar que el modelo y el programa se comporten como se espera, es decir determinar si el modelo representa de forma precisa la descripción del modelo conceptual y las especificaciones del desarrollador.

Consiste en un proceso iterativo que se realiza paso a paso a medida que se construye el modelo hasta que se termina la construcción del mismo. Se recomienda a medida que se programe el modelo ir verificando por separado cada una de las partes de éste, para que de esta manera después no se tenga que verificar el modelo completo, lo cual genera dificultades para localizar los errores. Después de este paso se debe a realizar la etapa de validación del modelo.

### ***Validación***

En esta etapa se determina si el modelo de simulación es una representación fiable del sistema para los objetivos particulares de estudio.

### ***Realización de réplicas y análisis***

Una vez validado el modelo, se procede a simular el sistema en estudio y analizar las vulnerabilidades y oportunidades encontradas, para finalmente interpretar los resultados.

### ***Documentación y reporte***

Finalmente, una vez que se tienen los análisis correspondientes y no se requiere la realización de más corridas, se hace la documentación de los resultados y análisis de estos en base a los objetivos del proyecto.

### ***Implementación del Modelo***

Dependiendo del éxito que obtuvo el modelo es que puede llegar a generalizarse para distintos casos de estudios. Si esto ocurre, el modelo queda a disposición del cliente, quien debe seguir todos los pasos de la metodología rigurosamente incrementando así la probabilidad de tener éxito en los nuevos casos de estudio.

# Capítulo V

## 5.1 Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a la aplicación de la metodología de simulación descrita en el capítulo 4 al sector Pacífico Superior el cual se encuentra iniciando la etapa productiva.

### 5.1.1 Entender cadena de procesos

Para entender de manera eficiente la cadena de procesos que se realizan en el sector Pacífico Superior este trabajo fue realizado en conjunto entre la superintendencia Mina Sur encargada de la operación del sector y la superintendencia de Planificación Minera Metalúrgica la cual realiza la planificación de mediano y largo plazo del sector, esto se realizó para así poder entender de manera adecuada tanto por la operación como por la planificación del sector. Esto con el fin de poder dar una respuesta adecuada a las preguntas existentes en ambas superintendencias alrededor del Pacífico Superior algunas de las cuales son:

- ¿Cuál es la capacidad productiva máxima del Pacífico Superior?
- ¿Qué configuraciones del nivel de transporte intermedio son de interés para la producción?
- ¿Se cumple la producción del plan de producción comprometida en el PQ 2018 al considerar las fallas y mantenciones de los equipos?

El sistema de manejo de materiales del sector Pacífico Superior considera la infraestructura existente en el nivel de producción y en el nivel de transporte intermedio. En la Figura 16 se muestra el límite de batería del modelo de simulación.

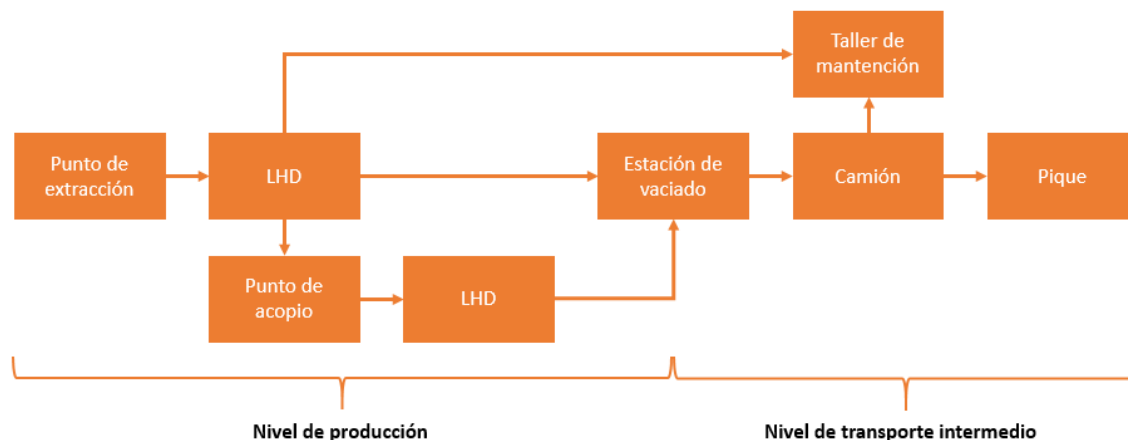


Figura 16: Límite de batería modelo de simulación.

### 5.1.2 Definir configuraciones a estudiar

Los casos a estudiar, de interés para las 2 superintendencias involucradas se detallan a continuación:

#### ***Loop completo***

Corresponde al caso definido como base por la ingeniería del proyecto, donde los camiones recorren el loop del nivel de transporte intermedio en sentido anti horario, descargando el material en los distintos OP del sector, 13, 15 y 16.

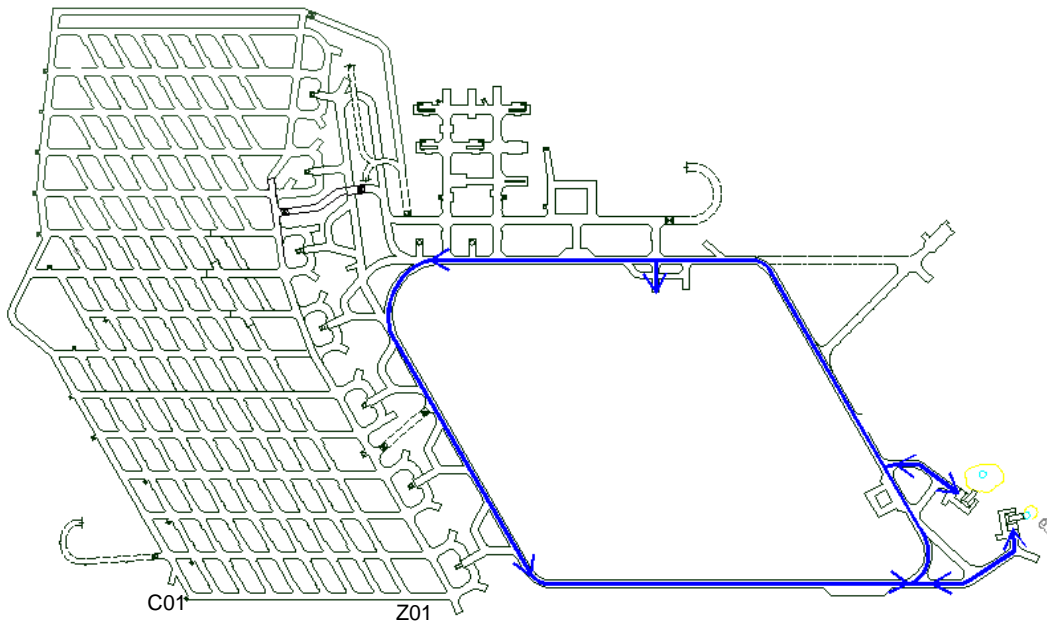


Figura 17: Circuito loop completo.

#### ***Circuito push-pull***

Se consideran dos circuitos independientes, uno por el socavón sur donde los camiones descargan el material en los OP 15 y 16 y otro por el socavón norte donde los camiones descargan en el OP 13. En la Figura 14 se muestra un periodo en el que solo existe extracción entre las estaciones de vaciado 1 a 4

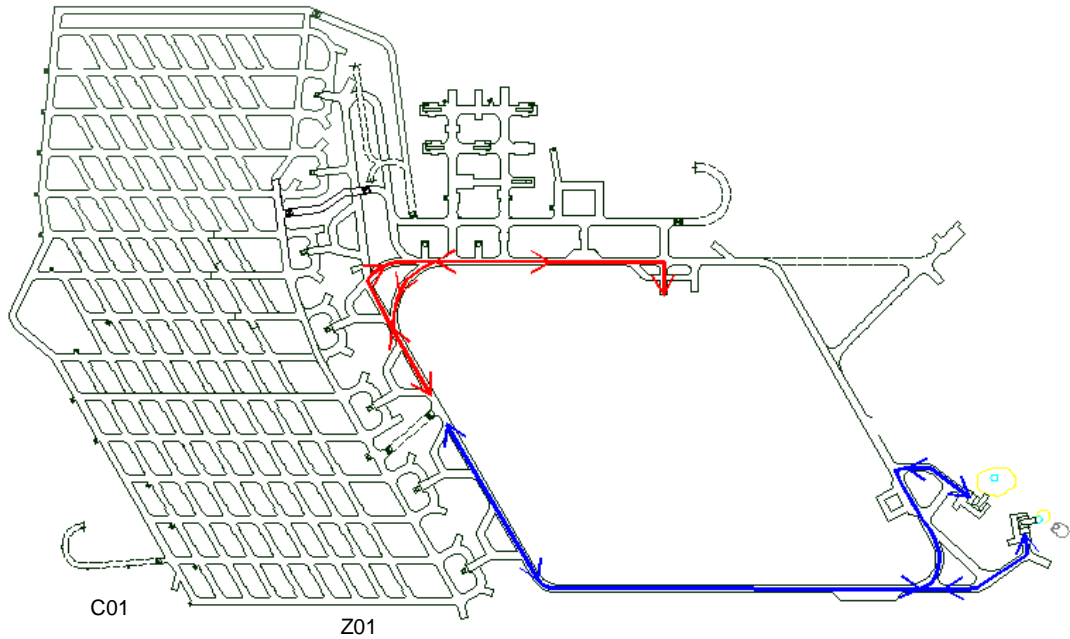


Figura 18: Circuito push-pull.

**Falla chancador Teniente 6**

Aun estando el chancador Teniente 6 fuera del límite de batería de la simulación es importante para la misma, ya que los OP 15 y 16 descargan el material en este chancador, así pues si este llega a salir de operación también lo harán estos piques, por lo tanto es necesario conocer la capacidad del Pacífico Superior cuando solo está operativo el OP 13.

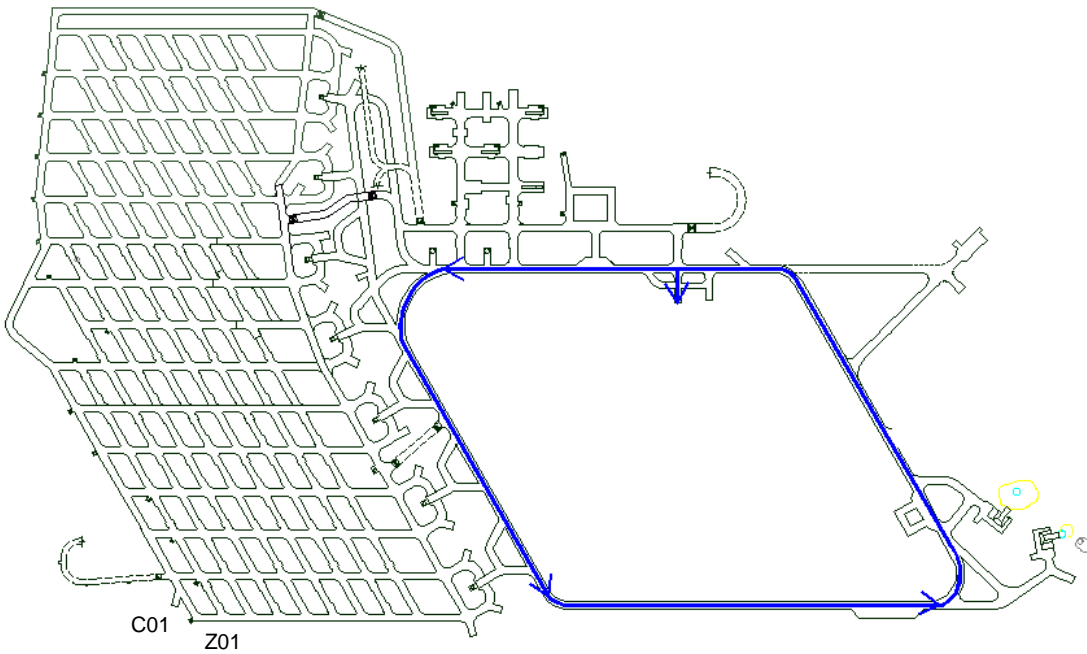
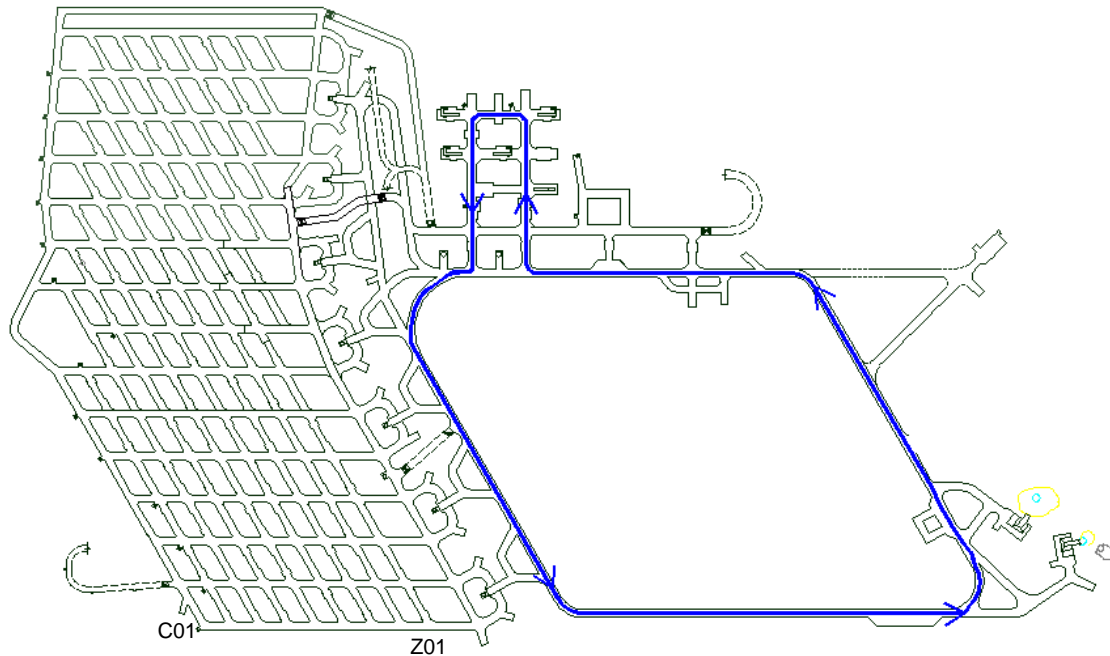


Figura 19: Falla chancador Teniente 6.

## ***Rutas de Servicios***

### *Camiones*

Dado que el taller mecánico está ubicado en la misma cota que el nivel de transporte intermedio se adecuó galerías de acceso por el socavón norte donde, cuando sea necesario, los camiones accederán a estas y se dirigirán al taller. Esto ocurre en caso de fallas o mantención de los camiones, Figura 20.



**Figura 20: Ruta taller camiones.**

### *LHD*

Existe una rampa de conexión entre el nivel de producción y el de transporte intermedio ubicada al norte del sector Figura 21, esto para que los equipos LHD no interfieran con el funcionamiento de los camiones ingresando al circuito de estos, cuando deban dirigirse al taller mecánico.

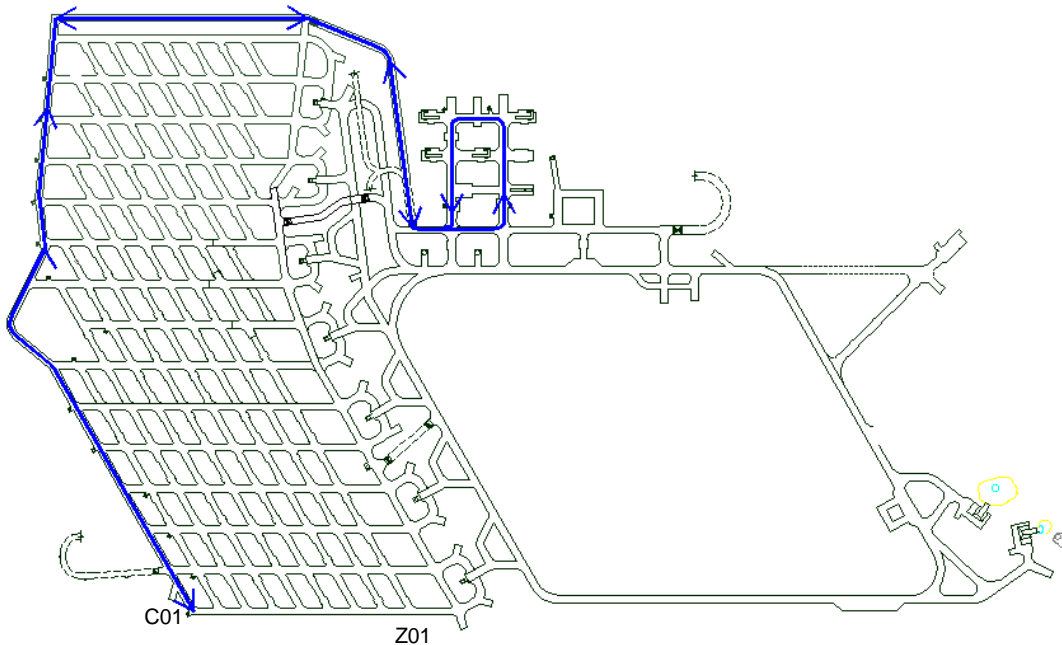


Figura 21: Ruta talleres LHD.

### ***Punto de espera camiones***

En el circuito donde los camiones recorren el loop completo, el punto de espera está ubicado afuera de los talleres por el nivel de transporte intermedio.

En el caso de los circuitos push-pull, el punto de espera en el circuito por el socavón norte, en un principio estará ubicado en la galería que conecta la estación de vaciado 4 con el socavón norte y cuando la estación de vaciado 5 entre en producción la espera será movida a la galería de conexión entre la estación de vaciado 5 y el nivel de transporte intermedio, este punto de espera depende de que estaciones de vaciado estén en operación en el instante simulado. Para el circuito que pasa por el socavón sur la espera de los camiones estará ubicada en el ensanche ubicado al este del mismo.

### ***5.1.3 Levantamiento de la información***

La información considerada para las simulaciones proviene de distintas fuentes.

#### ***Layout nivel de producción y transporte intermedio***

El layout de los niveles de producción y transporte intermedio fue obtenido del plano de construcción del proyecto, el cual fue facilitado por la Gerencia de Proyectos de la División El Teniente. (JRI Ingeniería, 2014b)

#### ***Fallas de equipos***

Para obtener los datos de las fallas de los equipos se utilizó la información de los operadores de los equipos LHD de 13 [yd<sup>3</sup>] de la unidad Pipa Norte entre los años 2016-2017, dado que ellos serán los que operaran los equipos del Pacífico Superior. Estos datos fueron proporcionados por la unidad de Planificación y Confiabilidad Mina.

### ***Estrategia de mantención.***

La estrategia de mantención de los equipos a utilizar en el sector fue proporcionada por la Unidad de Planificación y Confiabilidad Mina (Mina, 2017) y se muestra en la Tabla 10. Estas mantenciones se realizan según las horas por horómetro.

**Tabla 10: Estrategia de mantención DET.**

Tipo de Mantención	Numero de Mantenciones	Tiempo de Mantención
50 horas	9	2 horas
250 horas	1	6.59 horas
50 horas	9	2 horas
500 horas	1	9.5 horas
50 horas	9	2 horas
250 horas	1	6.59 horas
50 horas	9	2 horas

Al finalizar este ciclo se realiza una mantención final, la cual depende de en qué ciclo de mantención se encuentra el equipo, y al finalizar el quinto ciclo el equipo se retira de la operación. Estas mantenciones se muestran en Tabla 11 (Mina, 2017).

**Tabla 11: Mantención final ciclo DET.**

Tipo de Mantención	Numero de Ciclo	Tiempo de Mantención
1000 horas	1	15.49 horas
4000 horas	2	20 horas
1000 horas	3	28 horas
8000 horas	4	68 horas



### ***Tiempos de reducción secundaria***

Los tiempos que se demoran las cuadrillas en realizar la reducción secundaria, fueron medidos en terreno durante la duración del trabajo. La distribución que siguen estos tiempos se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12: Distribución tiempos de reducción secundaria.

Distribución	Mínimo	Máximo
Uniforme	9.3 [min]	28.3 [min]

### ***5.1.4 Definir coeficientes de rendimientos***

Los coeficientes para comparar los rendimientos de las distintas configuraciones son la producción promedio, diaria del sector y tonelaje pasante por los distintos piques [tpd].

### ***5.1.5 Construcción modelo de simulación***

#### ***Elementos principales del modelo***

##### ***Infraestructura***

- **Puntos de extracción:** corresponde al lugar donde el mineral se deposita producto del caving, para luego ser retirado por los equipos LHD para ser llevado a un punto de carga de camiones o de acopio según sea la disponibilidad de los camiones. Son puntos fijos con distinta cantidad de material disponible, el cual está sujeto a restricciones de velocidad de extracción y a eventos de colgadura.
- **Puntos de acopio nivel de producción:** corresponden a frontones que ubicados al lado del punto de carga de camiones donde se almacena material para que cuando exista un camión listo para ser cargado esto se pueda realizar con viajes cortos. Puede almacenar hasta 80 [ton] y cada calle tiene su propio punto de acopio.
- **Puntos de carga de camiones:** son los puntos donde los LHD esperan que se ubique un camión y lo carga ya sea con material del punto de acopio, o si no hubiese disponible, van hasta los puntos de extracción a buscar material. Por cada dos calles existe un punto de carga de camiones y solo un LHD puede operar por punto de carga de camiones.
- **Taller de mantención (TD):** Es el lugar al que se dirigen los equipos, tanto LHD como camiones, para realizar las mantenciones programadas y reparación de fallas, se ubica al norte del nivel de transporte intermedio.
- **Puntos de vaciado nivel de transporte intermedio:** piques de traspaso 13-15 y 16, donde los camiones van a descargar el material. Dicho material se considera como salido del sistema y se suma a la producción total del sector.

### Principales equipos

- Nivel de producción  
Los equipos presentes en este nivel corresponden a la flota operativa de equipos LHD con las características mostradas en la Tabla 13

Tabla 13: Características LHD.

LHD	Valor medio ( $\mu$ )	Error ( $\sigma$ )	Distribución	Unidad
Flota	4	-	-	Unidades
Capacidad	20	-	-	Ton
Tiempo descarga	60	10	Uniforme	S
Tiempo carga	30	10	Uniforme	S
Velocidad cargado	15	-	-	km/hr
Velocidad vacío	20	-	-	km/hr
Turnos	3	-	-	Turnos/día

- Equipos nivel de transporte intermedio.  
Los equipos presentes en el nivel de transporte intermedio corresponden a la flota de camiones operativos, cuyas características se muestran en la Tabla 14

### Disponibilidad Puntos de Extracción

La disponibilidad de los distintos puntos de extracción está definida por 2 características principales las cuales serán explicadas a continuación.

- **Puntos en quiebre:** Puntos con material para ser extraído por los LHD y ser cargados en los camiones para su extracción según el plan de extracción mensual. Si un punto no está en quiebre se considera como punto futuro.
- **Puntos operativos:** Se definen como los puntos que están en condiciones para ser extraídos por los equipos LHD, durante el turno actual, lo cual significa que no se deben encontrar colgados, con presencia de colpas de sobretamaños o con la carpeta de rodado en mal estado.

- **Tabla 14: Características Camiones.**

Camiones	Valor medio ( $\mu$ )	Error ( $\sigma$ )	Distribución	Unidad
Flota	5	-	-	Unidades
Capacidad	40	-	-	Ton
Tiempo descarga	60	12	Uniforme	S
Tiempo carga	-	-	-	-
Tiempo descarga	20	10	Uniforme	S
Velocidad cargado	25	-	-	km/hr
Velocidad vacío	40	-	-	km/hr
Turnos	3	-	-	Turnos/día

### ***Layout***

El modelo incluye las 10 calles del Pacífico Superior y las 5 calles de la Extensión Norte con todos los puntos de extracción pertenecientes a cada una con las estaciones de vaciado correspondientes. Además se consideran los 3 piques del sector operativos, así como el taller mecánico.

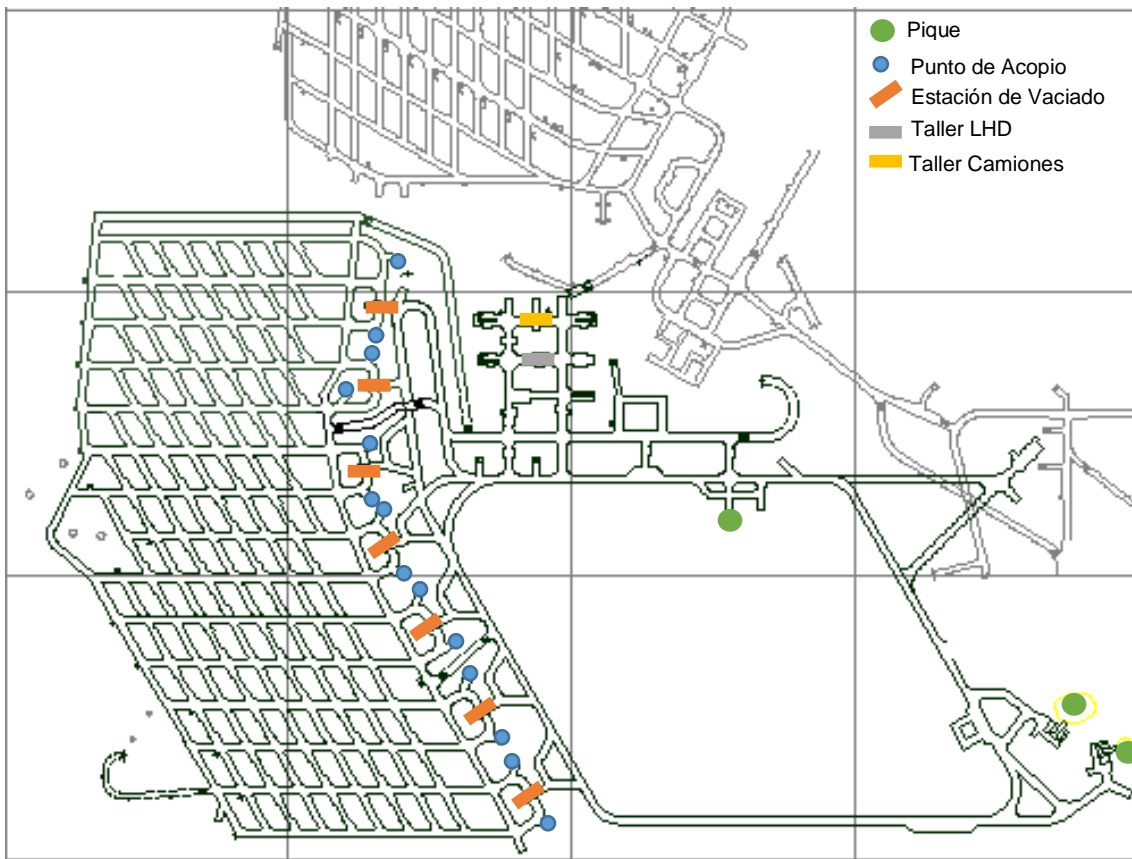


Figura 22: Layout Pacífico Superior.

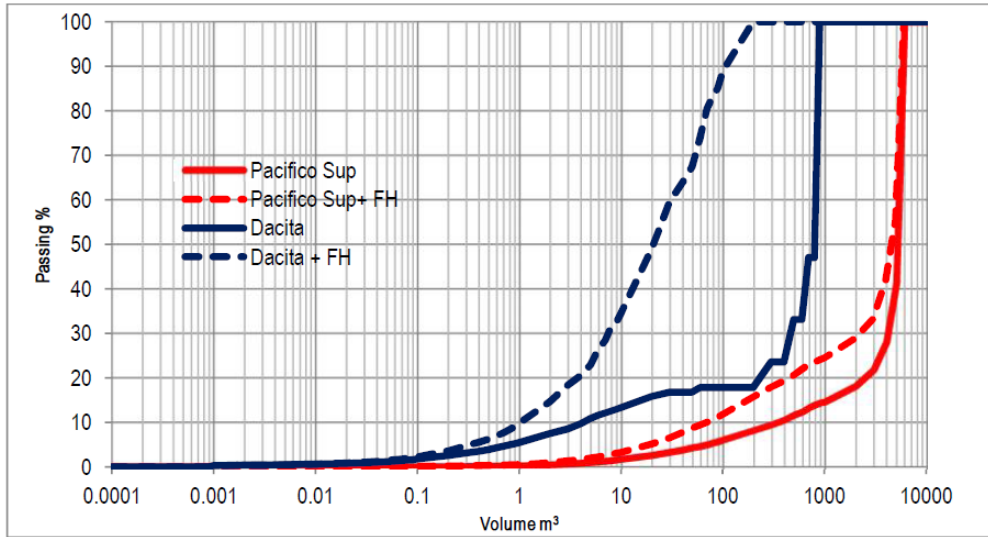
En la Figura 22 se observa la ubicación de las distintas infraestructuras tales como los 14 puntos de acopio, las 7 estaciones de vaciado, los 3 piques y los talleres mecánicos para los equipos LHD y camiones.

### ***Inputs del Modelo***

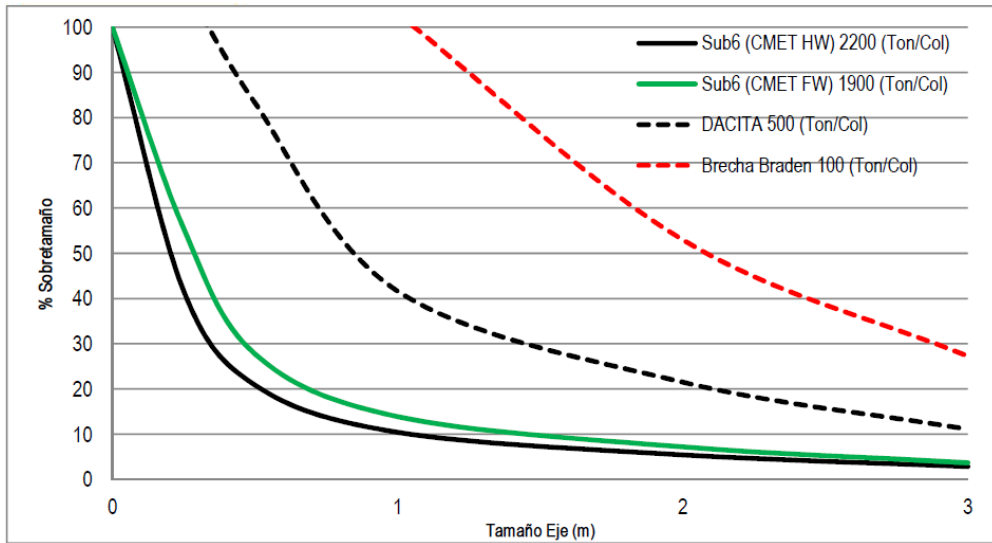
En esta sección se muestran los distintos inputs que se ingresan en el modelo para simular el sector Pacífico Superior.

#### *Tipo de Roca*

El sector Pacífico Superior posee 2 tipos principales de roca, en los puntos más cercanos a las estaciones de vaciado se encuentra roca tipo brecha la cual posee baja hundibilidad y baja presencia de vetillas, y luego existe una roca CMET primaria, Figura 3, esto es de gran importancia pues cada tipo de roca posee una distinta frecuencia de colgaduras (Guiñez, 2017). En la Figura 23 se observa la curva de fragmentación de la roca tipo Brecha donde se desprende que la frecuencia de colgaduras es 5 veces peor que un sector con baja hundibilidad (sector Dacita). Es por esto que se espera una frecuencia de colgaduras de 100 [ton/col] para la roca tipo Dacita y Brecha Braden.



**Figura 23: Curvas de fragmentación para roca Dacita y Brecha Braden.** (Seguel & Schachter, 2013)



**Figura 24: Curvas de fragmentación para distintos sectores DET.** (Guiñez, 2017)

Para la roca CMET no está definido un valor de frecuencia de colgadas, es por esto que se tomaran 3 casos principales, uno con una frecuencia de 300 (Ton/Col), otro con 500 (Ton/Col) y finalmente uno con 1,000 (Ton/Col). Estos 3 casos corresponden a un caso muy pesimista, un caso pesimista y otro caso favorable. Esto ocurre a que todavía no se tiene claridad sobre cuál será la frecuencia de colgadas en este tipo de roca.

*Plan de Producción*

Se determinó que para estudiar la capacidad del sistema de manejo de materiales de cumplir la cuota productiva lo más adecuado es simular un mes cuando el Pacífico Superior haya alcanzado su régimen productivo. Se selecciona el mes de Noviembre de

2020 porque es el periodo donde existen más puntos operativos y es representativo del periodo en régimen.

De la Figura 25 se observa que hay 9 calles operativas, desde la calle 2 hasta la calle 10 y la Extensión Norte todavía no entra en operación y en la Tabla 15 se muestran los tonelajes disponibles por cada calle operativa.(SPL, 2018)

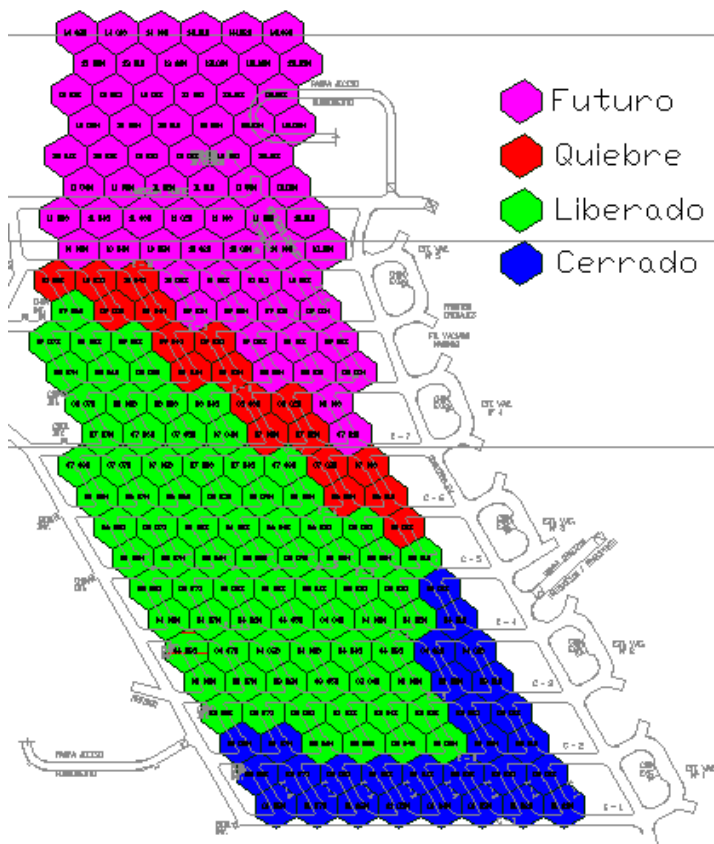


Figura 25: Estado puntos de extracción Noviembre 2020.

Tabla 15: Tonelaje disponible por calle.

Calle	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tonelaje [tpd]	329	1,748	1,994	2,286	2,649	2,335	1,998	1,295	363

Para estudiar la producción de la Extensión Norte se simulara el mes de Agosto 2023, debido a que se tiene la mayor producción de la Extensión, además de que todos los puntos ya están en operación y todavía quedan puntos operativos en el Pacífico Superior lo cual permite además estudiar la interacción entre estos 2 sectores.(SPL, 2018)

### Variables de Salida

Se obtienen los siguientes indicadores de producción y utilización:

### *Tonelajes*

Se obtienen los tonelajes por cada equipo, pique y la producción del sector en general.

### ***Procesos en Paralelo***

Junto con el proceso de movimiento de equipos, se presentan los siguientes procesos en paralelo que son los que ocurren de manera simultánea al proceso principal y son los que generan las interferencias del sistema

### *Mantenciones Programadas de Equipos*

En este modelo las mantenciones de los equipos se realizan cada 50 horas de horómetro, de acuerdo a los lineamientos divisionales de mantención, y estas tienen una duración de 2 horas. A esto no se le agrega variabilidad debido a que cuando se cumplen las horas requeridas el equipo se debe dirigir hacia el taller mecánico y las mantenciones siguen un estricto plan de ejecución por lo que la variación en la ejecución es baja debido a que el taller mecánico tiene estos equipos como preferencia (JRI Ingeniería, 2012a). Además como se simula un mes de operación no se considera que sea necesario la realización de una mantención mayor.

### *Fallas de Equipos*

Para reproducir las fallas de los equipos se tomó en consideración los datos de fallas de los equipos de 13[Ton] de la Unidad Pipa Norte, esto debido a que son los más ícercanos al tamaño de los LHD utilizados en el Pacífico Superior y serán operados por los mismos trabajadores que los equipos del Pipa Norte.

Se tomaron en cuenta todos los tipos de fallas y se modelaron por un tipo de falla en el modelo, debido a que separar por tipos de fallas no tiene un gran impacto en el modelo (Valenzuela, 2017). Los datos de tiempo entre falla y duración de la reparación se ajustaron a una variable aleatoria y el resultado se muestra en la Tabla 16

**Tabla 16: Parámetros ajuste fallas**

Fallas LHD		Parámetros distribución Weibull		
Tipo Falla	Tiempo entre Fallas		Tiempo de Reparación	
	Factor Escala [Días]	Factor Forma	Factor Escala [Hr]	Factor Forma
Falla	3.103	0.698	1.513	0.301

Debido a que no existe una base de datos confiable para los camiones, ni existe un sector similar desde donde sacar datos de fallas se asume que las fallas de estos tendrán el mismo comportamiento que para los LHD.

## ***Criterios de Operación***

En la siguiente sección se muestran los criterios de operación para los distintos equipos que operan en el sector, estos son los LHD, camiones y la cuadrilla de reducción secundaria

### *LHD*

Los equipos LHD son aquellos que llevan a cabo el plan de extracción realizado por la operación y su tarea es llevar el material desde los puntos de extracción hasta las estaciones de vaciado o los puntos de acopio, dependiendo de la existencia de algún camión disponible. Es debido a esto que existe una gran variabilidad en la operación de estos equipos.

Es de gran importancia notar que los equipos LHD toman la decisión sobre cual punto de extracción deben dirigirse y al lugar donde depositara el material posteriormente, ya sea una estación de vaciado o un punto de acopio. Esta decisión es debido a que para tomar decisiones inmediatas cuando se está desplazando requiere una gran cantidad de recursos computacional, así las decisiones se realizan antes de empezar a moverse. Además también verifica que se cumplan las condiciones necesarias para la operación, es decir la calle se encuentra disponible, si se está en horario de colación, cambio de turnos o si se debe dirigir a los talleres mecánicos por mantención o falla.

### *Camión*

Los camiones transportan el material desde las estaciones de descarga desplazándose por el Nivel de Transporte Intermedio hacia los distintos piques existentes. Debido a la forma de cargado de estos es que el tiempo del ciclo de cargado puede variar de gran manera puesto que el camión puede ser cargado con material traído desde los puntos de extracción o desde los puntos de acopio según corresponda. Al igual que lo ocurrido con los equipos LHD la decisión de a que estación de vaciado o pique, dependiendo de en qué parte del ciclo se encuentra, se toma en puntos específicos del ciclo, ya sea cuando se está en el punto de espera al frente de los talleres mecánicos donde se les asigna un punto de descarga, o en el socavón sur donde se les asigna un pique a donde dirigirse a descargar el material. En la Figura 28 se observan los distintos criterios de decisión.

Primero se debe verificar que existan las condiciones de seguridad para operar esto se ve reflejado en verificar ocurrencia de fallas y mantenciones, luego que no se encuentre en un periodo de colación o de cambio de turno. Luego se espera que exista material disponible, luego el camión se dirige a la estación de vaciado donde espera a ser cargado con 2 baldadas. Una vez se encuentra cargado se revisan los 3 piques existentes en el sector y los que se encuentran disponibles se agregan a una lista de tareas, de la cual se escoge un pique con los criterios mostrados en la Tabla 17.



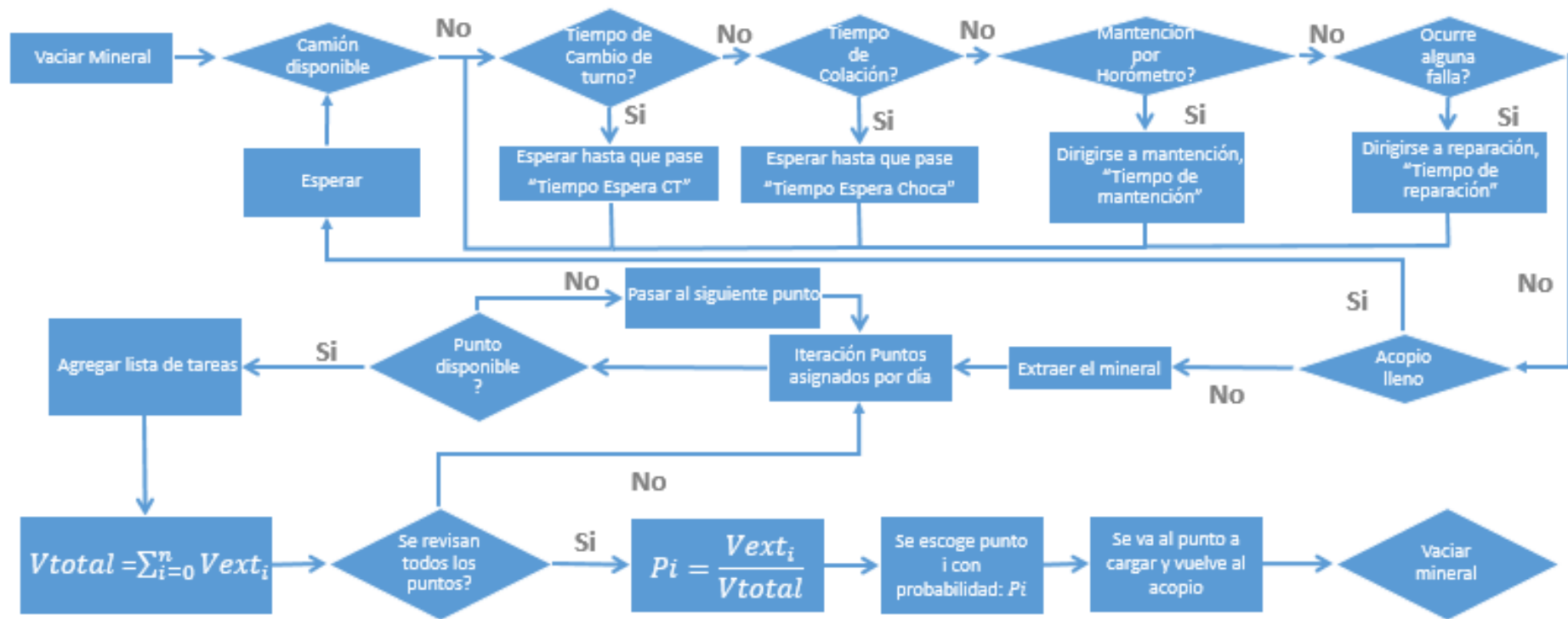


Figura 26: Criterio de decisión LHD sin camión.

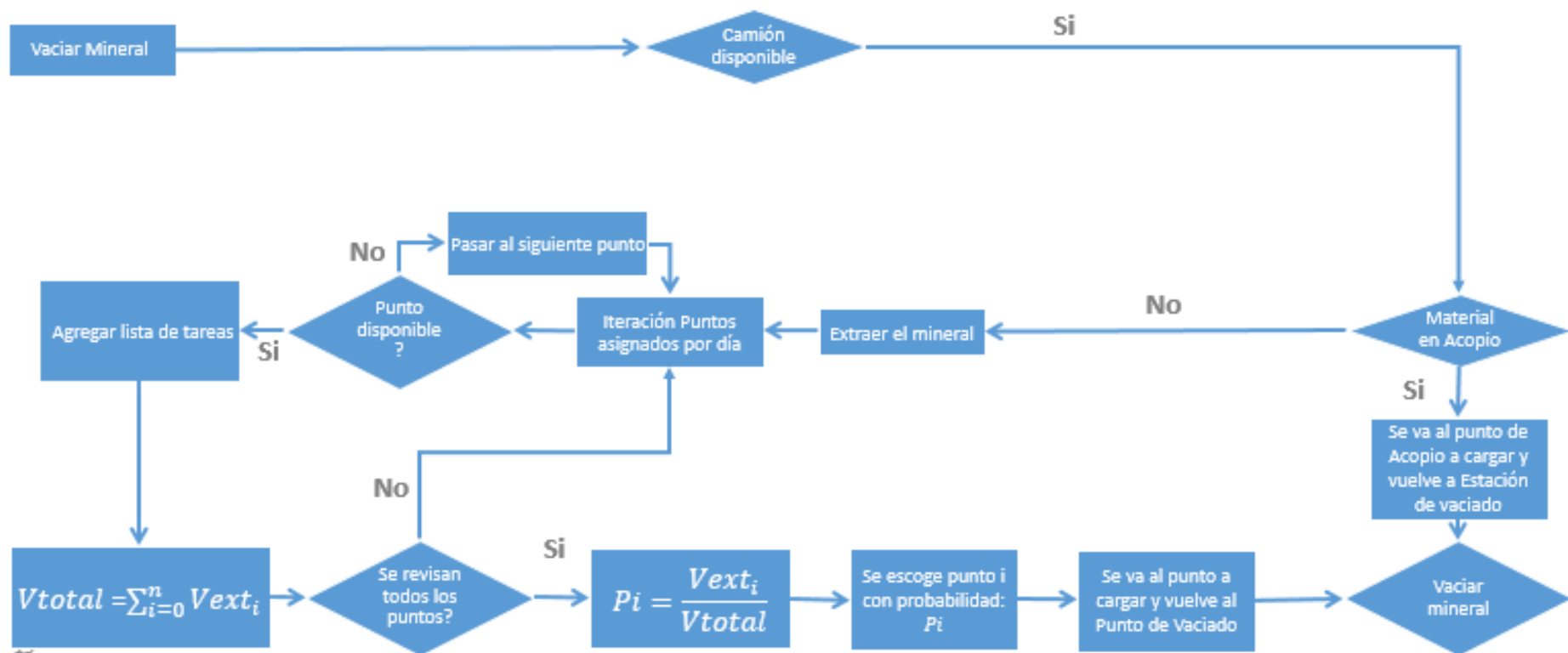


Figura 27: Criterios de decisión LHD con Camión.

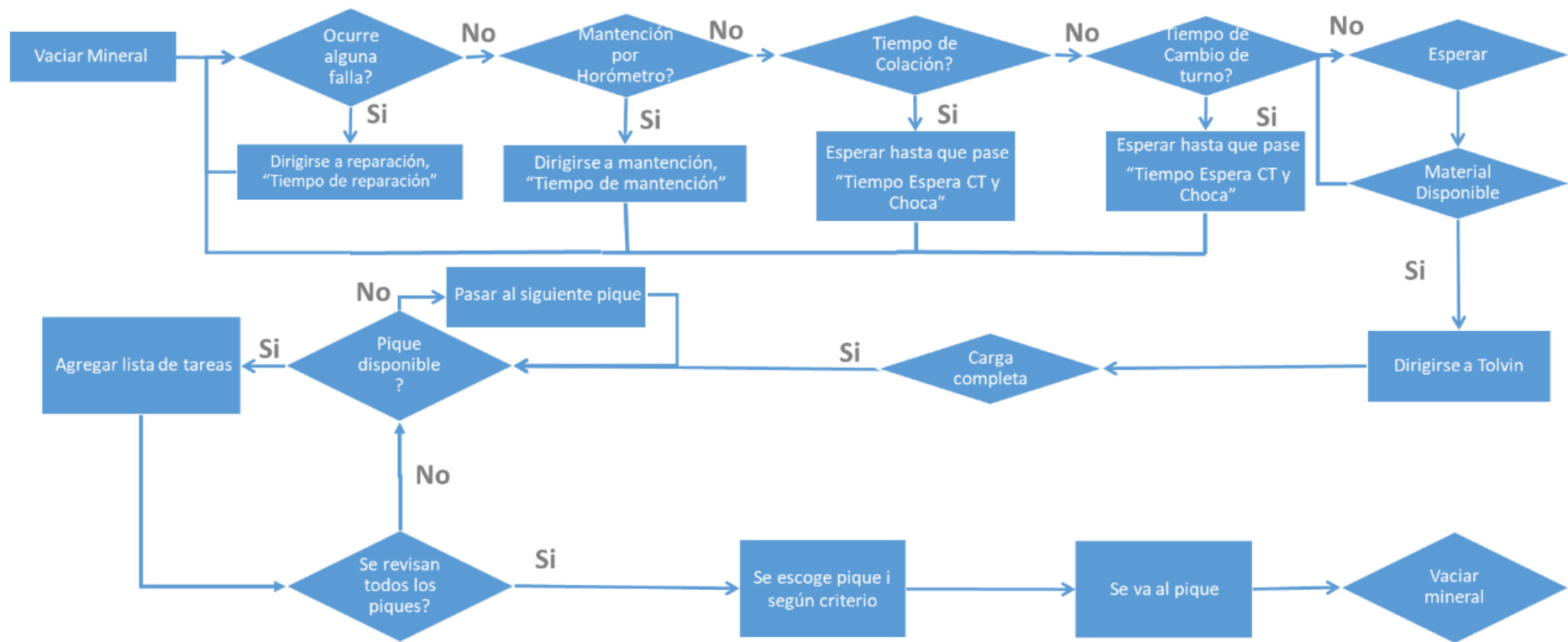


Figura 28: Criterios de operación camión.

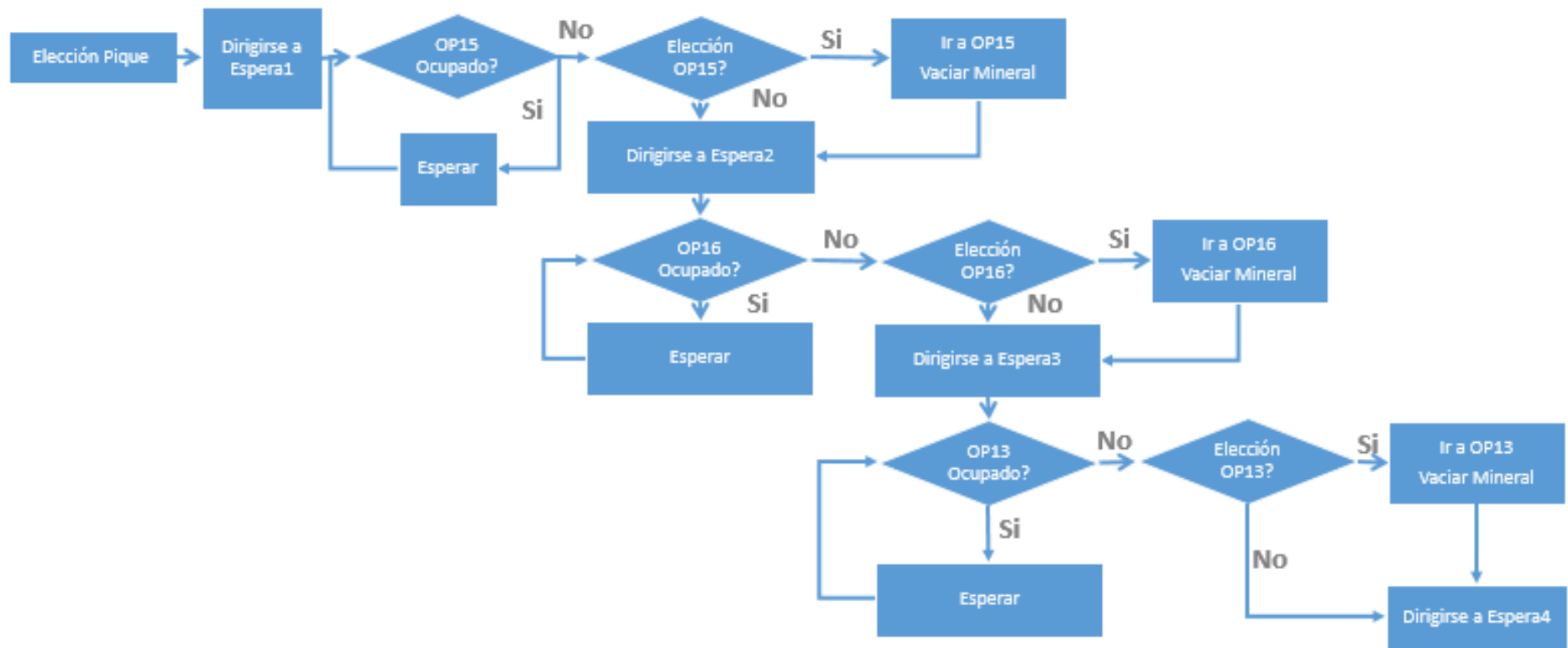


Figura 29: Criterios de operación segura camión.



Figura 30: Criterios de decisión cuadrilla de reducción secundaria.

**Tabla 17: Criterios de elección de pique.**

<b>Igualitaria</b>	Probabilística	Cada pique disponible tiene la misma probabilidad de ser escogido
<b>Preferencia al más lejano</b>	Probabilística	El pique más lejano tiene mayor probabilidad de ser escogido
	Determinística	Se selecciona el pique más lejano
<b>Preferencia al más cercano</b>	Probabilística	El pique más cercano tiene mayor probabilidad de ser escogido
	Determinística	Se selecciona el pique más cercano

Una vez que el pique se encuentra seleccionado y el equipo se encuentra movilizándose por el nivel de transporte intermedio se debe ir verificando que cada pique por el cual se pasa no está ocupado, esto se realiza para que no ocurran accidentes. Este proceso de decisión se muestra en la Figura 29. Una vez que se vacía el material el camión se reintegra al camino principal y continúa pidiendo los permisos adecuados al pasar por los piques restantes.

#### *Reducción Secundaria*

Dado la existencia de una cuadrilla de reducción secundaria, ya sea para descolgar los distintos eventos de colgadura y realizar la reducción secundaria se muestra la lógica de decisión en la Figura 30

#### ***Replicas Modelo de Simulación***

Según lo determinado en trabajos previos (Valenzuela, 2017), para simulaciones de elementos discretos con un grado de variabilidad similar al modelo que se construye en el presente trabajo, con 10 réplicas es suficiente para estabilizar los resultados.

#### ***5.1.6 Obtención y análisis de resultados***

Se realizarán análisis de sensibilidad a: frecuencia de colgaduras, frecuencia de fallas, tiempo de fallas para LHD y camiones por separado y factor de llenado de los camiones, esto para poder determinar que variable es la que tiene una mayor importancia en la producción, esto para categorizar las variables y poder atacar las que tengan una mayor injerencia sobre la producción.

### ***5.1.7 Recomendación opción***

Se recomienda la mejor opción de acuerdo a los coeficientes de rendimiento establecidos en el punto 4.3, además de estimar las producciones en caso de falla en alguna estructura crítica del proyecto, casos definidos en 4.1.

# Capítulo VI

## 6.1 Resultados

### 6.1.1 Capacidad nominal nivel de transporte intermedio

Para determinar la capacidad máxima del nivel de transporte se simula en primera instancia la producción del Pacífico Superior por 12 horas pero sin interferencias operacionales en el nivel de producción, es decir no ocurren eventos de colgaduras en los puntos de extracción, además todo el material disponible se encuentra en las dos líneas de zanjas más cercanas a la estación de carguío, por lo cual el punto de acopio siempre se encontrará lleno al momento de ubicarse un camión y la operación de carguío del camión se asemeja a un carguío mediante piques. Además existe una asignación equiprobable para la asignación de piques. Se simularon 30 días independientes y se obtuvieron los resultados de la Tabla 18.

Tabla 18: Capacidad máxima nivel de transporte intermedio

	OP13	OP15	OP16	Total
Máximo	6,200	6,440	6,080	16,660
Media	5,303	5,620	5,453	16,376
Moda	5,200	5,880	5,520	16,200
Mínimo	4,600	4,840	4,400	16,120

Se observa que en todas las simulaciones se cumple la meta productiva de 15,000 [tpd].

### 6.1.2 Capacidad máxima real nivel de transporte intermedio

Se incorporan las interferencias operacionales causadas por la formación de arcos de colgaduras y aparición de colpas de sobretamaño. Para determinar la capacidad máxima real del nivel de transporte intermedio y se replican 10 periodos de un día de duración. Esto porque es equivalente al mejor día operacional que es aquel cuando no ocurren fallas de equipos y no se deben realizar mantenimientos.

#### *Asignación camiones*

Como primer paso se define la asignación de camión-pique de vaciado óptima y que se utilizara posteriormente. Para esto se incorpora solamente la formación de arcos de colgaduras y aparición de colpas de sobretamaños. Se simulan 10 réplicas de periodos de un día con las asignaciones definidas en la Tabla 17. Los resultados se muestran en la Tabla 19.



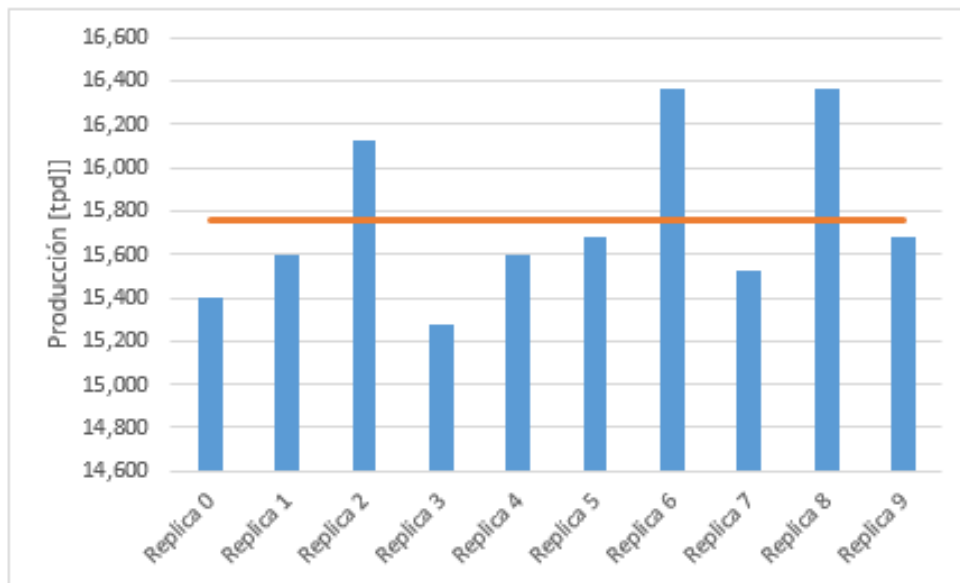
**Tabla 19: Resultados asignación.**

Criterio	Igualitario	Preferencia OP13		Preferencia OP15	
	Probabilístico	Probabilístico	Determinístico	Probabilístico	Determinístico
<b>Max</b>	16,000	15,800	16,360	15,840	16,040
<b>Media</b>	15,772	15,528	15,760	15,480	15,740
<b>Min</b>	15,200	15,320	15,280	15,040	15,280

Se determina que para los siguientes casos se utilizara una asignación determinística con preferencia al OP13 ya que se alcanza el mayor máximo y la media es la segunda más alta.

*Caso A*

Los resultados cuando se utiliza una baja frecuencia de colgadura se muestran en la Figura 31.



**Figura 31: Capacidad máxima real caso A con preferencia OP13 determinística.**

*Caso B*

Al utilizar una fragmentación similar a la Dacita se obtienen los resultados mostrados en la Figura 32

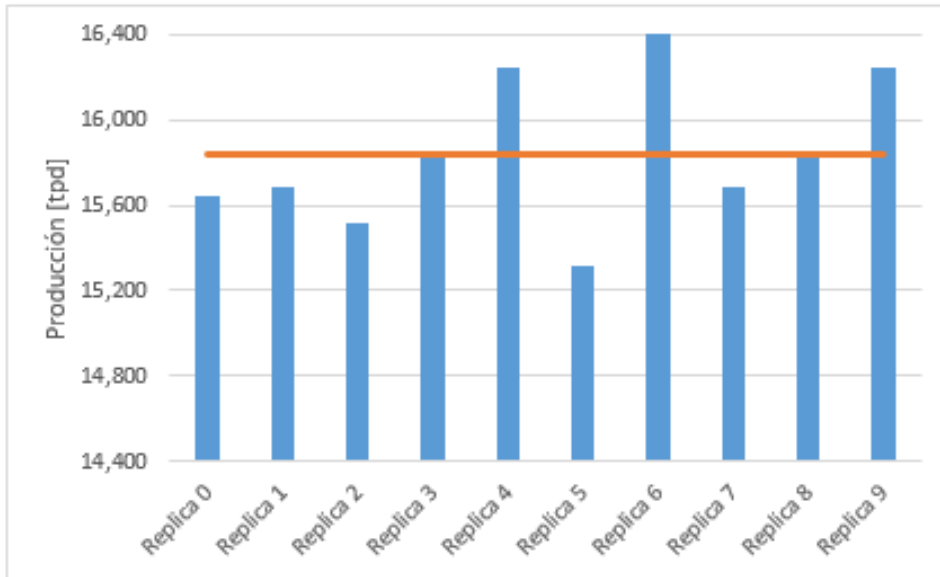


Figura 32: Capacidad máxima real caso B con preferencia OP13 determinística.

### Caso C

Al considera una aparición de 1000 [ton/col] se obtienen los resultados mostrados en Figura 33

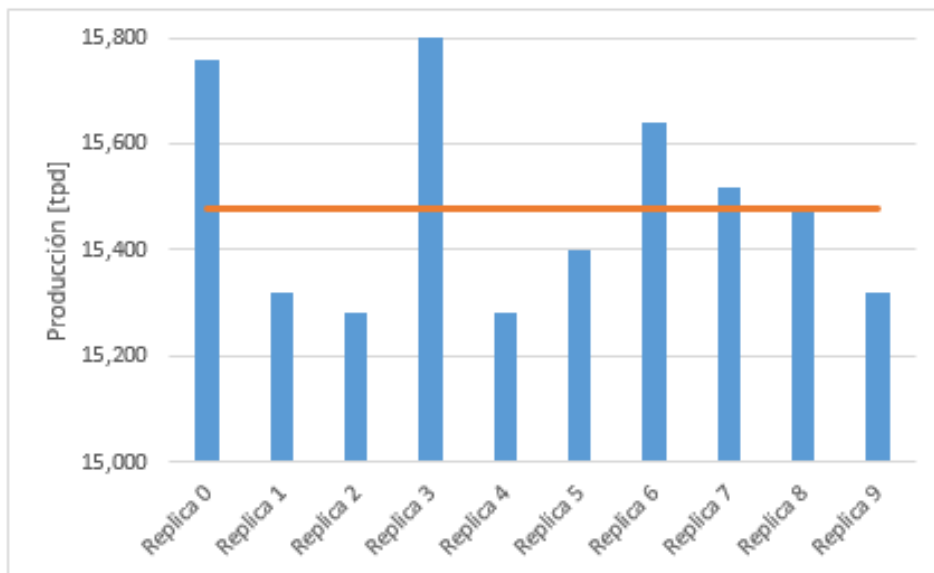


Figura 33: Capacidad máxima real caso C con preferencia OP13 determinística.

### 6.1.3 Plan de producción

Al agregar el plan PQ2018, para el periodo de Noviembre 2020, se propone una operación que considera un LHD fijo por estación de vaciado todo el mes. Esto se considera así para simplificar los requerimientos computacionales. Al estar operando en régimen se consideran los 4 equipos LHD y los 5 camiones disponibles para la operación.

Tomando lo anterior en consideración se obtienen los resultados que se muestran en el capítulo de anexos, Tabla anexo 1, Tabla anexo 2 y Tabla anexo 3.

Los puntos que se encuentran con una altura de extracción mayor a 33.3% de la altura de columna extraíble se considera que pueden sacar material ilimitado del punto, esto para determinar la capacidad máxima del circuito, pero los puntos que todavía están en quiebre se cerraran una vez se extraiga el material que viene indicado en el plan de producción para así cumplir con la restricción de velocidad de extracción geomecánica.

#### ***6.1.4 Mantenión de equipos***

Al incorporar las mantenciones programadas según los estándares divisionales en los distintos casos de fragmentación se obtienen los resultados mostrados en las Tabla anexo 4, Tabla anexo 5 y Tabla anexo 6.

#### ***6.1.5 Fallas de equipos***

Finalmente se agregan las fallas a los distintos equipos móviles y se obtienen los resultados mostrados en las Tabla anexo 7, Tabla anexo 8 y Tabla anexo 9, dependiendo que caso de fragmentación se está utilizando.

#### ***6.1.6 Push-pull***

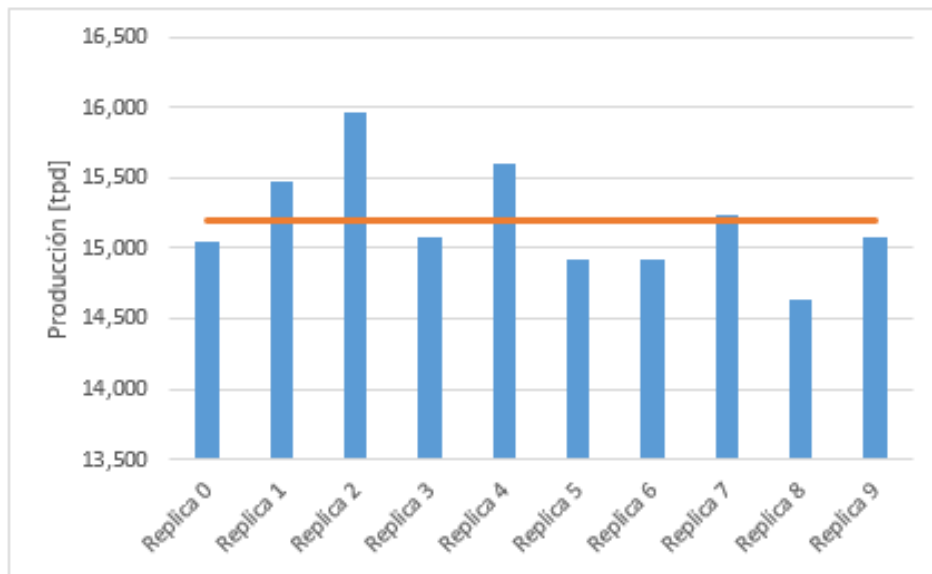
Para simular este caso se consideran 2 circuitos independientes en el periodo de Noviembre 2020 pero para maximizar la utilización de los camiones no se utilizan limitantes de tonelaje en el OP 13 con 2 camiones descargando en este pique y los 3 restantes descargan en los OP 15 y 16, lo cual se observa en la Figura 18.

En primera instancia se consideran los 3 casos de fragmentación descritos en la sección 5.1.5

#### ***Capacidad Máxima***

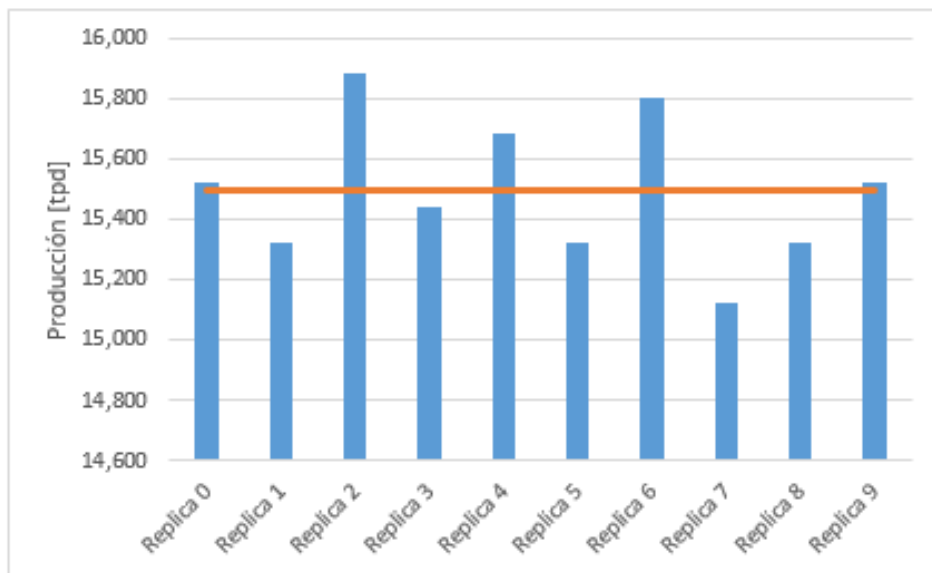
Los distintos resultados para la capacidad máxima del circuito push-pull se muestran a continuación

*Caso A*



**Figura 34: Capacidad máxima real caso A push-pull.**

*Caso B*



**Figura 35: Capacidad máxima real caso B push-pull.**

## Caso C

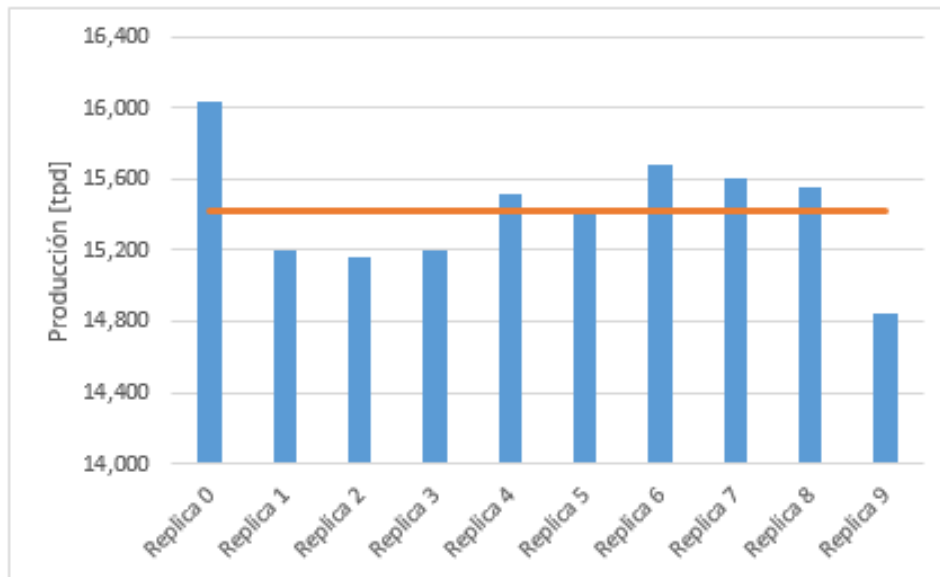


Figura 36: Capacidad máxima real caso C push-pull.

Se realiza el mismo proceso de ir incorporando los distintos procesos uno a la vez para poder ver el efecto de cada proceso en el funcionamiento global del sector.

### ***Plan de producción***

Los resultados obtenidos al incorporar el plan de producción a un circuito Push-Pull y los distintos casos de granulometría se muestran en las Tabla anexo 10, Tabla anexo 11 y Tabla anexo 12

### ***Mantenimiento de equipos***

Al incorporar las tasas de mantenimiento divisionales al circuito push-pull se obtienen las Tabla anexo 13, Tabla anexo 14 y Tabla anexo 15 dependiendo de la granulometría incorporada en el modelo.

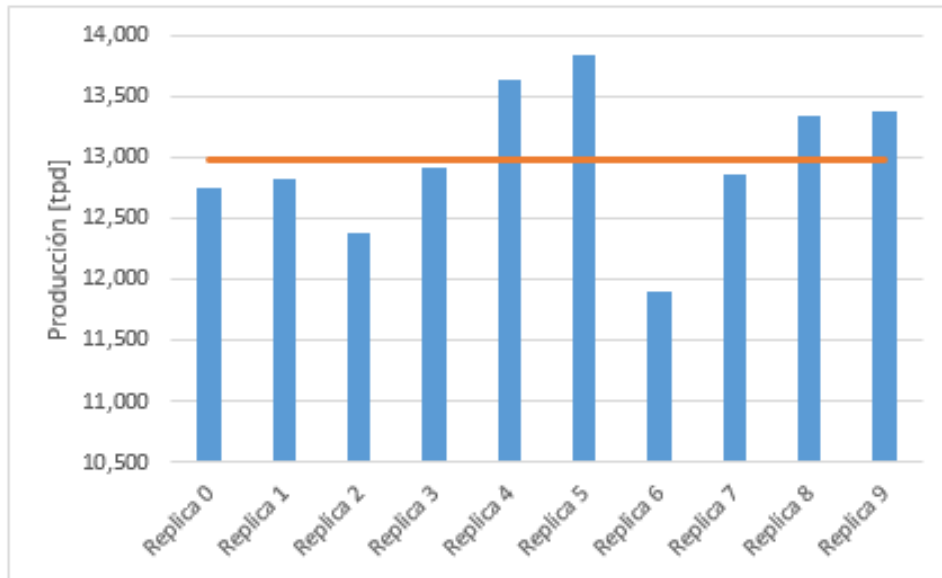
### ***Fallas de equipos***

Finalmente se obtienen las Tabla anexo 16, Tabla anexo 17 y Tabla anexo 18 al incorporar las tasas de fallas existentes, al circuito push-pull.

### ***6.1.7 Falla chancador Teniente 6***

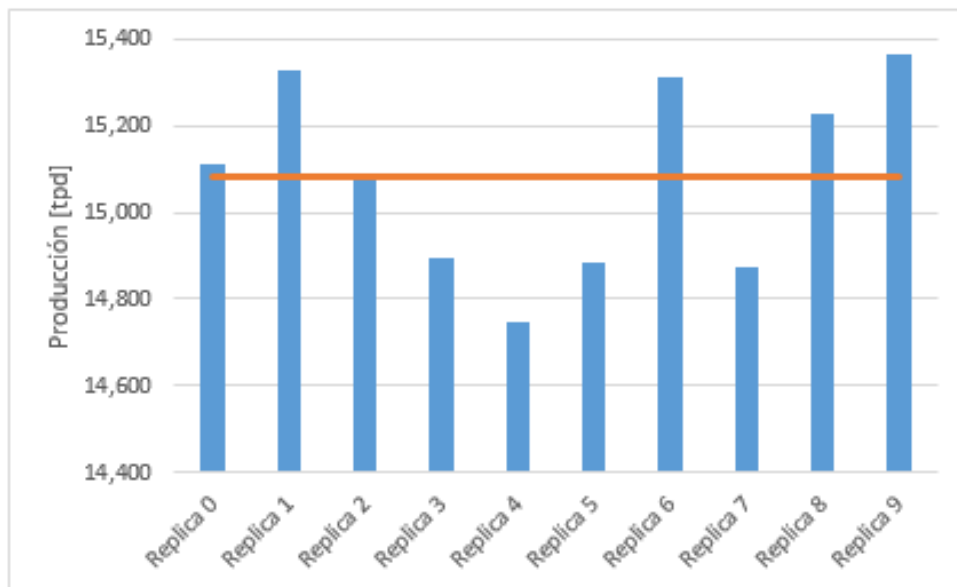
Se estudia la producción del Pacífico Superior en caso de existir la necesidad de detener la operación del chancador Teniente 6. Se utilizó una configuración push-pull y como en la sección 6.1.6 se estudió el impacto de la incorporación de los distintos procesos solo se muestran los resultados que consideran todos los distintos procesos. Los resultados se muestran en la Figura 37, Figura 38 y Figura 39.

*Caso A*



**Figura 37: Resultados falla Teniente 6 caso A.**

*Caso B*



**Figura 38: Resultados falla Teniente 6 caso B**

## Caso C

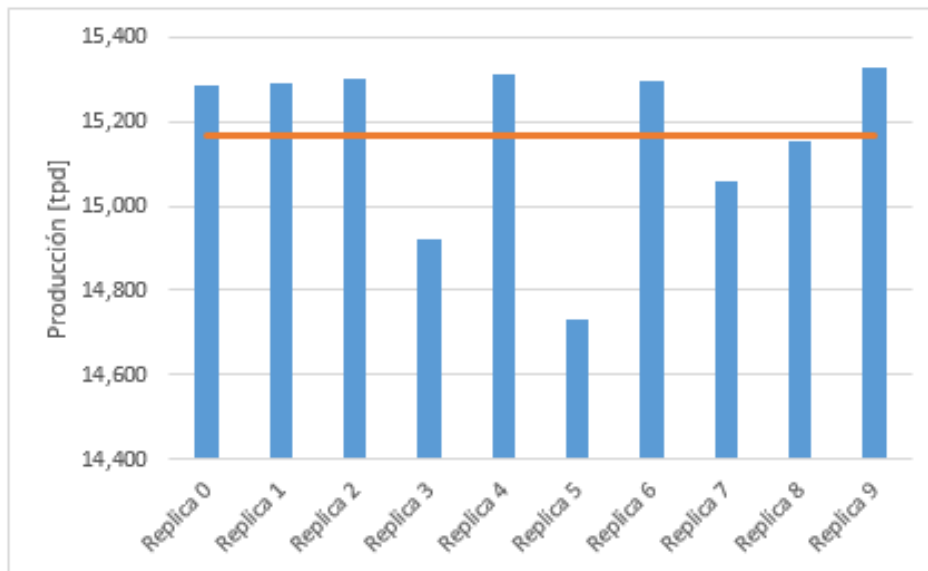


Figura 39: Resultados falla Teniente 6 caso C.

### 6.1.8 Extensión Norte

Se sigue el mismo desarrollo que en el caso del Loop completo. Primero se determina la capacidad máxima real y como esta disminuye al incorporar los distintos procesos.

La Extensión norte se simulo con una frecuencia de colgadas de 300 [ton/col], pero se analizan 2 distintas estrategias de acarreo. Una que considera el Nivel de Transporte Intermedio con los 3 piques disponibles para realizar la descarga de material y un circuito Push-Pull con descarga solo en el OP13, esto pues así se dejan los OP 15 y 16.

#### **Loop completo**

Al considerar la capacidad máxima de esta configuración se obtiene la Tabla anexo 19, una vez incorporado el plan de producción esperado se tiene la Tabla anexo 21, para finalmente obtener las Tabla anexo 23 y Tabla anexo 25 al incorporar la mantención y fallas de los equipos respectivamente.

#### **Circuito push-pull**

La capacidad máxima de la extensión norte al considerar un circuito Push-Pull hacia el OP13 se muestra en la Tabla anexo 20, luego al incorporar el plan de producción se obtiene la Tabla anexo 22 y finalmente las Tabla anexo 24 y Tabla anexo 26 al incorporar las tasas de mantención y fallas de los equipos.

# Capítulo VII

## 7.1 Análisis de resultados

En esta sección se analizan los resultados mostrados en la sección 6.1

### 7.1.1 Capacidad máxima

Se observa que cuando se considera la capacidad máxima nominal del nivel de transporte intermedio se tiene un 9.2% de holgura respecto a la meta productiva de 15,000[tpd].

### 7.1.2 Asignaciones equipos nivel de transporte intermedio

Al analizar la Figura 40 se observa que todas las asignaciones son capaces de cubrir la producción objetivo de 15,000 [tpd], pero que si se toma en cuenta una asignación determinista se pueden extraer aproximadamente 200 [tpd] extra en comparación con una estrategia probabilística, ambas con preferencia a un mismo pique. Pero por otro lado al observar la Figura 41 las asignaciones deterministas tienen mayores mínimos, máximos y una mayor variabilidad entre los valores de las distintas replicas, además de esto una asignación determinista favorece la seguridad en la operación pues permite crear protocolos más estrictos para que sigan los trabajadores tratando de eliminar el azar en las decisiones de estos. Es por todas estas razones que se prefirió una estrategia de este estilo para simular el resto de los escenarios.

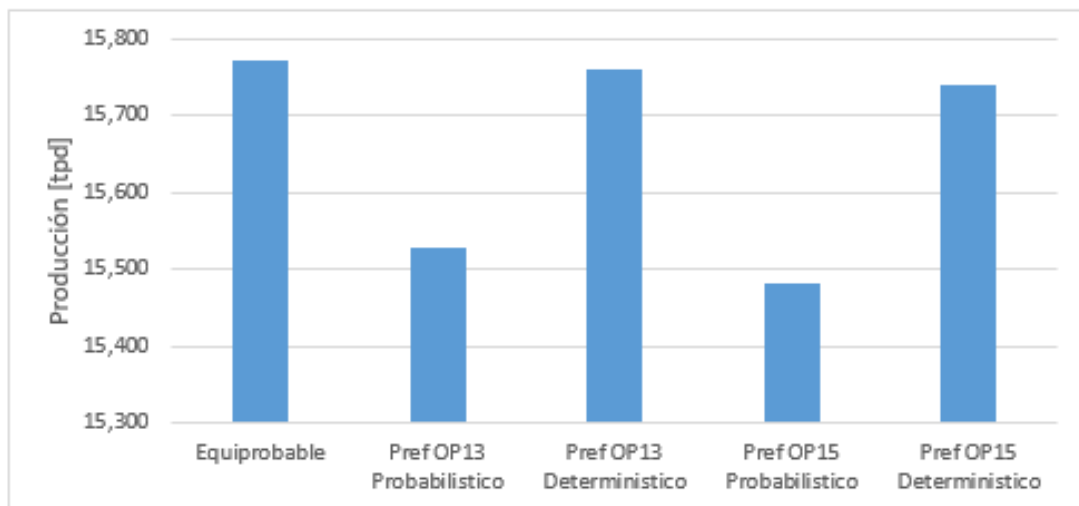


Figura 40: Producción según distintas asignaciones.



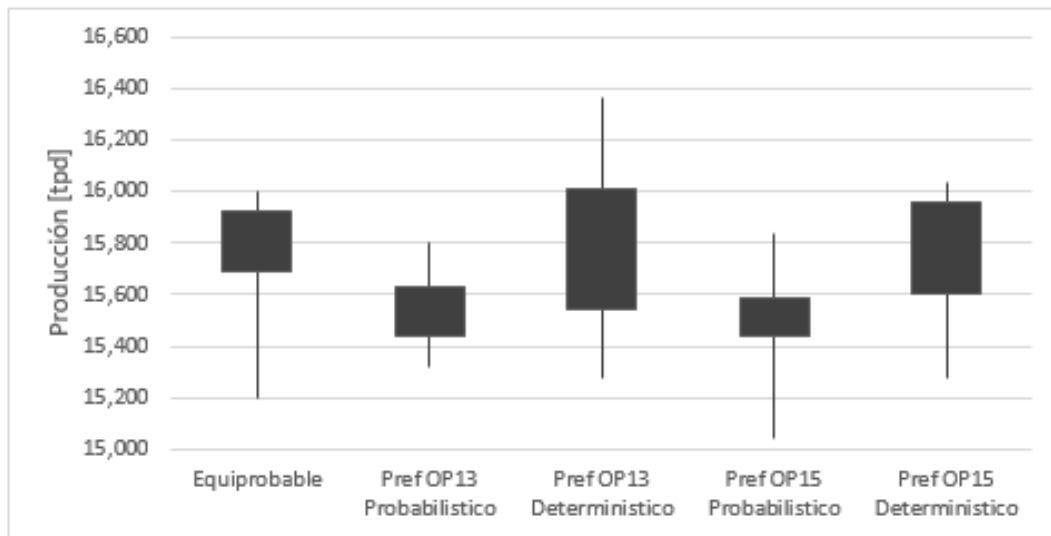


Figura 41: Variabilidad entre replicas según distintas asignaciones.

### 7.1.3 Incorporación Procesos

#### *Pacífico Superior loop completo*

Al incorporar los distintos procesos, consideraciones, simulaciones mensuales con mantenencias y fallas de equipos se simulan las distintas combinaciones de escenarios de fragmentación y procesos incorporados para obtener la Figura 42.

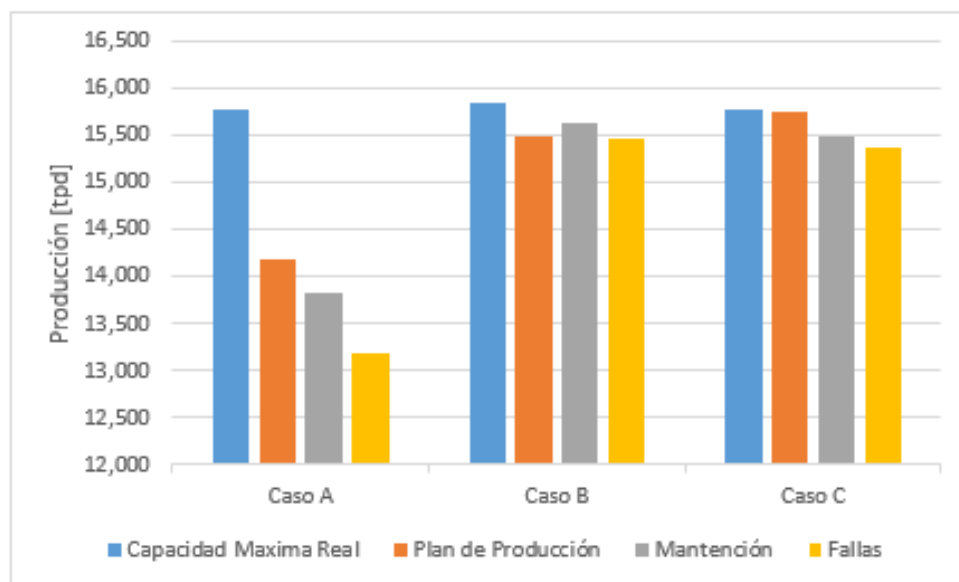


Figura 42: Impacto incorporación de procesos Pacífico Superior.

Aquí es posible observar que la capacidad máxima del circuito es similar en los tres escenarios, así pues se puede decir que para un día aleatorio donde no existan mantenencias ni fallas la producción del sistema de manejo de materiales será en promedio de 15,750 [tpd].

Por otro lado se observa una gran baja en la producción del Pacífico Superior al considerar la mensualización de la simulación en el caso A, no así en los casos B y C. Esto se debe a que en el caso A existe una mayor ocurrencia de cierre de puntos operativos debido a la presencia de puntos con presencia de arcos de colgadura o colpas de sobretamaño, lo que lleva a que la cuadrilla de reducción secundaria se vea sub-dimensionada respecto a la cantidad de trabajo que deben realizar. Esto lleva a una baja disponibilidad del área abierta operativa para los equipos LHD, lo que incluso lleva a que estos se deban detener su operación en algún momento. Esto se ve reforzado al momento de incluir las mantenciones y fallas de los equipos al modelo de simulación debido a que la disminución en la producción es baja, incluso aumentando la producción en el caso B. El caso A es el más sensible a las disminuciones en la producción, esto debido a la poca disponibilidad de área explicada previamente.

#### Caso A

Al observar la variabilidad de los resultados diarios obtenidos en las distintas réplicas del modelo, Figura 43, se observa que existe una baja variabilidad entre los resultados, pero aun así el máximo diario siempre se mantiene en un rango cercano a las 15,400 [tpd] siendo siempre mayor a la producción comprometida de 15,000 [tpd]. En cuanto a los mínimos diarios existe una mayor variabilidad llegando en la réplica 9 hasta 6,800 [tpd], este valor se debe a una salida conjunta de los equipos productivos.

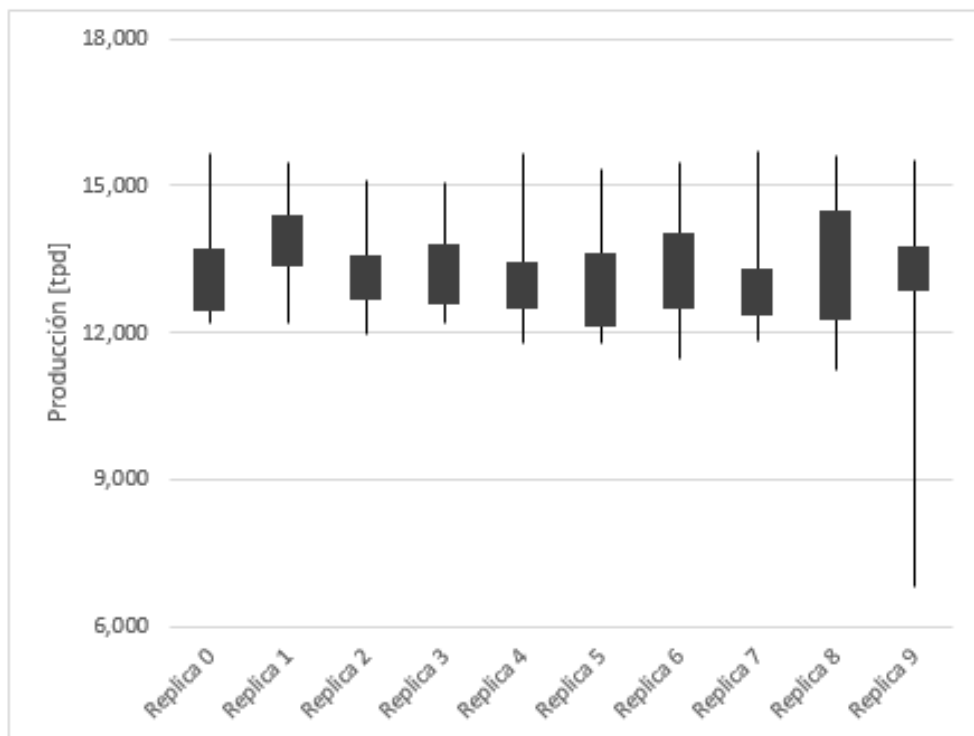


Figura 43: Variabilidad entre replicas caso A.

Al observar la Figura 44 se observa que existe un bajo cumplimiento diario, variando entre 3 y 1 día, dentro de los 30 días que se simularon. Si llegase a existir una tasa de 300 [ton/col], con los equipos considerados y una cuadrilla de

reducción secundaria no es posible alcanzar la producción comprometida de 15,000 [tpd] al considerar una simulación mensual.

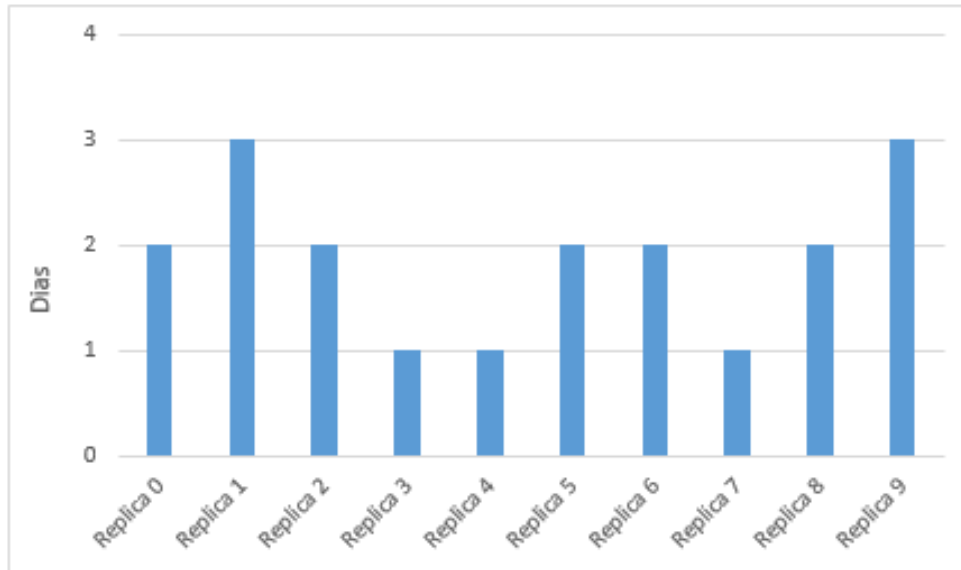
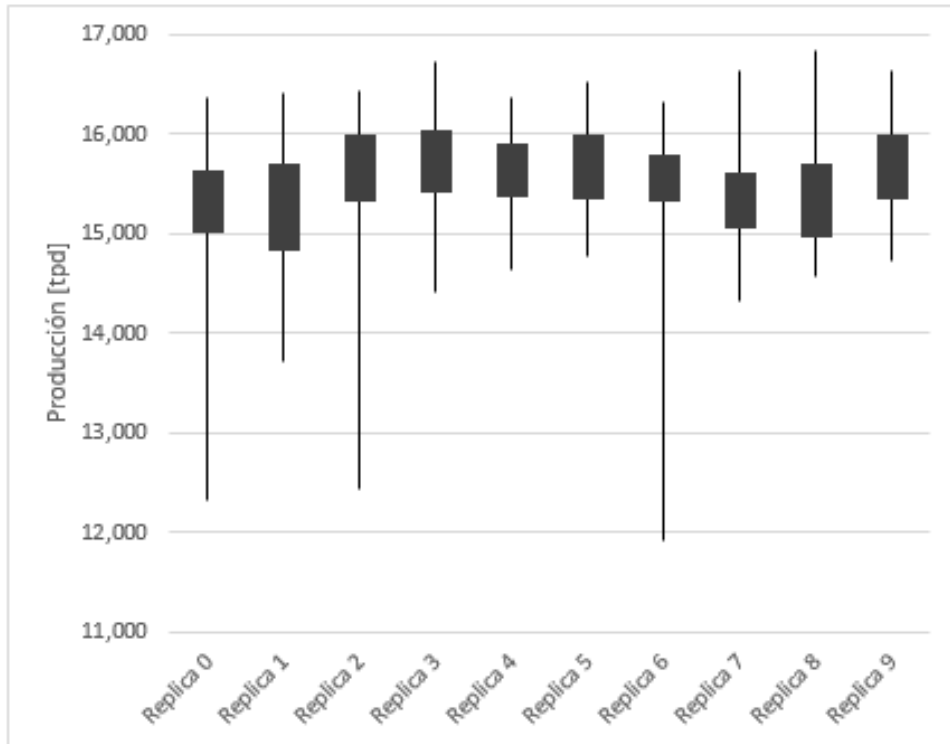


Figura 44: Cumplimiento caso A.

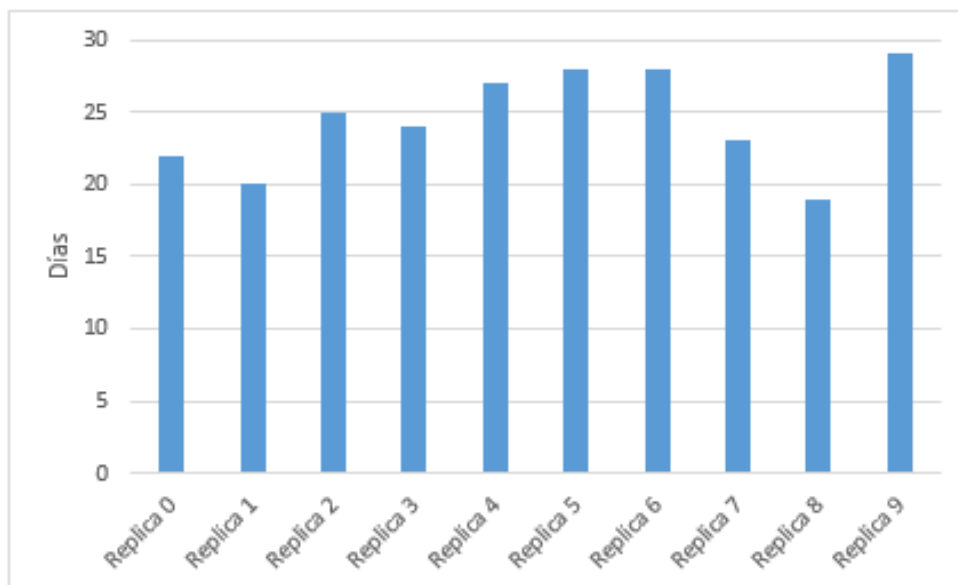
#### *Caso B*

Al observar la Figura 45 se observa una baja variabilidad entre las réplicas cumpliendo en su mayoría la meta productiva de 15,000 [tpd] pero con mínimos con una mayor variabilidad. Al considerar la producción mensual es posible cumplir la producción mensual, existiendo un 3% de holgura, Tabla anexo 8.



**Figura 45: Variabilidad entre replicas caso B.**

Existe una tasa de cumplimiento mensual mayor al 66.6% mensual en nueve de las diez replicas, más aun el segundo cuartil se encuentra ubicado por sobre las 15,000 [tpd] en ocho de las réplicas y el tercer cuartil siempre está bajo 16,000 [tpd], Figura 45, lo cual indica un alto agrupamiento de los datos entre estos valores, lo que indica que se pueden soportar pequeñas bajas en algunas producciones diarias, pero si existen bajas mayores, o una disminución de incumplimientos no se podrá cumplir la producción comprometida.



**Figura 46: Cumplimiento caso B.**

### Caso C

En este caso existe una mayor variabilidad ya sea entre las distintas replicas como en los resultados diarios en algunas de las réplicas, Figura 47, así pues es posible encontrar valores que varían entre las 17,000 [tpd] y las 11,000 [tpd] en una misma replica, así como otros que varían desde las 16,500 [tpd] y las 15,000 [tpd]. Existen siete replicas en las cuales el segundo cuartil se encuentra por sobre la meta productiva siendo estas donde existe una menor variabilidad entre los valores de la réplica. Existe un 2.4% de holgura respecto a la meta productiva.

El cumplimiento diario varía entre un 53% en la réplica 2 y un 100% en la réplica 7, lo cual indica que si existe una fragmentación más favorable es posible cumplir con la meta productiva durante todos los días del mes seleccionado.

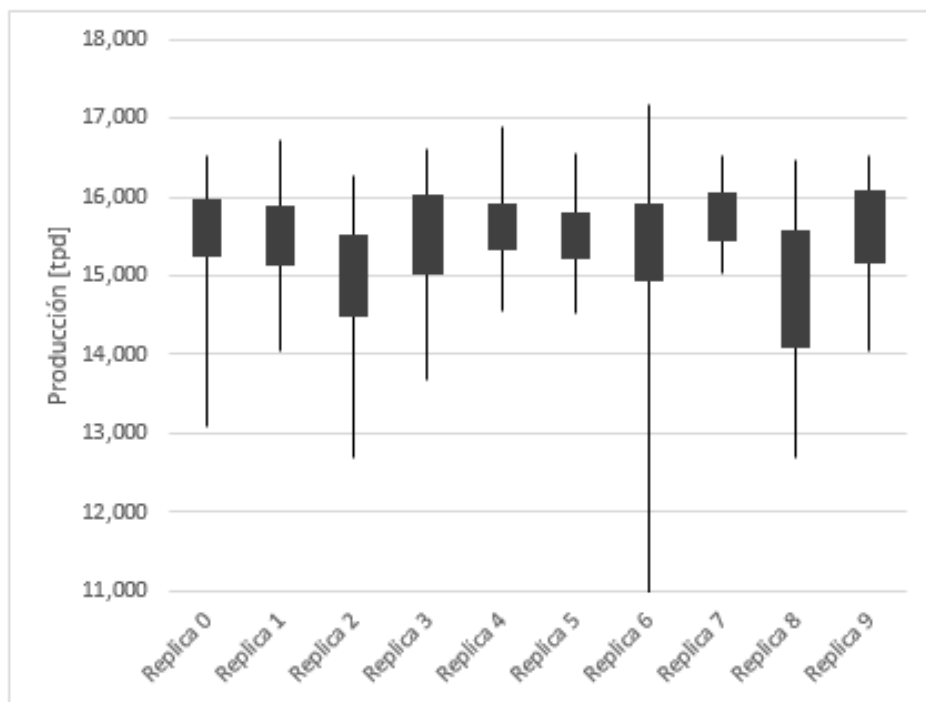


Figura 47: Variabilidad entre replicas caso C.

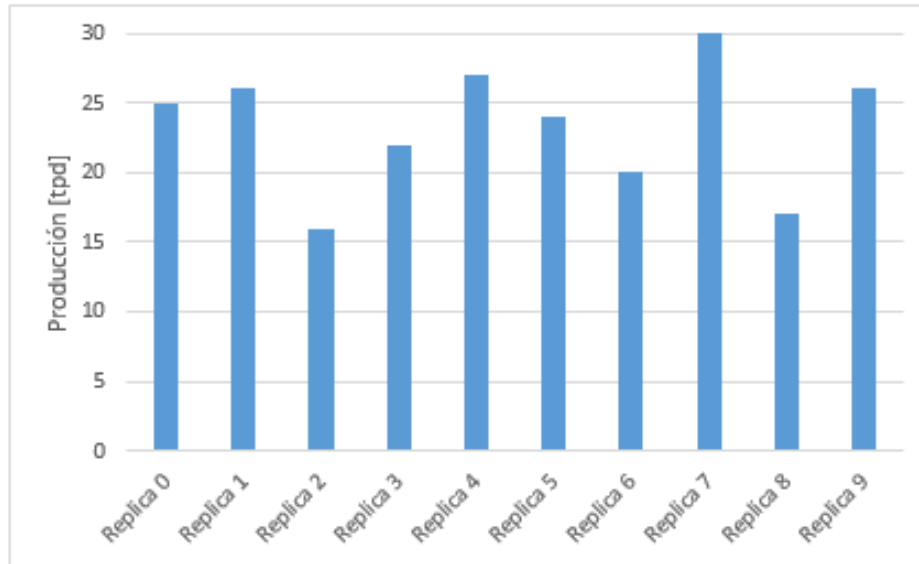


Figura 48: Cumplimiento caso C.

### Utilización

En la Tabla 20 se observa la utilización del sistema de manejo de materiales del Pacífico superior y se observa que en el caso A se tiene una baja utilización, pero que en los casos B y C esta es bastante elevada y muy similar entre ellas, lo que indica que en los casos de fragmentación más favorable el impacto de incorporar las mantenciones y fallas no es tan importante como lo es en el caso donde hay una frecuencia de colgadas mayor. Lo cual es esperable dado por que existe una mayor cantidad de puntos disponibles en los casos B y C.

Tabla 20: Utilización sistema de manejo de materiales Pacífico Superior.

Caso	Utilización NP-NTI
A	83.7%
B	97.6%
C	99.3%

### *Pacífico Superior push-pull*

Al incorporar todos los procesos en paralelo a una configuración con dos circuitos push-pull se observa que la producción del sector decae en gran forma debido a las fallas de los equipos, no así al incorporar las mantenciones o el plan de producción mensual en los casos B y C. Por otra parte el caso A tiene una baja importante al considerar el plan de producción y luego al incorporar las fallas

de equipos, este caso se conforma de manera similar a como lo hacía cuando existía una configuración de loop completo.

Al incorporar las fallas de los equipos la producción del sector baja de manera considerable, esto se debe a que esta configuración es mucho más sensible al número de equipos operando en el sector, puesto que en los distintos tramos solo puede operar un equipo a la vez y si dos equipos están en los distintos extremos del tramo esperando para entrar uno deberá esperar que el otro acabe su tránsito por dicho tramo.

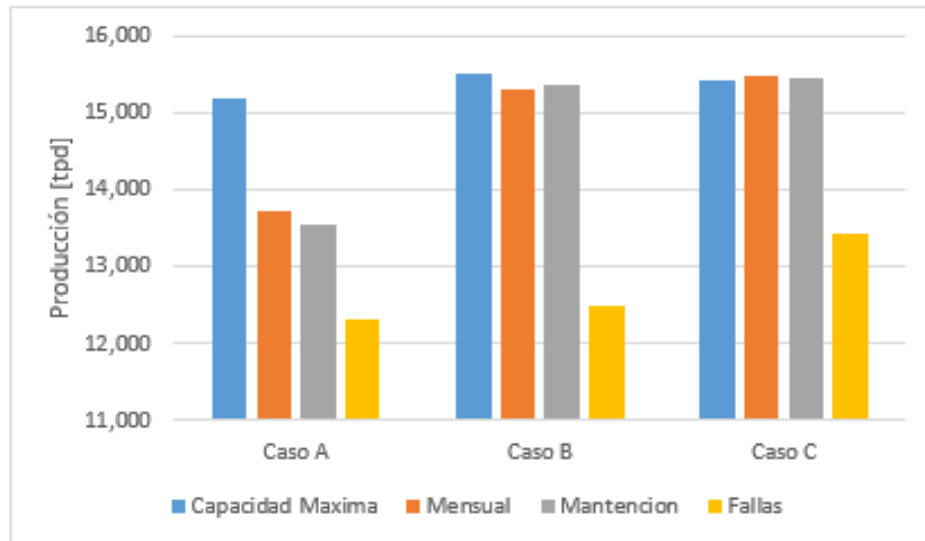


Figura 49: Impacto incorporación de procesos push-pull.

#### Caso A

Existe una gran diferencia entre los tonelajes extraídos mínimos y los máximos, en algunos casos cerca de 9,000 [ton], lo que demuestra la fragilidad de la configuración push-pull frente a las fallas de equipos.

En ningún día de las 10 réplicas se cumplió la meta productiva, lo que quiere decir que si se tiene una alta frecuencia de colgadas se debe evitar utilizar esta configuración.

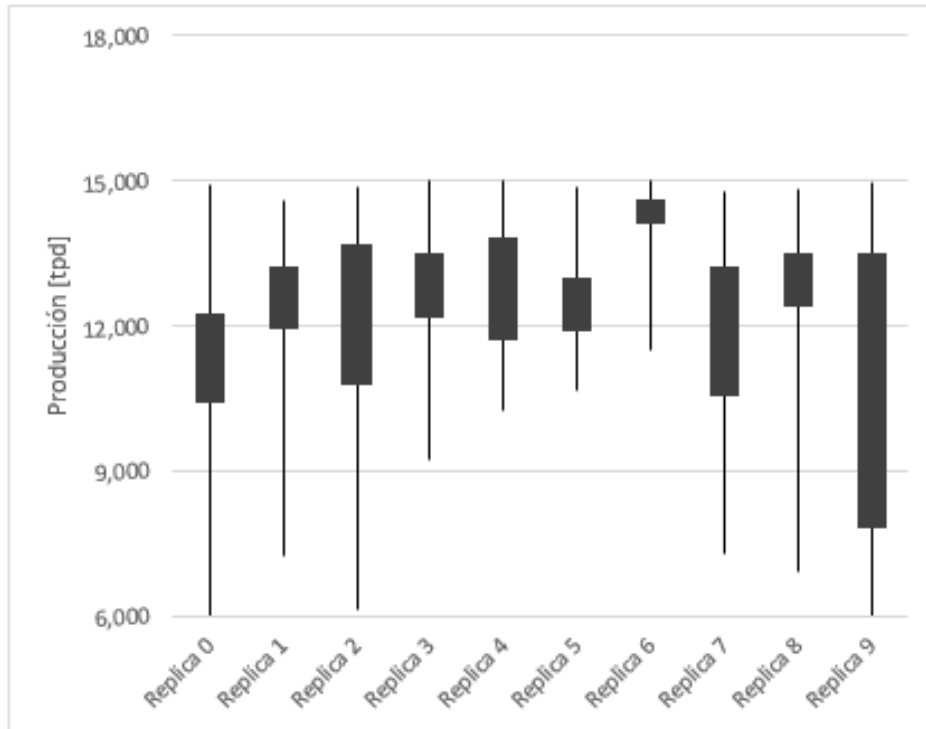


Figura 50: Variación entre replicas caso A push-pull.

### Caso B

Existe una gran variabilidad entre las distintas replicas, aunque gran parte de los días se tienen una producción entre 13,000-15,000 [tpd], pero también se tienen casos, como las réplicas 2 y 3, que tienen la mayoría de sus días con una producción bajo 10,000 [tpd]. Al analizar el cumplimiento del plan es un bajo grado de cumplimiento, con 2 réplicas que no lo cumplen en ningún momento y la que más días logra cumplirlo es durante 4 días.



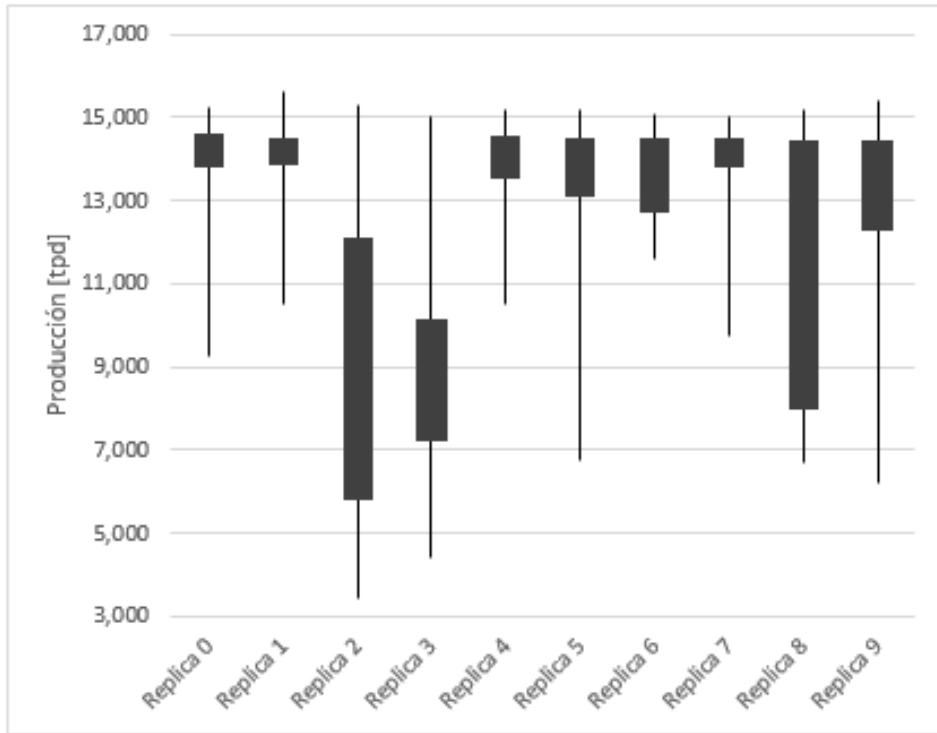


Figura 51: Variación entre replicas caso B push-pull

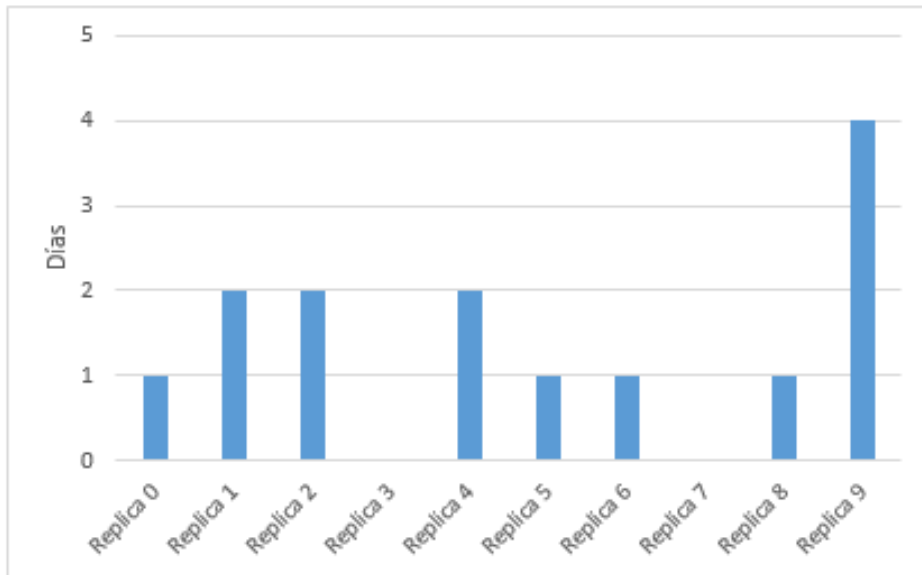


Figura 52: Cumplimiento caso B push-pull.

*Caso C*

Existe un bajo porcentaje de cumplimiento a lo largo del mes, con casos donde los mínimos mensuales bajo las 6000 [ton] lo cual se debe a que la configuración Push-Pull no es robusta frente a las fallas de los equipos.

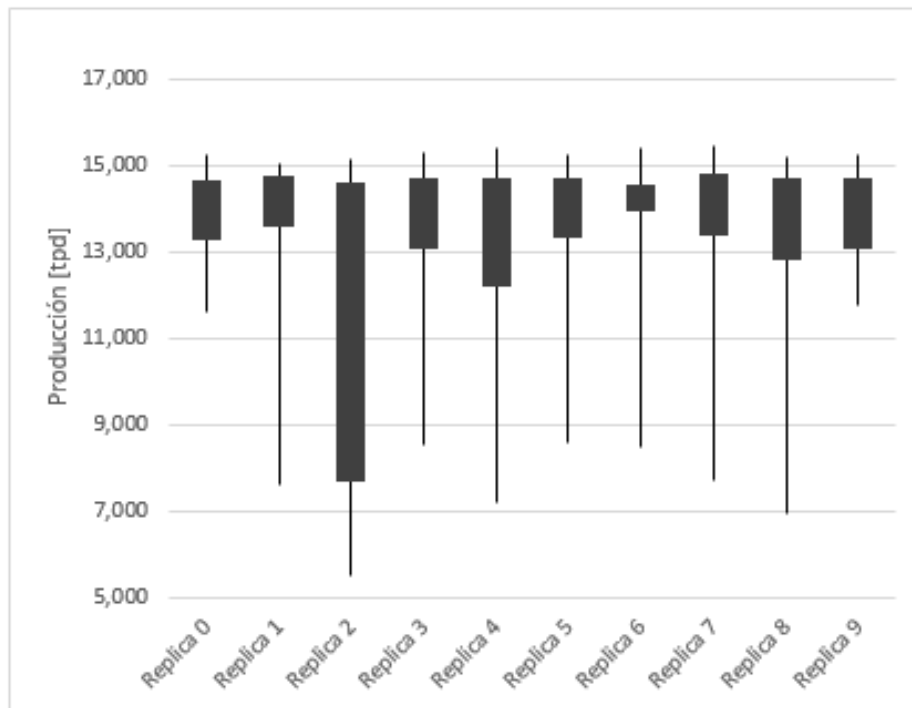


Figura 53: Variación entre replicas caso C push-pull.

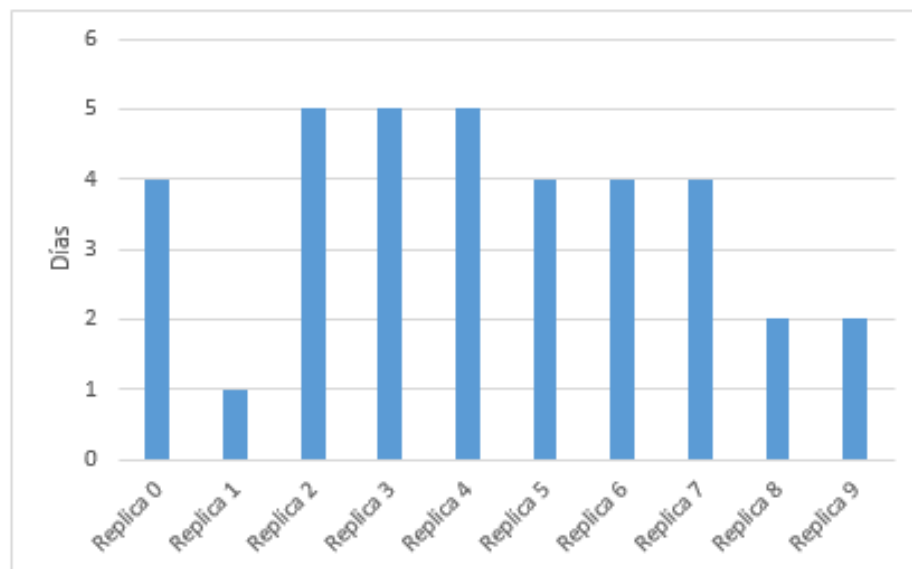


Figura 54: Cumplimiento caso C push-pull

### ***Comparación loop completo push-pull***

Al observar la Figura 55, se observa la baja en producción, que puede llegar a ser de hasta 3000 [tpd], en los casos con un tonelaje entre colgaduras mayor, al considerar un cambio en la estrategia de acarreo desde un circuito de loop completo a uno push-pull. Por lo tanto si se encuentra en el régimen productivo se debe evitar usar esta configuración a no ser no haya otra alternativa.

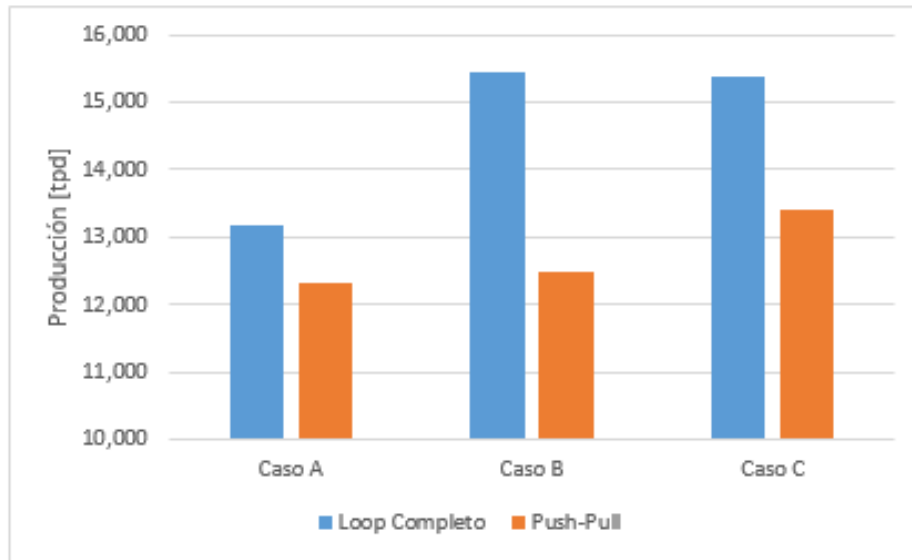


Figura 55: Comparación loop completo y push-pull.

#### 7.1.4 Falla chancador Teniente 6

Al no considerar las producciones de cada pique requeridas según el plan de producción y utilizar un circuito push-pull hacia el OP13, se observa en la Figura 56 que la disminución de producción que se muestra en la Tabla 21 no es significativa para el cumplimiento de la meta productiva del Pacífico Superior, en los casos donde se cumple previamente la producción. Pero por otro lado se debe tener una gran precaución debido a las altas interferencias y esperas que se tienen en el Nivel de Transporte Intermedio debido a que solo puede desplazarse un camión., pero debido a las distancias más cortas la producción no es afectada de gran manera.

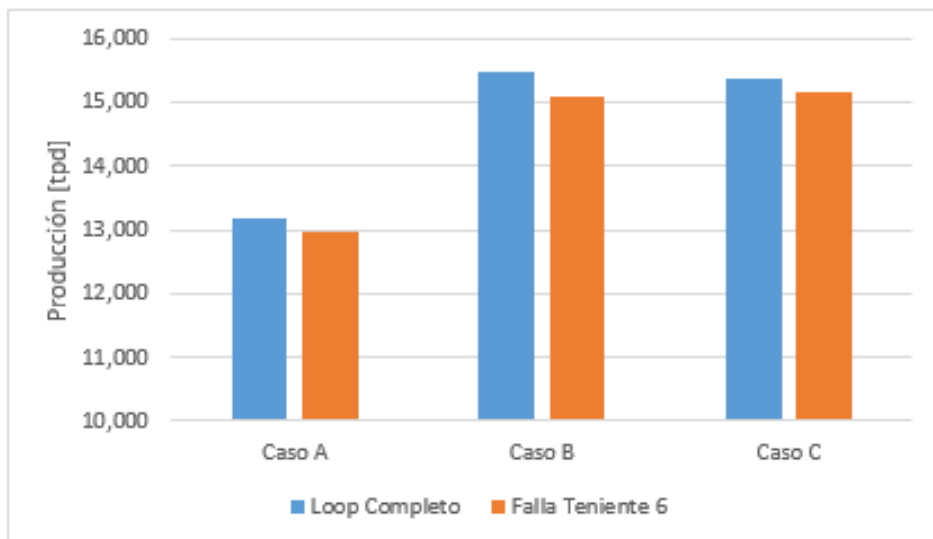


Figura 56: Comparación loop completo y falla chancador Teniente 6.

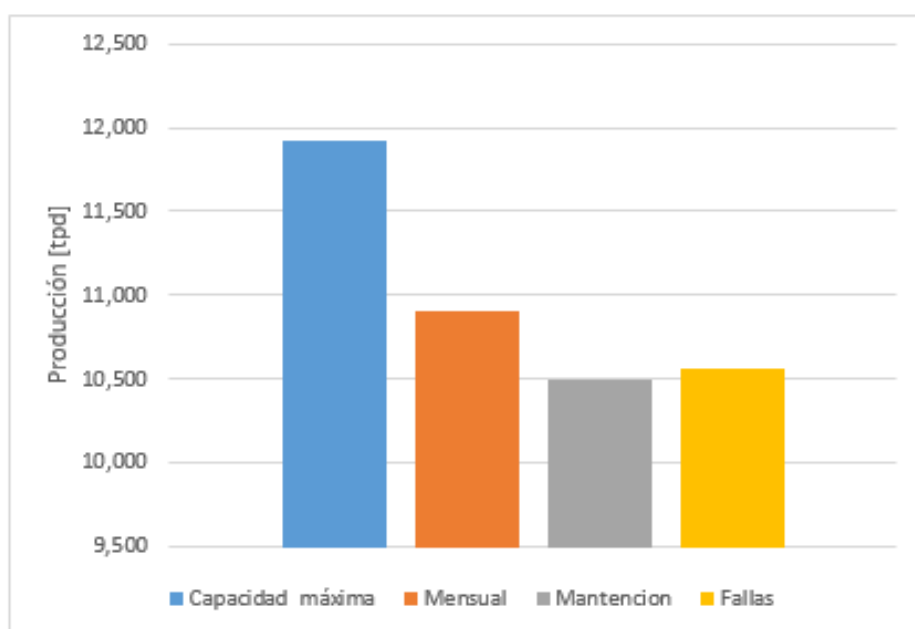
**Tabla 21: Disminución producción por falla chancador Teniente 6.**

Caso	Disminución Producción
Caso A	1.6%
Caso B	2.5%
Caso C	1.3%
Promedio	1.8%

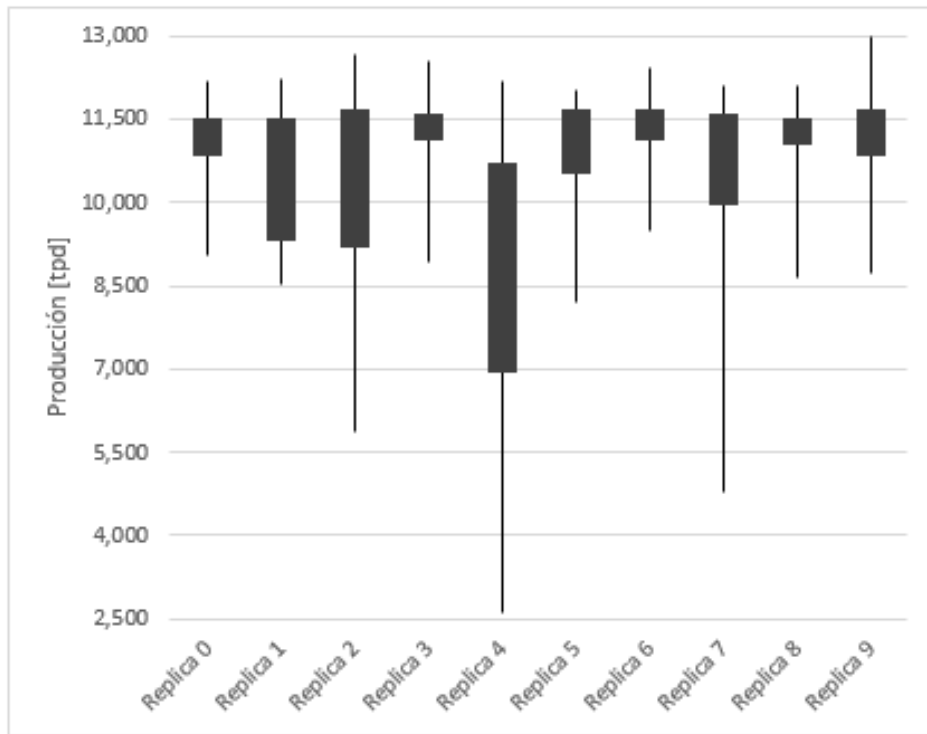
### 7.1.5 Extensión Norte

#### Loop completo

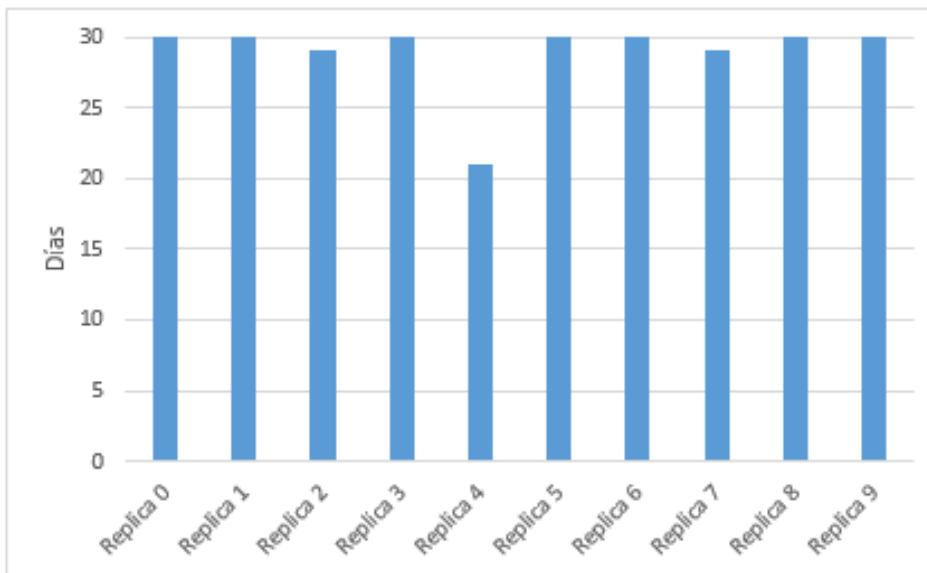
En la Figura 57 se observa el efecto en la producción de agregar los distintos procesos en paralelo al modelo de simulación, para la Extensión Norte. Se aprecia que luego de agregar todos los procesos aún queda una holgura de un 59% por sobre la producción máxima esperada. La incorporación de mantenciones y fallas afecta de gran manera la producción, incluso esta aumenta al incluir las fallas de equipos, lo que indica que los equipos están siendo sub-utilizados. Pero por otro lado se observa que esta configuración, en el periodo simulado, se ve muy afectada por la salida de un equipo de producción por un tiempo prolongado. La producción desciende a 8,000 [tpd] con un equipo menos y si dos equipos fallan al mismo tiempo la producción desciende a 4,000 [tpd]. Aun así se tiene un alto porcentaje de cumplimiento debido a la gran holgura existente en el sector, en el 60% de las réplicas se cumple el plan de producción todo el mes, y nunca se tiene un porcentaje menor al 83%



**Figura 57: Impacto incorporación de procesos Extensión Norte loop completo.**



**Figura 58: Variabilidad replicas Extensión Norte loop completo.**



**Figura 59: Cumplimiento loop completo Extensión Norte.**

*Push-pull*

Al cambiar la estrategia a un circuito push-pull con descarga solo en el OP13 se observan resultados mucho más variable en sus mínimos, que ocurren debido a fallas de múltiples equipos, con una menor capacidad que el circuito de loop completo y una mayor variabilidad entre las réplicas, pero aun así se tiene una holgura de un 42% por sobre el tonelaje requerido. Lo importante de esta configuración es que permite liberar los OP15 y 16 para ocuparlos para extraer

material extra del Rajo Sur. Esta configuración no es robusta a las fallas mecánicas de los equipos por lo cual se debe poner especial énfasis en tener las condiciones adecuadas para evitar accidentes y fallas.

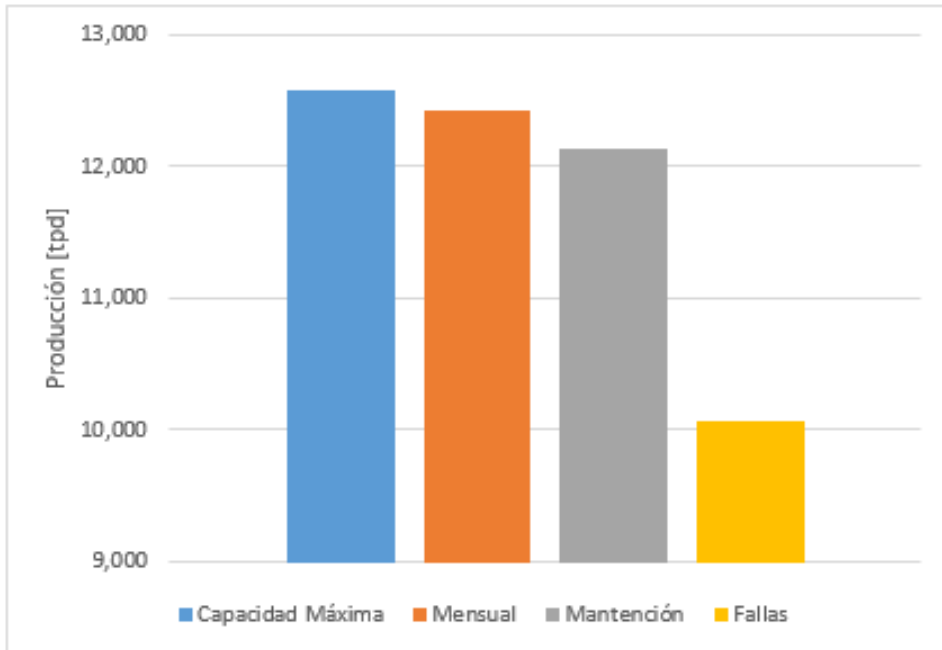


Figura 60: Impacto incorporación de procesos Extensión Norte push-pull.

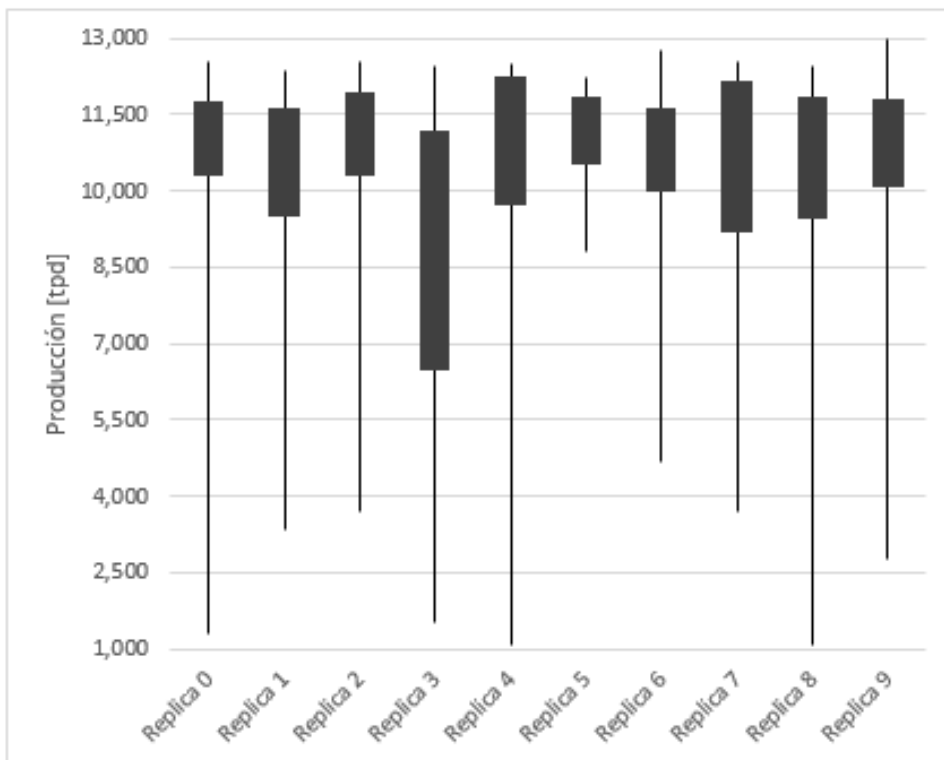


Figura 61: Variabilidad entre replicas push-pull Extensión Norte.

## Utilización

En el caso de la Extensión Norte ambas configuraciones tienen una alta utilización del sistema de manejo de materiales, aunque debido a la alta holgura existente, esta podría ser menor y todavía cumplir el plan de producción.

Tabla 22: Utilización sistema de manejo de materiales Extensión Norte.

Caso	Utilización NP-NTI
Loop Completo	89.39%
Push-Pull	87.61%

## 7.2 Análisis de sensibilidad

### 7.2.1 Número de camiones

En una primera instancia se realiza un análisis de sensibilidad respecto a la flota de equipos disponibles en el nivel de transporte intermedio. Los equipos disponibles en el nivel de producción no se varían debido a que por los estándares de seguridad no permiten la operación simultánea en una estación de vaciado.

Los equipos del nivel de transporte intermedio se varían entre 3 y 10 unidades y el resto de los inputs del modelo se mantienen constantes y se realizaron 10 réplicas diarias considerando un caso de capacidad diaria real.

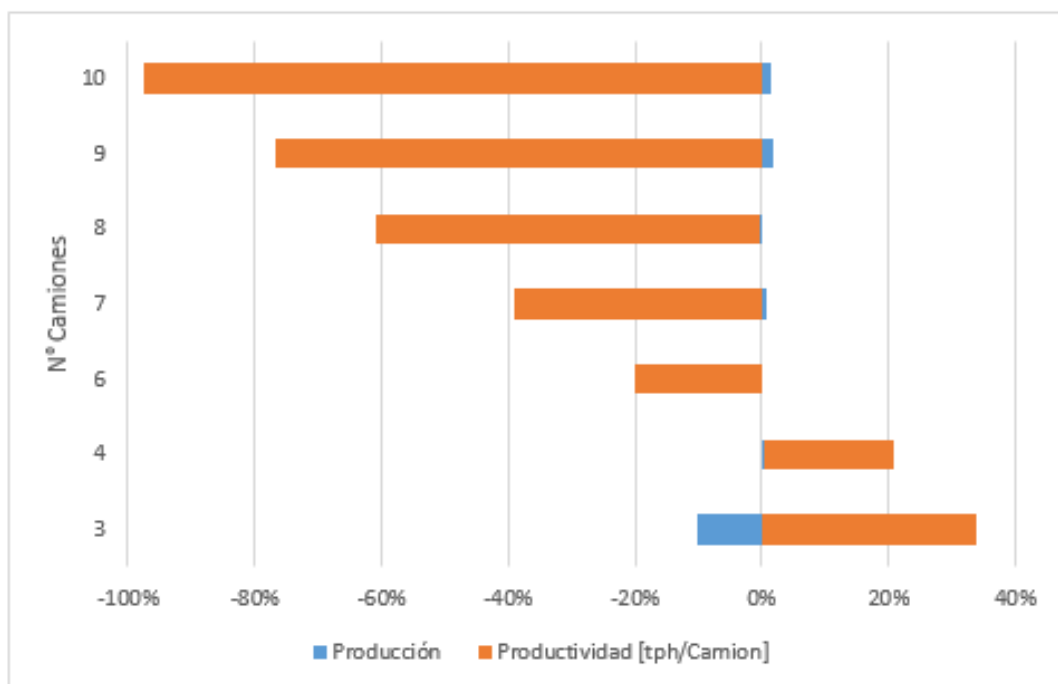


Figura 62: Análisis de número de equipos nivel de transporte intermedio.

De la Figura 62 se observa que entre 4 y 10 camiones la producción alcanzada no varía de gran forma. Aún más en algunos casos disminuye la producción al aumentar un equipo extra. Esto ocurre debido a que ya se entra en una zona de rendimientos decrecientes, lo cual se ve claramente en el número de ciclos promedio que disminuye de gran manera. Para poder cumplir la meta productiva se necesita asegurar que estén operando simultáneamente por lo menos 4 equipos.

### 7.2.2 Cambio de tamaño de balde

Se realizó un análisis considerando el cambio del tamaño de balde de los equipos del nivel de producción, pasando desde un balde de 20 [ton] a un balde de 17 [ton], esto para aumentar el factor de llenado de los camiones el cual cambia desde un 66.666% hasta un 85%, pero ahora el camión debe esperar 3 baldadas para ser cargado.

De la Figura 63 se observa que la capacidad real máxima disminuye aproximadamente 450 [ton], lo cual se debe al aumento del tiempo de carguío, debido al aumento del número de baldadas, puesto que son cargados en su gran parte por material proveniente desde los distintos puntos de extracción, no por viajes desde el punto de acopio.

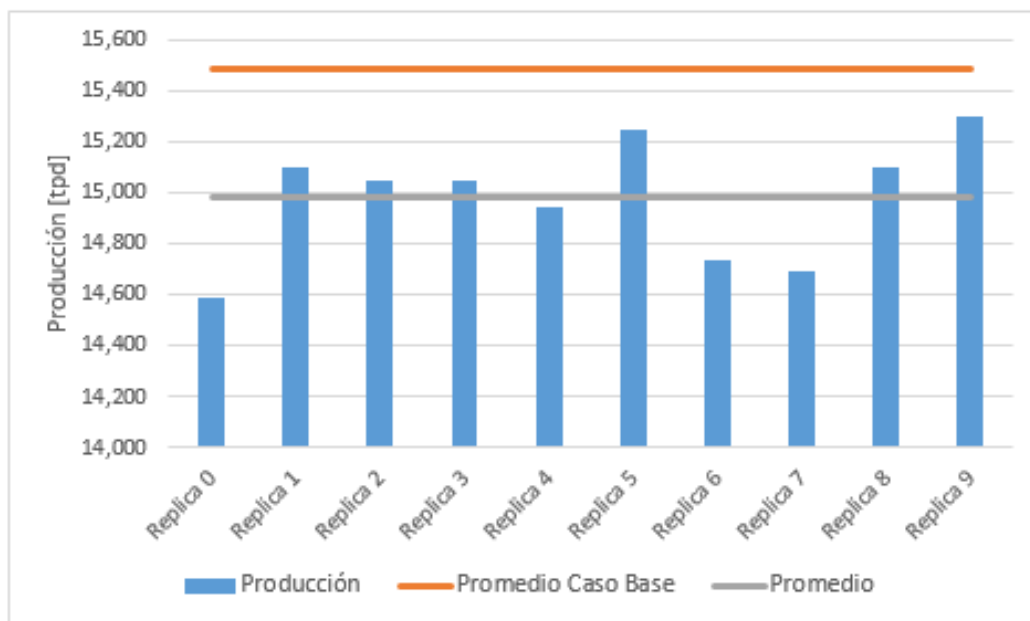


Figura 63: Análisis cambio tamaño de balde.

### 7.2.3 Fragmentación

Como una segunda parte de análisis de sensibilidad se varían distintos inputs de la operación de reducción secundaria. En una primera instancia se aumenta la frecuencia de colgadura en un 10% y luego se considera que todos los puntos de extracción tendrán una frecuencia de colgaduras similar a la zona de Brechas. Luego se disminuye la frecuencia a una similar a la existente en los sectores Reno Hw y Reno Fw. Finalmente se realiza un análisis sobre los tiempos que requiere la cuadrilla de reducción secundaria para volver un punto



a un estado avocado variando estos en un  $\pm 10\%$  considerando solamente el caso A, puesto que este es el más afectado por la colgadura de los puntos de extracción. Los resultados de estos 2 análisis se muestran en las Tabla 23 y

Tabla 24.

Tabla 23: Resultados sensibilidad tonelaje entre colgaduras.

Variación	Producción [tpd]	Días Cumplimiento
Reno Hw	15,576	23.7
Reno Fw	15,343	20.6
Caso C	15,364	23.3
Caso B	15,461	24.5
Caso A	13,190	1.9
-10%	12,827	0.7
Primario	7,253	0

Tabla 24: Resultados sensibilidad tiempos de reducción secundaria.

Variación	Producción [tpd]	Días Cumplimiento
50%	10,706	0.5
10%	12,575	1
Caso A	13,190	1.9
-10%	13,876	3.6
-50%	14,788	12.1

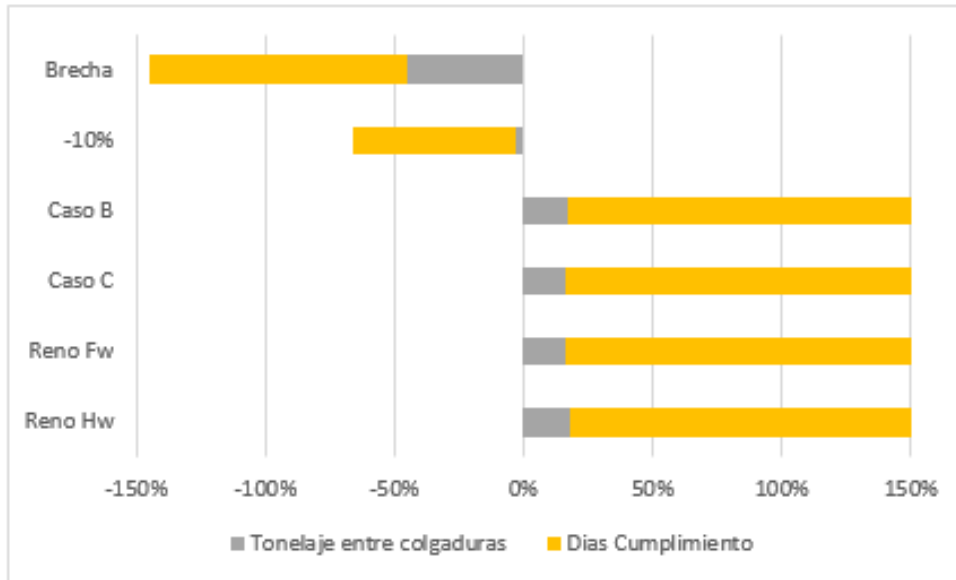


Figura 64: Diagrama de tornado frecuencia de colgaduras.

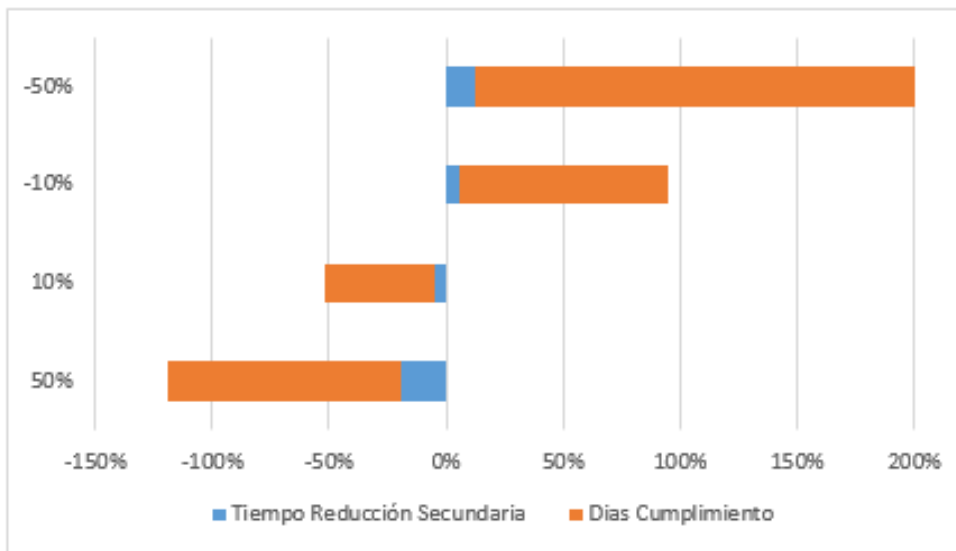


Figura 65: Diagrama de tornado tiempo de reducción secundaria.

De los resultados obtenidos en la Tabla 23 y la Figura 64 se observa que al disminuir la frecuencia de colgaduras la producción del sector aumenta hasta un valor máximo, sin ser este superado. Incluso llega a ocurrir que en casos con una peor fragmentación se tiene una mayor producción. Esto ocurre debido a que se alcanza la producción máxima real del nivel de transporte intermedio y la interacción entre los equipos del nivel de producción y del nivel de transporte Intermedio pasa a ser la limitante del sistema de manejo de materiales. Por otro lado al aumentar la frecuencia de colgaduras la producción del sector baja de manera considerable llegando a disminuir hasta 7,200 [tpd] aproximadamente. Esto pasa debido a que las cuadrillas de cachorreo no son capaces de dar abasto a todos los eventos de colgaduras y sobetamaño quedando los LHD sin puntos avocados de donde poder extraer el material necesario. El número de días donde se alcanza la meta de producción varía de gran manera a pequeños cambios en la producción mensual.

Por otro lado al variar el tiempo de reducción secundaria tiene un efecto menor sobre la producción del sector Pacífico Superior por lo cual se debe preferir la ejecución de una operación segura, Tabla 24 y Figura 65.

# Capítulo VIII

## 8.1 Conclusiones

Al considerar la capacidad máxima del sector Pacífico Superior, se puede ver que no existe una holgura apreciable respecto de la meta productiva de 15,000[tpd], puesto que la capacidad máxima es solo 6% superior a la meta esperada del sector. Al incluir los distintos procesos que ocurren durante la simulación de la operación del sector se tiene que bajo las condiciones ocupadas para la construcción del caso base, la producción prevista por la simulación es menor a la producción esperada del sector.

La capacidad máxima real del nivel de transporte intermedio no varía de manera considerable al operar con más de 4 camiones, esto debido a que si se ocupa un número mayor de equipos solo disminuirá la utilización de los mismos. La operación se debe asegurar de siempre tener los camiones en reserva en buen estado, para no bajar de los 4 equipos en operación necesarios.

Se debe mantener la flota de LHD en buenas condiciones para que estos no tengan que dejar la operación o la salida sea lo más corta posible, puesto que su falta de disponibilidad impacta de mayor manera la operación.

Si se posee una frecuencia de colgadura de 500[ton/col], el impacto mayor sobre la producción lo tiene la incorporación de las restricciones operativas del plan de producción mensual, al considerar una configuración de Loop Completo, mientras que la incorporación de las mantenciones y fallas de equipos el impacto no es tan apreciable. Por otro lado al considerar una configuración Push-Pull no tiene un gran efecto la incorporación de las restricciones operativas del plan de producción mensual, pero la producción si es afectada en gran medida por las fallas de los equipos.

Si disminuye la frecuencia de colgaduras a valores similares a los presentes en la roca tipo CMET HW y CMET FW, se tendrá que la disminución de la producción del sector no es tan marcada respecto al máximo del mismo, pero aun así existirá una baja holgura operativa. Esta además se ve reflejado en la utilización de los equipos de carguío, Tabla 20, donde se ve que esta aumenta desde un 84% a un 99%, solo por el cambio producto de realizar un menor número de reducción secundaria de los puntos de extracción, lo que implica un mayor número de calles operativas.

Si el OP 15 o 16 no se pueden ocupar se debe pasar a un circuito push-pull para minimizar el impacto de este cambio. Para poder realizar este cambio en la operación del sector se debe poner especial énfasis en la seguridad al momento de la operación, esto pues existirá una alta interacción entre los equipos de carguío.

Con respecto a la producción de la Extensión Norte, existe una holgura de 59% sobre la meta productiva, por lo tanto no se visualizan problemas para alcanzarla, al considerar los factores analizados en este trabajo.

## 8.2 Recomendaciones

Si existe una mala fragmentación es de gran importancia agregar otra cuadrilla de reducción secundaria para poder dar abasto a la gran demanda que existe por sus servicios. Es mejor agregar una cuadrilla extra que más equipos al Nivel de Transporte Intermedio.

Se debe preferir una estrategia determinista de asignación de piques por sobre una estrategia probabilística. Esto pues además de mejorar los estándares de seguridad, al tener un protocolo claro a seguir en la operación permite mejorar la producción en cerca de 250 [tpd], así el operador debe tener claro a que pique debe desplazarse a descargar el material.

En la Extensión Norte se puede trabajar con un circuito de push-pull, con una holgura de 42%, y de esta forma liberar los OP 15 y 16, los cuales podrán ser incorporados al sistema de manejo de materiales de otro sector.

# Capítulo IX

## 9.1 Bibliografía

- Barraza, M., Division, E. T., Rohrer, M., Automation, B., Ut, S. L. C., Hustrulid, W., & Engineering, M. (2004). *Application of simulation to improved planning at Esmeralda , El Teniente Mine , Chile*. (August), 22–25.
- Chang, Y., & Makatsoris, H. (2001). Supply chain modeling using simulation. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 2(1), 24–30.
- Cochilco. (2019a). Precio de los metales COCHILCO. Retrieved December 11, 2019, from [http://boletin.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo\\_metal=1](http://boletin.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo_metal=1)
- Cochilco. (2019b). Producto Interno Bruto por Clase de Actividad Económica, a Precios Corrientes. Retrieved December 11, 2019, from <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/tabla13/buscar.jsf>
- GRMD. (2017). *Informe del proceso de planificación anual PND-PQ 2017*. Rancagua: Gerencia recursos mineros y desarrollo División El Teniente.
- Guiñez, I. (2017). *Nota Interna N°NIG-005-2017*. Rancagua: Gerencia recursos mineros y desarrollo División El Teniente.
- Hidalgo, T. (2017). *Análisis comparativo de software para simulación en minería subterránea*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Hindle, K. I. (2012). The Role of Simulation in Infrastructure Planning at the Grasberg Mine for the Movement of Men and Materials. *Massmin*.
- JRI Ingeniería. (2012a). *Ingeniería básica proyecto Pacífico Superior Informe análisis de mantenibilidad y confiabilidad*. Rancagua: Gerencia de proyectos División El Teniente.
- JRI Ingeniería. (2012b). *Ingeniería básica proyecto Pacífico Superior simulación proceso productivo* (Vol. 7). Rancagua: Gerencia de proyectos División El Teniente.
- JRI Ingeniería. (2014a). *Ingeniería de detalles proyecto Pacífico Superior simulación transporte LHD-camión*. Santiago: Gerencia de proyectos División El Teniente.
- JRI Ingeniería. (2014b). *Mina Pacífico Superior Nivel Producción Excavaciones C-1 A C-6 DE 2 Topografía Planta*.
- Martínez, S. (2013). *API T13M407*. Rancagua: Gerencia de proyectos División El Teniente.

- Mina, S. M. (2017). *Pauta RCM Cargador LHD Sandvik LH517 de 13 yd3 con motor Detroit S-60*. Rancagua.
- Salama, A. J., & Greberg, J. (2012). Optimization of Truck-Loader haulage system in an underground mine: A simulation approach using SimMine. *Massmin*.
- Salazar, E. (2015). *Informe Prueba Piloto 1*. Rancagua: Gerencia recursos mineros y desarrollo División El Teniente.
- Sargent, R. G. (2007). *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference S. G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J. D. Tew, and R. R. Barton, eds.* 124–137.
- Seguel, J., & Schachter, P. (2013). *Actualización Antecedentes Geológicos-Geotécnicos Proyecto Pacífico Superior*. Rancagua: Gerencia recursos mineros y desarrollo División El Teniente.
- SPL. (2017). *Plan de negocios y desarrollo 2017*. Rancagua: Gerencia recursos mineros y desarrollo División El Teniente.
- SPL. (2018). *Plan quinquenal 2018*. Rancagua: Gerencia recursos mineros y desarrollo División El Teniente.
- USGS. (2019). *Mineral Commodity Summaries, February 2019*.
- Valenzuela, F. (2017). *Simulación del sistema productivo sector Diablo Regimiento, Mina El Teniente*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas., Santiago.

# Capítulo X

## 10.1 Anexos

### 10.1.1 Anexo A

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos para los casos A, B y C simulados durante el trabajo.

**Tabla anexo 1: Resultados plan de producción Caso A.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
OP13	5,084	5,064	5,059	5,061	5,080	5,087	5,068	5,067	5,079	5,072	5,072
OP15	2,540	2,199	2,391	2,324	2,263	2,419	2,343	2,275	2,384	2,365	2,350
OP16	7,233	6,557	6,481	6,752	6,515	7,185	6,756	6,396	6,960	6,788	6,762
Gruesos	5,084	5,064	5,059	5,061	5,080	5,087	5,068	5,067	5,079	5,072	5,072
Finos	9,773	8,756	8,872	9,076	8,777	9,604	9,099	8,671	9,344	9,153	9,113
Total	14,857	13,820	13,931	14,137	13,857	14,691	14,167	13,737	14,423	14,225	14,185

**Tabla anexo 2: Resultados plan de producción Caso B.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
OP13	5,057	5,060	5,063	5,063	5,057	5,069	5,072	5,075	5,065	5,061	5,064
OP15	3,153	2,869	2,876	3,004	2,864	3,001	2,708	3,051	2,840	3,105	2,947
OP16	7,805	7,499	7,464	7,781	7,712	7,559	7,737	7,992	7,729	7,937	7,722
Gruesos	5,057	5,060	5,063	5,063	5,057	5,069	5,072	5,075	5,065	5,061	5,064
Finos	10,959	10,368	10,340	10,785	10,576	10,560	10,445	11,043	10,569	11,043	10,669
Total	16,016	15,428	15,403	15,848	15,633	15,629	15,517	16,117	15,635	16,104	15,733



**Tabla anexo 3: Resultados plan de producción Caso C.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,080	5,080	5,080	5,040	5,040	5,040	5,080	5,120	5,040	5,120	5,072
<b>OP15</b>	3,640	2,480	3,000	2,640	3,400	3,240	3,320	3,160	3,400	2,600	3,088
<b>OP16</b>	7,040	7,760	7,200	8,120	6,840	7,120	7,240	7,240	7,040	7,600	7,320
<b>Gruesos</b>	5,080	5,080	5,080	5,040	5,040	5,040	5,080	5,120	5,040	5,120	5,072
<b>Finos</b>	10,680	10,240	10,200	10,760	10,240	10,360	10,560	10,400	10,440	10,200	10,408
<b>Total</b>	15,760	15,320	15,280	15,800	15,280	15,400	15,640	15,520	15,480	15,320	15,480

**Tabla anexo 4: Resultados mantención Caso A.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,076	5,063	5,072	5,061	5,072	5,084	5,083	5,076	5,077	5,068	5,073
<b>OP15</b>	2,167	2,344	2,155	2,340	2,212	2,184	2,484	2,140	2,301	1,995	2,232
<b>OP16</b>	6,365	6,659	6,723	6,349	6,640	6,500	6,799	6,329	6,500	6,367	6,523
<b>Gruesos</b>	5,076	5,063	5,072	5,061	5,072	5,084	5,083	5,076	5,077	5,068	5,073
<b>Finos</b>	8,532	9,003	8,877	8,689	8,852	8,684	9,283	8,469	8,801	8,361	8,755
<b>Total</b>	13,608	14,065	13,949	13,751	13,924	13,768	14,365	13,545	13,879	13,429	13,828

**Tabla anexo 5: Resultados mantención Caso B.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
OP13	5,067	5,071	5,069	5,068	5,065	5,077	5,063	5,061	5,064	5,064	5,067
OP15	2,876	3,013	2,881	2,812	2,849	2,989	3,019	3,041	3,063	3,029	2,957
OP16	7,473	7,848	7,392	7,320	7,437	7,847	7,659	7,663	7,724	7,655	7,602
Gruesos	5,067	5,071	5,069	5,068	5,065	5,077	5,063	5,061	5,064	5,064	5,067
Finos	10,349	10,861	10,273	10,132	10,287	10,836	10,677	10,704	10,787	10,684	10,559
Total	15,416	15,932	15,343	15,200	15,352	15,913	15,740	15,765	15,851	15,748	15,626

**Tabla anexo 6: Resultados mantención Caso C.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
OP13	5,068	5,057	5,055	5,065	5,057	5,073	5,061	5,077	5,069	5,072	5,066
OP15	3,056	2,968	2,989	3,001	3,017	3,055	3,036	2,980	3,085	3,064	3,025
OP16	7,745	7,693	7,695	7,656	7,619	7,652	7,856	7,575	7,761	7,624	7,688
Gruesos	5,068	5,057	5,055	5,065	5,057	5,073	5,061	5,077	5,069	5,072	5,066
Finos	10,801	10,661	10,684	10,657	10,636	10,707	10,892	10,555	10,847	10,688	10,713
Total	15,869	15,719	15,739	15,723	15,693	15,780	15,953	15,632	15,916	15,760	15,778

**Tabla anexo 7: Resultados fallas de equipos Caso A.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,000	5,001	5,000	5,001	5,000	5,001	5,000	5,001	5,000	5,001	5,001
<b>OP15</b>	1,928	2,248	2,033	1,997	1,973	1,820	2,023	1,857	1,976	1,836	1,969
<b>OP16</b>	6,272	6,705	6,188	6,161	6,059	6,140	6,217	6,100	6,173	6,181	6,220
<b>Gruesos</b>	5,000	5,001	5,000	5,001	5,000	5,001	5,000	5,001	5,000	5,001	5,001
<b>Finos</b>	8,200	8,953	8,221	8,159	8,032	7,960	8,240	7,957	8,149	8,017	8,189
<b>Total</b>	13,200	13,955	13,221	13,160	13,032	12,961	13,240	12,959	13,149	13,019	13,190

**Tabla anexo 8: Resultados fallas de equipos Caso B.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,065	5,067	5,056	5,067	5,060	5,068	5,061	5,069	5,061	5,065	5,064
<b>OP15</b>	2,696	2,689	2,735	2,903	2,871	2,888	2,808	2,761	2,803	2,911	2,806
<b>OP16</b>	7,391	7,469	7,648	7,641	7,647	7,737	7,604	7,572	7,468	7,727	7,590
<b>Gruesos</b>	5,065	5,067	5,056	5,067	5,060	5,068	5,061	5,069	5,061	5,065	5,064
<b>Finos</b>	10,087	10,159	10,383	10,544	10,517	10,625	10,412	10,333	10,271	10,637	10,397
<b>Total</b>	15,152	15,225	15,439	15,611	15,577	15,693	15,473	15,403	15,332	15,703	15,461

**Tabla anexo 9: Resultados fallas de equipos Caso C.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,065	5,067	5,063	5,063	5,065	5,068	5,068	5,067	5,069	5,063	5,066
<b>OP15</b>	2,817	2,828	2,540	2,729	2,892	2,852	2,580	2,868	2,521	2,828	2,746
<b>OP16</b>	7,633	7,629	7,296	7,687	7,675	7,563	7,375	7,784	7,251	7,631	7,552
<b>Gruesos</b>	5,065	5,067	5,063	5,063	5,065	5,068	5,068	5,067	5,069	5,063	5,066
<b>Finos</b>	10,451	10,457	9,836	10,416	10,567	10,415	9,955	10,652	9,772	10,459	10,298
<b>Total</b>	15,516	15,524	14,899	15,479	15,632	15,483	15,023	15,719	14,841	15,521	15,364

**Tabla anexo 10: Resultados plan de producción Push-Pull Caso A.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	7,535	5,908	6,135	6,656	7,380	7,548	7,120	6,603	6,111	6,169	6,716
<b>OP15</b>	817	1,069	1,061	972	936	943	897	864	936	985	948
<b>OP16</b>	5,903	6,620	6,139	6,015	6,021	6,044	5,988	5,816	5,933	6,099	6,058
<b>Gruesos</b>	7,535	5,908	6,135	6,656	7,380	7,548	7,120	6,603	6,111	6,169	6,716
<b>Finos</b>	6,720	7,689	7,200	6,987	6,957	6,987	6,885	6,680	6,869	7,084	7,006
<b>Total</b>	14,255	13,597	13,335	13,643	14,337	14,535	14,005	13,283	12,980	13,253	13,722

**Tabla anexo 11: Resultados plan de producción Push-Pull Caso B.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	7,675	7,208	7,200	7,821	7,707	7,495	7,784	7,783	7,688	7,496	7,586
<b>OP15</b>	1,157	1,131	1,160	1,172	1,143	1,212	1,149	1,293	1,184	1,099	1,170
<b>OP16</b>	6,545	6,553	6,547	6,583	6,577	6,489	6,496	6,517	6,533	6,625	6,547
<b>Gruesos</b>	7,675	7,208	7,200	7,821	7,707	7,495	7,784	7,783	7,688	7,496	7,586
<b>Finos</b>	7,703	7,684	7,707	7,755	7,720	7,701	7,645	7,811	7,717	7,724	7,717
<b>Total</b>	15,377	14,892	14,907	15,576	15,427	15,196	15,429	15,593	15,405	15,220	15,302

**Tabla anexo 12: Resultados plan de producción Push-Pull Caso C.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	7,761	7,727	7,740	7,805	7,643	7,695	7,771	7,609	7,816	7,784	7,735
<b>OP15</b>	1,097	1,235	1,148	1,144	1,224	1,156	1,171	1,191	1,165	1,151	1,168
<b>OP16</b>	6,625	6,468	6,591	6,652	6,455	6,680	6,529	6,620	6,647	6,580	6,585
<b>Gruesos</b>	7,761	7,727	7,740	7,805	7,643	7,695	7,771	7,609	7,816	7,784	7,735
<b>Finos</b>	7,723	7,703	7,739	7,796	7,679	7,836	7,700	7,811	7,812	7,731	7,753
<b>Total</b>	15,484	15,429	15,479	15,601	15,321	15,531	15,471	15,420	15,628	15,515	15,488

**Tabla anexo 13: Resultados mantención Push-Pull Caso A.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	6,051	5,963	7,417	6,757	7,121	7,429	5,853	7,588	6,311	6,245	6,674
<b>OP15</b>	879	713	776	1,165	851	957	1,016	1,067	1,035	1,088	955
<b>OP16</b>	5,803	5,308	5,697	6,331	5,315	6,060	5,957	6,403	5,968	6,180	5,902
<b>Gruesos</b>	6,051	5,963	7,417	6,757	7,121	7,429	5,853	7,588	6,311	6,245	6,674
<b>Finos</b>	6,681	6,021	6,473	7,496	6,165	7,017	6,973	7,469	7,003	7,268	6,857
<b>Total</b>	12,732	11,984	13,891	14,253	13,287	14,447	12,827	15,057	13,313	13,513	13,530

**Tabla anexo 14: Resultados mantención Push-Pull Caso B.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	7,749	7,767	7,555	7,300	7,761	7,377	7,795	7,409	7,732	7,819	7,626
<b>OP15</b>	1,163	1,179	1,225	1,213	1,176	1,189	1,176	1,168	1,176	1,101	1,177
<b>OP16</b>	6,493	6,632	6,491	6,533	6,541	6,587	6,575	6,563	6,612	6,596	6,562
<b>Gruesos</b>	7,749	7,767	7,555	7,300	7,761	7,377	7,795	7,409	7,732	7,819	7,626
<b>Finos</b>	7,656	7,811	7,716	7,747	7,717	7,776	7,751	7,731	7,788	7,697	7,739
<b>Total</b>	15,405	15,577	15,271	15,047	15,479	15,153	15,545	15,140	15,520	15,516	15,365

**Tabla anexo 15: Resultados Mantenimiento Push-Pull Caso C.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	7,744	7,691	7,749	7,693	7,663	7,681	7,732	7,541	7,693	7,691	7,688
<b>OP15</b>	1,215	1,148	1,161	1,160	1,212	1,141	1,227	1,200	1,244	1,215	1,192
<b>OP16</b>	6,584	6,531	6,588	6,576	6,529	6,616	6,549	6,576	6,585	6,527	6,566
<b>Gruesos</b>	7,744	7,691	7,749	7,693	7,663	7,681	7,732	7,541	7,693	7,691	7,688
<b>Finos</b>	7,799	7,679	7,749	7,736	7,741	7,757	7,776	7,776	7,829	7,741	7,758
<b>Total</b>	15,543	15,369	15,499	15,429	15,404	15,439	15,508	15,317	15,523	15,432	15,446

**Tabla anexo 16: Resultados fallas Push-Pull Caso A.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,848	5,668	5,727	6,419	5,696	5,704	6,909	4,452	5,917	4,875	5,721
<b>OP15</b>	624	2,692	2,319	2,779	2,641	3,060	2,856	2,819	2,815	2,213	2,482
<b>OP16</b>	4,695	4,131	4,080	3,759	4,268	3,728	4,463	4,187	3,717	4,007	4,103
<b>Gruesos</b>	5,848	5,668	5,727	6,419	5,696	5,704	6,909	4,452	5,917	4,875	5,721
<b>Finos</b>	5,319	6,823	6,399	6,537	6,909	6,788	7,319	7,005	6,532	6,220	6,585
<b>Total</b>	11,167	12,491	12,125	12,956	12,605	12,492	14,228	11,457	12,449	11,095	12,307

**Tabla anexo 17: Resultados fallas Push-Pull Caso B.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	6,440	6,767	2,521	2,089	6,553	5,845	7,003	6,556	4,557	5,500	5,383
<b>OP15</b>	3,040	3,023	2,016	2,736	2,917	3,045	3,832	3,132	2,881	2,437	2,906
<b>OP16</b>	4,360	4,272	4,596	4,245	4,367	4,225	2,841	4,159	4,429	4,543	4,204
<b>Gruesos</b>	6,440	6,767	2,521	2,089	6,553	5,845	7,003	6,556	4,557	5,500	5,383
<b>Finos</b>	7,400	7,295	6,612	6,981	7,284	7,271	6,673	7,291	7,311	6,980	7,110
<b>Total</b>	13,840	14,061	9,133	9,071	13,837	13,116	13,676	13,847	11,868	12,480	12,493

**Tabla anexo 18: Resultados fallas Push-Pull Caso C.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	7,008	6,620	3,811	7,039	6,005	6,151	6,781	6,399	5,904	6,829	6,255
<b>OP15</b>	3,507	3,109	3,183	3,611	3,536	2,980	3,008	2,919	3,075	3,169	3,210
<b>OP16</b>	3,509	4,133	4,141	3,077	3,460	4,396	4,184	4,435	4,224	3,953	3,951
<b>Gruesos</b>	7,008	6,620	3,811	7,039	6,005	6,151	6,781	6,399	5,904	6,829	6,255
<b>Finos</b>	7,016	7,243	7,324	6,688	6,996	7,376	7,192	7,353	7,299	7,123	7,161
<b>Total</b>	14,024	13,863	11,135	13,727	13,001	13,527	13,973	13,752	13,203	13,952	13,416



**Tabla anexo 19: Capacidad máxima real configuración Loop Completo Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,080	5,120	5,040	5,080	5,040	5,080	5,040	5,120	5,080	5,080	5,076
<b>OP15</b>	1,800	1,640	2,000	1,360	1,440	1,640	680	1,360	1,600	1,520	1,504
<b>OP16</b>	5,160	5,720	5,080	5,440	5,800	4,880	5,120	5,200	5,880	5,080	5,336
<b>Gruesos</b>	5,080	5,120	5,040	5,080	5,040	5,080	5,040	5,120	5,080	5,080	5,076
<b>Finos</b>	6,960	7,360	7,080	6,800	7,240	6,520	5,800	6,560	7,480	6,600	6,840
<b>Total</b>	12,040	12,480	12,120	11,880	12,280	11,600	10,840	11,680	12,560	11,680	11,916

**Tabla anexo 20: Capacidad máxima real configuración Push-Pull Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>Total</b>	12,729	12,690	12,363	12,529	12,545	12,697	12,579	12,549	12,497	12,529	12,571

**Tabla anexo 21: Resultados plan de producción Loop Completo Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	4,893	5,060	5,056	5,052	5,065	4,884	5,049	5,053	5,051	5,061	5,023
<b>OP15</b>	1,319	1,196	1,136	936	1,324	748	1,172	1,024	1,049	956	1,086
<b>OP16</b>	4,957	4,789	4,928	4,376	5,239	4,444	4,991	4,975	4,647	4,652	4,800
<b>Gruesos</b>	4,893	5,060	5,056	5,052	5,065	4,884	5,049	5,053	5,051	5,061	5,023
<b>Finos</b>	6,276	5,985	6,064	5,312	6,563	5,192	6,163	5,999	5,696	5,608	5,886
<b>Total</b>	11,169	11,045	11,120	10,364	11,628	10,076	11,212	11,052	10,747	10,669	10,908

**Tabla anexo 22: Resultados Plan de Producción Push-Pull Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>Total</b>	12,540	12,363	12,529	12,395	12,624	12,181	12,399	12,497	12,379	12,361	12,427

**Tabla anexo 23: Resultados mantención Loop Completo Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	5,055	4,891	5,029	4,883	4,884	5,059	4,845	5,044	5,061	5,056	4,981
<b>OP15</b>	1,073	1,128	872	829	961	1,133	496	695	1,149	1,291	963
<b>OP16</b>	4,668	4,776	3,975	4,476	4,747	4,972	3,491	4,309	5,024	5,148	4,559
<b>Gruesos</b>	5,055	4,891	5,029	4,883	4,884	5,059	4,845	5,044	5,061	5,056	4,981
<b>Finos</b>	5,741	5,904	4,847	5,305	5,708	6,105	3,987	5,004	6,173	6,439	5,521
<b>Total</b>	10,796	10,795	9,876	10,188	10,592	11,164	8,832	10,048	11,235	11,495	10,502

**Tabla anexo 24: Resultados mantención Push-Pull Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>Total</b>	12,032	12,060	12,219	12,315	12,275	12,028	12,135	11,951	12,191	12,116	12,132

**Tabla anexo 25: Resultados fallas de equipos Loop Completo Extensión Norte**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
<b>OP13</b>	4,527	4,513	4,687	4,865	3,009	5,024	5,024	4,353	4,859	4,855	4,572
<b>OP15</b>	1,327	1,076	897	1,303	865	1,068	1,217	1,120	1,281	1,196	1,135
<b>OP16</b>	5,260	5,055	4,927	5,101	3,069	4,856	5,076	5,127	4,975	5,137	4,858
<b>Gruesos</b>	4,527	4,513	4,687	4,865	3,009	5,024	5,024	4,353	4,859	4,855	4,572
<b>Finos</b>	6,587	6,131	5,824	6,404	3,935	5,924	6,293	6,247	6,256	6,333	5,993
<b>Total</b>	11,113	10,644	10,511	11,269	6,944	10,948	11,317	10,600	11,115	11,188	10,565

**Tabla anexo 26: Resultados fallas de equipos Push-Pull Extensión Norte.**

	Replica 0	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Replica 6	Replica 7	Replica 8	Replica 9	Promedio
Total	10,343	9,787	9,515	8,785	8,729	11,077	10,357	9,912	9,960	10,647	9,134